

第1章 引言

1.1 课题背景及选题依据

激光拼焊是集光学、机械学、电子学、计算机学、金属学、材料学等多学科为一体的高新技术,是激光应用最有发展前途的领域之一。激光焊接技术的出现是对传统的焊接工艺和焊接方法具有重大影响的技术变革,具有的优越性使其在机械、电子、冶金、汽车、石油和国防等领域得到了广泛应用,并产生了巨大的经济效益和社会效益,应用前景是十分广阔的。

激光拼焊自动化装备作为成套关键装备与战略技术,不仅影响着汽车行业的发展,而且将对国家的综合国力,对国家的可持续发展有着巨大而深远的影响。而我国作为世界制造加工大国,目前尚不能完全独立自主开发激光拼焊成套装备。激光拼焊成套设备的研制、开发成功,必将推动我国制造业整体制造能力,提高我们企业的核心制造能力,提高企业产品的竞争力具有重要意义。

针对自主开发激光拼焊成套装备的几个关键技术点,本文以中国科学院知识创新工程重要方向性项目“全自动激光拼焊成套装备关键技术研究与应用”为课题背景,结合实际开发全自动激光拼焊成套装备项目的具体要求,在对现有激光拼焊技术深入分析的基础上,对激光拼焊定位夹紧、激光拼焊工艺和焊接接头机械性能、金相组织进行了深入研究,给出了激光拼焊生产线焊接工艺规范和相应的焊接质量变化规律,为激光拼焊成套装备开发提供参考。

1.2 国内外发展现状

激光拼焊是指将两块或两块以上的板料,采用激光焊接的方法焊在一起,然后进行冲压成形。采用激光拼焊板有如下优势:(1)满足零件各部位对材质、厚度、涂层、性能等不同的要求;(2)降低车身质量,从而提供低能耗、性能优良、安全的环保汽车;(3)提高车辆结构的整体性,提高整体刚度,改善装配精度;(4)减少模具数目。

激光拼焊板发展大致经历了三个阶段:

开始阶段,大众公司1985年超大板的需求促进了激光拼焊板的发展,随着新车型的发展,激光拼焊板得到了广泛应用。

成长阶段,随着激光焊接设备的不断改进,激光拼焊板应用数量在不断增

加,尽管突然大量应用激光拼焊板对汽车制造商来说还难以接受,但采用激光拼焊板来制造汽车已成为必然趋势。

成型阶段,随着激光拼焊技术的进一步提高,开始出现了异型多料片焊接,提高复杂性,应用高端的激光焊接技术可以生产更复杂更大的零件,如图 1-1 所示。一些汽车制造商引进激光拼焊板使得其竞争对手也开始评估激光拼焊板的优点和缺点,从 1998 年开始,国内汽车厂商开始使用或计划使用激光拼焊板。

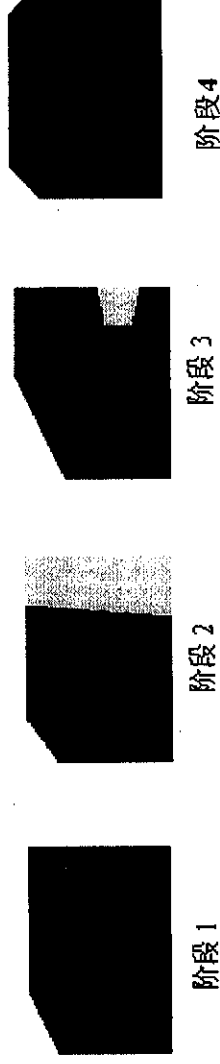


图 1-1 激光拼焊板发展过程

Fig1-1 the development of tailor blank laser welding

1.2.1 国外激光拼焊生产线发展现状

从 20 世纪 80 年代中期开始,激光拼焊板作为新技术在欧洲、美国、日本得到了广泛的关注。拼焊板工艺主要是为汽车行业进行配套服务,尤其在车身零部件生产、制造和设计方面,拼焊板的使用有着巨大的优势。目前,无论实验室还是汽车制造厂的实践经验,均证明了拼焊板可以成功地应用于汽车车身的制造。

1985 年德国蒂森钢铁公司与德国大众汽车公司合作,在 Audi100 车身上成功采用了全球第一块激光拼焊板。90 年代欧洲、北美、日本各大汽车生产厂也开始在车身制造中大规模使用激光拼焊板技术,近年来该项技术在全球新型钢制车身设计和制造上获得了日益广泛的应用。奔驰、宝马、通用等各大汽车生产厂相继在车身中采用了激光拼焊板技术。目前,由拼焊板生产的汽车零部件主要有前后车门内板、前后纵梁、侧围、底板、车门内侧的 A、B、C 立柱、轮罩、尾门内板等。

日本 JFE 公司建在西日本仓敷地区的水岛钢板工业公司内的激光拼焊板生产线已于 2004 年 9 月份投入运行。该项目投资额为 5 亿日元,年产能力约为 200 万张。JFE 是日本钢铁公司中首家拥有激光拼焊板设备。此次投产的设备是从德国蒂森克虏伯公司下属的 Nothelfer 公司引进的,采用激光点固定式,料片的移动方式和目前日本已投产的激光拼焊设备大多数采用激光头转动型不同,不但提高了生产效率,而且可满足宽幅拼焊。

韩国浦项扩大 Gwangyang 工厂激光拼焊板(Tailor Welded Blanks)的产能,以进一步开发汽车板市场。浦项集团希望扩大的激光拼焊板产能和 Gwangyang 厂两条新建的镀锌生产线能帮助他们提高在国内、外汽车板市场的竞争力。产能扩大后,他们的汽车板产能将达到 330 万吨,到 2007 年将扩大到 450 万吨,而该集团去年汽车板的产量为 270 万吨。据悉,到 2007 年,汽车板产能将占浦项总产能的 9%。激光拼焊板产能扩大工程于 2004 年 4 月 6 日开工,在 10 月份完工。完工后,浦项激光拼焊板的产能将由目前的 170 万吨/年扩大到 360 万吨/年。工程完工一年后, Gwangyang 将上马第五条热浸镀锌生产线。2004 年 1 月份,浦项宣布在 Gwangyang 钢厂新建第六条热浸镀锌生产线,将产能扩大到 200 万吨/年。6 号生产线将在 2004 年 11 月开始建设,于 2006 年 6 月完工,产品全部用于汽车生产。

法国阿赛洛在激光拼焊领域经过十几年的研究和发展,现激光拼焊生产线已达到 35 条,其产品在欧洲市场占有率超过 50%,成为当今世界规模最大的钢铁巨头。

意大利 Sollak 公司在不断增加激光拼焊生产线的条数,其子公司 Solblank 公司已经投入了 14 条生产线,而且还准备在英国及美国建立 4 条激光拼焊线,每条的产能将达到每年 2 万吨。

另外,一些大型冶金联合企业也正在加快在其他国家组建合资公司的步伐。德 Tissen 冶金公司就已经在印度尼西亚及美国(底特律)建立了合资公司,主要为凯迪拉克轿车新车型提供激光焊接车门及其它板件。名为“英国钢铁”的英国工业集团建成了好几个冶金产品客户服务中心,其中包括能向汽车制造商提供拼焊板的专门中心(企业),而且产能达到了 12.5 万 t/年,并向土耳其丰田汽车公司提供拼焊板。美国及日本也都建立了类似的独立的专门公司。

目前,西欧生产的拼焊板占世界总产量的 70%,美国生产的占 20%,日本生产的占 10%,其中每年由装配焊接流水线生产的大约有 2.9 亿件,由单个机床及成套设备生产的有 1 亿件。

开发激光拼焊板成套设备的国外公司主要有:瑞士的 Soudronic 公司,法国的 Nothelfer 公司,美国的 VIL 公司,加拿大的 AWS 公司和日本的 IHI 公司。这些公司完成的主要工作是系统的集成和局部关键技术的研究。

1.2.2 国内激光拼焊生产线发展现状

(1) 应用现状

我国的激光拼焊板应用刚刚起步,2002 年 10 月 25 日,中国第一条激光拼焊板专业化商业生产线正式投入运行,作为全球最大拼焊板制造供应商的德

国蒂森克虏伯集团拼焊板有限公司在海外的第八家公司（在亚洲的第一家），武汉蒂森克虏伯中人激光拼焊有限公司引进蒂森克虏伯公司生产的 8kW CO₂ 直线连续激光焊接生产线(Linear laser welding lines)，采用蒂森克虏伯拼焊板公司的全套专有技术和质量控制体系进行生产和工艺开发，该线最小工件间距为 50mm，焊接速度可达 10m/min，年生产能力可达 20,000 吨。

上海宝钢阿赛洛激光拼焊工程的一期工程已于 2004 年 11 月投产，生产国内最高品质的汽车激光拼焊板。工程总投资 1 亿美元，引进我国第一条应用于汽车行业激光拼焊板自动生产线，由宝钢股份、宝钢国际、上海大众联合发展公司和阿赛洛集团 ARBED 公司联合投资组建。

当前，国内激光拼焊板需求量迅速上升，帕萨特、POLO、别克、奥迪和 Mazda 等高品质车型都已采用激光拼焊板。

一汽宝友股份有限公司于 2004 年 7 月引进一条由瑞士 Soudonic 公司生产的全自动激光曲线拼焊线，目前已实现批量生产。

(2) 科研情况

目前国内的一些大学和研究单位纷纷研究激光拼焊线的关键技术，跟踪国际领先技术，在相关领域如焊缝质量检测、焊接工艺等方面发过一些文章，但成套大型的激光拼焊板自动焊接生产线还没有单位投入研制，主要原因是初期投入的成本太高。

其中以华中科技大学激光技术国家重点实验室为代表。华中科技大学激光技术国家重点实验室是 1986 年国家批准建立的对国内外开放的国家级实验室，主要研究方向是高功率激光器及激光与物质相互作用。主要探索和研究新型的激光物理现象和新型高功率激光器；解决高功率激光光束质量中的关键单元技术和检测技术，对高功率激光中光学、电学、热学和气体动力学等基础问题进行研究，以期获得高功率、高光束质量、高稳定性、长寿命(三高一长)的高功率激光器；研究激光与材料相互作用中激光等离子体热力学及微粒子运动的规律以及激光与生物组织相互作用的机理等，为新型激光器探索和激光科学应用开拓新的领域。

十五年来，该实验室共承担科研课题 156 项，其中国家“七·五”、“八·五”、“九·五”科技攻关项目 16 项，“863”课题 7 项，攀登计划 1 项，国家自然科学基金项目 30 项，国防科工委及教育部课题 32 项，国际合作项目 5 项。主要获奖成果有：“气动窗口”获保加利亚世界青年发明成果展览会金奖，“针板式万瓦横流 CO₂ 激光器”和“高功率 CO₂ 激光技术”分别获国家科技进步三等奖，“约束放电激励千瓦级 CO₂ 激光器”国家发明四等奖，“高功率 CO₂ 激光器及加工机”、“12V-180 重柴油机缸套外壁的激光热处理”、“多联齿轮激光焊接”、“大型轧辊激光刻花装备”分别获教育部科技进步一等奖，“高功率 CO₂ 激光圆偏振镜及

高反射镜”和“1500W 纵流 CO₂ 激光器”获教育部科技进步二等奖,“硬质合金与碳素钢的激光焊接”获湖北省科技进步二等奖,“1 千瓦无氨 CO₂ 激光器”和“实用针板式 2KW CO₂ 激光器”获国家教育部科技进步三等奖。共获专利 11 个,发表论文 800 余篇,出版专著和教材 8 本,取得了可喜的成果。

在 HOWO 重卡研发生产中,中国重汽卡车公司与蒂森克虏伯公司联合开发了应用于重卡车超宽板材,成功地解决了大尺寸驾驶室开发生产用料难题,首创国内重型车车身板材激光拼焊技术。

由攀钢钢研院与华中科技大学激光加工国家工程研究中心合作开展的“攀钢冷轧钢板激光拼焊及其应用技术研究”项目,最近在东风汽车公司进行了国内首次冷轧激光拼焊板冲压汽车零件的试验,取得了满意的效果。

上海光机所等多家单位在激光技术方面作了大量工作,获得了丰富的研究成果。如以“神光”为代表的系列激光薄膜、全固态激光器薄膜、软 x 射线膜、紫外膜、滤光片、红外膜、He-Ne 激光薄膜、强光防护片以及透明导电膜等等。并且对于薄膜的设计方法、制备工艺与光学薄膜的微观结构、损伤机理和光学特性的关系等基础问题进行了大量的实验探索和深入的理论分析。

总之,我国的激光器和激光技术产业规模已经形成且激光焊接市场前景广阔,但在激光焊接系统的可靠性、稳定性以及整体化、智能化、自动化水平与国外差距较大,尤其是全自动化生产线更是相距甚远。但迄今为止,我国尚无一家公司能够独立开发全自动激光焊接生产线,这是制约我国激光焊接技术进一步发展的关键所在。开发具有自主知识产权的全自动激光拼焊生产线,具有重大的经济意义和社会意义。

1.3 本文完成的主要工作

激光拼焊成套装备的开发是一个面临挑战的新课题,它涵盖了声、光、电、机、冶金、金属材料学等多学科多类别的系统性课题。本文针对实际激光成套装备开发工程项目要求,在激光拼焊定位夹紧对中机构开发和激光拼焊工艺及激光拼焊焊接性能检测方面作了大量工作,主要完成了以下研究内容:

(1) 激光拼焊定位夹紧对中机构研究。重点分析了由于激光光束自身的条件限制、激光拼焊生产线高速高效的要求、激光焊接热变形和目前国内汽车板材本身理化特性一致性差以及激光焊接过程中的诸多不确定因素,总结出了激光拼焊生产线工装夹具设计影响因素,在此基础上指出了激光拼焊定位夹紧结构所应具备的功能特征。针对激光拼焊板材介于刚体和弹性体之间的柔性特征,结合传统的定位原理“3-2-1”,提出了“N-2-1”的定位方式,给出了激光拼焊夹具定位原理及设计准则,建立了激光拼焊夹具参数化零件库和相应准

