

的顺利进行。经过大量的试验比较,我们认为环氧树脂、J39 和军用 J133 等胶粘剂基本满足需要,因为他们具强度高、凝固速度慢、流动性好、耐腐蚀等优点。

3.2.3 封装工艺

光纤光栅毛细金属管封装的核心工作是封装工艺,因为该工艺必须保证光纤光栅封装后准确平直地在毛细管的正中间,若光栅不对直,就会与待测方向存在一个夹角而不能准确传递应变。若光栅不在毛细管的正中间,由第 5 章的应变传感分析可知,应变传感会因埋入的旋转角度不同而不同,这样我们无法保证同批封装传感器具有相同的传感特性。此外,封装工艺还必须保证胶粘剂内部无气泡,且完全充满毛细管,否则也无法保证封装传感器的传感特性一致。封装传感器传感特性的一致性很重要,因为光纤光栅作为应变传感元件是不能逐一标定的,只能对同一批传感器进行取样。为了保证光纤光栅管式封装传感特性的一致性,本文引入空气压力差管吸技术很好地解决了这个问题。图 3-3 是光纤光栅毛细金属管式封装照片。

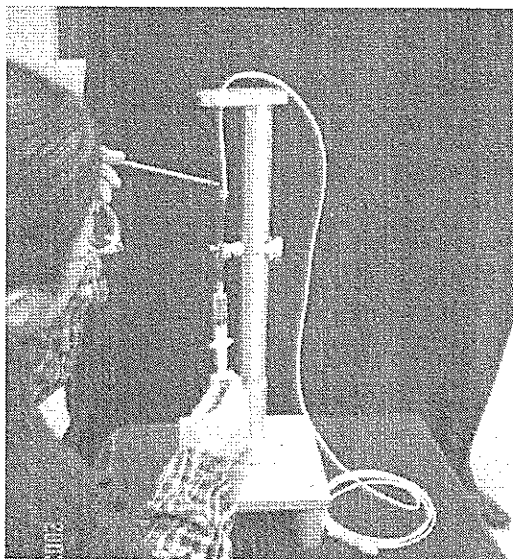


图 3-3 光纤光栅毛细金属管式封装照片

Figure 3-3 Picture of FBG tube-packaging

具体的封装过程是这样的:首先用快速凝固且容易被丙酮融解的 502 胶将吸管固定于毛细金属管的一侧,验证其四周是否密封好(用手捂住毛细管另一侧,推动吸管柄就可以判断出来)。然后将其竖直固定于特制的钢架上,有吸管

一侧朝下。该钢架的两个可以调节长度的外伸悬臂上分别有一个固定装置，下面的装置用于固定毛细金属，其卡口板之间有柔软塑料膜，其目的是防止将毛细管被夹变形；上面的用于固定传输光缆，以免它晃动，影响光栅的对中。然后，将已经与传输光缆焊接好的光纤光栅伸入金属毛细管内，并保证它与毛细管的中部对齐，同时还保证尾纤具有足够的长度伸出毛细管。在上面的金属环孔中注入胶粘剂，缓慢拉动吸管柄，在内外空气压力下胶粘剂会缓慢流入金属毛细管。若发现毛细管的下侧流出胶粘剂，说明胶粘剂已经充满毛细金属管，这时在吸管壁开一小孔，让空气进入，这样由于毛细金属管的上下空气压力平衡，胶粘剂就停留在毛细金属内了。最后用丙酮将吸管取下，待胶粘剂自然凝固即可。若环境温度过低（低于 10°C ），应该采用光照的方法对其加热，加快胶粘剂的固化速度。这里不用担心胶粘剂会溜出，因为毛细管内胶粘剂的重力被毛细管吸力平衡了。封装操作时必须注意胶粘剂不能出现气泡且具有适当的流动性，拉动吸管柄必须用力均匀且速度很慢，否则胶粘剂会流得太快来不及补充，形成空气断层，导致废品出现。无金属环的管式封装工艺只需在管的上部加一纸基微型漏斗即可。根据流体力学与压力加工塑性力学的基本规律可知，光纤光栅在两侧平衡的流体压力下自然地居于胶粘剂的正中央。

图 3-4 为 FBG 管式封装应变传感器照片。FBG 毛细金属管式封装工艺不仅可以充分保证光纤光栅准确对中地处于毛细管的正中央，而且可以保证胶粘剂完全充满毛细管。这样同批生产的光纤光栅管式封装传感器基本上具有相同的传感特性，只需部分标定就可以用于实际结构。该封装工艺具有加工方便、成品率高、成本低廉等优点，只需将吸管换成工业可控抽真空机，就可以满足工业化大批量生产需要，因此该封装工艺具有很好的市场前景。

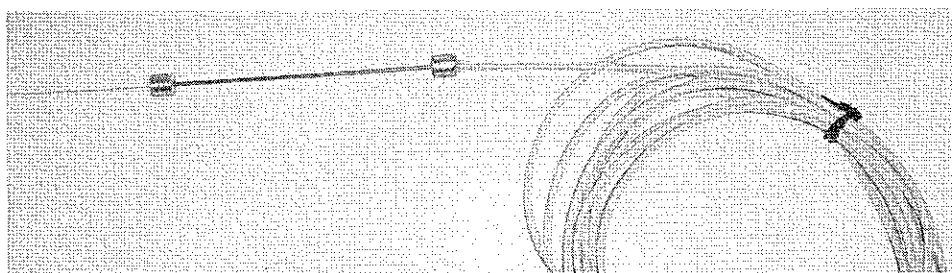
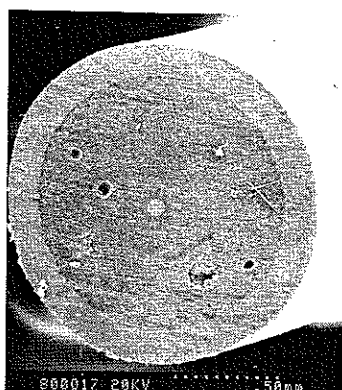


图 3-4 FBG 毛细金属管式封装照片

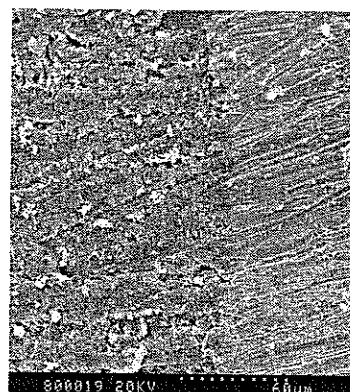
Figure 3-4 Picture of FBG packaged in steel capillary tube

图 3-5 的 SEM 照片表明光纤光栅处于胶粘剂的正中央，胶粘剂和金属管界

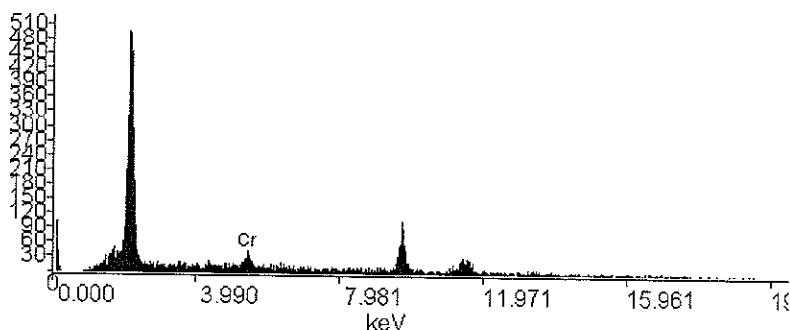
面结合得很好，这就保证了光纤光栅和金属管协同工作，同时也保证了同批封装传感器具有基本一致的传感特性；从能谱图可以看出，钢管一侧与钢材的特性一致，而胶粘剂一侧除 Au 和 Cr 谱线外，未发现钢材中的异质谱线，即没有相互侵蚀的现象。



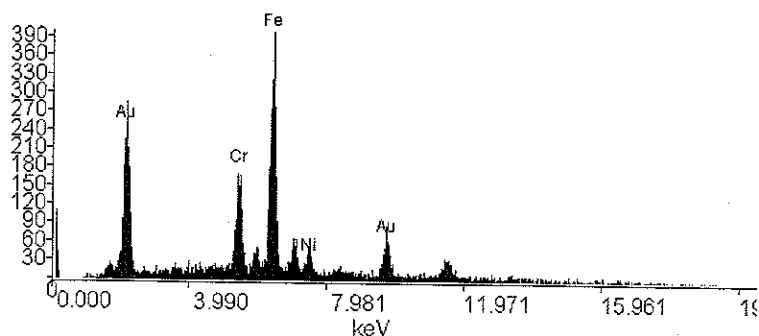
(a) 整体 SEM 照片



(b) 界面 SEM 照片



(c) 胶粘剂一侧能谱



(d) 毛细钢管一侧能谱

图 3-5 FBG 毛细金属管式封装 SEM 照片和能谱图

Figure 3-5 SEM pictures and energy spectrum of FBG packaged in micro mental tube

3.2.4 传感器性能试验

1) 粘贴于金属钢板应变传感试验 采用的毛细钢管外径为 1.2mm, 内径为 0.8mm, 长度为 9cm。封装胶粘剂环氧树脂, 而粘贴胶粘剂采用 J39 和 502 胶。将 2 根中心波长为 1552nm 的管式封装光纤光栅应变传感器用 J39 胶粘剂粘贴于经过抛光处理的弹簧钢板上, 并在相应位置布设高精度应变片, 然后将钢板在万能材料试验机上进行拉伸, 试验过程如图 3-6 所示。在线弹性范围内, 毛细钢管封装光纤光栅与应变片可以视为相同的应变值。试验结果如图 3-7 和 3-8 所示。

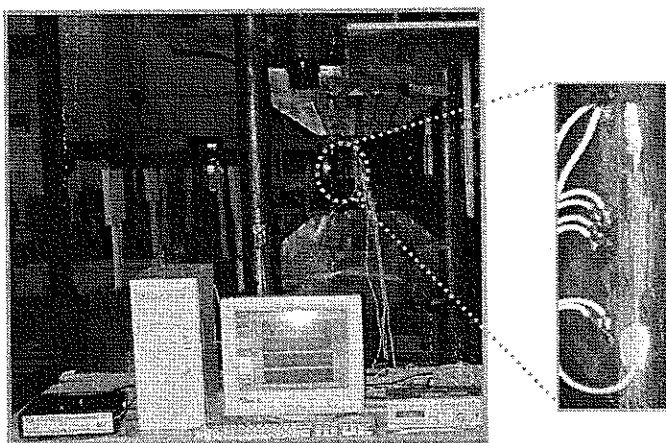


图 3-6 管式封装 FBG 粘贴钢板应变传感试验

Figure 3-6 Experiment of steel capillary packaged FBG bonded on steel slice strain sensing

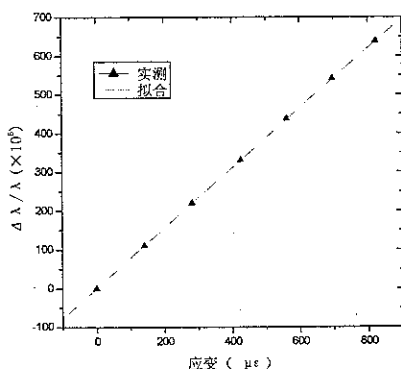


图 3-7 1# 管封 FBG 波长变化与应变关系
Figure 3-7 Relationship of wavelength and strain for tube-packaged FBG 1#

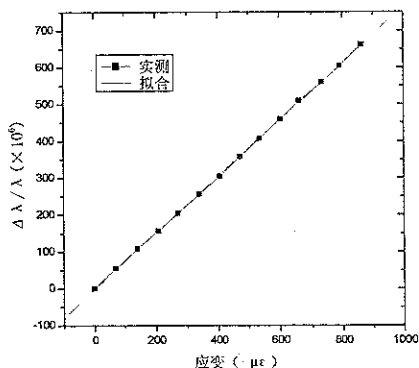


图 3-8 2# 管封 FBG 波长变化与应变关系
Figure 3-8 Relationship of wavelength and strain for tube-packaged FBG 2#

从毛细钢管封装光纤光栅的波长变化—应变关系曲线可以看出，毛细钢管封装光纤光栅应变传感的线性度很好，相关系数均达 0.9999 以上，两个封装传感器的传感特性基本一致，表明该封装工艺具有很好的一致性，即对部分封装传感器进行标定，即可获得整批封装传感器的灵敏度系数，进一步证明了该封装工艺的有效性。与裸光纤光栅对比，灵敏度存在一定的差异，这可以通过误差修正来克服。

2) 埋入钢筋混凝土梁应变传感试验 为了研究光纤光栅管式封装测试混凝土应变的有效性，我们将其埋入钢筋混凝土梁中对其应变传感特性进行研究。采用的毛细钢管外直径为 1.2mm、内径为 0.8mm、长度为 10cm，两端带有钢环。封装胶粘剂采用 J133。在一般试验室制作的小梁里的应变变化梯度较大，我们很难准确地将管式封装光纤光栅应变传感器与目前较成熟的混凝土应变传感器布置到同一位置，并保证它们具有完全一致的变形。为此，我们利用黑大公路大桥施工监测的有利条件，将我们研制开发的管式封装应变传感器和高精度电阻应变砖置于一根 3×40 米的预应力箱形梁的同一位置。对该梁进行静载试验，试验结果如图 3-9 和 3-10 所示。

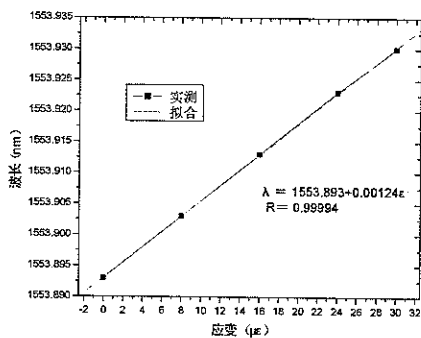


图 3-9 1#管封 FBG 混凝土内部应变传感
Figure 3-9 Tube-packaged FBG 1# concrete inner strain sensing property

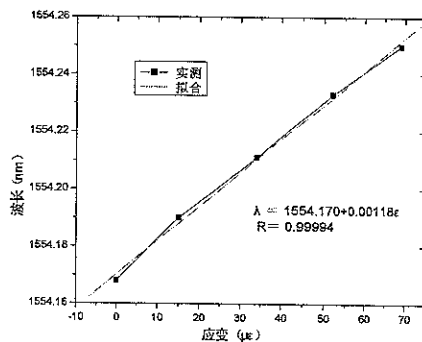


图 3-10 2#管封 FBG 混凝土内部应变传感
Figure 3-10 Tube-packaged FBG 2# concrete inner strain sensing property

从图 3-9 和 3-10 可以看出，静载下两个管式封装光纤光栅应变传感线性度很好，相关系数达 0.9999 以上，说明管式封装应变传感器很好地工作，从而说明该封装工艺完全满足混凝土内部应变监测的需要。它们与裸光栅的应变传感灵敏度存在一定的差异，可能是电阻应变砖自身的精度造成的。实际测试时，我们可以采用误差修正来克服。

3.3 光纤光栅片式封装应变传感器

虽然裸光纤光栅具有很好的传感特性，但是满足不了土木工程的粗放式施工和恶劣的服役环境。考虑这一问题，针对结构表面应变监测的需要，开发一种结构简单、应变测试精度高、满足结构长期健康监测的光纤光栅片式封装应变传感技术很有实际意义。

3.3.1 传感器封装结构

我们开发的光纤光栅片式封装应变传感器结构有两种：一种是封装基体材料为单层，适于金属基的封装方式；另一种封装材料为双层，适于胶基封装，其结构形式分别如图 3-11 和 3-12 所示。

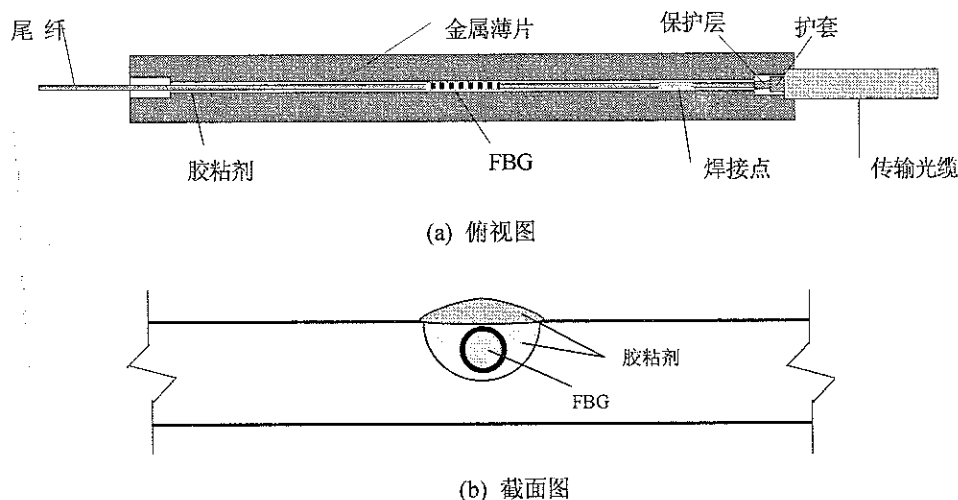


图 3-11 金属基光纤光栅片式封装示意图

Figure 3-11 Profile of FBG packaged in metal slice

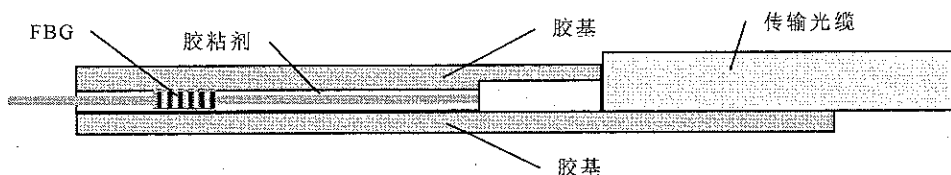


图 3-12 胶基光纤光栅片式封装示意图

Figure 3-12 Profile of FBG packaged in glue slice

光纤光栅金属基片式封装结构主要由金属薄片、胶粘剂、护套、尾纤、传输光缆等组成。该封装结构的基本思想是将光栅封装在刻有小槽的金属薄片上，通过金属薄片将结构的应变传到光栅上。金属薄片是传递结构应变的直接载体，因此需要它尽可能薄。小槽的主要目的是增大光栅与金属薄片的接触面积，使其形成有机的整体，同时起到保护光栅的作用。金属薄片的两侧镗有粗槽，其目的是防止连接光栅的传输光缆被碰断，通过胶粘剂将其出头部分保护好。尾纤的主要目的是为了结构长期健康监测的温度补偿与串连其它光栅传感元件。传输光栅与光纤跳线相接，负责将光栅传输来的信号送至信号解调器。胶粘剂的主要目的是充分将光栅、护套、传输光缆和金属薄片粘结成有机的整体。

光纤光栅胶基封装主要由胶膜、胶粘剂、尾纤、传输光缆等组成。胶膜的主要作用是传递应变和保护光栅。胶粘剂的主要作用是将胶膜和光栅、传输光缆固结为一体。传输光缆和尾纤的作用与金属基的功能一样。

3.3.2 封装材料选择

光纤光栅片式封装主要用到两种材料：基底材料和胶粘剂。基底材料必须能够很好地传递结构应变，并满足结构健康监测要求，因此对金属基而言，这种金属材料必须具有耐腐蚀、抗疲劳、加工性能好、抗蠕变、弹性范围宽等特点。考虑加工和变形性能，铜合金是可行的材料；若考虑耐久性，不锈钢、C₄合金、钛合金等是理想的材料。对于胶基膜而言，环氧树脂、聚乙烯醇缩醛树脂和聚酰亚胺树脂等是理想的材料。胶粘剂的选择也必须考虑结构应变传递和长期监测需要，因此胶粘剂既要满足基底材料和光栅底的粘结性能，而且具有较高的抗剪强度和耐久性，并能满足封装过程的顺利进行。经过试验比较，我们认为环氧树脂、J39 和军用 J133 等胶粘剂基本满足光纤光栅金属基片式封装的需要，而 502 胶满足光纤光栅胶基片式封装的需要。

3.3.3 封装工艺

由于光纤光栅片式封装的结构形式不复杂，封装工艺也相对简单。对于金属基而言，封装工艺主要分以下步骤：首先用丙酮或酒精将金属薄片的小槽清洗干净，置于操作平台上；然后将经过清洗并焊接有传输光缆的光纤光栅置于小槽内；待光栅的准确位置确定后，用胶布将其固定，将搅拌好的胶粘剂均匀地涂到小槽内即可。这里必须注意两点：一是光栅必须平直，并准确落在小槽的中央；二是胶粘剂必须无气泡且非常均匀。对于胶基而言，封装过程更为简单，只需先将与光纤光栅焊接的传输光缆固定于胶膜上，然后涂上胶粘剂，用另一尺寸适中的胶膜覆盖压实即可。胶基封装必须保证压实过程中没有气泡产

生，并维持较长的压实时间，确保两块胶基膜完好粘结在一起。

从上述的封装工艺来看，光纤光栅片式封装很容易实现，成本也很低廉，而且基本不改变光纤光栅的应变传感特性，对光栅起到很好的保护效果，很适于结构表面的应变测试。我们研究开发的两种片式封装光纤光栅应变传感器如图 3-13 和 3-14 所示。

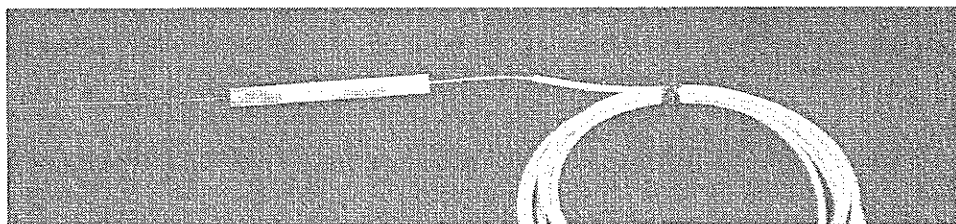


图 3-13 金属基光纤光栅片式封装应变传感器照片

Figure 3-13 Picture of FBG packaged in metal slice

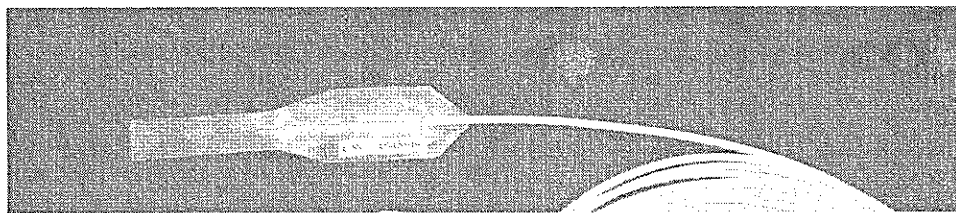


图 3-14 胶基光纤光栅片式封装应变传感器照片

Figure 3-14 Picture of FBG packaged in glue slice

3.3.4 传感器性能试验

由于光纤光栅胶基封装还在进一步改性中，这里只给出光纤光栅金属基应变传感试验结果。我们采用前述的等强度梁法对金属基光纤光栅片式封装应变传感器进行标定，试验照片和结果如图 3-15 和 3-16 所示。我们采用的金属基为铜片，胶粘剂为 502 和 J133。

从试验结果可以看出，我们封装的金属基片式封装光纤光栅应变传感器具有很好的应变重复传感能力，应变传感灵敏度为 $1.4\text{pm}/\mu\epsilon$ ，表明金属基片式封装工艺是很有效的。它的应变传感灵敏度比裸光栅大，这是由于金属基具有一定的厚度，在等强度梁受弯变形下，根据梁体的平截面假定，其应变要比梁表面要大。但是在拉伸变形下，就不会出现这种情况。因此，实际应用时，应该

根据结构受力形式的不同, 进行必要的误差修正。

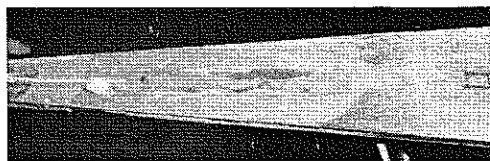
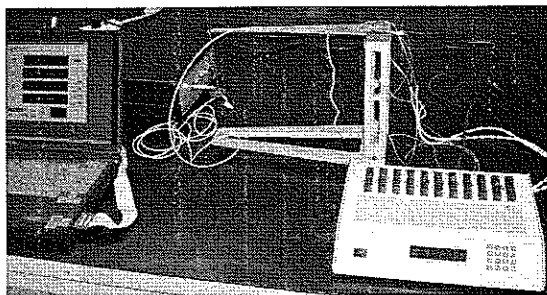
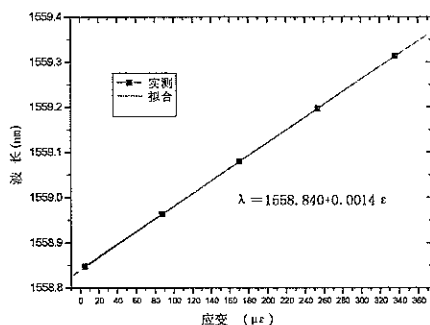
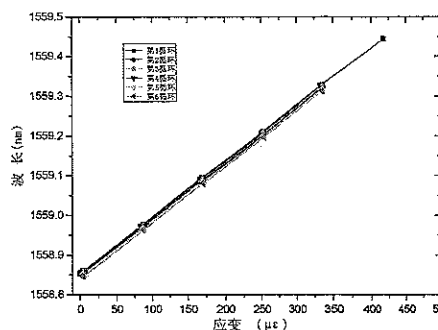


图 3-15 金属基片式封装 FBG 应变传感特性试验照片

Figure 3-15 The experiment of FBG packaged in metal slice strain sensing property



a) 灵敏度



(b) 重复性

图 3-16 金属基片式封装 FBG 应变传感特性试验

Figure 3-16 FBG packaged in metal slice strain sensing property

3.4 光纤光栅封装温度传感器

温度荷载是土木工程结构重要的荷载形式之一, 尤其是寒冷地区, 年温达几十、甚至上百摄氏度, 而传统的温度传感器不能同时满足土木工程结构稳定性、耐久性、既可粘贴也可埋入、分布式在线数据采集等要求, 考虑光纤光栅优越的温度传感特性, 研究开发适于土木工程结构健康监测的光纤光栅温度传感器具有重要的实际意义。

裸光纤光栅具有很好的温度传感特性, 但同样由于其固有的脆弱特性, 须经过封装才能用于土木工程结构的温度监测。温度监测必须保证温度传感

充分接触被测对象，同时还要保证温度传感器的传感特性不为被测对象的热膨胀和应力场所制约，否则温度传感器无法正确地反应被测对象的温度信息。基于这一认识，本文研究开发出两种封装技术，可以方便准确地实现结构长期的温度监测。

3.4.1 传感器封装结构

本文研究开发的光纤光栅温度传感封装结构分为无增敏封装和增敏封装两种，其结构形式分别如图 3-17 和 3-18 所示。它们不但可以布设于结构表面，还可以方便地埋入结构内部。光纤光栅无增敏温度传感封装结构主要由金属厚管、胶粘剂 1、胶粘剂 2、传输光缆、薄壁管等组成。考虑迅速传热的需要，可以在管中充入水银。金属厚管的主要作用是保护光纤光栅，同时保持光纤光栅与结构处于相同的温度场。胶粘剂 1 的主要作用是将金属厚管、带保护层光纤和传输光纤固结在一起，使其成为一个有机整体，而胶粘剂 2 和薄壁管的主要作用是防腐和起到二次保护的作用，如结构服役环境较好，且可以方便布设传感器的情况下，胶粘剂 2 和薄壁管可以去掉。传输光缆的主要作用是传输光信号和串连其他光纤光栅传感器。从结构上看，该封装形式既对光纤光栅起到保护作用，同时保持了光纤光栅的温度传感特性和准分布式传感能力。

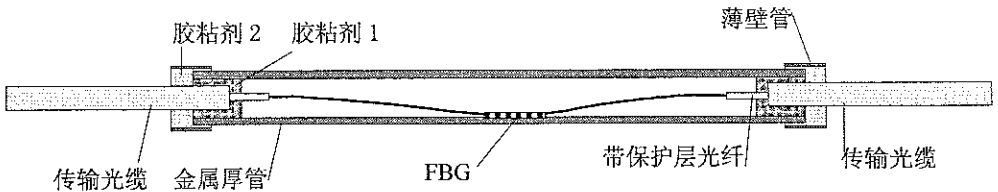


图 3-17 无增敏光纤光栅封装温度传感器
Figure 3-17 Packaged FBG for Temperature sensing
with no enhancing sensitivity

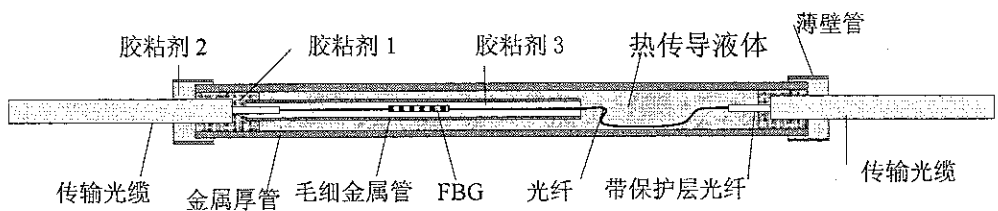


图 3-18 增敏光纤光栅封装温度传感器
Figure 3-18 Packaged FBG for Temperature sensing
with enhancing sensitivity

光纤光栅增敏温度传感封装结构主要由毛细金属厚管、金属厚管、胶粘剂 1、胶粘剂 2、胶粘剂 3、薄壁管、传输光缆、热传导液体等组成。金属厚管和胶粘剂 1 的作用与无增敏的封装方式一样。胶粘剂 2 的作用是将金属厚管和传输光缆与毛细金属管固结为一体。毛细金属管和胶粘剂 3 以及光纤光栅的组合方式与管式封装的一样。热传导液体的主要作用是维持金属厚管与管式封装光纤光栅的相同的温度状态。从结构上看,该封装形式不仅充分保持了管式封装光纤光栅的温度增敏效应,能自由地感应结构对象的温度变化,而且对其起到很好的保护作用,同时保持了光纤光栅的准分布式传感能力。

3.4.2 封装材料选择

光纤光栅温度传感封装主要考虑的问题是充分保证光纤光栅被保护起来,同时保证光纤光栅能够处于被测对象的同一温度场。对于无增敏封装结构而言,金属厚管必须具有高强度和良好的热传导能力,此外要具有很好的抗腐蚀能力,考虑目前的金属材料性能,不锈钢和钛合金是理想的材料,若考虑成本问题与混凝土的粘合性能,不锈钢是理想选择。胶粘剂必须也满足高强度和耐久性,因此环氧树脂和 J133 等高性能胶是理想的。考虑胶粘剂 1 需要渗透一定距离,因此流动性可调的双组分 J133 胶是可取的,而胶粘剂 2 只需单组分环氧树脂即可。薄壁管只起到保护作用,因此只需耐久即可,因此它可以选择金属钢管和聚乙烯高分子材料等。对于增敏封装结构而言,金属厚管、胶粘剂 1、胶粘剂 2 和薄壁管的选材与无增敏封装基于一样的考虑,而胶粘剂 3 和毛细金属管与前述的管式封装应变传感器的一样。这里特别的地方热传导液体的选择。考虑 Hg 是液态金属,具有优秀的热传导性能,在温度场改变迅速的场合是最理想的选择。然而,土木工程结构的温度场通常是慢变过程,象水、油等也是可以考虑的对象。

3.4.3 封装工艺

无增敏光纤光栅温度传感封装工艺相对比较简单,这样实现的:首先将两端焊有传输光纤的光纤光栅穿过金属厚管,然后竖直固定于铁架台上,对中光纤和金属管的中心,将其固定。将配好的流动性适宜的双组分 J133 胶从上部适量注入。待胶固化后,将金属厚管倒过来固定于铁架台上,然后重新将光纤与金属厚管对中,并注入胶粘剂。待其固化后,在金属管的两端套上薄壁管并注入胶粘剂即可。无增敏光纤光栅温度传感封装工艺的难点是整个过程中必须小心操作,并保证胶粘剂的流动性要适当,否则会出现胶粘剂将光栅与金属管粘在一起的情况,同时保证管中的光纤具有足够的弯曲度,以便光栅与金属管充分

光纤光栅增敏温度传感封装结构主要由毛细金属厚管、金属厚管、胶粘剂 1、胶粘剂 2、胶粘剂 3、薄壁管、传输光缆、热传导液体等组成。金属厚管和胶粘剂 1 的作用与无增敏的封装方式一样。胶粘剂 2 的作用是将金属厚管和传输光缆与毛细金属管固结为一体。毛细金属管和胶粘剂 3 以及光纤光栅的组合方式与管式封装的一样。热传导液体的主要作用是维持金属厚管与管式封装光纤光栅的相同的温度状态。从结构上看,该封装形式不仅充分保持了管式封装光纤光栅的温度增敏效应,能自由地感应结构对象的温度变化,而且对其起到很好的保护作用,同时保持了光纤光栅的准分布式传感能力。

3.4.2 封装材料选择

光纤光栅温度传感封装主要考虑的问题是充分保证光纤光栅被保护起来,同时保证光纤光栅能够处于被测对象的同一温度场。对于无增敏封装结构而言,金属厚管必须具有高强度和良好的热传导能力,此外要具有很好的抗腐蚀能力,考虑目前的金属材料性能,不锈钢和钛合金是理想的材料,若考虑成本问题和与混凝土的粘合性能,不锈钢是理想选择。胶粘剂必须也满足高强度和耐久性,因此环氧树脂和 J133 等高性能胶是理想的。考虑胶粘剂 1 需要渗透一定距离,因此流动性可调的双组分 J133 胶是可取的,而胶粘剂 2 只需单组分环氧树脂即可。薄壁管只起到保护作用,因此只需耐久即可,因此它可以选择金属钢管和聚乙烯高分子材料等。对于增敏封装结构而言,金属厚管、胶粘剂 1、胶粘剂 2 和薄壁管的选材与无增敏封装基于一样的考虑,而胶粘剂 3 和毛细金属管与前述的管式封装应变传感器的一样。这里特别的地方热传导液体的选择。考虑 Hg 是液态金属,具有优秀的热传导性能,在温度场改变迅速的场合是最理想的选择。然而,土木工程结构的温度场通常是慢变过程,象水、油等也是可以考虑的对象。

3.4.3 封装工艺

无增敏光纤光栅温度传感封装工艺相对比较简单,这样实现的:首先将两端焊有传输光纤的光纤光栅穿过金属厚管,然后竖直固定于铁架台上,对中光纤和金属管的中心,将其固定。将配好的流动性适宜的双组分 J133 胶从上部适量注入。待胶固化后,将金属厚管倒过来固定于铁架台上,然后重新将光纤与金属厚管对中,并注入胶粘剂。待其固化后,在金属管的两端套上薄壁管并注入胶粘剂即可。无增敏光纤光栅温度传感封装工艺的难点是整个过程中必须小心操作,并保证胶粘剂的流动性要适当,否则会出现胶粘剂将光栅与金属管粘在一起的情况,同时保证管中的光纤具有足够的弯曲度,以便光栅与金属管充分

接触。

增敏光纤光栅温度传感封装工艺由光纤光栅空气压力差管式封装工艺和无增敏管式封装工艺两部分组成, 光纤光栅空气压力差管式封装工艺部分与粘贴式光纤光栅应变传感管式封装完全一样, 而无增敏管式封装工艺部分与上述的无增敏光纤光栅温度传感封装工艺基本一样, 只是在第二次注胶前将热传导液体注入金属厚管。增敏光纤光栅温度传感封装工艺必须注意热传导液体不能将金属厚管完全充满, 否则光纤光栅无法自由伸缩, 甚至可能将传感器胀坏。其他注意事项与光纤光栅应变传感管式封装工艺和无增敏光纤光栅温度传感封装工艺完全一样。

由于只需保证被测对象的温度场与温度传感器一致, 即温度变化导致的热量传递能顺利进行并很快达到动态平衡, 和封装结构满足耐久性要求, 这种温度传感器就能完全胜任结构长期健康监测需要。而在相对合理的尺寸范围内, 金属管和胶粘剂并不影响光纤光栅封装温度传感器的传感特性, 其传感特性分别由裸光纤光栅和上述的光纤光栅应变传感管式封装结构决定, 从这个意义上来说, 只需尺寸满足实际结构的布设工艺即可, 当然为了保证与结构的相容性, 尺寸越小越好。

3.4.4 传感器性能试验

由上面的论述知道, 本文设计的两用光纤光栅封装温度传感器的传感特性分别由裸光纤光栅和粘贴式光纤光栅应变传感管式封装结构和工艺决定, 也就是说无增敏光纤光栅封装温度传感器的传感特性与用来封装的裸光纤光栅是一样的, 而增敏型光纤光栅封装温度传感器的传感特性与粘贴式光纤光栅管式封装应变传感的温度传感特性是一样的。鉴于此, 裸光纤光栅的温度传感特性在第二章中已经作了详细研究与讨论, 这里只需研究粘贴式光纤光栅管式封装应变传感器的温度传感特性即可。

1) 试验设备与材料 增敏型光纤光栅封装温度传感器的传感头与3.2.4节的一样, 即毛细钢管外径为1.2毫米, 内径0.8毫米, 长度为10厘米, 采用的封装胶粘剂为两种: J39 和 J133。为了确证光纤光栅封装温度传感器能否适用环境温度, 我们取试验温度场为 $-50^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ 。温度场由中国计量科学研究院监制的TYC-1低温检定无水乙醇槽和水槽提供, 其中 $-50\sim 20^{\circ}\text{C}$ 段在无水乙醇低温试验槽完成, 而 $20\sim 80^{\circ}\text{C}$ 在水槽中完成。试验槽提供的温度场稳定性为 0.01°C 。温度计采用二等水银温度计, 精度为 0.04°C 。布拉格中心波长识别系统采用美国Micron Optics公司生产的FBG-SLI系统。该标定试验在黑龙江省计量

检定测试院完成。

2) 试验结果与分析 我们将两个 J133 管式封装和一个 J39 封装的温度传感头置于检定槽中, 调整温度场, 记录温度和光纤光栅波长数据, 试验结果如图 3-19~ 3-21。

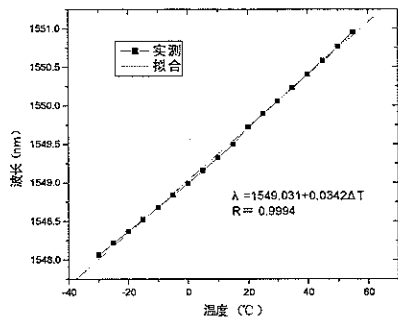


图 3-19 1# J133 封装温度传感器传感特性
Figure 3-19 Temperature sensing properties of J133-package FBG sensor 1#

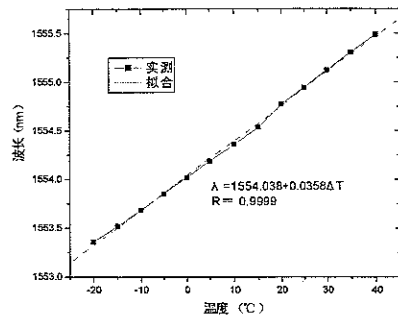


图 3-20 2# J133 封装温度传感器传感特性
Figure 3-20 Temperature sensing properties of J133-package FBG sensor2#

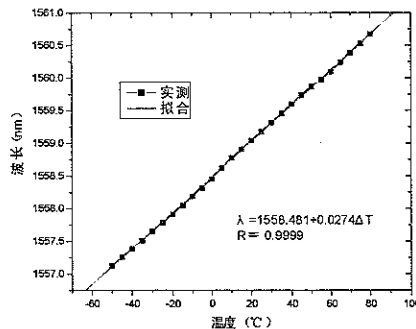


图 3-21 J39 封装温度传感器的温度传感特性
Figure 3-21 Temperature sensing properties of J39-package FBG sensor

从图中可以看出 J133 管式封装的两个温度传感器的温度灵敏度系数分别为 0.0342nm/°C 和 0.0358nm/°C, 平均为 0.035nm/°C, 而 J39 管式封装的温度传感器的温度灵敏度系数为 0.0274nm/°C。考虑裸光纤光栅的温度传感灵敏度系数为 9.35pm/°C, 因此, 这两种封装温度传感器的灵敏系数分别为裸光栅的 3.74 倍和 2.93 倍。由于目前已有的光纤光栅解调仪的分辨率为 1pm, 因此 J133 封

装的光纤光栅温度传感器的分辨率为 0.028°C ，而 J39 封装的光纤光栅温度传感器的分辨率为 0.036°C 。这种温度分辨率足以满足土木工程结构温度监测的需要。而两个 J133 封装的光纤光栅温度传感器的灵敏度系数误差仅为 2.3%，再一次证明了该封装工艺的有效性。

3.5 光纤光栅封装传感器在结构试验中的应用

为了验证光纤光栅封装传感器的传感性能，我们将其用于结构试验的应变监测和温度监测。混凝土内部应变监测在第4章和第7章着重介绍，温度监测在第6章和第7章着重介绍。这里只介绍我们在组合钢桁架上进行的应变和温度监测试验。

鉴于光纤光栅传感器的优点，本节研究光纤光栅在组合钢架上的布设工艺，利用布设在组合钢架上的裸光纤光栅和管式封装应变传感器监测组合钢架的静载应变历程与应变分布，同时验证光纤光栅的准分布式传感技术。

3.5.1 试验仪器与材料准备

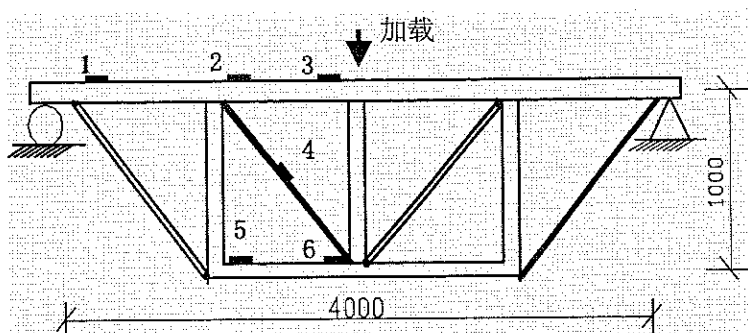


图 3-22 组合钢架结构与测点布置示意图

Figure3-22 Sketch of composite steel truss and monitored positions

本文监测的组合钢架由 I12 工字钢和 $\Phi 25$ 圆钢组成，选择有代表性的 6 个位置监测其应变历程，如图 3-22 所示。在如图所示的 1-6 点分别布设光纤光栅与 $2 \times 3\text{mm}$ 的胶基电阻应变片，使光纤光栅与电阻应变片的方向严格一致，其中 1、2、3 点布设裸光纤光栅，并将它们用光纤融接机焊接起来；4、5、6 点布设毛细钢管式封装光纤光栅应变传感器。为了防止信号解调仪混淆光纤光栅的中心波长，经过挑选，1—3 点分别布置中心波长为 1554nm、1546nm 和 1549nm

的裸光纤光栅。为了剔除温度的影响，我们在另一块不受力的同样材质的钢板上布置裸光纤光栅，用它来感应温度变化，作为应变监测的温度补偿。

3.5.2 光纤光栅应变传感器布设工艺

裸光纤特别纤细，约为 125 微米，主要成分是 SiO_2 ，其质地脆弱，尤其它的抗剪能力较差。为了保证光纤光栅不被破坏，且能充分感应结构应变，本文在多次试验的基础上采用以下布设工艺：

(1) 裸光纤光栅布设工艺：

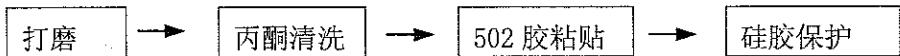


图 3-23 裸光纤光栅布设工艺

Figure 3-23 Techniques of installation for bare FBG

(2) 管式封装光纤光栅布设工艺：

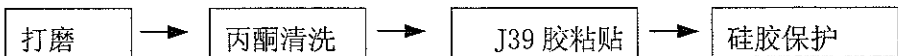


图 3-24 管式封装光纤光栅布设工艺

Figure 3-24 Techniques of installation for steel-tube packaged FBG

布设的光纤光栅全部成活，而且很好地感应应变，说明上述布设工艺很可靠。

3.5.3 监测结果与分析

用螺旋千斤顶对组合钢架正中部进行集中加载，加载范围为 0—4 吨，步长为 0.5 吨，组合钢架处于弹性工作阶段。每次加载结束后用光纤光栅和应变片进行监测，同时监测环境温度。光纤光栅监测的温度变化结果如图 3-25 所示，温度变化很小，因此我们不对应变监测结果修正，但是，长期监测必须根据温度变化补偿测试结果。本文对桁架梁进行 2 次重复加载，两次监测结果吻合较好，根据标定的应变灵敏度系数，得到图 3-26~31 的分析结果。