则,并对激光拼焊夹紧机构进行了柔性分析,给出了拼焊夹具的柔性评价方案。

(2) 激光拼焊工艺研究。本章首先分析了激光拼焊工艺特征,重点研究了激光拼焊焊接工艺参数主要包括激光功率、焊接速度、离焦量和侧吹保护气体的喷嘴高度、倾斜角度及气体流量等因素的变化对焊接质量的影响规律,得出了影响规律曲线,为激光焊接工艺规范微调提供调整方向和参考依据;同时也为激光工艺库开发提供推理机制。又系统全面地研究了目前汽车常用板材全厚度系列激光拼焊工艺规范,得到了全自动激光拼焊生产线的最优工艺规范。

(3) 激光拼焊工艺库开发。针对激光拼焊成套装备项目开发面临的问题:在中国市场中,激光拼焊成套装备销售必须附带汽车行业常用工艺规范库的现实问题。在大量试验的基础上,借助于 VB6.0 集成开发环境,建立了激光拼焊工艺库系统,主要包括激光拼焊示范应用模块、工艺参数查询模块、经济评估模块、数据库维护模块、管理查询模块等,初步实现了系统演示、查询、评估、管理等功能,基本满足激光拼焊生产线要求。

(4) 激光拼焊焊接接头金相组织性能研究。本章结合金属 Fe_3C 相图,分析了在激光焊接快速冷却、大过冷度条件下,分别从合金性质和成分、固/液界面上的表面能、均相成核速度和固相生长速度等角度,探讨了金相组织结构变化特征。然后通过试验分别研究了汽车碳钢板和不锈钢板激光拼焊时,板材厚度、激光功率、焊接速度等工艺参数变化,对激光拼焊焊接接头的抗拉强度、显微组织硬度和金相组织结构的影响变化规律。

(5) 基于 BP 神经网络激光拼焊焊接接头组织性能预测。针对激光拼焊钢板实际生产中,存在着钢板性能随着焊接工艺规范变化有很大差异的问题,利用激光拼焊生产线实际得到的数据,建立了基于 BP 神经网络激光拼焊焊接性能预测模型,初步实现了根据工艺参数的改变,直接预测焊接力学性能的目的,克服了激光拼焊初期需大量试验性研究的缺点,为工艺参数优化研究提供了一种有效的手段。

第2章 激光拼焊定位夹紧方法研究

2.1 引言

激光拼焊是将几块不同材质、不同厚度、不同涂层的钢材或铝材焊接成一块整体板,以满足零部件对材料性能的不同要求。激光焊接凭着多项显著的优点,非常适用于生产轿车用拼焊板。激光拼焊在汽车工业中已成为标准工艺,车身面板经激光拼焊后再进行冲压,这样制成的面板结构能达到最合理的金属组合。

采用激光拼焊板可以给汽车制造业带来巨大的经济效益,如车身装配中的大量点焊,把两个焊头夹在工件边缘上进行焊接,凸缘宽度需要16mm,而激光拼焊板无需搭接,点焊改为激光拼焊技术可以节省钢材,节省的用量视采用拼焊板的数量而定;用传统点焊焊接两片0.7mm的钢板冲压件,平均是20点/min,焊距是25mm,速度则为0.5m/min,这会耗费相当的时间,采用激光拼焊板替代点焊工艺后所需要的时间可以得到大量节省、焊接质量得到质的提高。采用激光拼焊板,其优势如下:

- (1) 零件数量的减少,以及随之而来的生产设备和制造工艺简化,大大提高了生产效率,降低整车制造及装配成本;
- (2) 由于产品的不同零件在成形前即通过激光连续焊接工艺焊接在一起,因而提高了产品的精度,大大降低了零部件的制造及装配公差;
- (3) 通过部件的优化减轻了重量,从而降低油耗,处于环保时代,这一点非常重要;
- (4) 由于不再需要加强板,也没有搭接接缝,大大提高了装配件的抗腐蚀性能;
- (5) 通过消除搭接提高部件的耐腐蚀能力,大大减少了密封措施的使用;
- (6) 通过对材料厚度以及质量的严格筛选,在材料强度和抗冲击性方面给零部件带来本质的飞跃,同时改良了结构,在撞击过程中可以控制更多的能量得到吸收,从而改良车身部件的抗冲击能力,提高车身的被动安全性;
- (7) 实现对材料性能的最充分的利用,达到最合理的材料性能组合;
- (8) 材料厚度的可变性以及其可靠的质量,保证了在对某些重要位置的强化改进可以顺利进行;

(9) 对产品的设计者而言增加了产品设计的灵活性。

为了降低车身重量、提高车身的装配精度、增加车身的刚度、降低汽车车身制造过程中的冲压和装配成本,减少车身零件的数目同时将其整体化是非常必要的,提高了汽车结构可靠性及安全性。因而,激光拼焊板在国外得到了广泛的应用。

本课题的突破将具有重要的科学意义和实际应用价值。激光拼焊板将给中国汽车制造工程带来直接的好处,使完美的车身制造质量成为可能,将大大促进中国汽车零部件制造水平的提高。激光拼焊在中国汽车行业的应用刚刚起步,在船舶行业的应用尚属空白,相关技术仍停留在试验室水平。为了打破国外企业国内垄断地位,开拓新的应用领域,开展不等厚汽车钢板激光拼焊线实现技术的研究符合我国的实际需要。

2.2 国外激光拼焊成套装备定位压紧技术研究现状

2.2.1 瑞士 Soudronic 公司

Soudronic 公司在拼焊设备技术方面拥有多项专利技术,与世界许多著名钢铁企业级轿车制造企业进行拼焊技术及焊接质量控制技术方面的项目开发,在技术上、设备上与市场处于全球领先地位。该公司开发了直线焊缝、折线焊缝和曲线焊缝全自动拼焊生产线,在焊缝质量检测上具有三项世界专利,在两块钢板精确定位和夹紧系统上拥有两项世界专利。目前国内的四条激光拼焊线,其中三条生产线为该公司的产品。

直线和折线焊缝不采用填丝系统,由 Souka 轮压板预加工系统完成定位、夹紧;折线焊缝须增加旋转机构,将已部分焊接的板材旋转,然后继续焊接。在焊接曲线焊缝时,需要填丝,因为无法保证钢板间隙的一致性。

Soudronic 公司在直线焊接和折线焊接时,采用激光头固定,工作台运动的方法实现焊接;在曲线焊接时,采用激光头和工作台联动的方式实现焊接,质量检测装置和激光头固定在一起。如图 2-1,图 2-3 为 Soudronic 公司激光拼焊线夹紧定位结构和原理图。

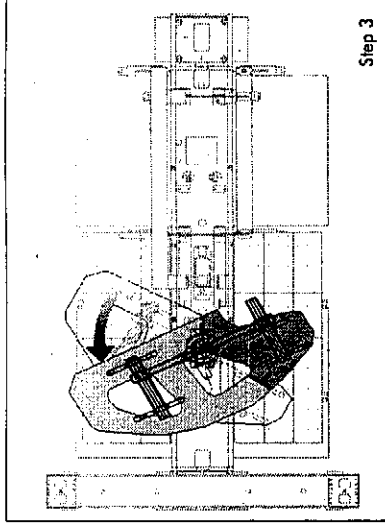


图 2-1 旋转装置俯视图

Fig 2-1 The planform of turning device

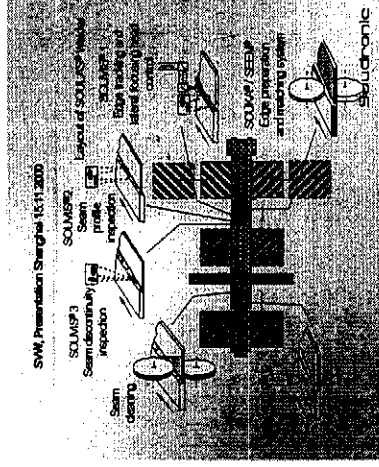


图 2-2 Souvis 和 souka 系统

Fig 2-2 The Souka and Souvis system

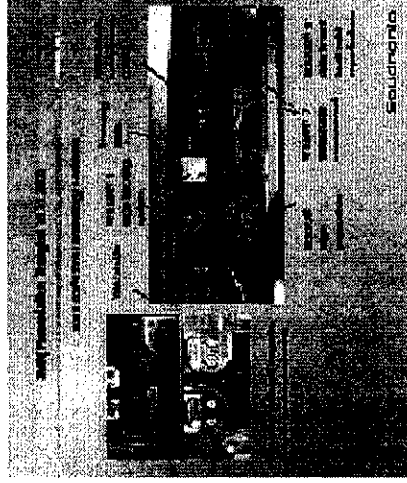


图 2-3 Souka 装置和工作原理图

Fig2-3 The device and principle of Souka

2.2.2 日本 IHI 公司

日本 IHI 公司是世界 500 强企业，在汽车用板激光拼焊生产线的研发、设计有一定的基础。该公司第一条激光拼焊线已于 2003 年在日本 Mazda 公司应用，并投入批量生产。

IHI 公司目前只开发了直线焊缝的激光拼焊线。焊接时，激光头运动，工作台不动，不采用填丝技术，工作台有自动定位和压紧装置，系统没有实时焊缝质量检测装置。如图 2-4 所示。

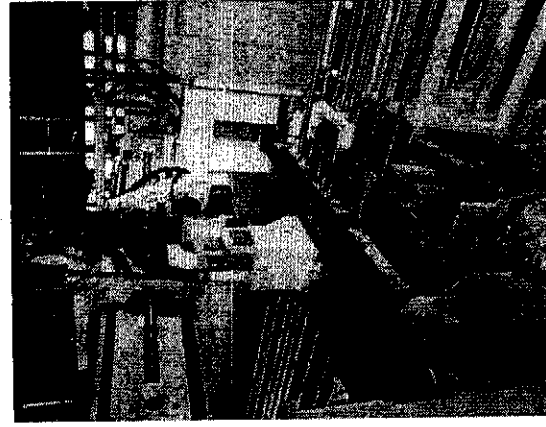


图 2-4 IHI 定位夹紧机构

Fig 2-4 Orientation and clamp set up of IHI LTD

2.2.3 美国 VIL 公司

美国 VIL 公司开发出包括高精剪、激光自动拼焊线及焊接过程在线监测在内的手工传输或机器人自动上料等不同规模的生产线商品系列,以适应各种用户需求。



图 2-5 VIL 公司全自动激光拼焊线

Fig 2-5 Automatic tailor blank laser welding line of VIL Ltd

2.2.4 德国 Northelfer 公司

与德国合资的蒂森克虏伯中人拼焊板有限公司现有直缝连续型 8KWCO₂ 激光焊接生产线一条, 采用 8KW 激光器, 焊接速度最高可达 10 米/分钟, 加工材料的厚度范围在 0.6-3.0 mm, 最大卷宽为 1600mm, 每班 (8 小时) 产量 800 至 3000 片激光拼焊板。目前年生产能力为 2 万吨; 预期在未来三年内达到 6 万吨 (3 条生产线) 的年生产能力, 生产线布局如图 24 所示。图 25 为长春蒂森克虏伯中瑞公司的激光拼焊线, 为鞍钢公司和日本住友公司合资的激光拼焊线公司。

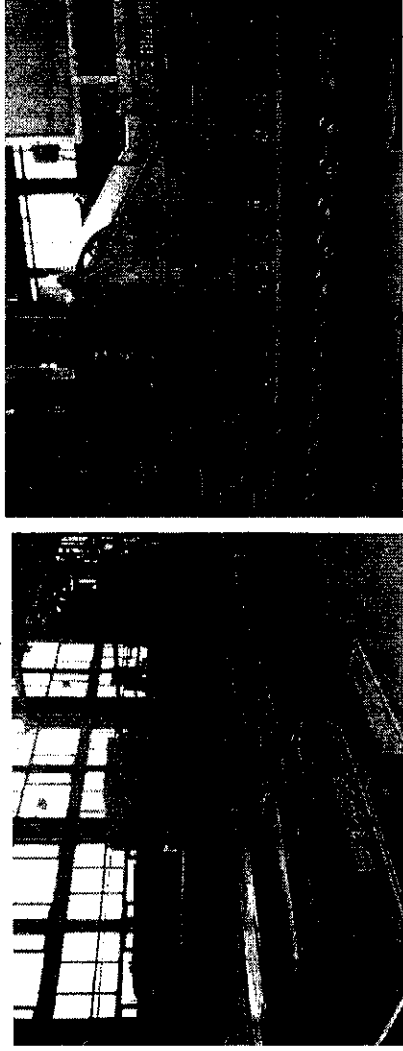


图 2-6 长春蒂森克虏伯中瑞激光拼焊线

Fig 2-6 Tailor blank laser welding line of Thissyen in Changchun

2.3 定位夹紧机构设计开发影响因素

2.3.1 激光拼焊飞行光路

如下图所示, 激光经飞行光路到达工件表面时, 光斑直径一般在 0.3-0.6mm, 目前我们激光拼焊生产线的光斑直径为 0.6mm。而且激光能量在整个光斑面积上并不是均匀分布的, 激光能量分布见图 2-8, 呈山峰状分布。