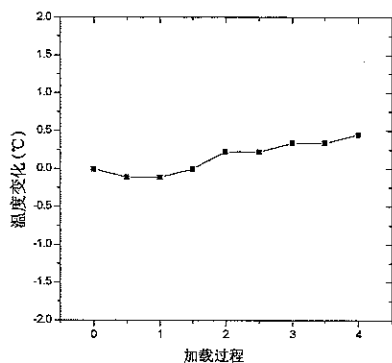


图 3-25 加载过程温度变化

Figure 3-25 Temperature changes during loading

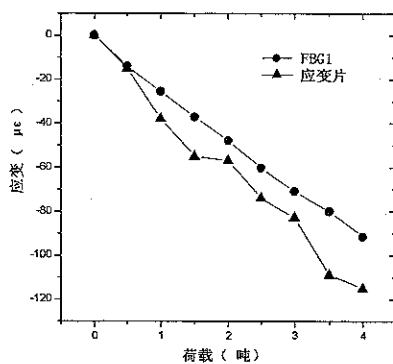


图 3-26 测点 1 的监测结果

Figure 3-26 Monitored results from point 1

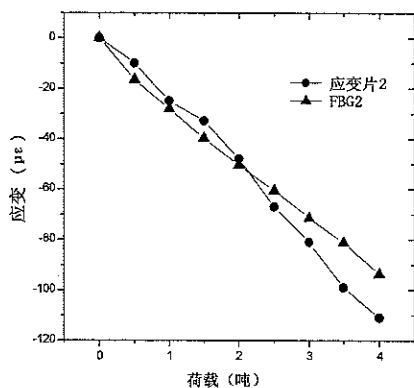


图 3-27 测点 2 的监测结果

Figure 3-27 Monitored results from point 2

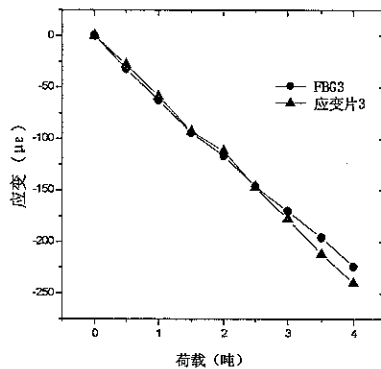


图 3-28 测点 3 的监测结果

Figure 3-28 Monitored results from point 3

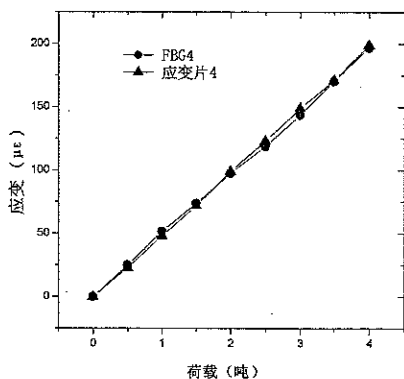


图 3-29 测点 4 的监测结果

Figure 3-29 Monitored results from point 4

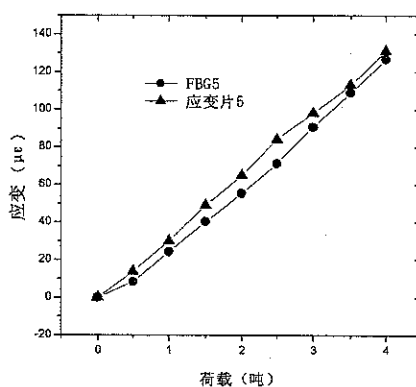


图 3-30 测点 5 的监测结果

Figure 3-30 Monitored results from point 5

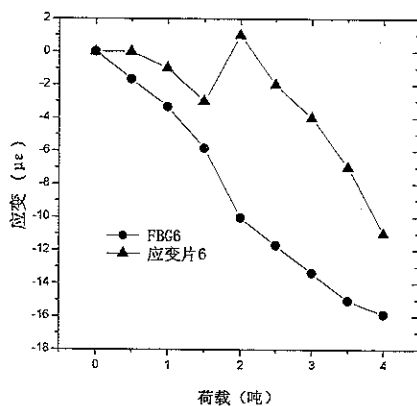


图 3-31 测点 6 的监测结果

Figure 3-31 Monitored results from point 6

图 3-27~30 可以看出, 光纤光栅与电阻应变片的监测结果吻合较好, 而光纤光栅的线性度明显优于电阻应变片。图 3-26 与图 3-31 两者的测试结果相差较大, 主要来源三方面原因: 一是两种传感器的测点比较靠近节点附近, 呈现复杂应力状态, 而传感器的位置具有一定的差异; 另一原因是电阻应变测试精度较低, 约为 $3\sim 5\mu\epsilon$, 它无法正确测试低于 $3\mu\epsilon$ 的变形量, 图 19 很好地说明了这一点; 三是测试环境干扰较大, 其它电动设备的运行改变电场, 直接影响电阻应变片的稳定性, 而光纤光栅却没有这个问题, 因此光纤光栅测试结果显得更加可靠。从管式封装光纤光栅应变传感器的测试结果图 3-29 和 3-30 来看, 其测试结果非常可靠, 再一次验证了管式封装工艺的可靠性。

3.6 本章小结

本章首先提出光纤光栅封装的基本方法, 并从结构形式、材料选择、封装工艺等角度对光纤光栅封装传感器进行了系统研究, 开发出毛细金属管式封装光纤光栅应变传感器、片式封装光纤光栅应变传感器和光纤光栅有/无增敏封装光纤光栅温度传感器, 并对其传感特性进行了试验。最后, 将管式封装应变传感器用于钢桁架组合梁试验。研究结果表明:

1) 光纤光栅管式封装应变传感器基本不会改变光纤光栅的应变传感特性, 是测试混凝土内部和结构表面应变的理想传感元件, 可以达到 $1\sim 2\mu\epsilon$ 的测试精度, 满足结构长期监测的需要。

2) 片式封装光纤光栅应变传感器是一种理想的结构表面应变测试手段。由于基材具有一定的厚度和长度,在结构应变监测时,弯曲变形和拉伸变形会有所差别,可以通过标定修正的办法方便克服。

3) 无增敏光纤光栅封装温度传感器很好地保留了裸光纤光栅的温度传感特性,而利用毛细金属管封装光纤光栅制作的温度传感器可以达到2~4倍的温度增敏效果,按光纤光栅解调仪的分辨率为1pm来算,其温度分辨率可达0.05℃的分辨率,完全满足土木工程结构健康监测的需要。

第 4 章 FRP-OFBG 筋及其力学与传感特性

4.1 引言

钢材和混凝土一直是土木工程最重要的结构材料，但是在恶劣的服役环境下，传统的钢筋或钢筋混凝土会因为钢筋锈蚀导致性能严重退化。这在桥梁、路面、水工、海洋平台等工程结构中问题非常严重。加拿大修复停车场的费用达 60 亿美元，而美国修复高速公路桥费用达 500 亿美元，修复混凝土结构费用为 1 万亿到 3 万亿美元。欧洲每年因为钢筋锈蚀损失达 30 亿美元。为解决钢筋锈蚀问题，在过去几十年内采取了许多措施，如环氧涂层、阴极保护、增加混凝土保护层厚度等，这些方法未能理想地解决钢筋锈蚀问题^{[130][131]}。

FRP(Fiber Reinforced Polymer)筋是连续纤维（如玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维、混杂纤维等）浸入聚合物热固性树脂（如聚酯树脂、乙烯基酯或热塑性树脂，如尼龙、聚乙烯对苯二酸盐酯等）基体中，并在基体中掺入适量外加剂，如引发剂、促进剂、填料、颜料等，经过挤拉工艺，在表面缠绕纤维束形成肋或粘砂增强与混凝土粘结的结构材料^{[132][133]}。由于 FRP 筋具有耐腐蚀、强度高、非磁性、重量轻（是钢筋密度 1/6~1/4）、高疲劳限值、加工方便、低导热性等优良性能，在建筑、桥梁、地下工程、海洋工程、隧道等土木工程中的应用前景十分广阔。目前美国、加拿大、欧洲和日本等国家成立了纤维增强塑料研究会，已有相对成熟的结构设计规范，并在桥梁、海洋结构、停车场、挡土墙、核反应堆基础、机场跑道、电子试验室等结构中得到大量的应用^[134~137]。

然而，FRP 筋也有一些缺点，如本构关系是线弹性的，为脆性断裂^[138]；横向强度低，抗剪强度不超过抗拉强度的 10%^[139]；弹性模量低，通常为普通钢筋的 25%~70%，FRP 加筋混凝土结构的挠度大，裂缝宽^[140]。在紫外线照射下聚合物树脂和纤维易损伤；FRP 筋垂直纤维方向热膨胀较大，在高温条件下性能较差^[141]；成本较高等。FRP 筋物理、力学性能与钢筋差异很大，传统的钢筋混凝土结构分析、设计、施工方法不能直接用于 FRP 加筋混凝土结构^[142]。

因此，如何充分利用 FRP 筋的优良性能，同时保证 FRP 筋正常工作，即防止脆断、粘结滑移、蠕变、疲劳等问题，是目前推广 FRP 筋在土木工程中应用的核心问题。赋予 FRP 筋智能特性，即预报可能出现的上述问题，是一种可行的办法。一些学者研究了 CFRP 筋的感知特性，即 CFRP 受力变形过程中电阻

发生变化,如 OU Jinping^[143]等人研究了 CFRP 筋的电阻变化,得到 CFRP 筋受拉破坏时电阻变化率为 30-45%,电阻变化—应变曲线的斜率随应变增加而明显增加,而在混凝土梁中其电阻变化率为 3.96-6.74%,是 CFRP 筋受拉时的 20%。Bakis^[144]等人利用碳纤维的压阻效应(Piezoresistive effect)监测结构变形和损伤。他们认为纵向碳纤维复合材料纤维弹性变形引起几何变化,纤维内电子变化,纤维之间接触,纤维断裂等原因产生电阻变化。但是,仅利用 CFRP 的电阻特性难以准确判断结构的损伤,因为 CFRP 的电阻特性具有较强的非线性。加拿大的 Kalamkarov^{[145][146]}等人提出将光纤传感器在加工过程中埋入 FRP 筋内部,并对这种含有光纤传感器的 FRP 筋进行了传感特性、疲劳特性、抗腐蚀特性等研究。结果表明,FRP 筋中埋入光纤传感器满足结构健康监测的需要,是一种理想的传感手段,但是他没有将这种技术深入研究,没有将其完全纳入结构健康监测。

为了充分利用 FRP 筋的优良性能,本章将 FRP 筋与光纤光栅智能传感器相结合,即在 FRP 筋的加工过程中将光纤光栅埋入其内部,研制出 FRP-OFBG (Fiber Reinforced Polymer-Optical Fiber Bragg Grating) 智能传感筋,分为 CFRP-OFBG (Carbon Fiber Reinforced Polymer-Optical Fiber Bragg Grating) 和 GFRP-OFBG (Glass Fiber Reinforced Polymer-Optical Fiber Bragg Grating) 两种;重点研究它们的力学与智能传感特性,并进行微观分析;最后将其埋入混凝土梁进行试验。由于光纤光栅特别纤细,直径为 125 微米,涂敷层为聚合物,它与 FRP 具有天然的相容性,不会改变 FRP 的基本特性。这样,FRP-OFBG 传感筋兼有 FRP 的优良力学性能和抗腐蚀特性以及光纤光栅的智能传感特性。此外,它本身就是光纤光栅的一种封装方式,彻底克服了光纤光栅脆弱、布设困难的缺点,大大提高了光纤光栅的耐久性。这样,我们可以方便地监测 FRP 筋的力学特性,从而把握基于 FRP 筋的相应结构性态,还可以将其作为测试其他结构的传感器。根据用户的需要,FRP-OFBG 传感筋可以加工成工程需要的任意尺寸,十分适于工业化生产。因此,FRP-OFBG 传感筋必将象 FRP 迅猛发展一样,在结构健康监测领域得到广泛的应用。

4.2 FRP-OFBG 筋的制备

哈尔滨工业大学与国家树脂基复合材料工程技术研究中心联合研制开发了 FRP 筋。FRP 筋是纤维束浸渍在树脂中,通过拉挤模,树脂受热固化而成。我们在 FRP 筋的生产过程中,将写入光栅的光纤从放入合束盘正中孔,随纤维束

一起与树脂固化。FRP-OFBG 传感筋的制备生产工艺如图 4-1 和 4-2 所示。为增强 FRP 筋与混凝土的粘结性能，在 FRP-OFBG 传感筋表面进行处理，处理为螺旋缠绕纤维和粘砂。FRP-OFBG 传感筋成分配比为：纤维体积含量 64%，环氧树脂体积含量 36%，其中碳纤维采用 Toray Industry Inc.公司生产的 T700SC，玻璃纤维采用 FPG Industry Inc.公司生产的 HYBON2006，聚合物热固性树脂为环氧树脂、固化剂、添加剂和脱模剂等组成。CFRP-OFBG 和 GFRP-OFBG 传感筋如图 4-3 和 4-4 所示。

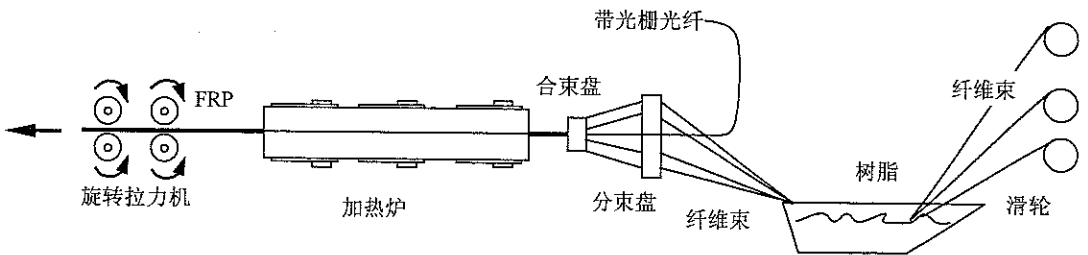


图 4-1 FRP-OFBG 筋制备工艺

Figure 4-1 Technique of FRP-OFBG bar fabrication

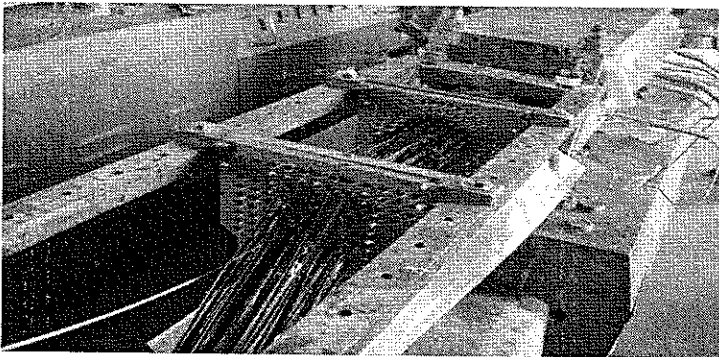


图 4-2 FRP-OFBG 筋制备照片

Figure 4-2 Picture of FRP-OFBG bar fabrication

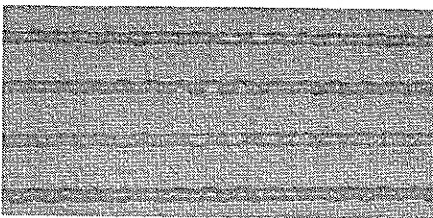


图 4-3 GFRP-OFBG 筋照片

Figure 4-3 Picture of GFRP-OFBG bar

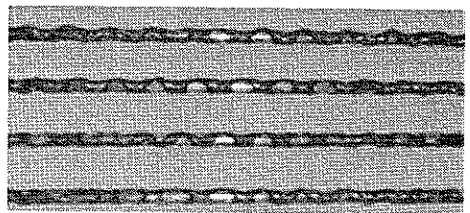


图 4-4 CFRP-OFBG 筋照片

Figure 4-4 Picture of CFRP-OFBG bar

4.3 FRP-OFBG 筋截面微观分析

FRP-OFBG 传感筋中的光栅能否正确地反映 FRP 的变形，主要取决于光纤光栅与 FRP 的界面结合程度。为此，我们分别对 FRP-OFBG 传感筋的传感部位（裸光纤光栅）和传输部位（带保护层）进行截面取样，并用 400 号砂纸到 1500 号砂纸依次打磨。将其进行电镜扫描（SEM 扫描），扫描照片如图 4-5~4-8 所示。

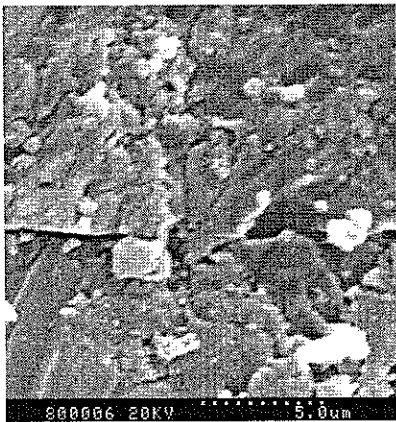


图 4-5 裸光纤光栅与 GFRP 界面 SEM 照片
Figure 4-5 SEM of bare FBG and GFRP

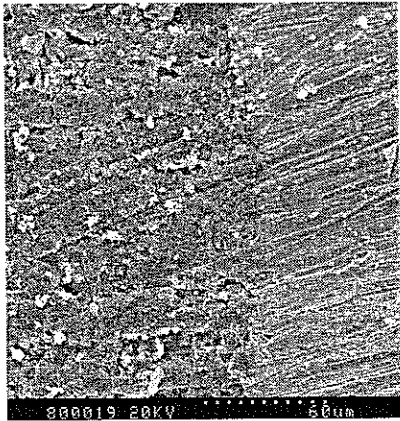


图 4-6 裸光纤光栅与 CFRP 界面 SEM 照片
Figure 4-6 SEM of bare FBG and CFRP

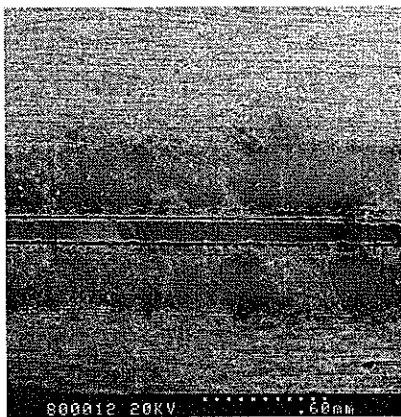


图 4-7 传输光纤与 GFRP 界面 SEM 照片
Figure 4-7 SEM of optical fiber and GFRP

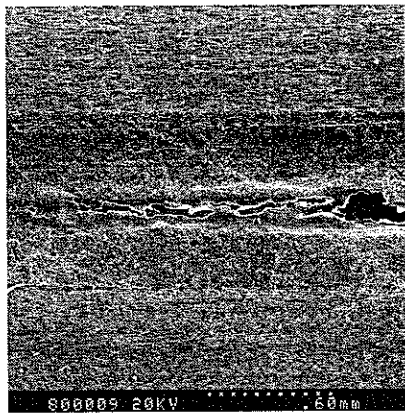


图 4-8 传输光纤与 CFRP 界面 SEM 照片
Figure 4-8 SEM of optical fiber and CFRP

从 SEM 扫描照片可以看出，FRP-OFBG 的裸光栅与 FRP 筋结合以及传输光纤和 FRP 都结合得很好，因此 FBG 完全可以与 FRP 协同工作，不可能出现应

变传递和削弱 FRP 的力学性能问题,也就是说光纤光栅可以完全感应 FRP 的应变。

4.4 FRP-OFBG 筋力学特性试验

由于 FBG 和传输光纤的外径非常小,为 FRP 筋的 2% (按 FRP 筋为 $\phi 6$ 计算),按面积比为 0.02%,几乎可以忽略不计,FBG 的存在不可能影响 FRP 原有的力学特性。为了证实 FRP-OFBG 基本上没有改变 FRP 的力学特性,我们将同样尺寸规格的 FRP-OFBG 传感筋和 FRP 普通筋在万能材料试验机上进行张拉试验,得到图 4-9 和 4-10 的对比结果。从试验对比结果可以看出,FRP-OFBG 几乎没有改变 FRP 筋的力学特性。

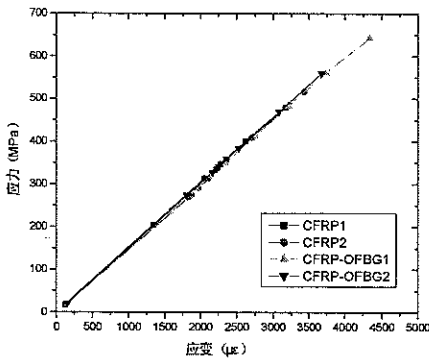


图 4-9 CFRP-OFBG 筋与 CFRP 筋张拉对比
Figure 4-9 Comparison of CFRP-OFBG bar and CFRP bar under load

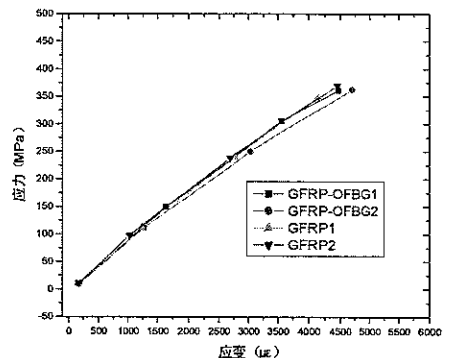


图 4-10 GFRP-OFBG 筋与 GFRP 筋张拉对比
Figure 4-10 Comparison of GFRP-OFBG bar and GFRP bar under load

4.5 FRP-OFBG 筋传感特性试验

4.5.1 FRP-OFBG 筋应变传感特性试验

1) 试验准备 FRP-OFBG 筋的应变传感特性试验在 Instron4505 电子材料试验机上完成,荷载精度为 0.001kg。FRP 筋的应变测试采用高精度电子引伸计,精度为 0.001mm。光纤光栅波长解调仪采用美国 MICRON OPTICS 生产的 FBG-SLI 解调仪。