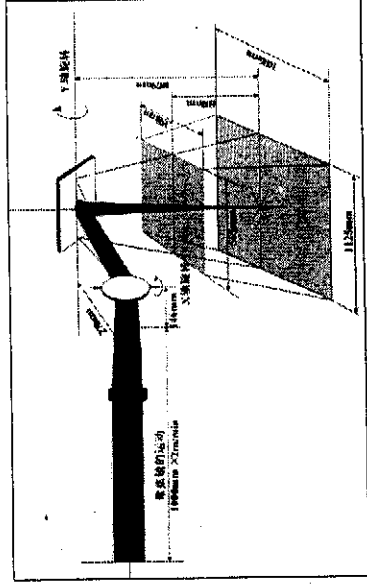


图 2-7 激光飞行光路

Fig 2-7 'flying way' of laser welding

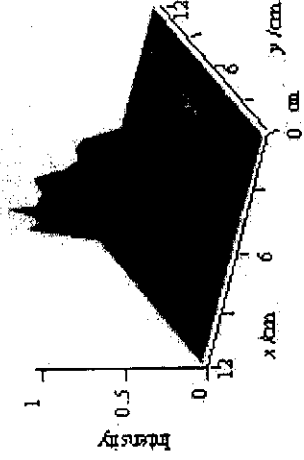


图 2-8 强激光环形束三维能量分布图

Fig 2-8 Energy distributing of laser power

2.3.2 激光拼焊板定位对中

两块或两块以上剪切或冲压而成板材对中时，由于板材端面直线度和平面度的原因，使得对中后的板材依然存在间隙，如下图所示。

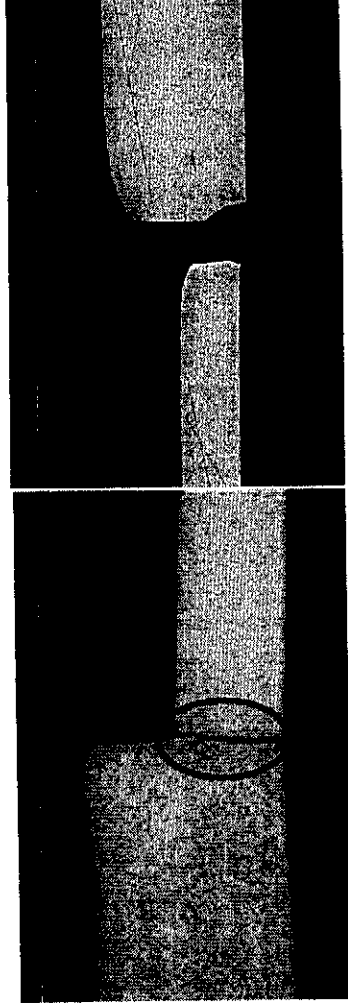
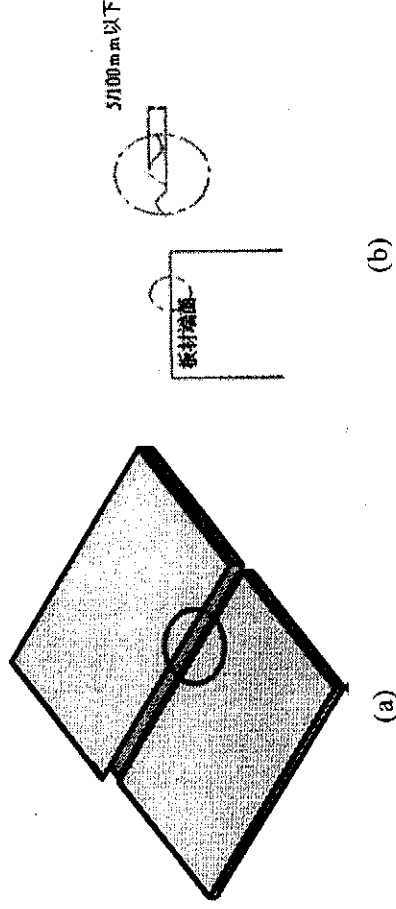


图 2-9 板材端面形状与对中形式

Fig2-9 The shape of cutting sheet end and mobility of sheet hit

由于激光自身的特点，激光能量的高斯分布特点，而且在焊接过程中不可

避免地产生热变形,这就要求焊接板材对中间隙尽可能地小,而且在焊接过程中不可避免地产生热变形。一般要求焊接板材的直线度在 0.05mm 以内,对中间隙在 0.15mm 以下。

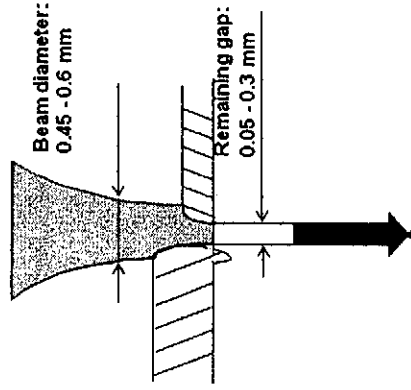


图 2-10 光束直径和对中间隙

Fig2-10 Beam diameter and remaining gap

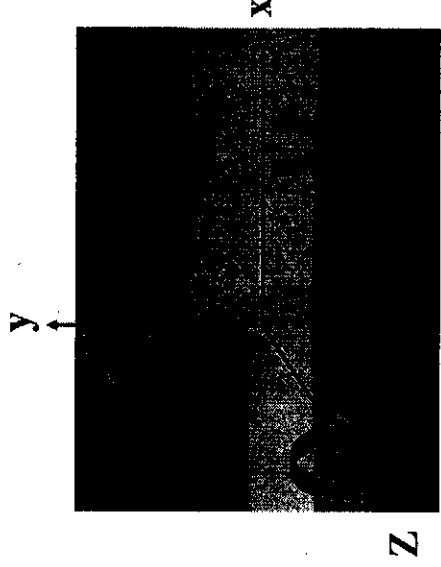


图 2-11 焊接变形力

Fig2-11 Distortion force of welding

2.4 激光拼焊夹具的设计开发

2.4.1 激光拼焊夹具定位原理及设计准则

激光拼焊夹具设计属于专用夹具设计的范畴,其中包括定位元件、夹紧元件、连接元件、骨架及紧固元件等基本组成部分。设计中最重要的是定位元件的设计,通常时大多采用六点定位,即“3—2—1”定位原理。对于车身板材零件,定位夹具除了具备限制零件刚体运动的基本功能外,还必须能够限制过多的工件变形。如果还是用普通的六点定位的话,工件将因为没有进行可靠的定位而发生定位不准的问题。要对薄板柔性件进行可靠定位,必须有更为有效的夹具设计理论来支持。

“N—2—1”定位原理是一种新的定位原理,该定位原理与广泛应用于刚性件的“3—2—1”定位原理相比更适用于激光拼焊薄板件的定位。我们可以根据“N—2—1”定位原理,提出夹具优化设计算法,即利用有限元分析和非线性规划方法去找到最优的“N”定位点,以使得薄板件的总体变形最小。

“N—2—1”定位原理认为:

(1)第一基准面上所需的定位点数为 $N(N \geq 3)$

对绝大部分薄板件加工过程,其最主要的尺寸问题是薄板件法向方向上的

变形,甚至其自重所引起的变形就不容忽视。有关分析表明:对一块长宽各400 mm,厚1mm的薄板,用“3—2—1”原理定位,在其自重作用下就可能产生1~3mm的平均变形。因此,对于薄板件而言,最合理的夹具系统是要求其第一基准面上存在多于三个定位点去限制这一方向上的零件变形。

(2)第二、第三基准面所需的定位点为二个和一个

在第二、第三基准面上分别需要二个和一个定位点去限制薄板件的刚体运动。二个和一个定位点是完全足够的,因为实际加工所产生的力通常不会作用在这两个基准面上,以避免弯曲和翘曲。更进一步的分析表明,第二基准面上的两个定位点应布置在薄板件较长的边上。这是因为当两个定位点间距尽可能大时,零件将更稳定,同时还可以更好的弥补零件表面或定位元件的安装误差。

(3)禁止在正反两侧同时设置定位点

必须强调禁止在工件正反两侧同时设置定位点,因为甚至极小的几何缺陷都可能导致薄板件相对巨大的挠度和潜在的不稳定或翘曲。

以上是“N—2—1”定位原理的主要内容,在实际的焊接夹具设计中,必须考虑到车身拼焊件的实际情况,事实上汽车制造厂的夹具大部分是单件生产,在固定的平台上安装和调试。主要通过工艺孔或零件本身形状特征定位。

通过分析和归纳,我们可以初步得到激光拼焊夹具设计的基本原则:汽车激光拼焊板的焊接夹具采用这样一种典型结构;即采用专用的固定平台式焊接结构;定位则采用定位销与支承杆相辅方式,对于易变形的车身拼焊件,定位时考虑“N—2—1”定位原理。对于普通零件采用“3—2—1”定位原理;夹紧方式则采用气动夹紧和杠杆夹紧相辅的复合夹紧方式。

据此在实际应用中,选用的定位点为6—4—2定位方式,即前向定位块在400mm长度上要保证至少6个定位挡块来限定拼焊板的前向对中精度;侧向定位采用单边有一个主定位挡块,一个辅助定位挡块,既防止侧向定位过程中,出现侧向滑动出现扭转,又防止因剪切板材形状误差而导致侧向定位偏转现象;后向定位采用的恒力推杆带2个定位挡块,既保证板材成分接触前向定位挡块,又可避免因推力不均匀而导致的侧转现象。实际定位方式如图2-12。

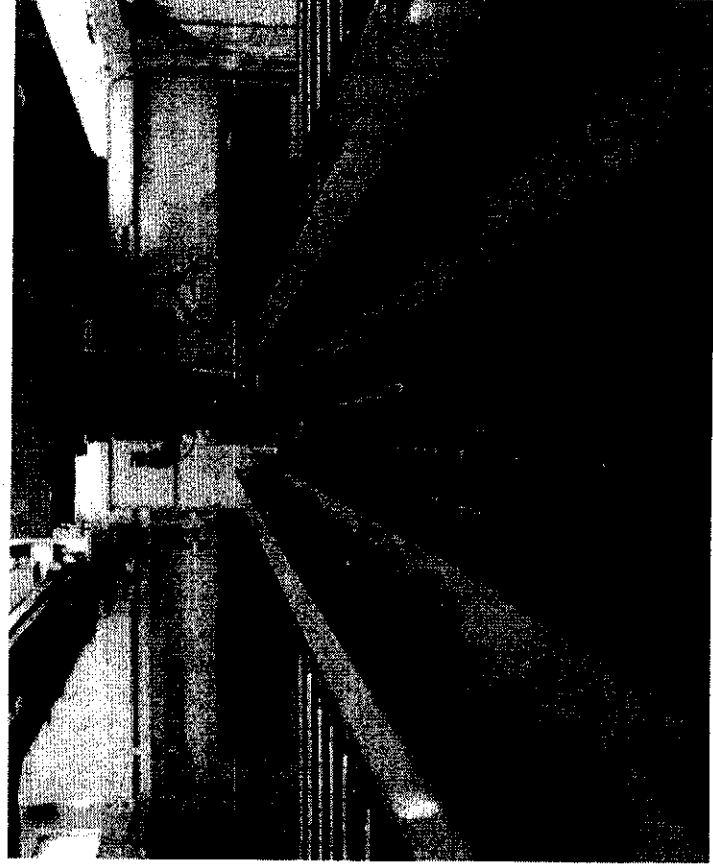


图 2-12 激光拼焊生产线定位夹紧系统

Fig 2-12 The orientation and stamp system of laser welding line

2.4.2 激光拼焊夹紧元件设计

在焊接夹具中对零件的夹紧十分重要,第一是使工件的定位基准与定位元件紧密接触;第二是保持焊接过程中零件位置不发生变动。特别是在定位焊时,必须保证零件的正确定位,不可因装配和焊接过程的外力作用和翻转夹具而变动。

一个零件若用六点定位原则,其夹紧力的数目也应当是六个,而且都应指向各个支撑点。这样就能避免夹紧力和支反作用力构成力偶,引起工件失稳,发生翻转或位置变动等不良情况。但是,从工件结构特点、工艺要求、简化夹具结构和操作方便等方面考虑,夹紧力的数目就可能多于六个或少于六个。只有当工件结构简单或要求不高时,为了简化夹具和使用方便,才可以不用夹紧件。

一般说来定位和夹紧是两个不同的概念,夹紧件不起定位作用,只是协助定位件使定位牢靠。但是在某些情况下,定位件和夹紧件往往可以设计成一体。在我们设计的夹紧元件参数库里,包括斜楔夹紧器、螺旋夹紧器、偏心夹紧器、杠杆夹紧器四类夹紧元件,并可根据需要扩充弹簧夹紧器,复合夹紧装置,多位夹紧器,四连杆夹紧件,气动夹紧器等夹紧元件。

2.5 激光拼焊定位夹紧机构设计

夹具单元通常由支架、连接板、定位块、夹紧机构、气缸及其他辅助部件组成。定位块通过连接板固定在支架上,采用气动夹紧方式,由气缸带动夹紧机构进行夹紧。主要部位有铰支销1、铰支销2和夹紧部位三处。其中铰支销1与连接板铰接,起固定作用;铰支销2与气缸铰接,通过气缸活塞杆的伸缩带动夹紧机构实现夹紧和打开两种状态,依靠夹紧部位实现夹紧功能。实际激光拼焊生产线上,夹紧定位机构物理模型如图2-13。

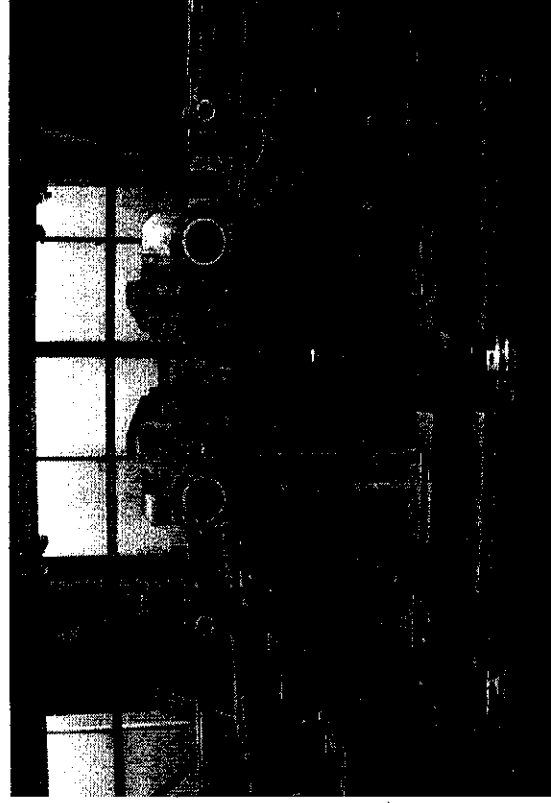


图 2-13 夹紧定位机构物理模型

Fig2-13 The true structure of orientation and stamp system

2.6 激光拼焊夹具参数化零件库和相应准则的建立

在确定了焊装夹具的基本设计准则以后,我们通过采用模块化和参数化设计技术,在 solidworks 软件平台上建立了一个三维的焊装夹具元件参数化图形库。该参数化图形库包括了焊装夹具典型结构中常用的元件,这些元件都按照相应的国标或行业标准进行参数化分类,以后用户可以直接调用,并通过修改参数就能得到想要的元件尺寸。同时可以根据需要将该参数库进行扩充,以满足用户进一步的要求。该参数化图形库建立之后,夹具的设计就是从该参数化图形库中进行零件的选用和夹具装置的装配了。这样就可以大大缩短夹具设计的时间。然后我们利用其它的图形分析软件,对被加工零件进行一定的分析,从而优化定位点和夹紧点的位置,做到焊装夹具的虚拟设计和虚拟调试。

2.6.1 定位元件参数库的设计

定位件是夹具中最重要的组成元件,它确定被装配零件在夹具中的位置,从而保证被装配的所有零件间相互位置的技术要求,有时还直接确定焊接结构的外形。定位元件的设计必须满足以下要求:

- (1) 定位件的定位要迅速可靠,保证工件能达到技术要求的精度;
- (2) 定位件应有足够的刚度和耐磨度,并与工件的接触面面积应尽可能小;
- (3) 工件定位时应不损坏工件表面;
- (4) 在保证可靠定位的前提下,定位件数量应最少,其构造和在夹具骨架上的安排应保证夹具的开敞,使工件有一定程度的伸缩变形,以减少焊接内应力;
- (5) 应尽量采用标准化和规格化的定位件,便于更换与维修,并能在一一定的范围内进行调节,以保证定位精度和焊件焊接收缩量的调整。

汽车车身拼焊件的外形特征是薄板柔性件,根据这一特征,所需要的定位元件的种类并不是很多。可以说,车身拼焊件焊装夹具定位装置的结构就是定位销与支承钉(支承板)的组合。因此定位元件库中包括了五个分库:V形块库、定位衬套库、定位销库、支承钉库和支承板库五个部分。每个分库中安装参数化设计的原则包含了车身焊装夹具所需要的大部分定位元件。

2.6.2 激光拼焊夹具参数化设计

选定了定位元件,接下来的定位基准面选择是很重要的。由于在焊接夹具上装配的零件都不是单个的,而是两个或多个。拼焊零件的工装过程,就是把这许多个零件按顺序逐个在夹具上进行定位和夹紧,待定位焊接完后才形成一个部件。在实际生产中,讨论一个零件的焊装时,经常会遇到选择定位基准的问题,一旦待装部件的装配基准确定以后,就可以按照装配顺序逐个考虑各个零件的定位基准。我们根据汽车薄板件的装配特点,初步总结出对一个零件的定位基准或待装部件适用的基准原则。

- (1) 当在零件或部件的表面上既有平面也有曲面时,优先选择平面作为首要定位基准面或组装基准面,尽量避免选择曲面,否则夹具制造困难。如果各个面都是平面时,则选择其中最大的平面作为首要定位基准面或组装基准面。
- (2) 当必须采用曲面定位时,那么就需要按照曲面的形状专门设计定位块和压块的曲面。至于导向基准面或定程基准面,一般选择零件或部件

上窄而长的平面作为导向定位基准面，而将零件或部件上窄而小的平面作为定程定位基准面。事实上在车身拼焊件焊接夹具中一般只在首尾定位基准面上才设置支承钉，其它的定位一般依靠定位销来进行定位。

(3) 对于复杂外形的零件, 一般需要使用与零件具有相似型面的的定位件来定位。在汽车夹具设计中特别是车身焊装夹具中广泛使用。

2.7 柔性激光拼焊夹具设计方案评价

目前轿车白车身一共大约采用了 14 块薄钢板拼焊而成。如图 2-15 所示。可以看到汽车白车身拼焊部件多, 不仅形状各异、焊缝形式多样而且长短也千差万别, 并且都是薄板柔性件。这就要求激光拼焊成套装备夹紧定位机构必须具有一定的柔性, 以适应工件的多样性需求。

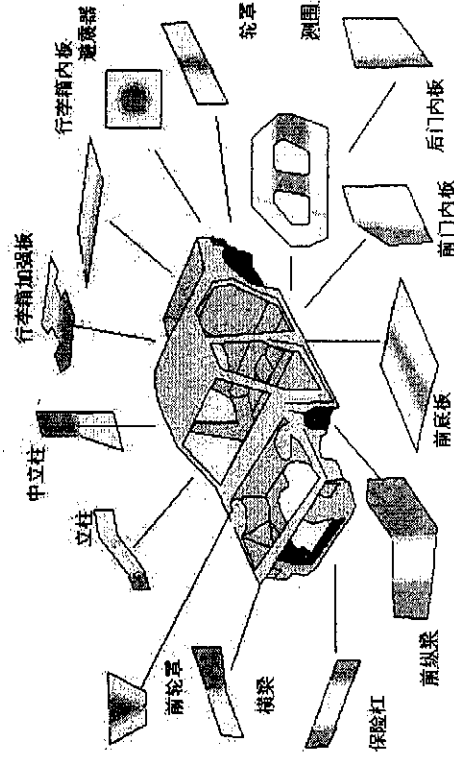


图 2-15 白车身主要拼焊件

Fig 2-15 The tailor blank of laser welding

当一个夹具设计方案产生之后,应该对其进行分析和评价,以确保设计的合理性,下图为柔性夹具设计的分析与评价目标。采用的评价函数为综合加权函数,其函数为:

$$Q_i = \sum_{j=1}^n W_{ij} Q_j$$

Q_s —加权综合评价值; W_i —第 i 个评价指标的权重; Q_i —第 i 个指标的
评价值;

激光拼焊定位夹紧机构的可靠性评价依据为:待拼焊件能否被可靠地夹紧,在焊接时夹具能否防止零件产生变形;夹具结构的开敞性、激光的可达性、

夹具上各种器件的干涉性、工件装上或卸下的方便性等。

· 装夹精度满足情况的评价依据为：激光拼焊夹具的加工精度，零件的定位方式，定位件的加工精度、刚度和耐磨性，定位件之间的间距，定位件能使焊件伸缩的余地等。

强度和刚度满足情况的评价依据为：夹具的材料和结构形式，夹具设计时的计算结果，夹具承受重力和因焊件变形所引起的各个方向的力的情况等。

可装配性的评价依据为：零件的质量，装配力的大小，装配时间，配合精度等级和公差值的大小等。这些评价目标评价值的确定方法为：① 单因素定量经验评价，即根据专家经验进行评价，采用定量分级(0-1)处理。② 单因素模糊评价，即通过模糊集函数进行模糊评价。夹具元件标准化程度的评价值可用其占夹具元件数量的百分比代替。非标准夹具元件的可加工性也可通过经验或模糊评价来确定。制造时间、制造成本、总体重量和尺寸的评价值均可定量确定。

2.8 本章小结

本章首先分析了国外主要激光拼焊成套装备制造公司目前夹紧定位，方法并且详细讨论了激光拼焊飞行光路自身特点和激光拼焊板特点，在此基础上给出了激光拼焊定位夹紧结构所必须具备的功能特点。在激光拼焊夹紧定位机构开发过程中，给出了激光拼焊夹具定位原理及设计准则，提出了“N-2-1”的定位原理，初步建立了激光拼焊夹具参数化零件库和相应准则，并对激光拼焊夹紧机构进行了一定的柔性分析，探讨了拼焊夹具的柔性评价方案。

第3章 激光拼焊成套装备焊接工艺研究

激光焊(Laser Beam Welding)是利用高能量密度的激光束作为热源进行焊接的一种高效精密的焊接方法。激光焊具有高能量密度、深穿透、高精度、适应性等优点而受到各发达国家的重视。激光拼焊由于具有能量密度高,焊缝深宽比大,变形和热影响区小,焊接速度快,满足工件不同部位对材料性能的不同需求,焊接质量好,容易实现自动化等众多优点,使其广泛应用于工业中各个领域。激光拼焊利用高能激光作为焊接热源,将两块或者多块不同材质、不同厚度、不同涂层的汽车板材一次焊接成形,实现高效率全自动化生产。本章主要工作是针对自主研发的全自动激光拼焊线面对国内市场,必须附带相应激光焊接工艺的现实而进行的。针对激光拼焊定位对中夹紧的特有工装方式,基于超大功率固体激光器的汽车拼焊工艺国内独立研究的较少,因此,有必要针对全厚度系列汽车板进行较为详细的深入研究。

3.1 激光焊接原理及分类

激光(Laser)是英文 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的缩写,意为“通过受激辐射实现光的放大”,激光利用辐射激发放大原理而产生一种单色、方向性强、光亮度大的光束。透射或反射聚焦后可获得直径小于1mm,功率密度高达 10^7w/m^2 的能束,可以用作焊接、切割及表面处理的热源。

(1) 激光焊接原理

激光焊接时,激光照射到被焊接材料表面,与其发生作用,一部分被反射,一部分进入材料内部。光子轰击金属表面形成蒸汽,蒸发的金属可防止剩余能量被金属反射掉。如果被焊金属具有良好的导热性能,则会得到较大的熔深。激光在材料表面的反射、透射和吸收,本质上是光波的电磁场与材料相互作用的结果。激光的光波入射材料时,材料中的带电粒子依着光波电矢量的步调振动,使光子的辐射变成了电子的动能。物质吸收激光后,首先产生的是某些质点的过量能量,如自由电子的动能,束缚电子的激发能或者还有过量的声子。这些原始激发能经过一定的过程再转化为热能。激光加工时,材料吸收的光能转换是在极短的时间(约为10-9ms)内完成的。在这个时间内,热能仅仅局限于

材料的激光辐照区,而后通过热传导,热能由高温区传向低温区。

(2) 激光焊接分类

按激光束的输出方式不同,可以把激光焊分为脉冲激光焊和连续激光焊。连续激光焊在焊接过程中形成一条连续的焊缝。脉冲激光焊接时,输入到工件的能量是断续的、脉冲的,每个激光脉冲在焊接过程中形成一个圆形焊点。若根据激光焊时焊缝的形成特点(或激光对工件作用的功率密度),又可分为传导激光焊和深熔焊。前者使用的激光功率密度低,一般小于 10^5 W/cm^2 ,熔池形成时间长,且熔池较浅,多用于小型零件的焊接;后者使用的激光功率密度较高,大于 10^6 W/cm^2 ,激光辐射区金属的熔化速度快,在金属熔化的同时伴随着强烈的汽化,能获得熔深较大的焊缝,焊道的深宽比较大,可达 12:1。这两种方式最根本的区别在于:前者熔池表面保持封闭,而后者熔池则被激光束穿透成孔。传导焊对系统的扰动较小,因为激光束的辐射没有穿透被焊材料,所以,在传导焊过程中焊缝不易被气体侵入。而深熔焊时,小孔的不断关闭能导致气孔。传导焊和深熔焊方式也可以在同一焊接过程中相互转换,由传导方式向小孔方式的转变取决于施加于工件的峰值激光能量密度和激光脉冲持续时间。激光脉冲能量密度的时间依赖性能够使激光焊接在激光与材料相互作用期间由一种焊接方式向另一种方式转变,即在相互作用过程中焊缝可以先在传导方式下形成,然后再转变为小孔方式。

3.2 激光拼焊工艺特点

在激光焊接过程中,当激光束触及金属材料时,其热量通过热传导传输到工件表面及表面以下更深处。在激光热源的作用下,材料熔化、蒸发,并穿透工件的厚度方向形成狭长空洞,随着激光焊接的进行,小孔沿两工件间的接缝移动,进而形成焊缝。与一般的焊接方法相比,激光焊具有以下特点:

- (1) 聚焦后的激光束具有高的功率密度(10^5 - 10^7 W/cm^2 或更高),加热速度快,可实现深熔焊和高速焊。由于激光加热范围小,在相同功率和焊接厚度条件下,焊接速度快、热影响区小、焊接应力和变形小。
- (2) 激光能发射、透射,能在空间传播相当距离而衰减很小,可进行远距离或一些难以接近部位的焊接;激光可通过光导纤维、棱镜等光学方法弯曲传输、偏转、聚焦,特别适合于微型零件、难以接近的部位或远距离的焊接。
- (3) 一台激光器可供多个工作台进行不同的工作,既可用于焊接,可用于切割、合金化和热处理,一机多用。

- (4) 激光在大气中损耗不大, 可以穿过玻璃等透明物体, 适合于在玻璃制成的密封容器里焊接被合金等剧毒材料; 激光不受电磁场影响, 不存在X射线防护, 也不需要真空保护。
- (5) 可以焊一般焊接方法难以焊接的材料, 如高熔点金属等, 甚至可用于非金属材料焊接, 如陶瓷、有机玻璃等。焊后无需热处理, 适合于某些对热输入敏感材料的焊接。

激光拼焊 (LBW) 的显著特征是大熔深、窄焊道、小热影响区以及高功率密度。激光焊接代表着一种在微小区域内加热与冷却之间的精细平衡。激光焊接的目的是通过辐射吸收产生液态熔池, 并使之长到理想尺寸, 然后沿固体界面移动, 消除被焊件间的初始缝隙, 形成高质量焊缝。熔池过大、过小, 或者蒸发严重, 都将导致焊接失败。此外, 焊缝的最终质量还可能因其它因素的改变而恶化, 如合金成分的蒸发, 过大的热梯度(导致热裂纹)以及焊接熔池体积与几何形状的不稳定(导致气孔和空穴)等。热输入与输出之间平衡的维护取决于激光的稳定吸收及能量在工件内部的均匀传递。激光向工件传递的途径经常被激光焦点处产生的蒸气所干扰, 在一定条件下, 这种蒸气可以转化为等离子体, 从而由于吸收和溅射而使激光强度减弱。在焊接熔池存在时, 熔合区与周围基体材料间界面几何形状的稳定, 是决定工件内部稳定传热的主要因素, 在焊接过程中工件移动或激光束移动的时候, 固液界面经常受到干扰, 既然存在这么多潜在的限制因素, 很难想象激光焊接会获得高质量的焊缝。但是, 不管激光焊接中激发与冷却平衡过程存在多少限制, 大量的传热与机械时间常数仍能共同作用, 以适应激光焊接的要求, 并将各种波动减轻到一定程度, 进而建立稳定的焊接条件。