2) 试验结果与分析 将 FRP-OFBG 传感筋在试验机上进行拉伸试验,如图 4-11 所示。记录引伸计获得的应变值和光纤光栅的波产值,得到的结果如图 4-12

和 4-13 所示。为了验证传感器的重复性, 对其进行反复加载试验, 得到图 4-14 和 4-15 的结果。



图 4-11 FRP-OFBG 筋应变传感特性照片

Figure 4-11 Picture of FRP-OFBG bar strain sensing experiment

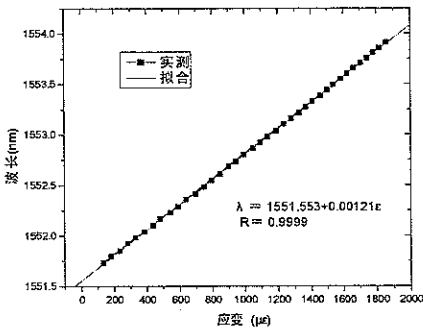


图 4-12 CFRP-OFBG 筋应变传感特性

Figure 4-12 CFRP-OFBG bar
strain sensing property

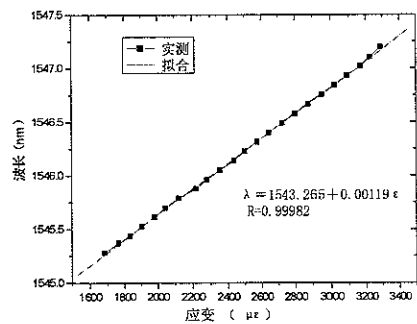


图 4-13 GFRP-OFBG 筋应变传感特性

Figure 4-13 GFRP-OFBG bar
strain sensing property

从图 4-12 和 4-13 可以看出, CFRP-OFBG 筋和 GFRP-OFBG 筋的应变传感灵敏度分别为 $1.121\text{pm}/\mu\epsilon$ 与 $1.19\text{pm}/\mu\epsilon$, 基本没有改变光纤光栅的应变传感特性, 即应变传感灵敏度保持在 $1.2\text{pm}/\mu\epsilon$ 左右, 微小误差可能是引申计的精度和读数的时间差导致的, 因此我们可以认为 FRP-OFBG 筋的应变传感系数仍为 $1.2\text{pm}/\mu\epsilon$, 这与国际上公布的光纤光栅应变灵敏度数据吻合很好。图 4-14 和 4-15

可以看出, FRP-OFBG 筋具有很好的重复性, 这是因为 FRP 筋在有效工作范围属于弹性材料。

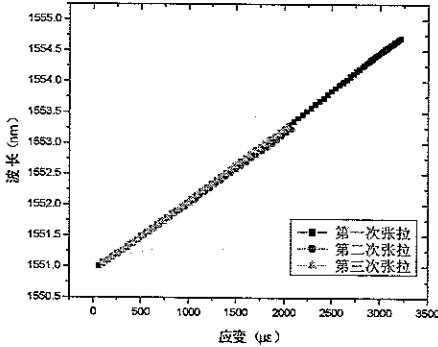


图 4-14 CFRP-OFBG 筋应变传感重复特性
Figure 4-14 Repetitive property of
CFRP-OFBG bar strain sensing

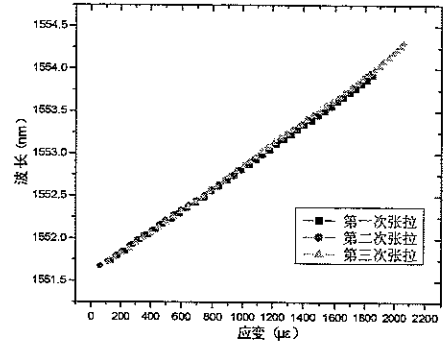


图 4-15 GFRP-OFBG 筋应变传感重复特性
Figure 4-15 Repetitive property of
GFRP-OFBG bar strain sensing

4.5.2 FRP-OFBG 筋温度传感特性试验

我们采用与裸光栅和管式封装光纤光栅温度传感器的温度传感标定完全一样的方法, 即标定试验在黑龙江省计量检定测试院利用中国计量科学研究院监制的 TYC-1 低温检定无水乙醇槽和水槽中完成。将 2 根相同规格的 GFRP-OFBG 筋和 2 根不同的 CFRP-OFBG 筋置于温度试验槽中进行标定试验, 如图 4-16 所示。记录温度计的温度值和光纤光栅的波产值, 得到的结果如图 4-17~4-20 所示。

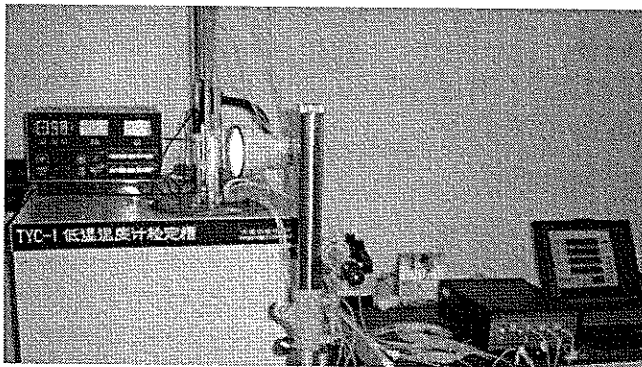


图 4-16 FRP-OFBG 温度传感试验照片
Figure 4-16 Picture of FRP-OFBG temperature sensing

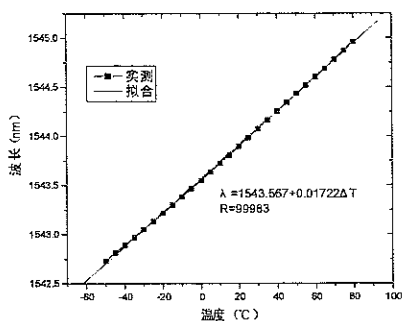


图 4-17 GFRP-OFBG1 温度传感特性
Figure 4-17 Temperature sensing property of GFRP-OFBG1

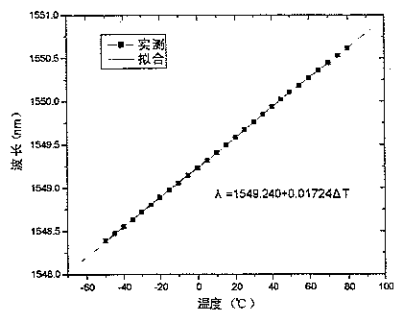


图 4-18 GFRP-OFBG2 温度传感特性
Figure 4-18 Temperature sensing property of GFRP-OFBG2

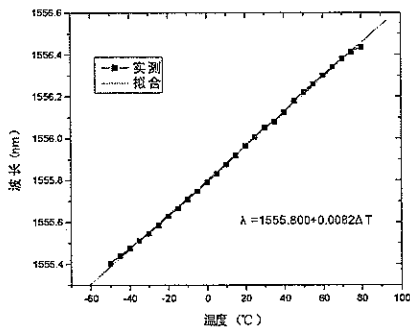


图 4-19 CFRP-OFBG1 温度传感特性
Figure 4-19 Temperature sensing of CFRP-OFBG1

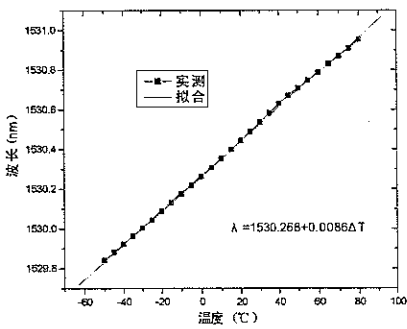


图 4-20 CFRP-OFBG2 温度传感特性
Figure 4-20 Temperature sensing of CFRP-OFBG2

图 4-17 和 4-18 可以看出,两根相同规格的 GFRP-OFBG 的温度传感器系数几乎完全一样,分别为 $17.22\text{pm}/\mu\text{ε}$ 和 $17.24\text{pm}/\mu\text{ε}$, 均比裸光纤光栅的温度传感灵敏度系数 $9.35\text{pm}/\mu\text{ε}$ 大, 约为 1.84 倍。此结果表明 GFRP-OFBG 具有光纤光栅封装的温度增敏效应, 这是由于 GFRP 的热膨胀系数比裸光纤光栅的大的缘故。因此, GFRP-OFBG 可以用来作为光纤光栅封装温度传感器的内核。图 4-19 和 4-20 可以看出, 两个不同规格的 CFRP-OFBG 的温度传感灵敏度系数分别为 $8.22\text{pm}/\mu\text{ε}$ 和 $8.68\text{pm}/\mu\text{ε}$, 均比裸光纤光栅的温度传感灵敏度系数小, 约为 0.89 倍。这表明 CFRP-OFBG 具有光纤光栅封装的温度减敏效应, 这是由于 CFRP 的热膨胀系数比裸光纤光栅的小的缘故。CFRP-OFBG 筋的温度传感灵敏度系数存在差异主要是由于他们的尺寸不同, 因此对光栅的影响也不同, 但是差异很

小，仅为 2.7%。上述试验结果同时也表明同批生产的 FRP-OFBG 温度传感特性离散性很小，这为其作为传感器批量生产提供了可靠的试验依据。

4.6 FRP-OFBG 加筋智能混凝土梁的试验研究

为了研究 FRP-OFBG 筋在混凝土梁中的应变传感特性和 FRP 筋在混凝土中的变形情况，我们在 12 根 FRP 混凝土梁上布置了 FRP-OFBG 筋和普通 FBG，共计 30 根光栅。为了对比，我们在其中一根梁上集中布置了有/无肋的 CFRP-OFBG 筋、GFRP-OFBG 筋、管式封装 FBG，裸光纤光栅等 10 个光纤光栅。布设的光纤光栅传感器全部成活。对这些梁进行了静载试验，研究了 FRP-OFBG 筋应变传感特性，验证了其作为传感器的可靠性。

4.6.1 试验准备

1) 试验材料与设备 FRP 梁采用 GFRP、CFRP、CFRP+钢筋三种配筋方案，为了保证混凝土与 FRP 筋协同工作，对 FRP 筋表面进行缠绕和粘砂处理，FRP 筋的性能特性如表 4-1 所示。

表 4-1 FRP 梁采用的 GFRP 和 CFRP 筋性能
Table 4-1 GFRP and CFRP's properties of FRP beam

筋	表面形式	肋高 (mm)	螺距 (mm)	直径 (mm)	极限抗拉强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)
GFRP	缠绕	1	20	8.5	631.3	47.64
	粘砂	1	20	8.5	631.3	47.64
	缠绕	1	16	10	631.3	47.64
	粘砂	1	16	10	631.3	47.64
	缠绕	1	20	12	631.3	47.64
	粘砂	1	20	12	631.3	47.64
CFRP	缠绕	1	11	4	2109.5	126.24
	缠绕	1	11	6	2109.5	126.24
	缠绕	1	12	8	2109.5	126.24

采用 C30 和 C40 两种混凝土强度，其配比材料为：天鹅普通 525 号水泥（实测强度 58MPa， $\rho_c=3.1g/cm^3$ ）、中砂（表观密度 $2.65 g/cm^3$ ）、碎石（最大粒径 20mm，表观密度 $2.7g/cm^3$ ）。质量配合比分别为 C30：水泥:砂:石:水=381:631:1172:195，C40：水泥:砂:石:水=454:609:1131:195。

混凝土力学性能如表 4-2 所示。

表 4-2 混凝土力学性能指标

Table 4-2 Mechanics properties indexes of concrete

	$f_{cu}(\text{MPa})$	$f_{ck}(\text{MPa})$	$f_{tk}(\text{MPa})$	$E_c(\text{GPa})$
C30	30	20.1	2.01	30
C40	40	26.8	2.40	32.5

钢筋采用一级钢，其 f_{yk} =335MPa， E_s =200GPa。直径为 6，8，10，12mm。箍筋采用一级钢直径 6mm，间距 50mm。上部纵筋采用直径 8mm 一级钢筋。

本试验加载设备为螺旋千斤顶，力传感器为压阻式力传感器。引伸计为百分表。光纤光栅解调仪为美国 MICRON OPTICS Inc.生产的 FBG-SLI。应变传感器为普通混凝土纸基电阻应变计。

2) FRP 混凝土梁设计 FRP 梁的详细构造如图 4-21 所示，几何尺寸为 150×300×2700mm，混凝土保护层厚度为 15mm。FRP 混凝土梁的设计参数见表 4-3。

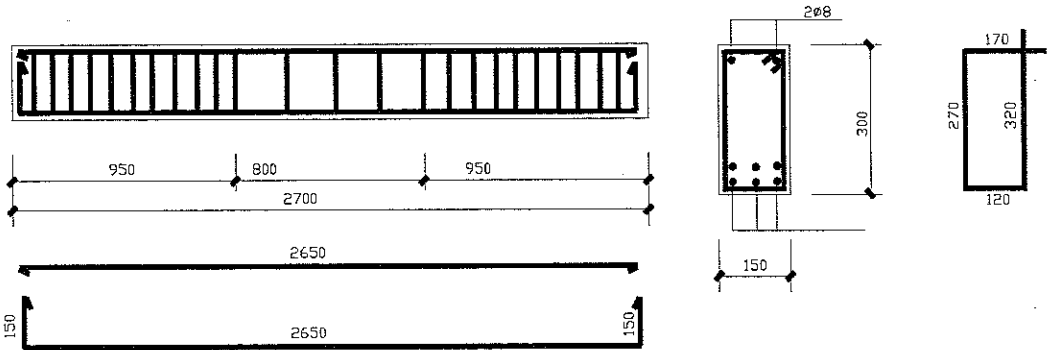


图 4-21 FRP 混凝土梁构造详图

Figure 4-21 Structure specification of FRP concrete beam

下表中的梁编号第一个字母 G、C 和 CS 分别代表玻璃、碳和碳+钢筋；数字 30 和 40 代表混凝土强度 C30 与 C40；然后 W 和 S 代表 FRP 筋外表明缠绕和粘砂。最后字母 A、B 和 C 为配筋率的大小。

表 4-3 FRP 混凝土梁设计参数

Table 4-3 Design parameters of FRP-concrete beam

编号	纵向配筋		纵筋面积 (mm ²)		实际配筋率 (%)	平衡配筋率 (%)	极限弯矩 (kNm)	极限荷载 (kN)	箍筋规格	箍筋根数
G30W-A	4ø8.5 (3 光栅)		226.88		0.504	0.416	36.1	90.25	8ø100	24 根 8
G40W-A	4ø8.5 (1 光栅)		226.88		0.504	0.555	37.10	95.75	8ø100	24 根 8
G40W-B	4ø10 (3 光栅)		314		0.698	0.555	49.75	122.37	8ø100	24 根 8
G40W-C	4ø12 (1 光栅)		452		1.004	0.555	67.98	169.95	8ø50	43 根 8
C30W-A	4ø4 (3 光栅)		50.4		0.112	0.177	27.57	68.925	8ø100	24 根 8
C30W-B	3ø4, 2ø6 (3 光栅)		93.9		0.209	0.177	47.82	119.56	8ø50	43 根 8
C30W-C	3ø6, 4ø4 (1 光栅)		135.4		0.301	0.177	64.07	160.17	10ø50	43 根 10
C40W-A	3ø4 (1 光栅), 2ø6		93.9		0.209	0.236	49.73	124.33	8ø50	43 根 8
	CFRP	钢筋	CFRP	钢筋	钢筋	CFRP				
CS30W-B	2ø8 (1 光栅), 1ø6	1ø8 1ø10	129	130	0.289	0.289	51.60	129	8ø50	43 根 8
CS40W-A	4ø8 (1 光栅), 1ø6	1ø8	229	50.2	0.112	0.509	71.10	177.75	10ø50	43 根 10
CS40W-B	2ø8 (1 光栅), 1ø6	1ø8 1ø10	129	130	0.289	0.289	59.68	149.2	10ø100	24ø10
S40W	2øø6CFRP	2ø10							10ø50	43ø10

3) FRP 混凝土梁上 FBG 传感器的布设与加载方式 我们在 11 根 FRP 混凝土梁中都布置一根含有单光栅或 3 根光栅的 FRP-OFBG 筋，作为受拉筋。单光栅 FRP-OFBG 筋的光栅位置在梁的中部，而 3 光栅 FRP-OFBG 筋则分别布置于跨中、加载点和支座附件。为了研究 FRP 混凝土梁的纯弯性能，采用三分点加载方式，如图 5-22 所示。为了进行对比，我们专门在第 12 根 FRP 混凝土梁中，埋入了多种形式的 FRP-OFBG 受力筋、FRP-OFBG 传感筋、管式封装 FBG 应变传感器、裸光纤光栅等，其布设位置与名称如图 4-23 和表 4-4 所示。为了对比，我们在 FRP 混凝土梁的跨中外表面沿梁高方向与 FBG 传感器相同位置的混凝土表面布置了引伸计。FBG 传感器的布设与浇注保护是传感器存活的关键。由于我们基本采用的是自身有保护措施的 FBG，只需对裸光纤光栅的和传输光缆保护即可。传感器的布设与浇注如图 4-24 (a) 和 (b) 所示。

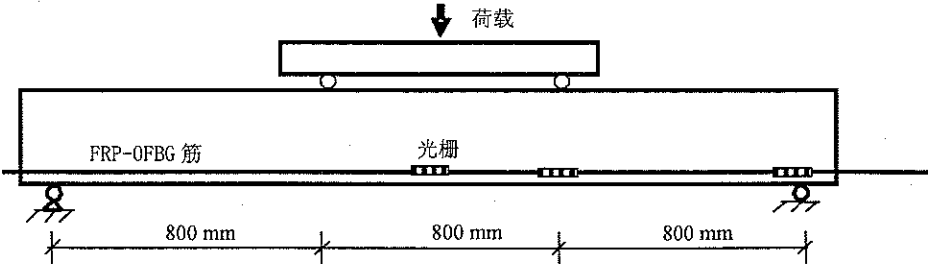


图 4-22 FRP 混凝土梁的加载形式及 FRP-OFBG 中光栅位置

Figure 4-22 FRP-concrete beam under loader and the position of FBGs in FRP

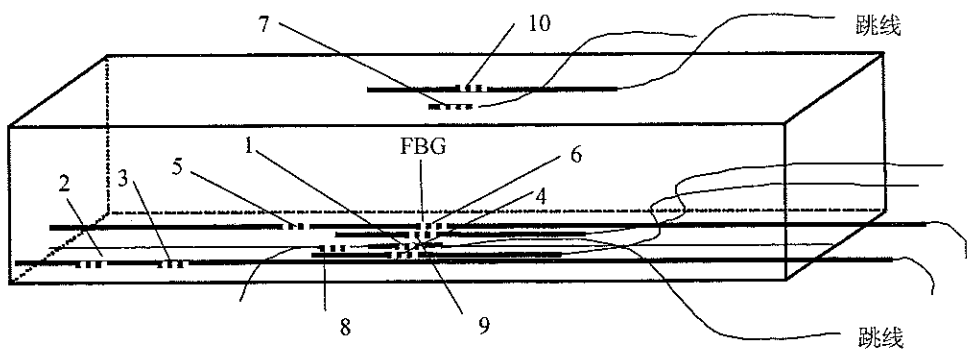
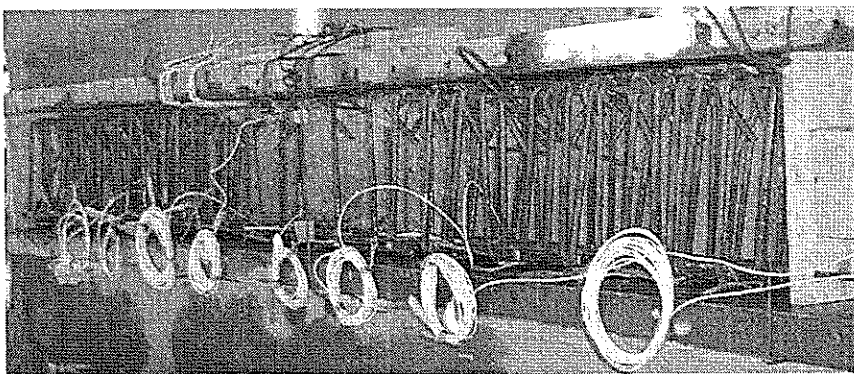
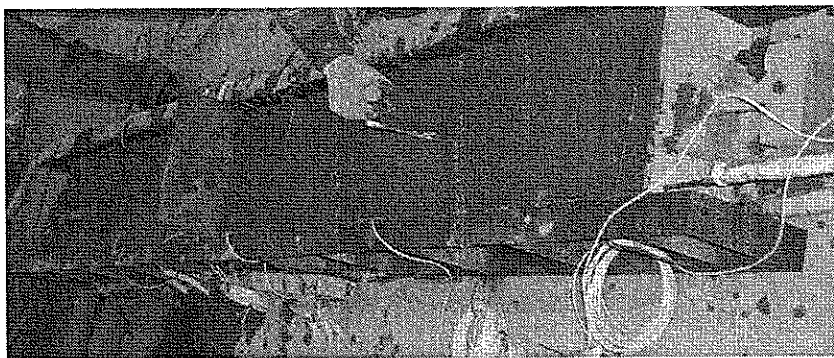


图 4-23 第 12 根梁中多种 FBG 传感器布设位置示意图

Figure 4-23 Position sketch of FBG sensors embedded in 12th FRP-OFBG beam



(a)



(b)

图 4-24 FBG 传感器的布设与浇注

Figure 4-24 Picture of FBG sensors installation and concrete pouring

表 4-4 第 12 根梁中埋入的 FBG 传感器的编号

Table 4-4 Numbers of the FBG sensors embedded in 12th FRP-OFBG beam

编号	FBG 传感器类型	梁上位置
1 #	管式封装 FBG 应变传感器	跨 中（下）
2 #	CFRP-FBG 筋	支 座
3 #	CFRP-FBG 筋	支座与荷载作用点之间
4 #	有肋 GFRP-FBG 应变传感器	跨 中
5 #	CFRP-FBG 筋	荷载作用点（1/3 跨）
6 #	CFRP-FBG 筋	跨 中
7 #	管式封装 FBG 应变传感器	跨 中
8 #	裸光纤光栅	跨 中
9 #	无肋 GFRP-FBG 应变传感器	跨 中（下）
10 #	有肋 GFRP-OFBG	跨中（上）