激光拼焊工艺研究的首要目标就是研究影响激光焊接稳定性和重现性的参数, 并寻求控制这些参数的方法。这首先应从激光源本身出发, 因为输出功率与模式的波动在焊接熔池中转换成热波动, 从而导致激光焊接过程不稳定性产生。

3.3 激光拼焊工艺参数对焊接质量影响规律研究

对于主要应用于汽车行业的激光拼焊成套装备来说, 产量都在几十万片到上百万片。然而国产汽车钢材, 不同批次、不同厂家相同牌号的钢材内部化学成分均匀性也不一致, 又由于激光焊接对材料的敏感性, 这就要求激光焊接过程中焊接工艺规范必须加以微调, 来保证焊接质量的一致性。激光拼焊工艺参数对焊接质量影响规律研究目的是为激光焊接工艺规范微调提供调整方向提

供参考依据,同时也为激光拼焊工艺库的建立提供推理规则。

评价焊接质量的指标主要有焊缝的深度、宽度、热影响区大小以及焊缝显微组织和焊接接头性能等。而影响焊接质量的工艺参数主要包括激光模式、功率、焊接速度、焦点位置等,合适的工艺参数是取得良好焊接效果的关键。针对激光焊接在汽车工业中的应用越来越广泛,我们运用自行设计的焊接设备对汽车钢板进行焊接实验,研究激光功率、焊接速度、焦点位置等工艺参数变化对焊接熔深、焊缝宽度的影响。

3.3.1 试验设备

全自动激光拼焊零号生产线:

激光器为德国通快公司 Nd: YAG 型号 HL4006D 固体激光器。

主要参数:

激光器额定输出功率	4000 W;
激光波长	1.06 μm ;
光斑尺寸	$\phi 0.6\text{ mm}$;
焦距	223mm
光束质量	25 mm.mrad
工作台面	1650 $\times$ 1500mm;
工作台	X 方向行程 1500mm; Y 方向行程 1650mm; Z 方向行程 800mm。

年产量为 120 万件/年,生产节拍为 15s/件,最大焊接速度为 15m/min。

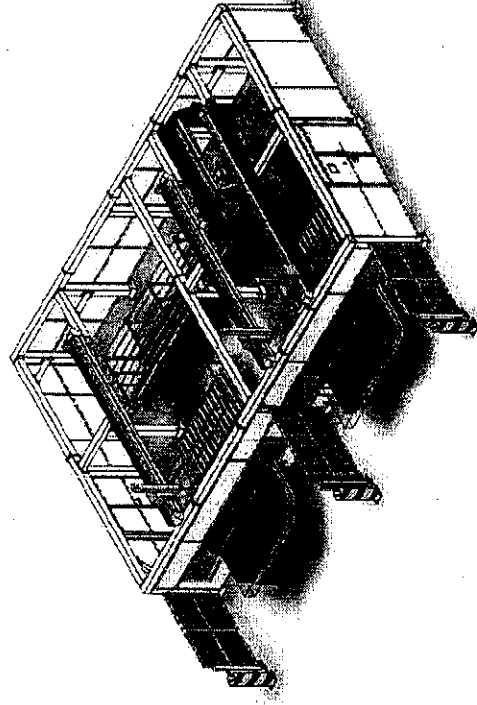


图 3-1 全自动激光生产线

Fig3-1 The tailor blank laser welding line

3.3.2 试验材料与规格

试验材料：200×100 汽车钢板，材料牌号 DC06 和 DC04Z；材料化学成分(质量分数)：

表 3-1 材料化学成分

Tab3-1 The chemistry component of blank sheet

钢号	C	Si	Mn	P	S
DC06	0.008	0.03	0.03	0.02	0.015
DC04Z	0.08	—	0.04	0.02	0.003

3.3.3 试验结果与分析

我们采用侧吹氩气进行保护和抑制等离子体，对低碳钢板进行焊接实验，并对焊接试样进行测试和分析。

(1) 激光功率对焊接质量影响

激光功率通常指激光器的输出功率，功率密度是激光焊接中最关键的参数之一。采用较高的功率密度(即工件上功率密度 $>10^6\text{W}/\text{cm}^2$)，在微秒时间范围内，表层即可加热至沸点，产生大量汽化。图 3-2 为焊缝深度和宽度随激光功率变化的测量结果。其中焊接速度为 1.5 m/min, 离焦量为 0。

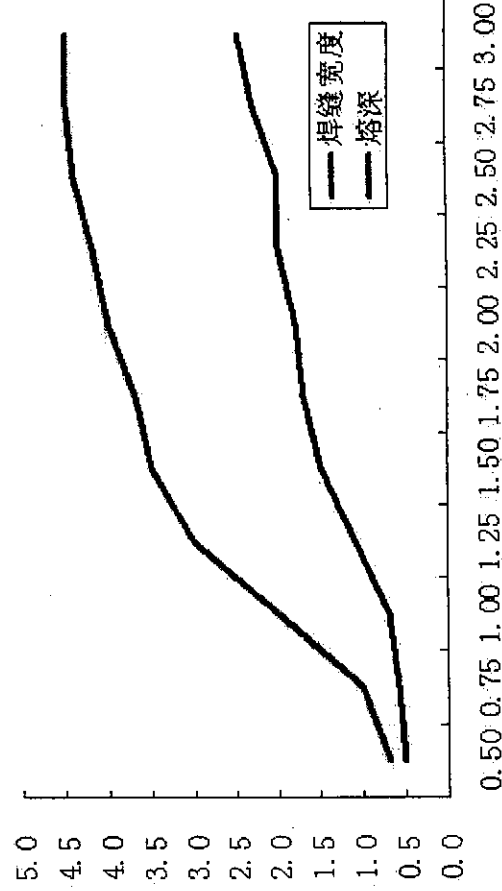


图 3-2 焊接熔深和熔宽与激光功率的关系

Fig3-2 The effect of laser power on depth and width of welding

可见,当激光功率比较小时,焊接熔深很浅,不到1mm,随着激光功率增加,熔深增加也比较缓慢,此时激光能量只被材料表面吸收,当功率大于0.7kW后,随着激光功率的增加,熔深急剧增加,两者几乎成线性关系,而且焊缝宽度也在增加,说明在这个过程中,高的激光功率密度使得熔融金属内形成了小孔效应,实现了深熔焊接。但当功率超过3.0kW后,随着功率的增加,此时熔深基本上不增加,而焊缝宽度却还是继续增大,分析其原因,可能是随着功率密度的增大,小孔内产生的等离子体增多,对入射激光束进行屏蔽,使得激光能量难于到达孔底继续熔化金属,从而使熔深不再增加。

高功率密度对于材料的深熔焊接可以说是很有利的。对于较低功率密度(即工件上功率密度 $< 10^5 \text{W/cm}^2$),表层温度达到沸点需经历数毫秒。激光熔深与激光输出功率密度直接有关,并且是入射光束功率和光斑直径的函数。在其它条件相同时,高功率激光焊接获得的熔深大,但当激光功率过大时容易飞溅而使焊接工件的表面形貌和焊接的质量均较差。不同材料在相同的激光功率下焊接的熔深也有着一定的差异,这与材料对激光的吸收有关,不同材料对激光的吸收系数不同,作用在工件上的有效激光功率就有着差异,从而就会产生不同的熔深。

(2) 焊接速度对焊接质量的影响

激光焊时,可以用线能量来描述焊件接受激光辐射能量的情况。线能量定义为:单位长度焊缝接受的激光能量。焊接速度大时,焊缝的线能量小,熔深下降,反之,可以获得较大的熔深。

图3-3是焊接熔深和焊缝宽度与焊接速度的关系,此时激光焦点位置在工件表面,焊接功率为2.5kW。

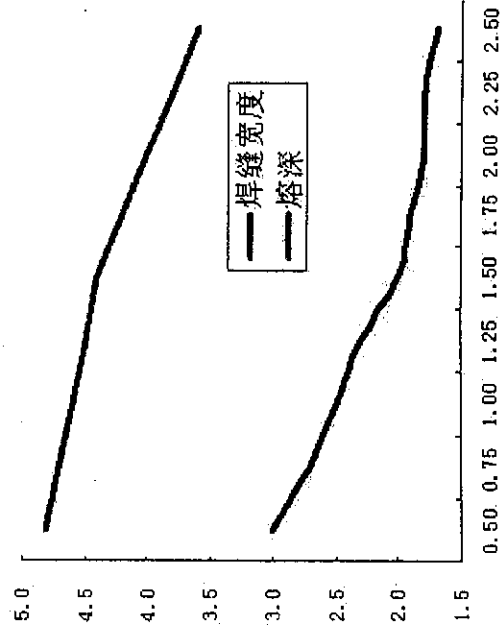


图3-3 焊接熔深、焊缝宽度与焊接速度的关系

Fig3-3 The effect of welding speed on depth and width of welding line

从图3-3中可看出,随着焊接速度的增加,熔深和焊缝宽度逐渐减小,而

深宽比有一定程度的增大。试验表明,熔深随焊接速度的增加几乎是呈线性下降。焊接速度在不同功率下和熔深的关系很大。在较低的焊接速度下,随着焊接速度的提高,熔深明显减小。而在焊接速度超过一定值后,再提高焊接速度对熔深的影响逐渐减弱,这就是说,激光焊可以在较高的焊接速度下实现深熔焊。在功率一定时,焊接速度越大,熔深越小。

但是如果焊接速度过快或过慢,都会影响焊缝成型,图 3-4 分别是焊接速度为 0.5m/min, 1.5m/min 和 3 m/min 时的焊缝外形。



图 3-4 不同焊接速度下的焊缝外形

Fig3-4 The shape of welding line between different welding speed

可见,当焊接速度过快时,在被焊工件焊缝凹凸不平,这是由于焊接速度过快,金属未熔透和自淬速度过快以致不能流动和融合,而且焊缝中的有害气体如 N_2 , H_2 , O_2 及 CO 来不及逸出,使焊缝气孔增多,从而会影响焊缝的抗弯强度和外观。而当焊接速度过慢时,可以观察到由于过量的热传导引起的焊道向侧向扩展,热影响区过热、扩大。所以适中的焊接速度对焊接也非常重要。

(3) 离焦量对焊接的影响

作用于工件表面的激光功率密度除了和激光束的焦斑功率密度有关外,还取决于工件表面与焦斑的相对位置(离焦量)。离焦量是指工件表面离激光焦点的距离,焦点工件表面在以内时为负离焦,反之为正离焦。激光焊接通常需要一定的离焦量;因为激光焦点处光斑中心的功率密度过高,容易蒸发成孔。离开激光焦点的各平面上,功率密度分布相对均匀。离焦量不仅影响工件表面激光光斑的大小,而且影响光束的入射方向。

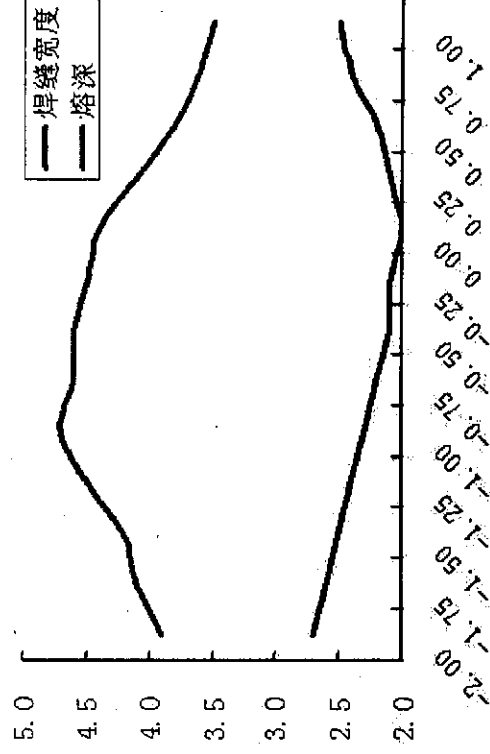


图 3-5 熔深、焊缝宽度与离焦量的关系

Fig3-5 The effection defocusing on depth and width of welding line

图 3-5 为激光功率 $P=2.5\text{kW}$ 焊接速度 $v=1.5\text{m/min}$ 时不同的离焦量对熔深和焊缝宽度的影响,可见激光束的离焦量对熔深有很大的影响,激光束腰处的功率密度最大,束腰位于工件上时(正离焦)工件获得的功率密度相应降低,会形成“钉头”状焊缝,熔深减小;当束腰处于工件内时(负离焦),可增加熔深,形成 V 形焊缝。从试验可以看出,焦点位置在钢板表面下 $0.5\sim 1.0\text{mm}$ 左右最佳,而且离焦量不能太大,否则会导致熔深损失太大,深宽比下降,甚至因功率密度不足而导致焊接失败。

3.4 侧吹保护气体对激光拼焊影响规律研究

激光焊接过程中,通过侧向吹辅助气体能够增强等离子体附近区域的对流和冷却作用,从而削弱等离子体、有效抑制等离子体对入射激光束的吸收、改善激光能量的耦合和传输过程。此外,辅助气体还可以抑制周围环境气体对焊缝附近区域的污染。

为了研究侧吹辅助气体对激光焊接过程的影响规律,试验了不同的侧吹工艺下,焊缝形貌的变化。

3.4.1 试验设备

试验设备: 多功能数控加工实验台。

主要性能数:

激光器额定输出功率 3000 W;

- 激光波长 10.6 μ m;
- 光斑尺寸 ϕ 0.4 mm;
- 焦距 7.5" ; (190.5mm)
- 工作台面积 600 $\times$ 500mm;
- 工作台行程 X 方向行程 1200mm;
- Y 方向行程 800mm;
- Z 方向行程 200mm。