4. 6. 2 试验结果分析与讨论

我们采用千斤顶手动缓慢对 FRP 混凝土梁进行分级加载，待力传感器读数稳定一定时间后，开始记录荷载、引伸计（梁的下侧）、光纤光栅波长数据。试验如图 4-25 所示。

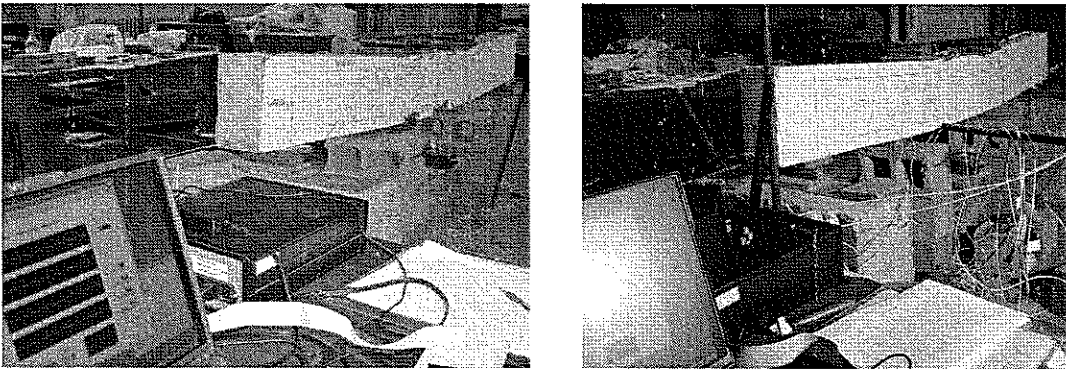


图 4-25 FRP-混凝土梁加载试验照片

Figure 4-25 Pictures of FRP-concrete beam under loading

4.6.2.1 单 FRP-OFBG 筋在 FRP 混凝土梁中试验结果（1～11 根梁）

a. 埋入 **CFRP-OFBG** 筋的 **FRP** 混凝土梁试验结果 C30W-A 梁中的单根 CFRP-OFBG 筋上有两根光栅，位置分别在加载点和跨中，其荷载与应变关系如图 5-26 所示。由于加载步长过大，裂缝开展过快导致光栅在第 6 级，即在 25kN

时突然没有信号,可能是筋中出现了集中变形,传输光缆被拉断,因此数据记录不太完整,此时 CFRP-OFBG 筋拉应变达到 $6170\mu\epsilon$ 。由于该梁属于脆断,极限荷载为 70kN。跨中 CFRP 筋的变形与外层混凝土的变形在初始阶段吻合较好,表明他们协同变形,但是后来裂缝出现后,它们的差异逐渐明显,且 CFRP-OFBG 筋的应变明显大于混凝土,这是由于其他部位的裂纹将混凝土的整体变形平衡掉了,跨中的引伸计测得混凝土局部的平均应变,而 CFRP-OFBG 筋处于弹性阶段,感应到 FBG 处的局部应变,因此 CFRP-OFBG 筋的应变大于混凝土的应变。加载点光栅与跨中光栅在初始的弹性段基本一致,但是后来出现明显偏差,这可能是裂缝开始在跨中发展的缘故。

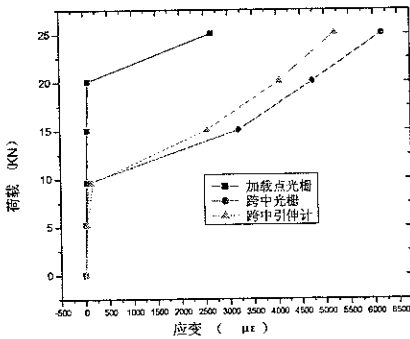


图 4-26 C30W-A 梁的荷载与应变关系
Figure 4-26 Load-strain relationship of C30W-A

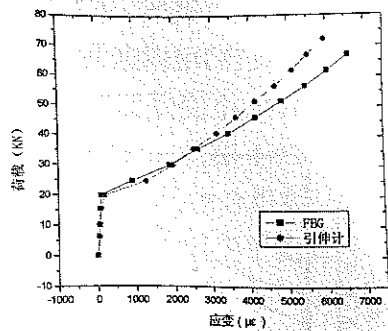


图 4-27 C30W-C 梁的荷载与应变关系
Figure 4-27 Load-strain relationship of C30W-C

C30W-C 梁中的 CFRP-OFBG 筋中光栅在跨中,其变形情况与 C30W-A 基本一致,属于脆断,荷载与应变关系如图 4-27。同样,初始阶段 CFRP-OFBG 筋与混凝土协同工作,因此两者的变形吻合很好,但是裂缝出现后,CFRP-OFBG 筋的变形大于混凝土的变形。在 70kN 荷载时,裂缝已经很大,光栅突然没有信号,说明传输光缆出现了问题,此时 CFRP-OFBG 筋达到 $6590\mu\epsilon$ 。

C30W-B 梁中的单根 CFRP-FBG 筋中布置了 3 个光栅,分别在跨中、加载点和支座位置,其荷载与应变关系如图 4-28 所示。为了研究 CFRP-OFBG 筋应变传感的重复性,我们对该梁进行了循环加载,即在 5~25kN 循环了一次。从图中可以看出,支座处的光栅没有感应到应变,这与实际情况完全吻合。跨中的光栅与引伸计结果的对比图 4-29 表明,在初始变形时,CFRP-OFBG 筋与混凝土协同变形,因此它们的变形一致,随着混凝土裂纹的萌生与扩展,CFRP-OFBG 筋与混凝土应变出现较大差异,且 CFRP-OFBG 筋的应变明显大于

混凝土，其原因的分析与上面的一样，即其他部位的裂纹将混凝土的整体变形平衡掉了，跨中的引伸计获得其局部的平均应变，而 CFRP-OFBG 筋处于弹性阶，FBG 感应到局部应变，因此 CFRP-OFBG 筋的应变大于混凝土的应变。荷载达到 50kN 时，梁体发出“砰”的一声，我们分析可能是出现了 CFRP-OFBG 筋与混凝土的滑移现象。图 4-29 和 30 充分说明了这一点，即在 50kN 时，我们可以清楚从 CFRP-OFBG 筋上发现应变回弹现象，而引伸计测试结果却不明显，这是 CFRP-OFBG 传感筋的一大优点。图 4-30 表明，梁 1/3 处与跨中的 FBG 的变化趋势完全一致，出现差别是由于梁跨中的应变大于支座处的缘故。从循环加载上来看，CFRP-OFBG 筋的重复性很好，没有完全重合是由于梁体已经处于塑性段。从加载到破坏，C30W-B 梁中的 CFRP-OFBG 筋中的三个光栅一直非常稳定，表明它们可以监测 CFRP-OFBG 筋的整个变形过程，在该梁中的极限应变为 $8305\mu\varepsilon$ 。

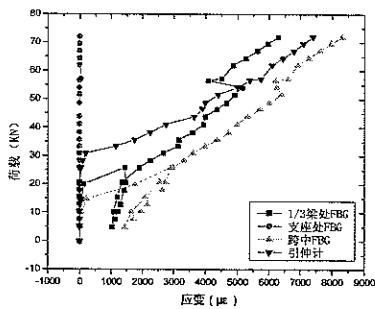


图 4-28 C30W-B 梁荷载与应变关系
Figure 4-28 Load-strain relationship of C30W-B

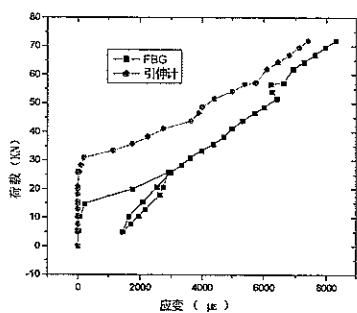


图 4-29 C30W-B 梁引伸计与 FBG 结果对比
Figure 4-29 Comparison between extensometer and FBG on beam C30W-B

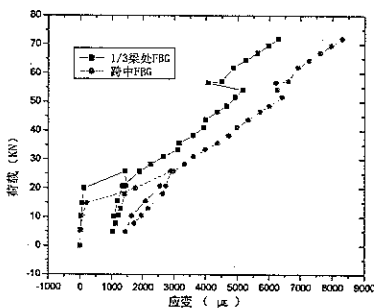


图 4-30 C30W-B 梁 1/3 与跨中光栅应变对比
Figure 4-30 Comparison between 1/3 span and mid-span strain of C30W-B

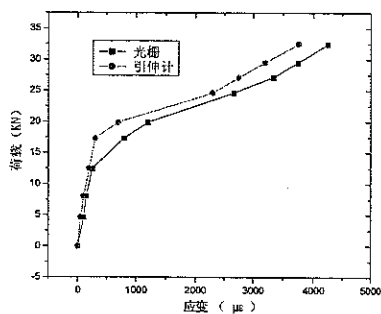


图 4-31 C40W-A 梁的荷载与应变关系
Figure 4-31 Load-strain relationship of C40W-C

C40W-A 梁中的 CFRP-OFBG 筋上有一根光栅，置于跨中，其荷载与应变关系测试结果如图 4-31。其变形分析与 C30W-C 梁一样，引伸计和光栅在初始段吻合，后面由于混凝土开裂，所以光栅的监测结果高于引伸计。同样，由于加载步长过大，在 35kN 时，光栅突然没有信号，此时 CFRP-OFBG 筋的应变为 4245 $\mu\epsilon$ 。

上面四根梁的受力筋全部是 CFRP 筋，以下 3 根梁是 CFRP+钢筋。

CS40W-A 和 CS40W-B 的梁中均只布置了一根 CFRP-OFBG 筋，其光栅位置也都在跨中。这两根 CFRP-OFBG 筋中的光栅始终完好，全过程监测了梁的变形，其结果如图 4-32 和 4-33 所示。从图 4-32 可以看出，在初始的弹性阶段，两者吻合较好，后来出现很大偏差，CFRP-OFBG 大于引伸计，但后来，引伸计读数突然变大，这是由于有裂缝穿过跨中。从该图可以看出，在 80kN 左右，出现了滑移现象，这与观察结果完全吻合。光栅最后的读数变小，是因为梁断裂后 CFRP-OFBG 筋回弹所致，光栅最大的应变为 6550 $\mu\epsilon$ 。从图 4-33 可以看出，CFRP-OFBG 与混凝土引伸计读数在出现滑移现象前，一直吻合很好，但是滑移出现后，由于引伸计的附近出现较大裂缝，将引伸计处的应变平衡掉了，因此引伸计读数变小。这两点分析符合图 4-34 的混凝土梁破坏形式。而 CFRP-OFBG 筋经过两次严重的滑移现象，混凝土完全退出工作后，由其 CFRP-OFBG 筋和钢筋直接承受全部荷载，直到梁体断裂，最大的应变为 5600 $\mu\epsilon$ 。

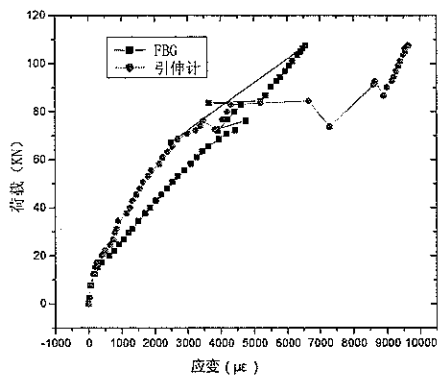


图 4-32 CS40W-A 梁的荷载与应变关系
Figure 4-32 Load-strain relationship of CS30W-A

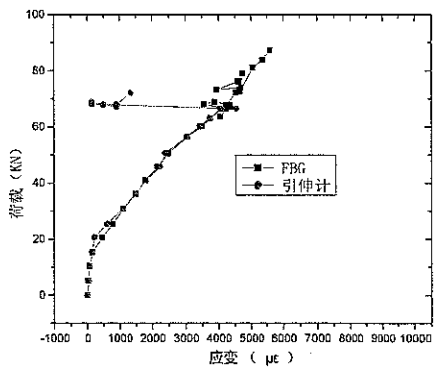
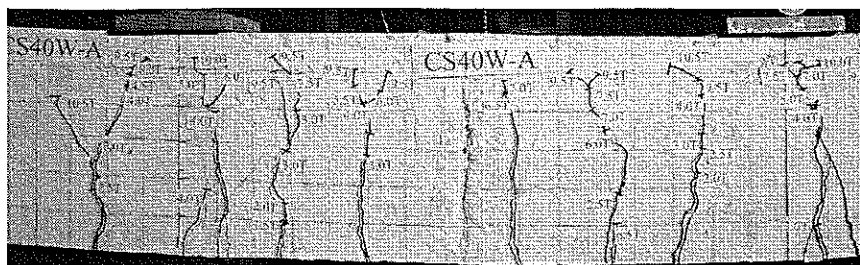
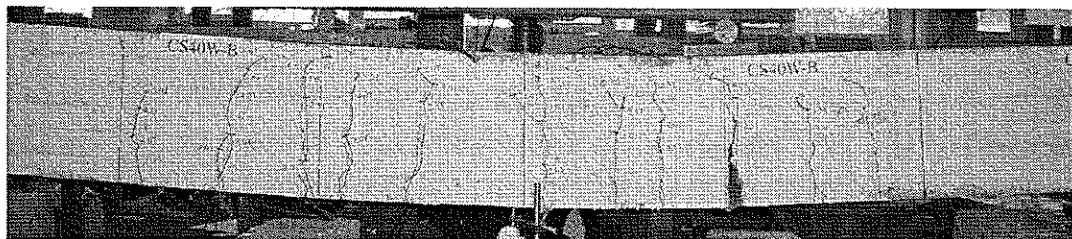


图 4-33 CS40W-B 梁的荷载与应变关系
Figure 4-33 Load-strain relationship of CS30W-B



(a)



(b)

图 4-34 CS40W-A 和 CS40W-B 梁体破坏形式

Figure 4-34 Failure modes of beams CS40W-A and CS40W-B

CS30W-B 梁上布置了三个光栅，位置为跨中、1/3 梁和支座处，它们都保持到良好的工作状态，直到梁体完全破坏，其测试结果如图 4-35 所示。该梁属于脆性断裂，没有出现滑移现象，图 4-36 很好地说明了这点。支座处光栅的测试结果始终保持不变，这与实际情况完全吻合。跨中光栅与引伸计的吻合与差异完全吻合上述分析的情况。图 4-36 是跨中光栅与 1/3 梁处光栅的测试结果比较，与前面分析的一致，其最大的测试应变为 4200 和 2400 $\mu\epsilon$ 。

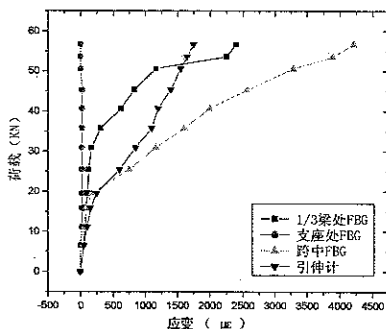


图 4-35 CS30W-B 梁的荷载与应变关系

Figure 4-35 Load-strain relationship of CS30W-B

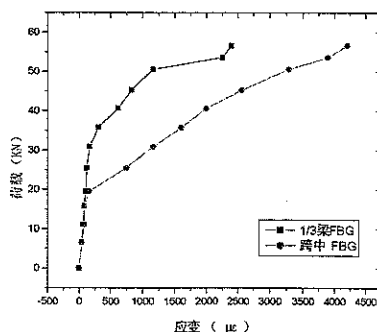


图 4-36 CS30W-B 梁 1/3 与跨中光栅对比

Figure 4-36 Comparison between 1/3 span and mid-span strain of beam CS30W-B

b. 埋入 GFRP-OFBG 筋的 FRP 混凝土梁试验结果 以下四根梁的受力筋全为 GFRP 筋。G30W-A、G40W-A 和 G40W-C 梁等 3 根梁中分别布设 1 根单光栅 GFRP-OFBG 筋，光栅位置在梁的跨中。而 G40W-B 梁中布设一根 3 光栅 GFRP-OFBG 筋，位置分别为支座、跨中和 1/3 梁处。除 G40W-A 梁中光栅达到 $10040\mu\epsilon$ 突然失效外，其余光栅的工作状态都很好，监测了 GFRP 混凝土梁的整个变形过程。为了验证 GFRP-OFBG 筋的重复工作能力，我们对 G30W-A 和 G40W-B 梁进行了循环加载。

图 4-37~39 分别为 G30W-A、G40W-A 和 G40W-C 梁的试验结果，它们很好地反映了梁的静载变形过程。图 4-37 表明，在 20kN 以内，FBG 和引伸计的测试结果变化趋势一致，并吻合很好，说明混凝土与 GFRP 筋协同变形很好，随后，FBG 的应变大于引伸计，并一直持续到梁体失效。这说明混凝土裂纹已经出现，这与实际观察结果完全吻合。在 30kN 荷载循环荷载下，两者吻合也较好，说明传感器的重复性很好。在 70kN 左右，从图上可以看出光栅应变出现跳动，说明可能出现了轻微的滑移现象，试验观测结果的确如此，而引伸计却没有明显的现象，这充分说明了 GFRP-OFBG 传感筋的优越性。G30W-A 中光栅的最大应变为 $12200\mu\epsilon$ ，在如此大的变形下，还能保持良好的工作状态，这是一般应变传感器，如电阻应变片、振弦传感器等，无法比拟的，这是由于 GFRP 对光纤光栅来说是一种很好的保护措施，充分发挥了光纤光栅的应变传感特性。图 4-38 和 4-39 也很好说明了 GFRP-OFBG 传感筋的优越传感特性。图 4-38 和 4-39 的初始变形阶段与混凝土开裂后的变形阶段具有很好的线性特性。G40W-A 梁中的光栅应变达到 $10040\mu\epsilon$ 时突然失效，可能是传输光缆出现问题，因此图 4-38 出现引伸计读数超过光栅应变的现象。图 4-38 还可以看出，CFRP-OFBG 筋与混凝土可能出现轻微的滑移，这与实际观测结果吻合。其光栅最大变形为 $8900\mu\epsilon$ 。三根梁的破坏形式如图 4-41。

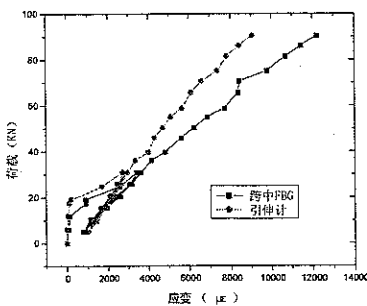


图 4-37 G30W-A 梁的荷载与应变关系
Fig. 4-37 Load-strain relationship of G30W-B

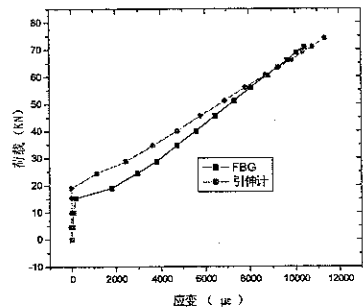


图 4-38 G40W-A 梁的荷载与应变关系
Fig. 4-38 Load-strain relationship of C40W-A

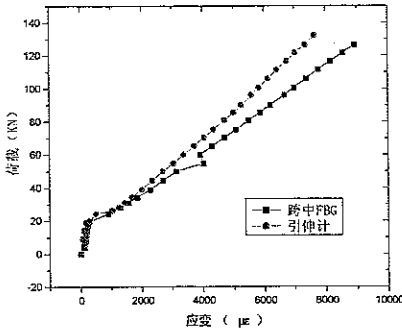


图 4-39 G40W-C 梁的荷载与应变关系
Figure 4-39 Load-strain relationship of G40W-C

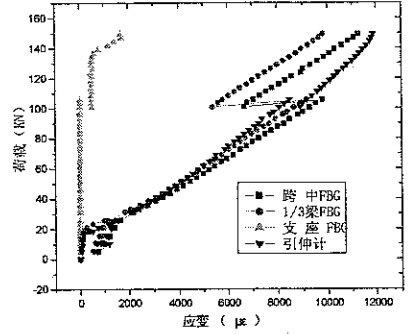


图 4-40 G40W-B 梁的荷载与应变关系
Figure 4-40 Load-strain relationship of G40W-B

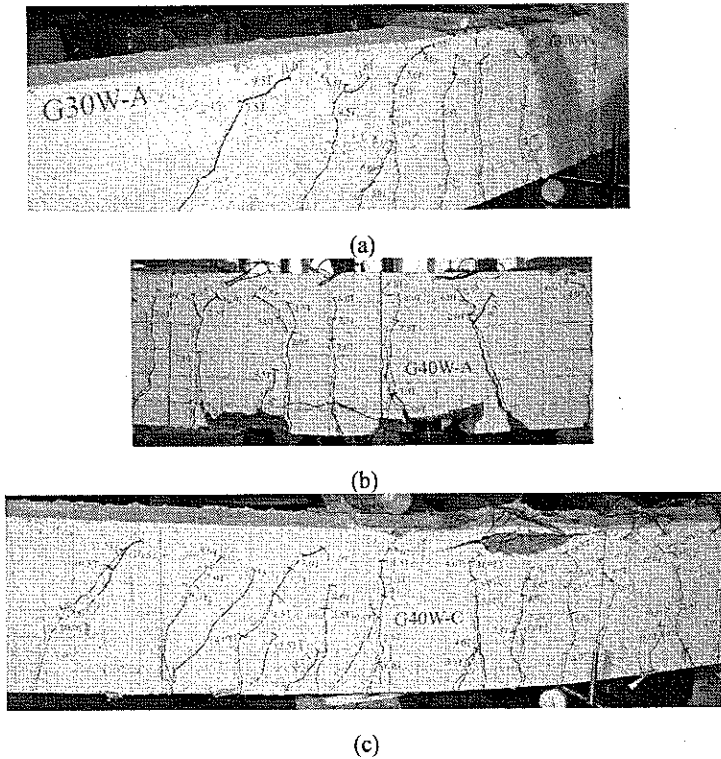


图 4-41 G30W-A、G40W-A 和 G40W-C 梁的破坏形式
Figure 4-41 Failure modes of beams G30W-A, G40W-A and G40W-C

图 4-40 为 G40W-B 梁的变形过程测试结果。图中可以看出，GFRP 筋与混凝土出现较大的滑移。支座处光栅在 100kN 以下，保持不变，此后突然出现跳动，说明支座出现轻微的滑动，使其进入受力区，这点正好是 GFRP 筋与混凝土

土发生滑移的荷载点, 实际观测证实了这一点。从跨中光栅与引伸计的对比结果图 4-41 可以看出, 荷载在 40kN 以下的单向加载和循环加载, 光栅测试结果与引伸计吻合较好, 说明 GFRP 筋与混凝土协同工作良好, 跨中没有大的裂纹出现, 这与实际观察结果吻合。当滑移出现后, 即荷载大于 100kN 后, 引伸计的应变量大于光栅, 这是由于 GFRP 筋的应变已经重新分布, 跨中的应变变小, 而混凝土的应变是标距范围的平均应变, 如有裂纹出现在这区域时引伸计结果会变大。这与破坏形式图 4-44 完全吻合。从跨中和 1/3 梁的 FBG 测试结果对比图 4-43 可以看出, 它们都能监测混凝土和 GFRP 的滑移现象。两者的变形趋势完全相同, 而跨中 FBG 的测试应变要大于 1/3 梁处 FBG 的结果, 这符合跨中应变较大的实际情况。梁体破坏时, 它们的最大应变分别为 $11270\mu\epsilon$ 和 $10800\mu\epsilon$ 。

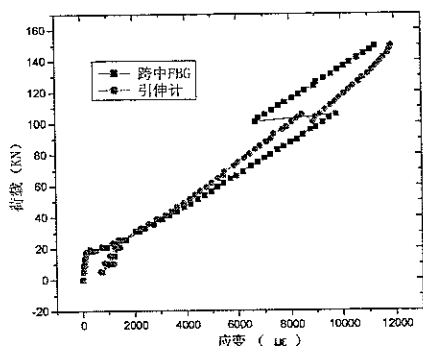


图 4-42 G40W-B 梁跨中 FBG 与引伸计对比
Figure 4-42 Comparison between FBG and extensometer in mid-span

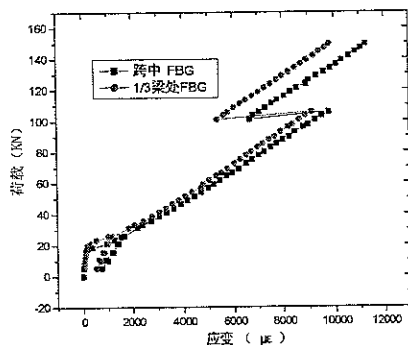


图 4-43 G40W-B 梁跨中和 1/3 梁 FBG 对比
Figure 4-43 Comparison between 1/3 span and mid-span FBGs strain of G40W-B

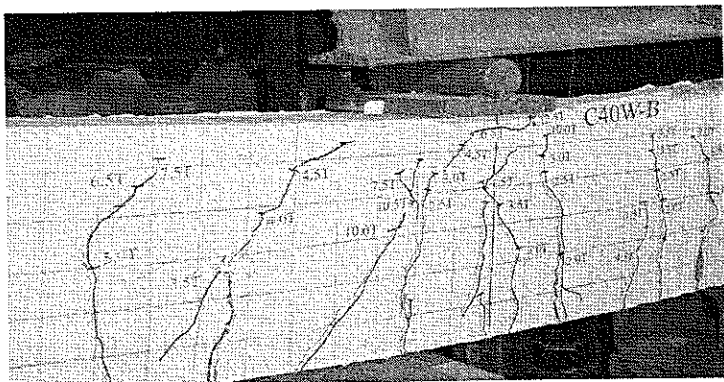


图 4-44 G40W-B 梁体破坏形式
Figure 4-44 Failure modes of beam G40W-B

4.6.2.2 多种 FBG 传感器在 FRP 钢筋混凝土梁中试验结果 (第 12 根梁)

为了集中对比,我们在第 12 根梁上布置了 10 个光纤光栅,其名称与位置如表 4-4 所示。该梁在静载下的应变分布如图 4-45 所示。除 4# 有肋 GFRP-OFBG 传感器和 8# 裸光栅在荷载 50kN 下突然没有信号外,其余全部工作到梁体破坏。

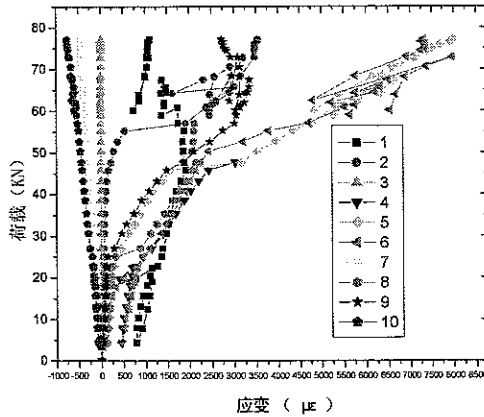


图 4-45 第 12 根梁中静载下的应变分布关系

Figure 4-45 Load-strain relationship of the 12th beam

图 4-45 完整地揭示了 FRP 钢筋混凝土梁在静载下的支座处、跨中、力作用点处 (1/3 梁处)、受压区等处的应变历程,说明利用我们开发的光纤光栅传感器完全可以解决混凝土内部的应变监测问题。

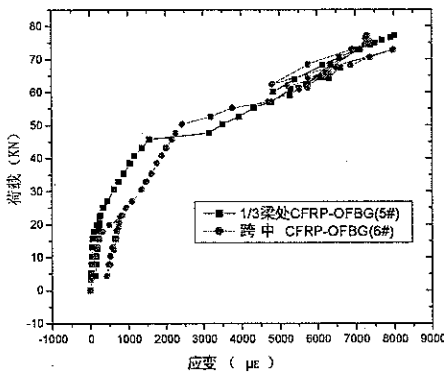


图 4-46 5#和 6#FBG 结果对比

Figure 4-46 Comparison between FBG 5# and FBG 6#

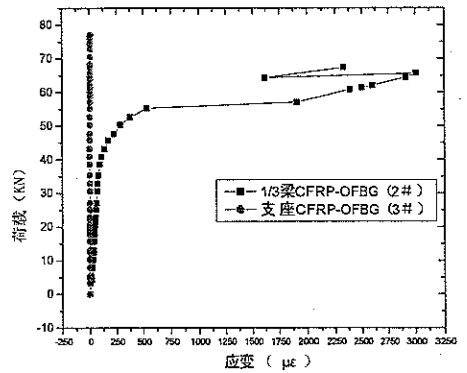


图 4-47 2#和 3#FBG 测试结果对比

Figure 4-47 Comparison between FBG 2# and FBG 3#

从图 4-46 中的 CFRP-OFBG 筋中的 1/3 梁处 5#FBG 和跨中 6#FBG 结果

对比可以看出,两者的变化趋势规律基本一致,在 45kN 以下时,跨中 6# 光栅比 1/3 梁处 5# 光栅的变形大,但是在 45kN 以后,5# FBG 反而更大,这是由于在 1/3 梁处出现一条较大的裂缝,裂缝扩展拉动光栅所致。这符合观察结果,图 4-54 的变形破坏图也很好地说明了该现象。该图同样说明了 CFRP-OFBG 筋具有很好地重复变形能力,在 60kN 左右,监测 CFRP 与混凝土滑移的能力。

从图 4-47 中 CFRP-OFBG 筋中的 1/3 梁处 2# FBG 和支座 3# FBG 结果可以看出,支座处的 3# 光纤光栅没有监测到变形信息,这完全符合支座处没有变形的实际情况,而 1/3 梁处的 2# FBG 较好地反映了梁的变形过程。2# FBG 在 55kN 处出现应变跳跃增大现象,说明该处可能出现了大的裂纹,这与实际情况一致,破坏图 4-54 很好地说明了该问题。它同样监测到了荷载在 60kN 左右的滑移现象。它们监测到的最大应变分别为 $8050\mu\epsilon$ 和 $7955\mu\epsilon$ 。

图 4-48 为相近位置 1# 管式封装光栅、4# 有肋 GFRP-OFBG 应变传感器、8# 钢筋上的裸光栅、9# 无肋 GFRP-OFBG 应变传感器的测试结果。该图很好的解释了在混凝土开裂前 (25kN 以前) 各传感器测试的结果基本一致,并具有很好的循环变形重复性,但是裂纹出现后,由于裂缝分布的随机性导致即便比较靠近的传感器应变也不一样。除 4# 有肋 GFRP-OFBG 应变传感器因为突然破坏外,其余传感器都监测到了一定的滑移现象,由于传感器长短不一,出现位置也各不一样。它们测试到的最大应变分别为: $1915\mu\epsilon$ 、 $3035\mu\epsilon$ 、 $2160\mu\epsilon$ 和 $3355\mu\epsilon$ 。

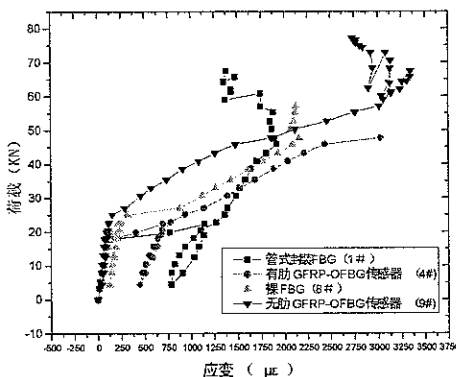


图 4-48 相近位置 1#、4#、8#
和 9# FBG 测试结果对比
Figure 4-48 Comparison between
FBG 1#, 4#, 8# and 9#

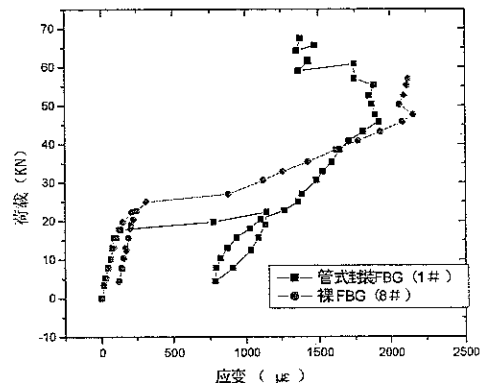


图 4-49 紧靠位置 1# FBG 和 8# 裸光栅对比
Figure 4-49 Comparison between FBG 1#
and FBG 8#

图 4-49 为紧靠位置 1# 管式封装 FBG 和裸光栅 (8#) 的对比结果。1# 管式封装光栅测试的是混凝土的应变, 而 8# 直接粘贴在钢筋上, 它测试的是钢筋的应变。在 20kN 以下, 两者的测试结果吻合很好, 表明梁体处于弹性变形阶段, 钢筋与混凝土协同变形。超过 20kN 时, 我们观察到混凝土表面出现裂纹, 而图 4-49 也表明随后两者的测试结果出现偏离, 因此随后的循环加载两者自然偏离很大。在随后的循环 (5~25kN) 荷载下, 由于钢筋基本为弹性段, 8# 裸光栅测试的应变线性度很好, 并基本重合, 而混凝土已经开裂, 因此 1# FBG 的应变不可能重合。混凝土开裂后, 1# 光栅开始结果大于 8# 光栅, 这是由于毛细裂纹张拉管式封装 FBG 传感器, 使其整体的平均应变变大。随着附近裂纹的扩展, 管式封装 FBG 传感器应变变小, 可能是管式封装应变传感器与混凝土产生了滑移。

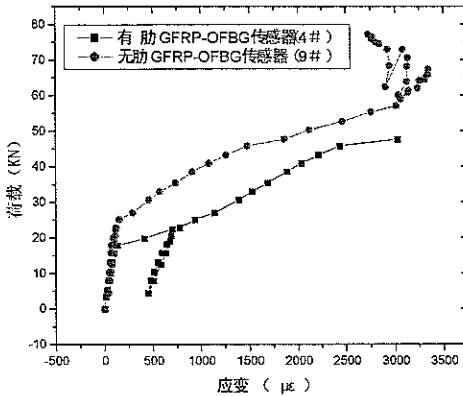


图 4-50 同位置 4# 和 9# 传感器对比
Figure 4-50 Comparison between FBG4#
and FBG 9#

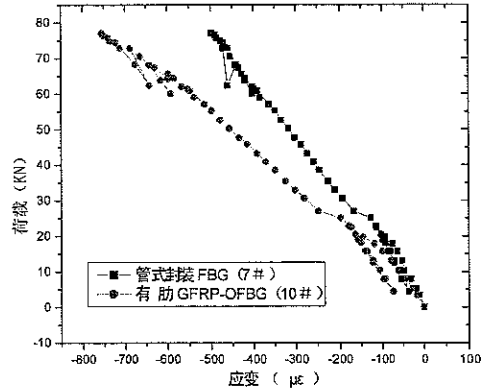


图 4-51 同位置 7# 和 10# FBG 传感器比较
Figure 4-51 Comparison between FBG7#
and FBG10#

从图 4-50 可以看出, 弹性段时, 有/无肋 GFRP-OFBG 传感器结果吻合较好, 而混凝土开裂后, 两者差异十分明显, 这里是因为无肋 GFRP-OFBG 传感器与混凝土粘结较差, 不能完全与混凝土共同工作, 其工作状态介于理想粘结和完全不粘结之间, 所以其测试结果小于有肋 GFRP-OFBG 传感器。到 60kN 以后, 无肋 GFRP-OFBG 传感器与混凝土基本粘结基本保持不变, 所以应变不随荷载变化而变化, 随荷载继续增加出现滑移现象, 其最大应变为 $3355\mu\epsilon$ 。有肋 GFRP-OFBG 传感器很好地反应了混凝土的变形过程, 在 50kN 左右, 突然断裂, 应变测试值达到 $3205\mu\epsilon$ 。

图 4-51 为梁体跨中受压区相近位置 7# 管式封装 FBG 和 10# 有肋 GFRP-OFBG 传感器比较结果。从图可以发现，两者的变形趋势完全一致，具有很好的重复性，反应了梁体的受压区特性，其最大的受压应变分别为 $755\mu\epsilon$ 和 $500\mu\epsilon$ ，离混凝土的极限应变 ($3000\mu\epsilon$ 左右) 有很大差距，因此该梁的受压区高度较小，这与实际情况一致。两者存在一定数值上的偏差主要原因是它们梁体中的高度位置不一样造成的。

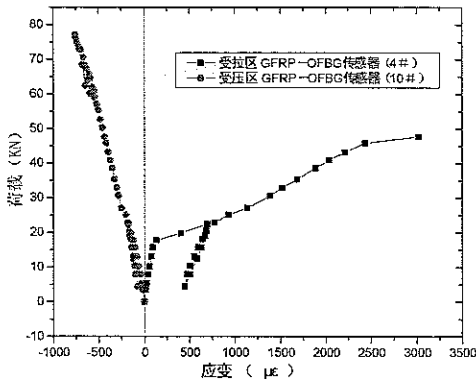


图 4-52 受拉 (4#) / 受压区 (10#) GFRP-OFBG 传感器对比

Figure 4-52 Comparison between 4# and 10# GFRP-OFBG sensors

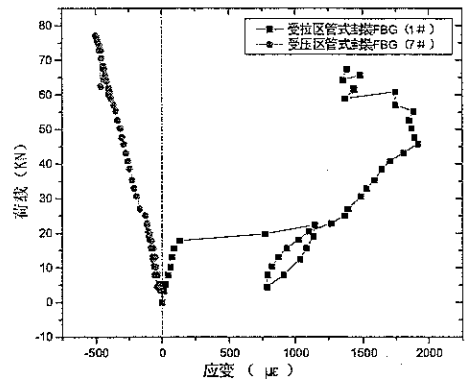


图 4-53 受拉 1# 管式封装 FBG 与受压区 7# 管式封装 FBG 对比

Figure 4-53 Comparison between 1# and 7# steel capillary tube-packaged sensors

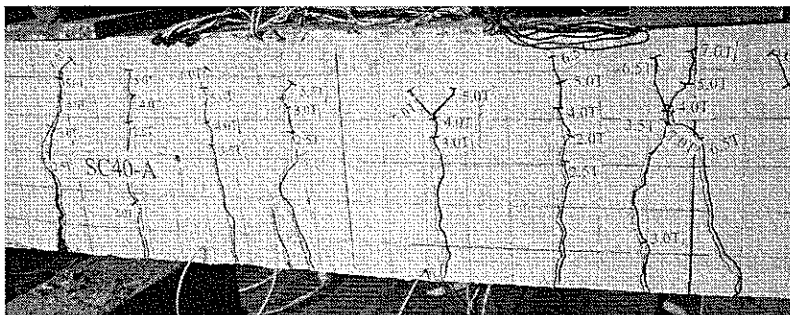


图 4-54 多传感器布设梁的破坏形式

Figure 4-54 Failure modes of beam with multi-sensors

从图 4-52 和 4-53 受拉和受压的传感器测试结果来看，开裂前，弹性段测试的结果受压和受拉测试结果几乎相等，表明该梁的变形符合平截面假定，从这两图中可以清楚地看出该梁的受压区高度很小，这与梁体的破坏形式照片图 4-54 完全吻合。这两图的变形形式基本一致，符合梁体的变形过程分析，表明

管式封装传感器和有肋 GFRP-OFBG 传感器是理想的混凝土内部应变传感器,具有很好的应用前景。

上面的试验结果与分析很好地解释了 FRP 混凝土梁静载试验的现象过程,归纳起来:

1) FRP-OFBG 监测 FRP 筋与混凝土的滑移

从图 4-30、4-32、4-33、4-40、4-42、4-43、4-46 等发生滑移的 FRP 混凝土梁的监测曲线来看,FRP-OFBG 可以全过程地监测梁体的变形和 FRP 筋本身的变形,清楚地监测到 FRP 筋与混凝土的滑移现象,这是由于 FRP 筋中的光栅能方便监测到 $10000\mu\epsilon$ 以上的变形量。这弥补了传统设计理论难以考虑滑移问题的不足,为结构试验提供新的测试手段,同时也为 FRP 筋在结构中的应用打下了坚实的基础。

2) 本实验中用到的 FBG 传感器测试结果对比

本试验中用到了 FRP-OFBG 筋、FRP-OFBG 传感器、管式封装应变传感器、裸光栅等光纤光栅传感器。从图 4-30 的 CFRP-OFBG 监测结果和图 4-40 的 GFRP-OFBG 监测结果来看,它们都能监测梁体的变形全过程,说明它们都是集受力与传感于一体的理想传感筋。从有肋 GFRP-OFBG 传感器和无肋 GFRP-OFBG 传感器的监测结果比较图 4-50 可以看出,有肋 GFRP-OFBG 传感器与混凝土的粘结更好,说明我们工程应用时必须对 FRP-OFBG 筋加肋。从管式封装应变传感器和有肋 GFRP-OFBG 传感器的监测结果对比图 4-51 可知,两者温和较好,都能充分监测混凝土的内部变形,说明它们都是理想的混凝土内部变形监测传感元件。从布设在混凝土内部的管式封装应变传感器和直接粘贴在钢筋表面的裸光栅监测结果对比图 4-49 可以看出,两者都是可行的监测手段,其监测结果可以方便判断混凝土与钢筋的协同工作状况。

3) FRP 混凝土梁上的应变分布

由于布设在 FRP 混凝土梁中不同位置的 FBG 传感器都能很好地工作,因此它们的监测结果可以揭示梁体在荷载作用下的应变历程与分布状况,为研究 FRP 混凝土梁的变形过程提供了详实的数据来源。图 4-45 中各不同位置 FBG 的监测结果充分地说明了这一点:支座处的光栅几乎没有感受到应变;跨中光栅和 $1/3$ 梁处光栅很好揭示了梁体的拉、压变形过程。

4.6.3 混凝土梁破坏后 FRP-OFBG 筋的 SEM 分析

为了进一步确证 FBG 和 FRP 的协同变形能力,我们将 FRP 混凝土梁破坏后 FRP-OFBG 筋的取样进行 SEM 分析,主要分析其界面的破坏情况。对梁体

开裂处和非开裂处分别取样，SEM 扫描结果如图 4-55~4-58 所示。

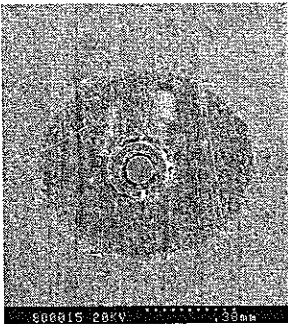
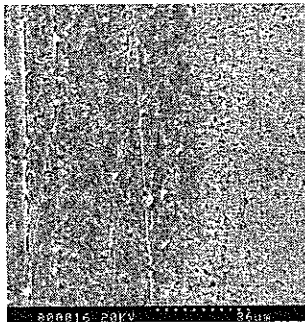


图 4-55 CFRP-OFBG 筋变形到破坏的保护层与 FRP 的界面 SEM 图（非开裂处）

图 4-56 CFRP-OFBG 筋变形到破坏的保护层与 FRP 的界面 SEM 图（非开裂处）

Figure 4-55 SEM of interface between CFRP-OFBG surface and FRP (uncracked)

Figure 4-56 SEM of interface between CFRP-OFBG surface and FRP (uncracked)

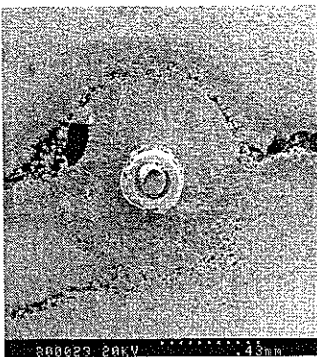


图 4-57 GFRP-OFBG 筋变形到破坏的保护层与 FRP 的界面 SEM 图（开裂处）

图 4-58 GFRP-OFBG 筋变形到破坏的保护层与 FRP 的界面 SEM 图（开裂处）

Figure 4-57 SEM of interface between GFRP-OFBG surface and FRP (cracked)

Figure 4-58 SEM of interface between GFRP-OFBG surface and FRP (cracked)

从 SEM 扫描图可以看出，非开裂处的 FBG 保护层界面与 CFRP 界面复合得很好，不可能出现应变传递误差问题。从开裂处的试件来看，即便 GFRP 已经裂开，它们的界面仍粘合很好，表明它们没有滑移出现，这进一步说明了 FRP-OFBG 筋自身不存在应变传递失效的问题，这也是 FRP-OFBG 筋能够进行 FRP 混凝土梁全过程监测的基本保证。