侧吹喷嘴内半径 2.5mm。

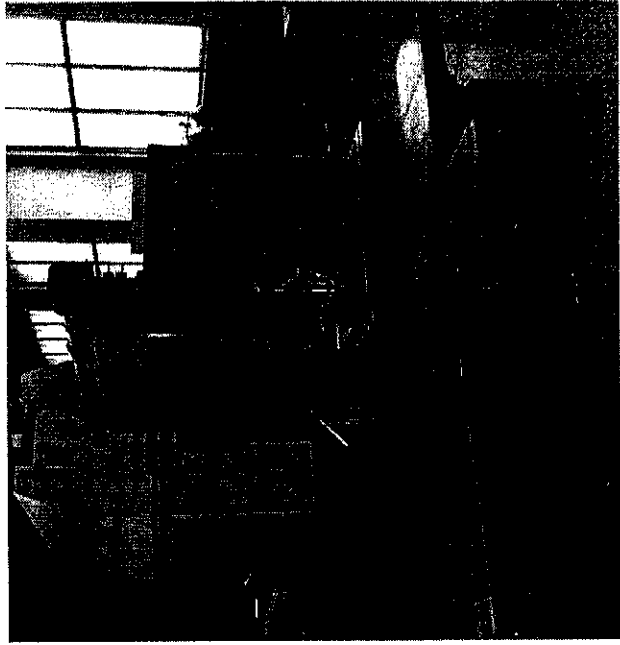


图3-5中功率多功能实验台
Fig3-5 The laboratorial machine of laser welding

3.4.2 试验材料与规格

试验材料：200 $\times$ 100 $\times$ 2 mm不锈钢钢板，材料牌号 304；材料化学成分(质量分数)：

表 3-2 材料化学成分

Tab3-2The chemistry component of blank sheet

C	Mn	Cr	Ni	备注
$\approx$ 0.08%	$\approx$ 0.9%	$\approx$ 18%	$\approx$ 9%	奥氏体

3.4.3 试验方法

整个试验过程中下列参数保持不变：激光功率为 2kw；焊接速度为 1.5m / min。

进行了三组试验：

第一组试验在侧吹喷嘴高度分别为 1mm、3 mm、5 mm、7 mm、9 mm 的情况下进行了不锈钢薄板的激光焊接试验，以研究喷嘴高度变化对焊缝熔透情况和焊缝表面熔宽的影响。试验中侧吹角度为 30° ；侧吹气体流速 15L / min。

第二组试验对比研究了侧吹角度为 30° ，侧吹喷嘴高度为 5mm 的情况下，侧吹保护气体流速变化对焊缝的熔透情况、焊缝表面熔宽的影响。侧吹保护气体流速的取值分别为 3L / min、6L / min、9L / min、12L / min、15L / min。

第三组试验研究了侧吹角度分别取 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 时焊缝的背面和正面焊缝表面宽度。

3.4.4 试验结果与分析

(1) 侧吹喷嘴高度的影响

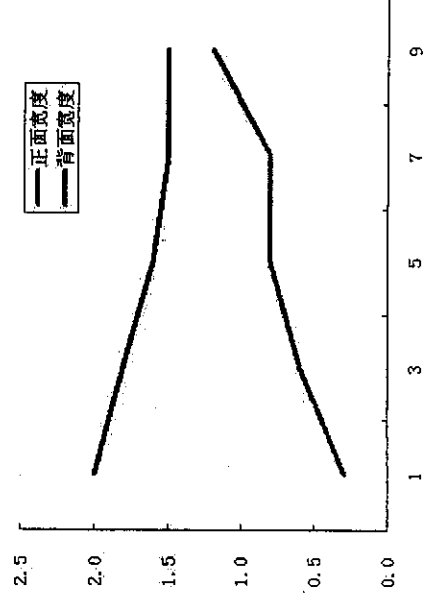


图3-6 焊缝熔宽随喷嘴高度的变化

Fig3-6 The influence of Nozzle height

图 3-6 是不同侧吹喷嘴高度下的激光拼焊焊缝正面和背面熔宽随喷嘴高度的变化规律。从图 3-6 可以看到侧吹喷嘴高度对焊接结果的影响很显著。总体趋势是随着侧吹喷嘴高度增加，激光拼焊焊缝正面熔宽逐渐减小和背面熔宽逐渐增大，分析原因随着喷嘴高度的提高保护效果逐渐变差，吹走等离子的性能减低，保护气体的影响降低所致。激光拼焊焊缝正面熔宽随着侧吹喷嘴高

度增加逐渐减低然后趋于平缓;背面熔宽随着侧吹喷嘴高度增加逐渐升高然后保持不变最后有所增加。由实验可以看出当喷嘴高度在 5-7 mm 时效果最佳。

(2) 侧吹保护气体流速的影响

侧吹保护气体流速的变化对焊缝熔透情况和焊缝表面熔宽影响的试验结果见图3-7。

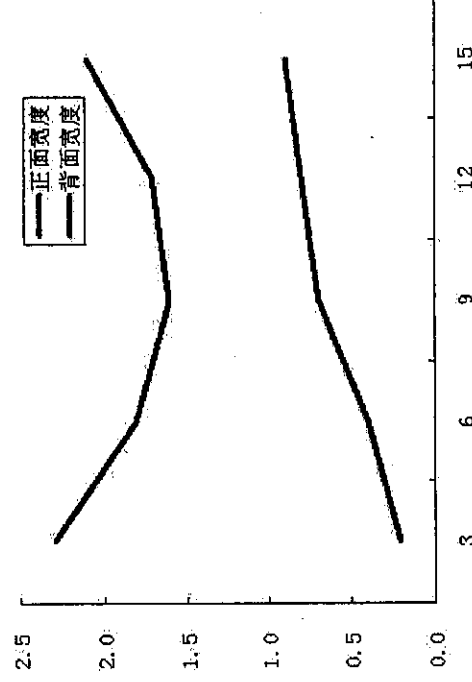


图3-7 侧吹流速对焊缝熔宽的影响

Fig3-7 The influence of velocity of flow

图 3-7 是不同侧吹气体流速下的激光拼焊焊缝正面和背面熔宽随喷嘴高度的变化规律。从图 3-7 可以看到侧吹喷嘴高度对焊接结果的影响很显著。总体趋势是随着侧吹气体流速增加,激光拼焊焊缝正面熔宽先减小后增加和背面熔宽逐渐增大,分析原因随着气体流速的提高保护效果逐渐变好,吹走等离子体的性能增加,保护气体的影响降低所致。激光拼焊焊缝正面熔宽随着侧吹气体流速增加逐渐减低然后增加;背面熔宽随着侧吹气体流速增加逐渐升高然后保持逐渐趋于平滑,但 3-9L/min 增加的速度明显快于 9-12L/min。由实验可以看出当气体流速在 12L/min 时效果最佳。

(3) 保护气体侧吹角度的影响

研究侧吹角度分别取 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 时焊缝的背面和正面焊缝表面宽度,图中侧吹角度是指侧吹喷嘴轴线和水平方向之间的夹角。

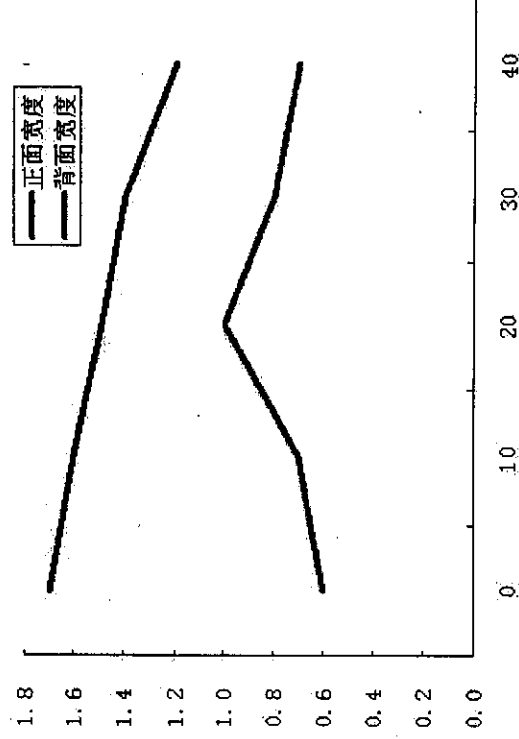


图3-8 侧吹角度对焊缝熔宽的影响

Fig3-8 The influence of nozzle angel on width of welding line

从图 3-8 是不同侧吹气体喷嘴角度的激光拼焊焊缝正面和背面熔宽随喷嘴高度的变化规律。从图 3-8 可以看到侧吹侧吹气体喷嘴角度对焊接结果的影响很显著。总体趋势是随着侧吹气体喷嘴角度增加,激光拼焊焊缝正面熔宽逐渐减低,分析原因随着侧吹气体喷嘴角度升高的提高保护效果逐渐变差,吹走等离子体的性能降低,保护气体的影响降低所致。激光拼焊焊缝正面熔宽随着侧吹气体喷嘴角度增加逐渐减低;背面熔宽随着侧吹气体喷嘴角度增加逐渐升高然后又逐渐降低。说明此时激光能量耦合作用随角度的增大而减弱。侧吹气体有利于把高温蒸汽云团从小孔上方吹走,起到了对流和冷却的作用,从而有效地抑制光致等离子体。由实验可以看出当气体流速在 30 度时效果较好。

3.5 全系列汽车板材激光拼焊工艺规范最优化

激光拼焊是指冲压成型前将不同厚度、不同材质或不同表面涂层的板坯料采用高能激光作为焊接热源的一种焊接方式。

3.5.1 试验设备

(1) 激光拼焊设备

试验平台为全自动激光拼焊零号生产线,具体指标为:

激光器为德国通快公司 Nd: YAG 型号 HL4006D 固体激光器。

主要参数:

- 激光器额定输出功率

4000 W;

激光波长

1.06 μ m;

光斑尺寸

ϕ 0.6 mm;

焦距

223mm

光束质量

25 mm.mrad

工作台面积

1650 $\times$ 1500mm;

工作台

X 方向行程 1500mm;

Y 方向行程 1650mm;

Z 方向行程 800mm。

年产量为 120 万件/年，生产节拍为 15s/件，最大焊接速度为 15m/min。

(2) 质量检测项目与设备

焊缝外观目测与初步检验，设备：角尺、刻度放大镜、千分尺。

焊缝断面形状与尺寸检测，设备：锯床、注塑机、研磨设备、腐蚀设备、显微观察与测量设备。

机械强度检测：纵向拉伸强度、纵向拉伸强度，设备：锯床，拉伸试验机。

冲压成型检测：冲压成型能力，设备：杯突试验机。

金相组织检测：锯床、注塑机、研磨设备、腐蚀设备、显微观察与金相分析设备。

3.5.2 试验材料与规格

试验材料：200 $\times$ 100 汽车钢板，材料牌号 DC06 和 DC04Z；材料化学成分(质量分数)：

表 3—3 材料化学成分

Tab3-3The chemistry component of blank sheet

钢号	C	Si	Mn	P	S
DC06	0.008	0.03	0.03	0.02	0.015
DC04Z	0.08	—	0.04	0.02	0.003

3.5.3 质量寻优检测标准

焊缝质量具体评价标准：具体评价采用国际标准 ISO 13919-1。

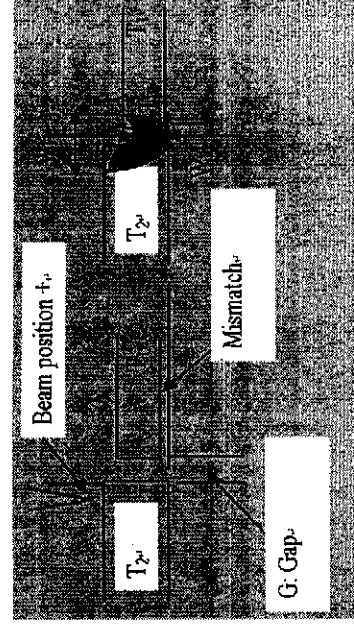


图3-9焊缝截面示意图

Fig3-9 The section of welding line

(1) 焊缝高度比不小于 0.8, 即 $\frac{T_w}{T_1} = \frac{T_1 + T_2}{2} \times \frac{W_F + W_R - 2G}{W_F + W_R}$ 。

(2) 焊缝背部宽度不小于 0.5mm。

(3) 错配小于不大于薄板厚度的 15%。

(4) 气孔直径不大于薄板厚度的 30%。

(5) 焊缝强度不低于母材。

(6) 杯突试验断裂点不位于焊缝, 杯突值不低于母材 75%。

(7) 焊缝无外观瑕疵, 焊缝有明显波纹理。

(8) 焊缝表面突起或凹陷不大于薄板厚度的 10%。

(9) 厚板切割阶梯高度不大于薄板厚度的 10%。

3.5.4 试验设计

(1) 拼板厚度组合

根据全系列汽车板材激光拼焊工艺规范最优化目的, 设计如下各组实验:

- 第一组: $\frac{DC04 \times t = 0.7}{DC04 \times t = 1.4}$, 代号 A
- 第二组: $\frac{DC04 \times t = 0.8}{DC04 \times t = 1.6}$, 代号 B
- 第三组: $\frac{DC06 \times t = 1.5}{DC04 \times t = 2.5}$, 代号 C
- 第四组: $\frac{DC06 \times t = 1.5}{DC04 \times t = 2.0}$, 代号 D
- 第五组: $\frac{DC06 \times t = 1.0}{DC04 \times t = 1.6}$, 代号 E
- 第六组: $\frac{DC06 \times t = 1.0}{DC04 \times t = 2.0}$, 代号 F
- 第七组: $\frac{DC06 \times t = 1.0}{DC04 \times t = 2.5}$, 代号 G
- 第八组: $\frac{DC04 \times t = 2.0}{DC04 \times t = 2.5}$, 代号 H
- 第九组: $\frac{DC04 \times t = 0.8}{DC04 \times t = 0.8}$, 代号 I
- 第十组: $\frac{DC06 \times t = 1.0}{DC06 \times t = 1.0}$, 代号 J
- 第十一组: $\frac{DC06 \times t = 1.5}{DC06 \times t = 1.5}$, 代号 K
- 第十二组: $\frac{DC04 \times t = 2.0}{DC04 \times t = 2.0}$, 代号 L