4.7 本章小结

本章研究制备了 FRP-OFBG 智能筋, 并对其力学特性、应变和温度传感特性以及微观 SEM 扫描进行了研究与分析。通过 12 根分别布设单光栅(多光栅) FRP-OFBG 筋、FRP-OFBG 传感器、管式封装 FBG 应变传感器、裸光栅等传感器的 FRP 混凝土梁试验, 对 FRP-OFBG 筋的传感特性进行了充分研究。这些研究结果表明:

1) 由于 FBG 外径很小, 因此基本不改变 FRP 筋的力学性能。

2) FRP-OFBG 中的光栅与 FRP 复合得很好, 不存在应变传递失效问题, 即与裸光纤光栅的应变传感一致, 达到 $1\sim 2\mu\epsilon$ 的测试精度, 最大应变可达 $1200\mu\epsilon$ 左右。但是由于 FRP 材料的影响, 温度传感特性与裸光纤光栅相差较大, 其中 GFRP-OFBG 具有增敏效应, 而 CFRP-OFBG 具有减敏效应。

3) FRP-OFBG 筋是兼具受力与传感特性的理想结构材料, 它可以全过程监测结构的变形过程, 不仅可以全过程监测 FRP 筋的变形, 而且可以方便监测混凝土与 FRP 筋的滑移现象。由于 FRP 自身的耐久性很好, 因此它是结构健康监测的理想传感元件。

4) 有肋 FRP-OFBG 传感器与混凝土粘结很好, 是一种理想的混凝土内部应变监测手段。

5) 管式封装应变传感器是一种理想的应变传感元件。

由于光纤光栅与 FRP 具有天然的相容性, 不会改变 FRP 的基本特性。这样, FRP-OFBG 传感筋兼有 FRP 的优良力学性能和抗腐蚀特性以及光纤光栅的智能传感特性。此外, 它本身就是光纤光栅的一种封装方式, 彻底克服了光纤光栅脆弱、布设困难的缺点, 大大提高了光纤光栅的耐久性。这样, 我们可以方便地监测 FRP 筋的力学特性, 从而把握基于 FRP 筋的相应结构性态, 还可以将其作为测试其他结构的传感器。根据用户的需要, FRP-OFBG 传感筋可以加工成工程需要的任意尺寸, 十分适于工业化生产。因此, FRP-OFBG 传感筋必将象 FRP 迅猛发展一样, 在结构健康监测领域得到广泛的应用。

第5章 光纤光栅应变传感的界面传递特性 与误差修正

5.1 引言

由于光纤光栅本身很纤细,粘贴或埋入结构中不会影响基体材料的基本力学性能。光纤光栅布设到结构上后,传感部分通常由光栅、保护层、封装材料层、粘贴层和基体材料等组成,光纤光栅理想的监测结果是传感器测量的应变信号与基体结构的应变完全相等。然而,由于保护层、封装层和粘贴层等在应变传递过程中要吸收一部分能量,因此光纤光栅所测得的应变与基体结构的实际应变是不相等的。光纤光栅应变传感的准确程度取决于光栅、保护层、封装材料层和粘贴层等以及基体材料的物理力学性质,即取决于光纤光栅应变传感的界面传递特性。光纤光栅应变传感的界面传递特性是正确使用光纤光栅应变传感器的指南,是研究开发适于结构工程的高质量光纤传感器的依据与保证,同时也是开发类似智能传感器的重要理论基础。因此,深入展开光纤光栅应变传感的界面传递特性研究意义重大。

对光纤传感器的界面传递特性研究其实早已引起了相关学者的重视,并得到了一些有益的成果,如, Antonio Nanni^[147]1991年十分粗略地得到光纤传感器测试应变与混凝土应变关系为 $\varepsilon_{\text{光纤}} = \varepsilon_{\text{混凝土}} * 2E_{\text{保护层}} / (E_{\text{混凝土}} + E_{\text{保护层}})$; Ansari^[148]和 Duck^[149]等人也给出了相应的光纤传感力学模型,但是没有考虑粘贴层厚度、封装材料的影响,不便于分析光纤传感器的封装、布设工艺等问题。Lau^[150]等人给出的光纤传感模型尽管考虑了粘贴层的影响,但是没有考虑光纤较长时基体材料几何性质的影响,没有针对光栅的实际应用情况加以讨论,因此也不能很好地用来解决诸如保护层、封装、胶粘剂影响等问题。

针对光纤传感的一般情况,即有保护层光纤通过胶粘剂埋入或粘贴于结构表面的应变传感问题进行分析,研究其应变传感界面传递公式;然后考虑多层应变传感的界面传递情况,分析其通用公式;针对光纤光栅在结构中的实际应用情况,如裸光栅直接粘贴于结构表面或埋入结构内部、管式封装光纤光栅埋入或粘贴于结构、片式封装粘贴于结构表面、FRP-OFBG 传感器等展开讨论,研究其界面传递特性。对自行研究开发的 FRP-OFBG 传感器、光纤光栅管式封装和片式封装应变传感器等逐一展开讨论,研究其界面传递误差和修正系数。

5.2 光纤应变传感的界面传递特性

普通光纤应变传感器的构造一般包括光纤、保护层和粘贴层,根据不同的布设工艺要求,还可能增加其他的封装材料层,各层对应变传感的影响是不同的。而光纤光栅与普通光纤在力学结构上的最大区别是前者没有保护层,即光栅光纤是裸光纤。因此,以光纤应变传感器为例,研究应变传感的界面传递特性具有普遍意义,是其他类似应变传感器应用和设计的基础。

本节根据光纤应变传感器的两种布设方式(埋入式和表面粘贴式),分别研究它们的界面传递特性。

5.2.1 埋入式光纤应变传感的界面传递特性

5.2.1.1 圆柱体模型及其位移关系

首先以矩形截面梁为例,在光纤、保护层、粘贴层和基体材料的基本传感模式下进行光纤的应变传感特性的力学分析,如图 5-1 和 5-2 所示。其他的截面形状推导方式类似。

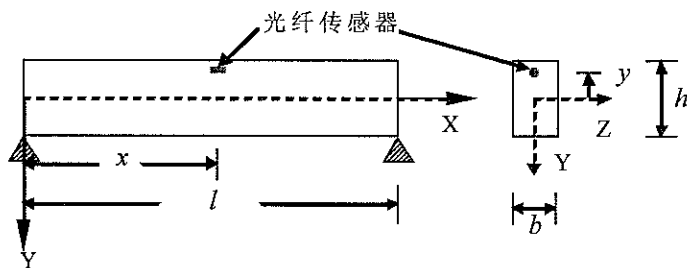


图 5-1 埋入光纤传感器的矩形截面梁

Figure 5-1 Rectangular beam with the embedded optical fiber sensor

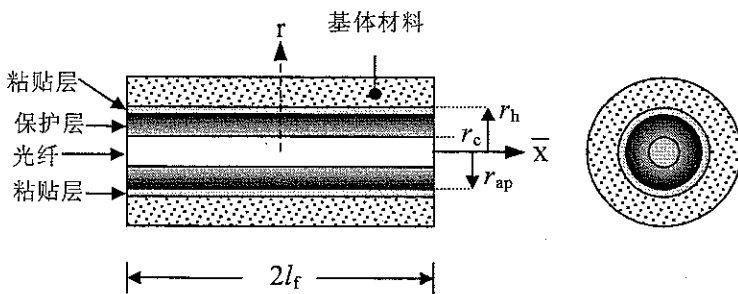


图 5-2 光纤应变传感圆柱体模型

Figure 5-2 Cylindrical model of optical fiber strain sensing

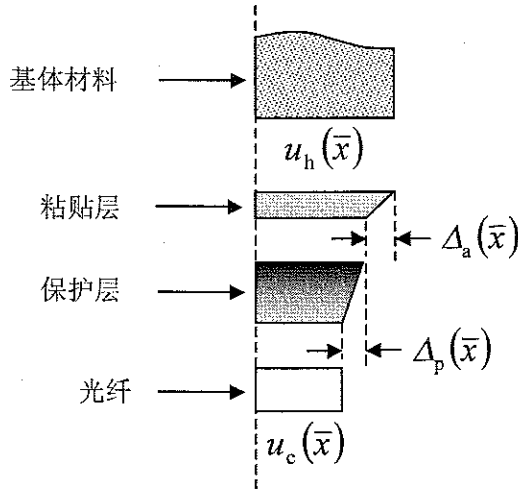


图 5-3 圆柱体模型位移关系

Figure 5-3 Relationship of deformation for cylindrical model

由于光纤包埋在基体材料中，并且是柱形轴对称的，因此取如图 5-2 所示的柱坐标。其中， $\bar{x}$ 为光纤轴向坐标， r 为径向坐标； r_h 是基体材料距光纤的距离(粘贴层外径)， r_c 和 r_{ap} 分别是光纤和保护层外径； $2l_f$ 是光纤有效工作长度。

我们引入基本假设：光纤、保护层、粘贴层和基体材料是线弹性各向同性体；所有粘结界面都是连续的，满足位移相容条件；不考虑温度效应。根据位移连续性假设，圆柱体模型中任意点处位移可表示为

$$u(\bar{x}) = \begin{cases} u_c(\bar{x}) & 0 \leq r \leq r_c \\ u_p(r, \bar{x}) & r_c \leq r \leq r_{ap} \\ u_a(r, \bar{x}) & r_{ap} \leq r \leq r_h \\ u_h(\bar{x}) & r_h \leq r \end{cases} \quad (5-1)$$

式中 $u_c(\bar{x})$ —— 光纤位移；
 $u_p(r, \bar{x})$ —— 保护层位移；
 $u_a(r, \bar{x})$ —— 粘贴层位移；
 $u_h(\bar{x})$ —— 基体材料位移。

粘接界面各点处位移相容条件：

$$\begin{cases} u_c(\bar{x}) = u_p(r_c, \bar{x}) & r = r_c \\ u_p(r_{ap}, \bar{x}) = u_a(r_{ap}, \bar{x}) & r = r_{ap} \\ u_a(r_h, \bar{x}) = u_h(\bar{x}) & r = r_h \end{cases} \quad (5-2)$$

由于保护层和粘贴层的存在,使得光纤位移 $u_c(\bar{x})$ 与基体材料位移 $u_h(\bar{x})$ 之间存在相对位移差,这是由保护层和粘贴层的剪切变形所致。如图 5-3 所示(由于对称性,仅给出四分之一图示),相对位移差可由下式给出:

$$u_h(\bar{x}) = \Delta_a(\bar{x}) + \Delta_p(\bar{x}) + u_c(\bar{x}) \quad (5-3)$$

$$\Delta_a(\bar{x}) = u_a(r_h, \bar{x}) - u_a(r_{ap}, \bar{x}) \quad (5-4)$$

$$\Delta_p(\bar{x}) = u_p(r_{ap}, \bar{x}) - u_p(r_c, \bar{x}) \quad (5-5)$$

当 $\bar{x} = 0$ 时,各层应变应该是相等的,即

$$\varepsilon_h(r, 0) = \varepsilon_a(r, 0) = \varepsilon_{ap}(r, 0) = \varepsilon_c(r, 0) \quad (5-6)$$

5.2.1.2 微元体平衡方程

1) 光纤微元体平衡关系 根据第 2.3.2 节论述的光纤对横向应力不敏感,我们忽略横向应力和剪应力的影响,只考虑纵向应力与纵向剪应力的作用。考虑任意一点 $\bar{x}$ 处光纤微元体轴向平衡,如图 5-4 所示,由 $\sum F_{\bar{x}} = 0$,

$$-\sigma_c(\bar{x})\pi r_c^2 + [\sigma_c(\bar{x}) + d\sigma_c(\bar{x})]\pi r_c^2 + \tau_{pc}(r_c, \bar{x})2\pi r_c d\bar{x} = 0$$

经整理可得

$$\frac{d\sigma_c(\bar{x})}{d\bar{x}} = -\frac{2\tau_{pc}(r_c, \bar{x})}{r_c} \quad (5-7)$$

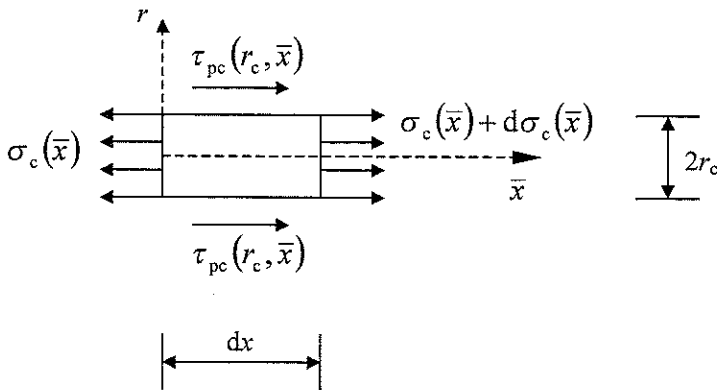


图 5-4 光纤微元体

Figure 5-4 Infinitesimal element of FBG

2) 保护层与粘贴层微元体平衡 图 5-5 为保护层微元体。根据变形协调,有近似关系^[151],

$$\tau(r, \bar{x}) = \frac{r_{ap}}{r} \tau_{ap}(r_{ap}, \bar{x}) \quad r_c \leq r \leq r_{ap} \quad (5-8)$$

$$\tau(r, \bar{x}) = \frac{r_{ap}}{r} \tau_{ap}(r_{ap}, \bar{x}) \quad r_{ap} \leq r \leq r_h \quad (5-9)$$

考虑 $\sum F_{\bar{x}} = 0$, 可得

$$\frac{d\sigma_p(\bar{x})}{d\bar{x}} = \frac{2[\tau_{pc}(r_c, \bar{x})r_c - \tau(r_{ap}, \bar{x})r_{ap}]}{r_{ap}^2 - r_c^2}$$

当 $r = r_c$ 时, 由式(5-8)有 $\tau_{pc}(r_c, \bar{x})r_c = \tau(r_{ap}, \bar{x})r_{ap}$, 从而上式变为 $\frac{d\sigma_p(\bar{x})}{d\bar{x}} = 0$, 即

$$\sigma_p(\bar{x}) = \text{constant} \quad (5-10)$$

同理, 对于粘贴层也有

$$\sigma_a(\bar{x}) = \text{constant} \quad (5-11)$$

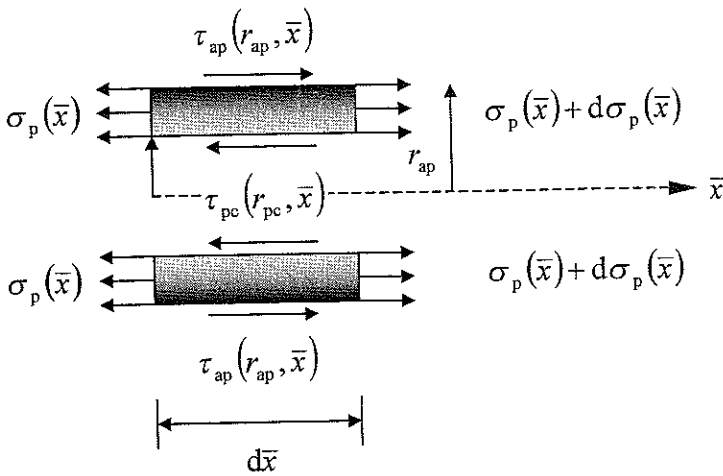


图 5-5 保护层微元体

Figure 5-5 Infinitesimal element of protective layer

3) 基体材料待测点处正应力与剪应力关系 若光纤的有效测试长度较小, 即基体材料的被测长度较短时, 我们可以认为

$$\sigma_h(\bar{x}) = \text{constant} \quad (5-12)$$

反之, 若基体材料的被测长度较长时, 由材料力学可知

$$\sigma_h(\bar{x}) = \frac{M(\bar{x})y}{I_z}, \quad \tau(r_h, \bar{x}) = \frac{Q(\bar{x})S_z^*}{I_z b}, \quad \frac{dM(\bar{x})}{d\bar{x}} = Q(\bar{x})$$

式中, $M(\bar{x})$ ——弯矩;

y 、 b ——距离中心轴的高度与宽度;

I_z —— 惯性矩;
 $Q(\bar{x})$ —— 剪力;
 S_z^* —— 面积矩。

从而有

$$\frac{d\sigma_h(\bar{x})}{d\bar{x}} = \frac{\tau(r_h, \bar{x})by}{S_z^*} \quad (5-13)$$

4) 位移与应力平衡关系 由物理方程可知

$$\varepsilon_h(\bar{x}) = \frac{\sigma_h(\bar{x})}{E_h}, \quad \varepsilon_c(\bar{x}) = \frac{\sigma_c(\bar{x})}{E_c} \quad (5-14)$$

$$\begin{cases} \gamma_a(r, \bar{x}) = \frac{\tau(r, \bar{x})}{G_a} & r_{ap} \leq r \leq r_h \\ \gamma_p(r, \bar{x}) = \frac{\tau(r, \bar{x})}{G_p} & r_c \leq r \leq r_{ap} \end{cases} \quad (5-15)$$

从而有

$$\begin{cases} u_h(\bar{x}) = \int_0^{\bar{x}} \varepsilon_h(\bar{x}) d\bar{x} = \int_0^{\bar{x}} \frac{\sigma_h(\bar{x})}{E_h} d\bar{x} \\ u_c(\bar{x}) = \int_0^{\bar{x}} \varepsilon_c(\bar{x}) d\bar{x} = \int_0^{\bar{x}} \frac{\sigma_c(\bar{x})}{E_c} d\bar{x} \end{cases} \quad (5-16)$$

$$\begin{cases} \Delta_a(\bar{x}) = \int_{r_{ap}}^{r_h} \gamma_a(r, \bar{x}) dr = \frac{1}{G_a} \int_{r_{ap}}^{r_h} \tau(r, \bar{x}) dr \\ \Delta_p(\bar{x}) = \int_{r_c}^{r_{ap}} \gamma_p(r, \bar{x}) dr = \frac{1}{G_a} \int_{r_c}^{r_{ap}} \tau(r, \bar{x}) dr \end{cases} \quad (5-17)$$

将式(5-16)和(5-17)代入式(5-3), 利用式(5-8)和(5-9)可得

$$\int_0^{\bar{x}} \frac{\sigma_h(\bar{x})}{E_h} d\bar{x} = \frac{r_{ap}}{G_a} \tau_{ap}(r_{ap}, \bar{x}) \ln \frac{r_h}{r_{ap}} + \frac{r_{ap}}{G_p} \tau_{ap}(r_{ap}, \bar{x}) \ln \frac{r_{ap}}{r_c} + \int_0^{\bar{x}} \frac{\sigma_c(\bar{x})}{E_c} d\bar{x} \quad (5-18)$$

上式对 $\bar{x}$ 求导, 有

$$\frac{\sigma_h(\bar{x})}{E_h} = r_{ap} \left[\frac{1}{G_a} \ln \frac{r_h}{r_{ap}} + \frac{1}{G_p} \ln \frac{r_{ap}}{r_c} \right] \frac{\partial \tau_{ap}(r_{ap}, \bar{x})}{\partial \bar{x}} + \frac{\sigma_c(\bar{x})}{E_c} \quad (5-19)$$

再对上式求导, 利用式(5-7)和(5-12), 则

$$\left[\frac{1}{G_a} \ln \frac{r_h}{r_{ap}} + \frac{1}{G_p} \ln \frac{r_{ap}}{r_c} \right] \frac{\partial \tau_{ap}^2(r_{ap}, \bar{x})}{\partial^2 \bar{x}} - \frac{2}{E_c r_c^2} \tau_{ap}(r_{ap}, \bar{x}) = 0 \quad (5-20)$$

若令

$$\lambda_1^2 = \frac{2}{E_c r_c^2 \left[\frac{1}{G_a} \ln \frac{r_h}{r_{ap}} + \frac{1}{G_p} \ln \frac{r_{ap}}{r_c} \right]} \quad (5-21)$$

则式(5-20)变为:

$$\frac{\partial \tau_{ap}^2(r_{ap}, \bar{x})}{\partial^2 \bar{x}} - \lambda_1^2 \tau_{ap}(r_{ap}, \bar{x}) = 0 \quad (5-22)$$

考虑式(5-7)和(5-13), 注意式(9)在 $r = r_h$ 时, $\tau(r_h, \bar{x}) = \frac{r_{ap}}{r_h} \tau_{ap}(r_{ap}, \bar{x})$, 则式

(5-19)变为

$$\left[\frac{1}{G_a} \ln \frac{r_h}{r_{ap}} + \frac{1}{G_p} \ln \frac{r_{ap}}{r_c} \right] \frac{\partial \tau_{ap}^2(r_{ap}, \bar{x})}{\partial^2 \bar{x}} - \left[\frac{2}{E_c r_c^2} + \frac{by}{E_h S_z^* r_h} \right] \tau_{ap}(r_{ap}, \bar{x}) = 0 \quad (5-23)$$

若令

$$\lambda_2^2 = \frac{\frac{2}{E_c r_c^2} + \frac{by}{E_h S_z^* r_h}}{\frac{1}{G_a} \ln \frac{r_h}{r_{ap}} + \frac{1}{G_p} \ln \frac{r_{ap}}{r_c}} \quad (5-24)$$

则式(5-23)变为

$$\frac{\partial \tau_{ap}^2(r_{ap}, \bar{x})}{\partial^2 \bar{x}} - \lambda_2^2 \tau_{ap}(r_{ap}, \bar{x}) = 0 \quad (5-25)$$

令 $\lambda = \begin{cases} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{cases}$, 则式(5-22)和(5-25)可以统一为

$$\frac{\partial \tau_{ap}^2(r_{ap}, \bar{x})}{\partial^2 \bar{x}} - \lambda^2 \tau_{ap}(r_{ap}, \bar{x}) = 0 \quad (5-26)$$

5.2.1.3 方程求解

方程(5-26)的通解为

$$\tau_{ap}(r_{ap}, \bar{x}) = A \operatorname{ch}(\lambda \bar{x}) + B \operatorname{sh}(\lambda \bar{x}) \quad (5-27)$$

其中积分常数 A 和 B 由边界条件决定。

光纤的轴力可由下式求出

$$N_c(\bar{x}) = \int_A \sigma_c(\bar{x}) dA \quad (5-28)$$

积分式(5-7), 注意 $\bar{x} = 0$ 时, $\sigma_c(0) = \sigma_c$, 则

$$\sigma_c(\bar{x}) = \sigma_c - \frac{2r_{ap}^2}{r_c^2} \int_0^{\bar{x}} \tau_{ap}(r_{ap}, \bar{x}) d\bar{x} \quad (5-29)$$

从而有

$$N_c(\bar{x}) = \pi r_c^2 \sigma_c - 2\pi r_{ap} \int_0^{\bar{x}} \tau_{ap}(r_{ap}, \bar{x}) d\bar{x} \quad (5-30)$$

将式(27)代入上式, 可得

$$N_c(\bar{x}) = \pi r_c^2 \sigma_c - 2\pi r_{ap} \frac{1}{\lambda} [A \operatorname{sh}(\lambda \bar{x}) + B \operatorname{ch}(\lambda \bar{x}) + B] \quad (5-31)$$

考虑式(5-6), $\varepsilon_c(r_c, 0) = \varepsilon_h(r_h, 0)$ 及 $\bar{x} = l_f$ 时, 光纤轴力为零, 则

$$\begin{cases} N_c(0) = \sigma_h \pi r_c^2 \frac{E_c}{E_h} \\ N_c(l_f) = 0 \end{cases} \quad (5-32)$$

从而

$$A = \frac{\sigma_c r_c^2 \lambda}{2r_{ap} \operatorname{sh}(\lambda l_f)}, \quad B = 0 \quad (5-33)$$

则有

$$\tau_{ap}(r_{ap}, \bar{x}) = \frac{\sigma_c r_c^2 \lambda}{2r_{ap} \operatorname{sh}(\lambda l_f)} \operatorname{ch}(\lambda l_f) \quad (5-34)$$

式(5-34)代入式(5-29), 有

$$\sigma_c(\bar{x}) = \sigma_c \left[1 - \frac{\operatorname{sh}(\lambda \bar{x})}{\operatorname{sh}(\lambda l_f)} \right] \quad (5-35)$$

从而

$$\varepsilon_c(\bar{x}) = \varepsilon_c(0) \times \left[1 - \frac{\operatorname{sh}(\lambda \bar{x})}{\operatorname{sh}(\lambda l_f)} \right] = \varepsilon_h(0) \times \left[1 - \frac{\operatorname{sh}(\lambda \bar{x})}{\operatorname{sh}(\lambda l_f)} \right] \quad (5-36)$$

其中, $\varepsilon_h(0)$ 为基体材料在 $\bar{x} = 0$ 时的应变。

上式是一个考虑光纤、保护层、粘贴层和基体材料的光纤应变传感界面传递表达式。这里考虑了保护层厚度及其剪切模量、粘贴层厚度及其剪切模量、

基体材料的物理特性、光纤有效长度的长短等影响应变传递的基本因素，可以方便用来分析光纤光栅应变传感的界面传递特性。

5.2.1.4 埋入光纤应变传感多层界面传递特征值统一形式

对于光纤与基体有 n 层介质的情况，如图 5-6 所示，其应变的界面传递规律分析方法及解的形式与前述方法是一样的，只是在特征值 λ 的取值上有所不同。根据上面的分析，可以写成如下的统一表达式

$$\lambda_1^2 = \frac{2}{E_0 r_0^2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{G_i} \cdot \frac{r_i}{r_{i-1}} \right)} \quad (5-37)$$

$$\lambda_2^2 = \frac{\frac{2}{E_0 r_0^2} + \frac{b y}{E_n S_z^* r_n}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{G_i} \cdot \frac{r_i}{r_{i-1}} \right)} \quad (5-38)$$

其中 r_0 —— 光纤层半径；
 E_0 —— 光纤层弹性模量；
 r_i —— 第 i 层封装材料的外径；
 G_i —— 第 i 层封装材料的剪切模量。

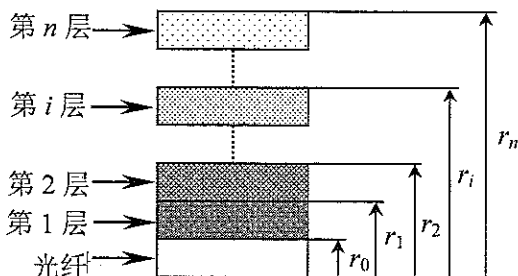


图 5-6 光纤 n 层介质示意图

Figure 5-6 Sketch of n layers coating for optical fiber

5.2.2 表面粘贴光纤应变传感的界面传递特性

仍然以简支梁为例，认为光纤传感器的粘贴层和保护层截面是矩形，横截面几何尺寸如图 5-7 所示

5.2.2.1 表面粘贴光纤传感器的分层模型

传感器变形是由粘贴层与基底材料表面摩擦剪应力引起的，当梁的变形增大时，传感器的两端首先发生开裂，这一现象表明在传感器两端剪应力最大。根据变形对称性，可知传感器纵剖面变形后形状为梯形，如图 5-8 所示，且摩擦剪应力有如下条件：

$$\begin{cases} \tau_{ah}(\bar{x}, \bar{y})|_{\bar{x}=\pm l_f} = \tau_{\max} \\ \tau_{ah}(\bar{x}, \bar{y})|_{\bar{x}=0} = 0 \end{cases} \quad (5-39)$$

基于上述变形形式，为了分析问题方便，将光纤传感器分为如下三层：(1) 粘贴层；(2) 由 $\bar{y}=0 \rightarrow \bar{y}=h_p/2-r_c$ ，不含光纤的保护层；(3) 由 $\bar{y}=h_p/2-r_c \rightarrow \bar{y}=h_p$ ，包含光纤的保护层。

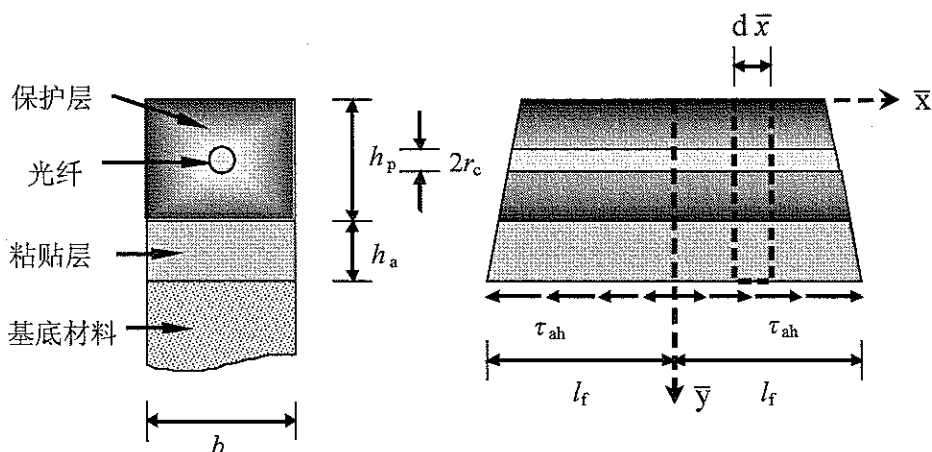


图 5-7 光纤粘贴结构表面横截面构造

Figure 5-7 Section of optical fiber bonded on structure surface

图 5-8 光纤变形形式及剪力分布

Figure 5-8 Optical fiber deformation and shear distribution

假设 1: 由于光纤传感器的工作长度一般较薄，所以，各层内的周应力沿 $\bar{y}$ 无变化，即 $\sigma = \sigma(\bar{x})$ 。

5.2.2.2 各层微元体变形位移关系及平衡方程

(1) 顶层保护层平衡 如图 5-9 所示，顶层保护层平衡方程 $\sum F_{\bar{x}} = 0$ ，则有

$$-\sigma_p(\bar{x}) \times b \times \left(\frac{h_p}{2} - r_c \right) + [\sigma_p(\bar{x}) + d\sigma_p(\bar{x})] \times b \times \left(\frac{h_p}{2} - r_c \right) + \tau_{pc} \times b \times d\bar{x} = 0$$

整理上式，可得

$$\frac{d\sigma_p(\bar{x})}{d\bar{x}} = -\frac{\tau_{pc}}{\frac{h_p}{2} - r_c} \quad (5-40)$$

(2) 底层保护层平衡 同理，底层保护层平衡方程 $\sum F_{\bar{x}} = 0$ ，有

$$\frac{d\sigma_c(\bar{x})}{d\bar{x}} \pi r_c^2 + \frac{d\sigma_p(\bar{x})}{d\bar{x}} \left[b \left(\frac{h_p}{2} - r_c \right) - \pi r_c^2 \right] = (\tau_{pc} - \tau_{ap}) b \quad (5-41)$$

将式(5-40)代入式(5-41)，可得

$$\frac{d\sigma_c(\bar{x})}{d\bar{x}} = \left[\frac{bh_p}{\pi r_c^2} - 1 \right] \frac{1}{\frac{h_p}{2} - r_c} \tau_{pc} - \frac{b}{\pi r_c^2} \tau_{ap} \quad (5-42)$$

(3) 粘贴层平衡

$$\frac{d\sigma_a(\bar{x})}{d\bar{x}} = \frac{\tau_{ap} - \tau_{ah}}{h_a} \quad (5-43)$$

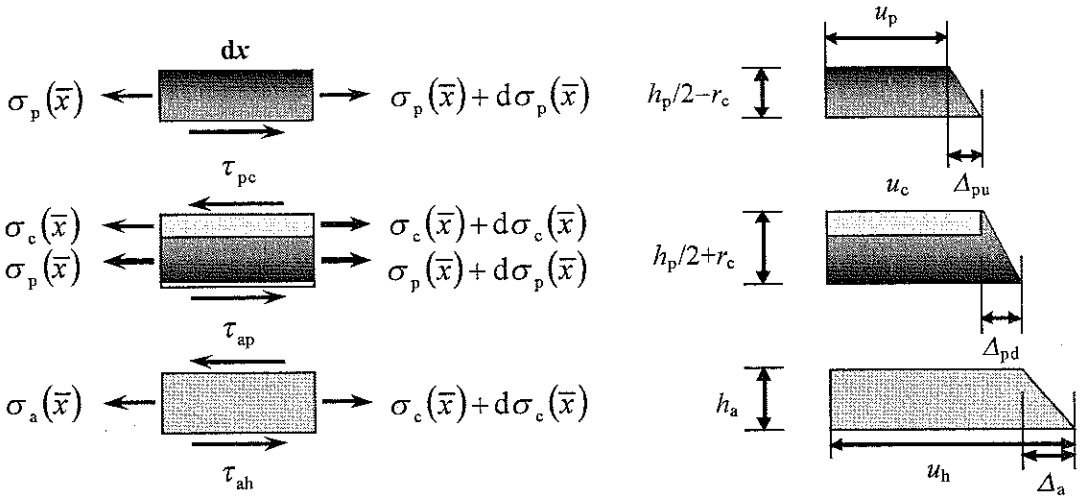


图 5-9 光纤分层微元体关系图

Figure 5-9 Optical Infinitesimal element of different layers

假设 2: 保护层和粘贴层轴应力为线性分布。

根据应力边界条件，有

$$\begin{cases} \bar{x} = 0: & \sigma_a(\bar{x}) = \sigma_a(0), \sigma_p(\bar{x}) = \sigma_p(0), \sigma_c(\bar{x}) = \sigma_c(0) \\ \bar{x} = \pm l_f: & \sigma_a(\pm l) = \sigma_p(\pm l) = \sigma_c(\pm l) = 0 \end{cases} \quad (5-44)$$

从而有

$$\begin{cases} \sigma_a(\bar{x}) = -\frac{\sigma_a(0)}{l_f} \bar{x} + \sigma_a(0) \\ \sigma_p(\bar{x}) = -\frac{\sigma_p(0)}{l_f} \bar{x} + \sigma_p(0) \end{cases} \quad (5-45)$$

假设 3: 坐标原点处各层应变相等。即

$$\varepsilon_h(0) = \varepsilon_a(0) = \varepsilon_p(0) = \varepsilon_c(0) = 0 \quad (5-46)$$

则有

$$\varepsilon_h(0) = \frac{\sigma_h(0)}{E_h} = \frac{\sigma_a(0)}{E_a} = \frac{\sigma_p(0)}{E_p} = \frac{\sigma_c(0)}{E_c} \quad (5-47)$$

进而有

$$\sigma_a(0) = \sigma_h(0) \frac{E_a}{E_h}, \quad \sigma_p(0) = \sigma_h(0) \frac{E_p}{E_h}, \quad \sigma_c(0) = \sigma_h(0) \frac{E_c}{E_h}, \quad (5-48)$$

上式代入式(5-47), 可得

$$\begin{cases} \sigma_a(\bar{x}) = -\frac{\sigma_h(0)}{l_f} \cdot \frac{E_a}{E_h} \bar{x} + \sigma_h(0) \cdot \frac{E_a}{E_h} \\ \sigma_p(\bar{x}) = -\frac{\sigma_h(0)}{l_f} \cdot \frac{E_p}{E_h} \bar{x} + \sigma_h(0) \cdot \frac{E_p}{E_h} \end{cases} \quad (5-49)$$

假设 4: 各层剪应力沿 $\bar{y}$ 方向变化为线性的。

考虑 $\bar{y}=0$ 时, 剪应力边界条件: $\tau=0$, 则有

$$\begin{cases} \tau(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{\tau_{ap}}{h_p} \bar{y} & 0 \leq \bar{y} \leq h_p \\ \tau(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{\tau_{ah} - \tau_{ap}}{h_a} (\bar{y} - h_p) + \tau_{ap} & h_p \leq \bar{y} \leq h_p + h_a \end{cases} \quad (5-50)$$

(4) 位移关系 如图 5-9 所示, 各层位移有如下关系:

$$u_h = u_c + \Delta_{pd} + \Delta_a \quad (5-51)$$

其中, 根据材料力学知识可知:

$$\begin{cases} u_h = \int_0^{\bar{x}} \frac{\sigma_h(\bar{x})}{E_h} d\bar{x}, & u_c = \int_0^{\bar{x}} \frac{\sigma_c(\bar{x})}{E_c} d\bar{x} \\ \Delta_{pd} = \int_{\frac{h_p}{2} - r_c}^{h_p} \frac{\tau(\bar{x}, \bar{y})}{G_p} d\bar{y}, & \Delta_a = \int_{h_p}^{h_p + h_a} \frac{\tau(\bar{x}, \bar{y})}{G_a} d\bar{y} \end{cases} \quad (5-52)$$

考虑式(5-47)和(5-48)，则上式中后两式变为

$$\begin{cases} \Delta_{pd} = \frac{\tau_{ap}}{8h_p G_p} (3h_p - 2r_c)(h_p + 2r_c) \\ \Delta_a = \frac{h_a^2}{2l_f} \cdot \frac{E_a}{E_h} \cdot \frac{\sigma_h}{G_a} + h_a \frac{\tau_{ap}}{G_a} \end{cases} \quad (5-53)$$

5.2.2.3 方程及其解的形式

将式(5-52)和(5-53)代入式(5-51)，可得

$$\int_0^{\bar{x}} \frac{\sigma_h(\bar{x})}{E_h} d\bar{x} = \int_0^{\bar{x}} \frac{\sigma_c(\bar{x})}{E_c} d\bar{x} + \left[\frac{(3h_p - 2r_c)(h_p + 2r_c)}{8h_p G_p} + \frac{h_a}{G_a} \right] \tau_{ap} + \frac{h_a^2}{2l_f} \cdot \frac{E_a}{E_h} \cdot \frac{\sigma_h}{G_a} \quad (5-54)$$

对上式关于 $\bar{x}$ 求导：

$$\frac{\sigma_h(\bar{x})}{E_h} = \frac{\sigma_c(\bar{x})}{E_c} + \left[\frac{(3h_p - 2r_c)(h_p + 2r_c)}{8h_p G_p} + \frac{h_a}{G_a} \right] \frac{\partial \tau_{ap}}{\partial \bar{x}} \quad (5-55)$$

由于光纤较短，可近似认为 $\sigma_h(\bar{x}) = \text{constant}$ ，则对上式关于 $\bar{x}$ 求导，可得

$$\left[\frac{(3h_p - 2r_c)(h_p + 2r_c)}{8h_p G_p} + \frac{h_a}{G_a} \right] \frac{\partial^2 \tau_{ap}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{1}{E_c} \cdot \frac{d\sigma_c(\bar{x})}{d\bar{x}} = 0 \quad (5-56)$$

考虑式(5-42)，并注意式(5-50)，当 $\bar{y} = \frac{h_p}{2} - r_c$ 时， $\tau_{pc} = \tau\left(\bar{x}, \frac{h_p}{2} - r_c\right) = \left(\frac{1}{2} - \frac{r_c}{h_p}\right) \tau_{ap}$ ，

则

$$\frac{d\sigma_c}{d\bar{x}} = -\frac{\tau_{ap}}{h_p} \quad (5-57)$$

$$\left[\frac{(3h_p - 2r_c)(h_p + 2r_c)}{8h_p G_p} + \frac{h_a}{G_a} \right] \frac{\partial^2 \tau_{ap}}{\partial \bar{x}^2} - \frac{1}{E_c h_p} \tau_{ap} = 0 \quad (5-58)$$

令

$$\lambda^2 = \frac{1}{E_c h_p \left[\frac{(3h_p - 2r_c)(h_p + 2r_c)}{8h_p G_p} + \frac{h_a}{G_a} \right]} \quad (5-59)$$

则

$$\frac{\partial^2 \tau_{ap}}{\partial \bar{x}^2} - \lambda^2 \tau_{ap} = 0 \quad (5-60)$$

该方程的通解为

$$\tau_{ap} = A \operatorname{ch}(\lambda \bar{x}) + B \operatorname{sh}(\lambda \bar{x}) \quad (5-61)$$

积分式(5-57), 考虑式(5-44)应力边界条件, 从而

$$\sigma_c(\bar{x}) = - \int_0^{\bar{x}} \frac{\tau_{ap}}{h_p} d\bar{x} + \sigma_c(0) \quad (5-62)$$

将式(5-61)代入式(5-62), 可得

$$\sigma_c(\bar{x}) = \sigma_c(0) - \frac{1}{\lambda h_p} [A \operatorname{sh}(\lambda \bar{x}) + B \operatorname{ch}(\lambda \bar{x}) + B] \quad (5-63)$$

注意式(5-44), 我们有

$$A = \frac{\lambda h_p \sigma_c(0)}{\operatorname{sh}(\lambda l_f)}, \quad B = 0 \quad (5-64)$$

则

$$\tau_{ap} = \frac{\lambda h_p \sigma_c(0)}{\operatorname{sh}(\lambda l_f)} \operatorname{ch}(\lambda \bar{x}) \quad (5-65)$$

上式代入式(5-62), 可得

$$\sigma_c(\bar{x}) = \sigma_c(0) \left[1 - \frac{\operatorname{sh}(\lambda \bar{x})}{\operatorname{sh}(\lambda l_f)} \right] \quad (5-66)$$

$$\varepsilon_c(\bar{x}) = \frac{\sigma_c(\bar{x})}{E_c} = \varepsilon_c(0) \left[1 - \frac{\operatorname{sh}(\lambda \bar{x})}{\operatorname{sh}(\lambda l_f)} \right] = \varepsilon_h(0) \left[1 - \frac{\operatorname{sh}(\lambda \bar{x})}{\operatorname{sh}(\lambda l_f)} \right] \quad (5-67)$$

此式为粘贴光纤应变传感的解, 与式(5-36)完全相同。

5.2.2.4 粘贴光纤应变传感多层界面传递特征值统一形式

与 5.2.1.3 节相似, 对于有 n 层表面粘贴介质的光纤光栅, 如图 5-10 所示。同样可以得到 λ 同一表达式

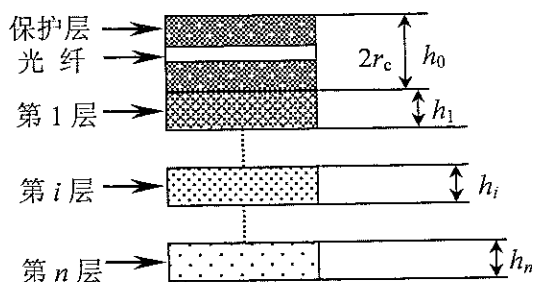
$$\lambda = \frac{1}{E_c h_0 \left[\frac{(3h_0 - 2r_c)(h_0 + 2r_c)}{8h_0 G_0} + \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{G_i} \right]} \quad (5-68)$$

其中,

r_c ——光纤光栅半径;

h_0 ——保护层厚度;

h_i ——第 i 层介质厚度;
 h_n ——第 n 层介质厚度。

图 5-10 光纤表面粘贴 n 层介质示意图Figure 5-10 Sketch of n layers adherers for optical fiber

5.3 光纤光栅应变传感的界面传递特性

在上两节中,我们全面地分析了光纤应变传感的界面传递规律,给出了光纤应变与基体材料应变关系的解析表达式(5-36)和(5-67),它们对于光纤应变传感的应变修正具有重要的理论和实际意义。

光纤布拉格光栅是写在没有保护层的裸光纤上的,然后按照不同的封装方式埋入或粘贴在待测结构上监测应变。光纤光栅用于结构应变监测的常用方式有:裸光纤光栅直接粘贴或埋入结构中;片式封装光纤光栅粘贴于结构表面;管式封装光纤光栅粘贴或埋入结构;封装于复合材料中,如FRP筋等。由于光纤光栅传感器的构造形式与普通光纤传感器基本相同,因此,FBG应变传感器的界面传递特性分析方法与上述方法完全相同,所得到的解的形式是一样的。对于不同的封装形式,只是特征值系数 λ 有所差别,而且由于光栅通常为1~2cm,因此只适于短光纤的工况。基于上述分析,下面研究不同类型的光纤光栅应变传感器的界面传递特性,给出相应的特征值系数 λ 值。

5.3.1 埋入式光纤光栅应变传感的界面传递特性

1) 裸光纤光栅通过胶粘剂埋入基体结构 图 5-11 所示通过胶粘剂直接埋入结构的裸光纤光栅可以视为 5.2.1 节中去掉保护层,而只有胶粘层的光纤情况,其应变传递的计算模型、方程及解的形式与前面分析的完全相同,只是 λ 取值有所不同,即