(2) 工艺参数组合试验

表 3-4 激光功率与焊接速度参数组合试验

Tab3-4 The combination test of laser power and welding speed

		焊接速度 (m/min)					
		2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
激光功率 (kW)	2.0	B11	B12	B13	B14	B15	B16
	2.5	B21	B22	B23	B24	B25	B26
	3.0	B31	B32	B33	B34	B35	B36
	3.5	B41	B42	B43	B44	B45	B46
	4.0	B51	B52	B53	B54	B55	B56

表 3-5 离焦量和光斑偏移量组合试验

Tab3-5 The combination test of defocus and laser excursion

离焦量	问 隙	光斑偏移量 (mm)										
		-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0	+0.1	+0.2	+0.3	+0.4		
-4mm	0	C111	C112	C113	C114	C115	C116	C117	C118	C119		
	0.1	C121	C122	C123	C124	C125	C126	C127	C128	C129		
	0.2	C131	C132	C133	C134	C135	C136	C137	C138	C139		
	0.3	C141	C142	C143	C144	C145	C146	C147	C148	C149		
-2mm	0	C211	C212	C213	C214	C215	C216	C217	C218	C219		
	0.1	C221	C222	C223	C224	C225	C226	C227	C228	C229		
	0.2	C231	C232	C233	C234	C235	C236	C237	C238	C239		
	0.3	C241	C242	C243	C244	C245	C246	C247	C248	C249		
0mm	0	C311	C312	C313	C314	C315	C316	C317	C318	C319		
	0.1	C321	C322	C323	C324	C325	C326	C327	C328	C329		
	0.2	C331	C332	C333	C334	C335	C336	C337	C338	C339		
	0.3	C341	C342	C343	C344	C345	C346	C347	C348	C349		
2mm	0	C411	C412	C413	C414	C415	C416	C417	C418	C419		
	0.1	C421	C422	C423	C424	C425	C426	C427	C428	C429		
	0.2	C431	C432	C433	C434	C435	C436	C437	C438	C439		
	0.3	C441	C442	C443	C444	C445	C446	C447	C448	C449		
4mm	0	C511	C512	C513	C514	C515	C516	C517	C518	C519		
	0.1	C521	C522	C523	C524	C525	C526	C527	C528	C529		
	0.2	C531	C532	C533	C534	C535	C536	C537	C538	C539		
	0.3	C541	C542	C543	C544	C545	C546	C547	C548	C549		

3.5.5 试验结果与分析

试验的具体参数及结果如表 3-6 所示:

表 3-6 试验结果

Tab3-6 The result of test

组别	参数			焊接结果
	功率	速度	离焦量	偏移量
A	4	8.5	0.2	0.064
	4	8.8	0.2	0.032
	4	9	0.3	0
	4	9	0.3	0
B	4	9.3	0.3	0
	4	8.5	0.2	0.1
	4	8.8	0.2	0.1
C	4	6.4	-0.1	0
D	4	6.4	-0.1	0.048
	4	7.4	-0.1	0.048
	4	7.4	0.1	0
	4	8	0.1	0.048
	4	8	0.1	0
	4	8	-0.2	0.048
E	4	8	-0.3	0.064
	4	8.5	-0.3	0.064
	4	10	0.2	0.064
F	4	10	0.2	0.12
	4	10	0.2	0.08
G	4	10	0.2	0.06
	4	7	0.4	0.06

	4	6.4	0.2	0.15	不合格
	4	6.4	0.6	0.12	不合格
	4	6.4	0.6	0.05	焊缝形态良好
H	4	6	0	0.02	不合格
	4	6	0	0	焊缝形态良好
I	4	15	-0.1	0	正面焊缝较好, 背面焊缝细, 有间断
	4	13	0.2	0	焊缝形态良好
J	4	13	0.2	0	正、背面焊缝窄, 有间断
	4	12	0.2	0	正、背面宽度足够, 不光滑, 背面粗细不均匀
	4	12.3	0	0	焊缝形态良好
K	4	10	0	0	正、背面焊缝窄, 不光滑, 不均匀
	4	9	0.2	0	焊缝形态良好
L	4	6	0	0	正、背面焊缝宽度足够, 表面很粗糙
	4	7	0.2	0	较上面结果好, 仍有些粗糙
	4	7.2	0.1	0	焊缝形态良好

通过以上试验, 得出了出焊接质量最优工艺规范, 列表如 3-7, 存入工艺参数库。

表 3-7 最优工艺规范参数

Tab3-7 The parameter optimization of tailor blank welding line

板材厚度 (mm)	最优工艺规范参数			
	功率 (KW)	焊接速度 (m/min)	离焦量 (mm)	偏移量 (mm)
0.7+1.4	3.5	9.3	0.3	0
0.8+1.6	3.8	8.8	0.2	0.1
1.0+1.6	4	10	0.2	0.06
1.0+2.0	4	10	0.2	0.08
1.0+2.5	4	6.4	0.6	0.05
1.5+2.0	4	8.5	-0.3	0.06
1.5+2.5	4	6.4	-0.1	0
2.0+2.5	4	6	0	0
0.8+0.8	2.8	13	0.2	0
1.0+1.0	3.0	12.3	0	0

1.5+1.5	3.5	9	0.2	0
2.0+2.0	4	7.2	0.1	0

3.6 本章小结

本章首先分析了激光拼焊工艺特征,重点研究了激光拼焊工艺参数主要包括激光功率、焊接速度、离焦量和侧吹保护气体喷嘴高度、倾斜角度及气体流量等因素变化对焊接质量影响,获得到了变化规律曲线,为激光拼焊接工艺参数微调方向提供参考依据;同时也为激光工艺库开发提供推理机制。最后又系统地研究了目前汽车行业白车身常用板材全厚度系列激光拼焊工艺,获得了适用于全自动激光拼焊生产线的最优工艺规范。

第4章 激光拼焊成套装备工艺库系统开发

激光加工采用大功率进行焊接热加工,它在材料加工中具有诸多特殊的优越性,经过多年的研究开发,激光加工工艺已形成系列。随着激光加工工业应用的不断发展,各种工艺参数和数据资料越来越多、越来越复杂,如何有效地管理、利用这些数据资源,使其更好地为实际生产服务,是一个急需解决的问题。同时,针对激光拼焊成套装备项目开发面临的问题:在中国市场中,激光拼焊成套装备销售必须附带汽车行业常用工艺规范库的现实问题,开发激光拼焊生产线专用工艺参数库,为实际生产提供参考依据。

本章初步建立了激光拼焊工艺库系统,基本实现了激光拼焊工艺的保存、查询、演示、经济评估和推理预测等功能,并且该系统采用分布式客户机/服务器模式构建,满足激光拼焊成套装备网络化和集成化的需要。

4.1 焊接数据库系统国内外发展状况

4.1.1 焊接数据库系统国外发展状况

数据库技术的出现,为焊接领域内各种数据和信息的管理提供了有利条件,各国焊接机构相继建立了不同类型和不同用途的焊接数据库系统。

1976年,日本专门成立了焊接数据库委员会,1986年召开了第五次会议,提出了将要在今后几年内,建立试验钢材、焊接方法、坡口形状、焊接材料、焊接条件、焊缝金属化学成分、预热和后热、热处理等条件及焊接接头性能的数据库,确定了今后数据库的发展方向。

1984年,美国专门成立了材料数据库网,在世界范围内收集有关材料数据,包括力学性能、物理性能、化学成分及电化学腐蚀性能等。

1989年,美国巴地蒙雨电器公司,建立了焊工技能评定数据库系统,记录焊工的个人情况、考试参数及焊接参数等,并定时提供各种数据报表。

表 4-1 1995 年部分西方国家完成的部分数据库系统

Tab 4-1 Part of western countries' finished database systems in 1995

软件名称	主要功能	设计单位	国家
WELDSPEC	焊接工艺管理	TWI	英国
WELDERQUAL	焊工记录管理	TWI	英国
NDTSPSEC	探伤记录管理	TWI	英国
WELDING ORDINATOR	制造信息管理	TWI	英国
QMWELD	制造信息管理	TWI	英国
XWELD	焊接工艺管理	TWI	英国
WELDPLAN	焊接工艺设计	FORCE 研究所	挪威
SANWELD	焊接材料选择	Sandvik	丹麦
WELDER QUALFICTION	焊接工艺管理	OGL	英国
WELDPROC	焊工记录管理	IVF	瑞典
FARCON	焊工记录管理	LOGICAL	英国
QWEST	制造控制	LOGICAL	英国
WELDMANER	焊接工艺管理	Renown	英国
PQRDATABASE	焊接数据库	焊接研究所	美国
WELDPLAN	存储工艺库	焊接研究所	美国
FILER2	焊接生产计划	焊接研究所	美国
WELDSPEC	焊材数据库	DAVIGON	英国
WELDERQUAL	焊工档案数据库	焊接研究所	英国

美国加州 BerNask 根据 ASME 法则第 IX 篇建立了标准咨询系统。

1990 年, 美国焊接研究所完成了工艺评定数据库(PQR database)及焊接数据库系统(Weld-manager)。

英国焊接研究所, 1986 年建立了焊接工艺数据库 Weld Spec。该系统是根据英国 BS4870 标准设计的, 可以分别按照工艺评定号、母材类别、接头形式、厚度范围、焊接方法及焊接位置进行焊接工艺评定记录查询。英国 Darvignan 工业公司建立了焊接材料数据库系统。

德国焊接协会, 1987 年开始建立焊接信息系统, 其中包括两个数据库系统: 焊接文献数据库及焊接记录数据库。

表 4-2 是西方国家已经完成的部分数据库和已经商品化的焊接数据库。

表 4-2 商品化的焊接数据库系统

Tab 4-2 Commercial welding database systems in 1995

软件名称	主要内容	参照标准	研究部门
CORRALD WPS/PQR	WPS 及 PQ 管理	AWS D1.1	美国焊接研究所
CORRAL9	WPS 及 PQ 管理	ASME IX	美国焊接研究所
WELDSPEC PLUS	WPS 及 PQ 管理	ASME IX	爱迪生研究所
WELDERQUAL PLUS	焊工记录管理	ASME IX	爱迪生研究所
WELD-IT	焊接技术咨询	-	加拿大焊接局
WELDING PRO-WRITE	PQR 管理	ASME IX	美计算机工程公司
WELD SELECTOR	焊条选择咨询	ASTM AWS	美国焊接研究所
TURBO-IX	ASME 咨询	ASME IX	美国研究所
SUPERWELD BEST	材料定性	AWS D1.1	BAG SINGER
ELECTRODE SELECTION	焊条(焊丝)咨询	-	PENTON 教育分部

4.1.2 焊接数据库系统国内发展状况

我国焊接数据库的研究工作起步也较早, 1986 年, 甘肃工业大学和哈尔滨焊接研究所合作开始进行焊接工艺数据库系统的研究, 1990 年 12 月进行了专家鉴定。

哈尔滨工业大学与哈尔滨锅炉厂于 1986 年开始合作, 研究锅炉压力容器焊接数据库, 并于 1991 年通过专家鉴定。

天津大学和清华大学也建立了不同的焊接数据库系统。天津大学将国产低合金钢插销裂纹试验结果建立了数据库, 并结合冷裂纹预测模型, 判定冷裂纹敏感性。清华大学建立的焊接材料、焊接工艺选择专家系统中, 也包括一些数据库内容。表 4-3 是部分国产焊接数据库:

表 4-3 国内部分焊接数据库系统

Tab4-3 Domestic part of welding database systems

系统名称	主要功能 和特点	完成单位
焊接工艺设计	焊接工艺材料 CCT 图谱管理	甘肃工业大学
焊接工艺 CAD 数据库	焊接工艺评定管理	上海交通大学
焊接数据库	PQR/WPS 材料牌号对照管理	清华大学
焊接工艺评定管理	PQR 管理语言	兰州石化机器厂
焊接工艺评定管理	PQR 管理语言	天津大学
焊接工艺评定数据库	PQR 管理语言	太原机械厂
焊接数据库	PQR 管理/焊工档案管理	哈尔滨工大
焊接工艺与设计软件	焊接性能预测设计评定	哈工大
焊接工艺设计 CAPP 系统	焊接性能预测设计评定	哈工大
焊接培训考试系统	焊工培训材料管理	哈工大
焊接工艺评定数据库	PQR 管理	北京燕山建筑
焊接检测设计	采用分类编码技术工艺设计	太原风机厂
焊接工艺信息管理	WPS 管理与工艺设计	德州重型机械厂
焊接工艺管理	WPS 管理与编制	唐山锅炉厂
焊接工艺数据管理	焊工考试档案管理	北京锅炉厂
焊工档案计算机管理	焊工档案管理	北京燕山建筑
焊工档案管理	焊工档案管理	哈尔滨锅炉厂
焊工档案管理	焊工档案管理	兰州石化
焊接材料数据管理	焊条/焊剂/焊丝管理	哈焊所

4.2 激光拼焊工艺库结构设计

本系统的开发环境采用 VB6.0, 其中前者用于数据库查询系统客户端部分的前台开发, 而后者用于服务器端部分的后台开发。操作环境为 WinXP 系统。本章主要介绍激光拼焊数据库查询系统整体结构的设计和建立步骤。

4.2.1 系统设计

(1) 系统的功能分析

针对激光拼焊成套装备项目开发需求, 初步设计了激光拼焊工艺库系统。

预计要实现的功能有:

- 1) 激光拼焊示范应用模块, 能够实现对激光拼焊原理、激光拼焊生产线构造原理、激光拼焊工艺流程和激光拼焊设备信息等方面进行图文并茂的演示输出, 使非专业人士对激光拼焊成套装备能有一个初步的了解。
- 2) 激光拼焊工业应用模块, 能对一定范围内汽车行业的具体材料进行激光拼焊工艺参数查询输出, 为实际激光拼焊提供参考或者精确的激光拼焊工艺参数。
- 3) 经济评估模块, 根据用户输入, 系统能够定性定量地判断激光拼焊生产线近期的工作效益, 如每天、每星期、每月、每年和每生产批次的实际生产效益等, 为生产决策提供参考。能对激光拼焊生产线实际生产和经济效益进行评估, 并给出一个定性的收益率。
- 4) 数据库维护模块, 能够实现库记录添加、删除、修改功能, 使得数据库不断完善。
- 5) 采用分布式客户机/服务器模式即 Client/Server 网络模式构建, 满足现代企业网络化和集成化的需要。
- 6) 管理查询功能, 能够通过企业网络平台, 实时查询激光拼焊生产线工作状态、工作任务、操作者等信息, 起到一定的远程监控查询功能。
- 7) 报表生成功能, 能将用户查询的结果生成报表, 便于用户保存、打印、浏览等, 提高操作效率。用户也可以定义报表格式, 以便于阅读、存档等。
- 8) 能提供通俗易懂的使用帮助。

(2) 系统功能模块的设计

在系统功能分析的基础上, 考虑到 VB 程序编制的特点, 得到图 4-1 所示的功能模块。

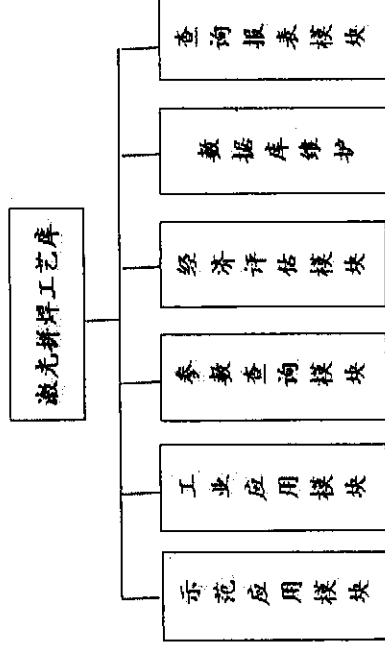


图 4-1 系统功能模块图

Fig4-1 The chart of system function model

其中,示范应用模块和工业应用模块是本系统前台开发的核心模块。系统开发大部分工作围绕着工业应用库和示范应用模块的建立进行。系统模块包括打印设置和退出等系统功能。示范应用模块能实现对激光拼焊原理、激光拼焊生产线构造原理、激光拼焊工艺流程和激光拼焊设备信息进行演示。工业应用模块能对汽车行业常用材料的激光拼焊工艺参数进行查询。报表模块能对查询结果进行打印输出。维护模块能实现对激光拼焊数据库进行维护。经济评估模块能对激光拼焊生产线实际生产和经济效益进行评估,判断是否符合实际生产需要和经济性要求。

(3) 系统网络模型的设计

在 C/S 系统中,Server 指一台处于核心状态的较大规模的计算机,主要负责管理多个用户共享的资源,包括硬件资源(如打印机、扫描仪等)、激光拼焊的数据资料等。

本系统采用的是数据库服务器,它为用户提供数据管理、信息、共享、以及安全、备份、恢复等方面的高级管理方法。为方便系统地管理庞杂的各种数据信息,数据库主要保存以下各部分的信息:激光拼焊设备信息、激光拼焊工艺规范、激光拼焊生产线实际生产信息等等。

Client 一般属于从属状态,主要负责为用户提供一种访问系统资源的工具,另外也可以协助 Server 完成整个系统的功能。当某个用户需要使用系统资源时,就可以通过网络从客户端连接到 Server 上,使用共享资源。

4.2.2 系统的建立

系统最终建立的流程图如下:

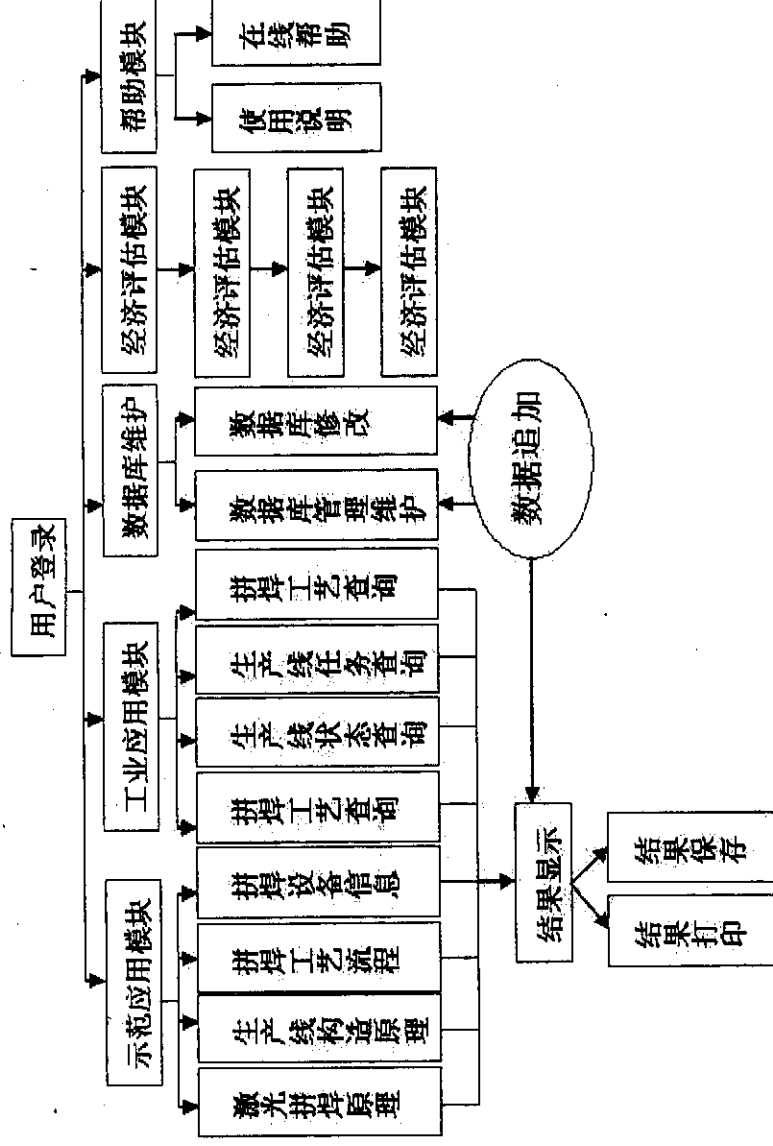


图 4-2 激光拼焊工艺库系统流程图

Fig 4-2 The flow chart of laser machine Database System

在用户登录窗口，用户需要填入正确的用户名及用户口令，否则无法进入系统；用户级别分为管理员级别和普通用户，管理员可以对系统进行维护，而普通用户只具备浏览、查询的权利，无权对系统进行维护。

查询分类窗口中，用户可以选择所要进入的窗口，包括示范应用、工业应用库、经济评价界面、留言、帮助、数据库维护窗口和修改口令窗口。

在示范应用中，用户可以根据需要进行查询，也可以保存、打印所查内容。

在工业应用中，用户可以对激光拼焊设备、激光焊接、激光切割等进行查询，系统会给出指导性的推荐值，并根据需要生成报表，以供浏览、保存、打印等。

用户构造查询条件时，要根据要求填写选择框，否则将造成查询失败；如果查询条件合法，系统将对后台发出指令，将符合查询条件的数据调用出来，并在输出窗口显示。

在数据库维护窗口中，管理员可以对激光拼焊设备数据列表、激光焊接数据列表、激光切割数据列表等进行调用，并可以对记录进行修改、添加、删除等操作，如果修改内容符合后台数据库数据类型要求，并不与以前记录冲突，便可完成修改。

经济评估界面要求用户填写真实可靠的数据，系统经过计算判断，能给出

相应确切的结果,供用户参考。

帮助能对系统的用法等进行说明,使用户快速掌握本软件的使用方法。

4.3 系统的模块开发

用户在系统运行后进入登陆窗口,当输入正确的用户名和密码后,系统就进入了模块选择模式。

系统包括了示范应用模块、工业应用库模块、经济评估模块、维护模块、帮助模块。

4.3.1 示范应用

示范应用模块内容包括激光物理基础、激光焊接、激光切割、激光表面改性、安全防护五部分内容。对于激光拼焊的原理、工艺参数的选择原则、加工过程中的安全防护问题等都可以在这里找到答案。

示范应用的操作非常简单,以激光拼焊原理查询为例,首先点击右上角“查询内容选择框”中的“激光焊接”按钮,则在“内容浏览树图”中,展开了所包含的内容;在树图中,单击任意条项,则相对应的查询结果将在多行文本编辑框中显示,用户可以根据需要,对查询结果进行保存。其他查询与其类似。

在示范应用模块的开发过程中,主要利用了 VB6.0 的 TreeView 控件和多行编辑框,左侧的目录结构即是用 TreeView 控件所开发的,通过单击选择相应的内容,程序用图文并茂的方式对激光的基础原理和各种激光拼焊方法作了详细介绍。

4.3.2 工业应用

工业应用模块是本系统最主要功能,在这里用户选择工业应用模块后,输入查询条件就可完成结果查询。以 DC04 碳钢板激光拼焊接查询为例,在“种类选择框”中点击“汽车板查询”,则“不等厚激光拼焊”标签变成可见,用户需要选择选择下拉列表框来构造查询条件,然后点击“开始查询”按钮,如果查询条件符合要求,则向后台的数据库发出指令,将符合条件的数据记录调用出来并显示在输出窗口中,用户也可以将查询结果生成报表,以便保存、打印。

4.3.3 报表生成

当输入查询条件后,进入查询结果输出浏览窗口,在此窗口处单击报表生

成按钮可进入报表生成窗口，以激光焊接报表生成窗口为例，如图 4-6

所示，下面简单的介绍一下报表窗口的开发过程。

其中下端数据窗口控件的显示方式由报表/打印风格内的单选按钮来确定。数据窗口的开发采用动态数据窗口技术，当选择一种显示方式后，下端的数据窗口控件会动态的改变显示风格与之相对应。下面介绍一下动态数据窗口的开发过程。

通过检索构造的查询条件在动态数据控件中显示查询结果。

打印格式/缩放比例框内的单选按钮控制数据窗口横向和纵向显示比例，可以在打印前预览一下要打印的查询结果。

保存命令按钮可以将数据窗口内的查询结果保存成 Excel 文件形式。

单击打印设置后可以进入打印设置窗口界面，如图 4-3 所示，在此窗口下可以完成打印设置。如对打印的页面范围、份数等进行设置，系统提供了这样的对话界面，以便于控制打印。

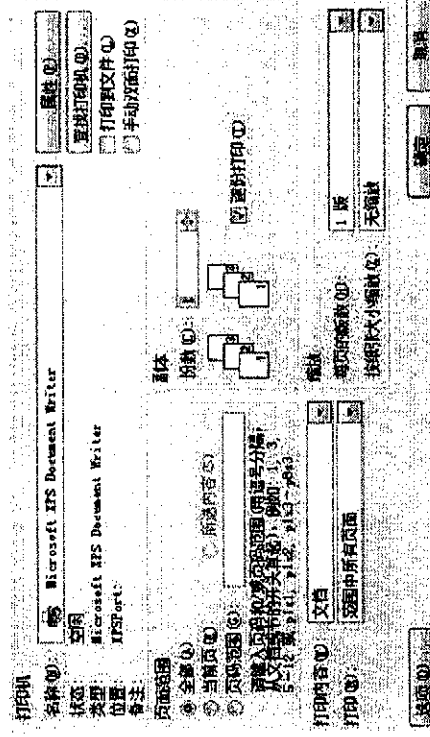


图 4-3 打印界面

Fig. 4-3 The interface of print

4.3.4 数据库维护

数据库维护模块要实现的功能是对数据库的更新与维护。在实际生产中激光拼焊工艺参数总是需要不断更新，因此要求对后台数据库不断地进行添加与修改。对数据资源进行更新和维护可以在数据库管理器中进行，考虑到安全因素，这个工作只能由数据库系统管理员来完成。而数据库维护模块提供了一个友好的数据库操作界面，用户在取得数据库管理员权限后，可以在程序中选择维护菜单选项进入此界面，方便直观地对数据库进行更新、修改、删除、添加纪录等操作。

系统通过用户界面进行数据库的管理具有一定的限制：不能对数据表、表

与表之间的关系、数据表的结构、数据类型、以及用户权限等进行设计,这些工作都要求在数据库管理系统中进行。但是在该管理模式下用户不需要了解复杂的数据库管理器的工作原理,如果用户对于大型数据库管理器不是十分熟悉时,这个简化的界面会使数据更新和维护的工作变得很容易。

由上述分析可见,对于数据库系统管理员来讲,系统的数据资源是处于完全开放状态的,他可以对任何的数据资源进行任何的操作;但对于通过系统提供的用户界面进行数据更新的用户来讲数据资源只是半开放的状态,他只能通过界面接口查阅库中的数据,并在限定的范围内进行数据更新。

在应用选择窗口的对话界面中选择“数据库维护”一项,然后输入系统提供的用户名和密码后就可进入数据库维护界面,可以通过下拉列表框选择要更新的具体加工方法和激光拼焊设备表进行数据库维护。

在该模块内用户可以进行添加、删除、修改、刷新等各项操作。窗口上的“添加”按钮是指添加新的纪录;“刷新”按钮实现数据库的更新之后显示更新后的结果;“删除”按钮指删除当前纪录;“确定”按钮完成对数据库的修改;“退出”按钮是关闭该窗口,退出数据库模块程序。

4.3.5 经济评估

通过建立经济评估模块,系统根据用户输入来定性定量地判断激光拼焊生产线近期的工作效益,如每天、每星期、每月、每年和每生产批次的实际生产效益,为生产决策提供参考。能对激光拼焊生产线实际生产和经济效益进行评估,并给出一个定性的收益率。

本系统尝试性的设计了经济评估模块,它通过激光拼焊的固定资产投资、运行费用和除以运转周期内的回收额再与常规加工的固定资产投资、运行费用的和除以同样运行周期内的回收额比值来作为评估的标准,当比值小于1.0时,则激光拼焊收回投资较快,否则反之。以此来为用户判断激光拼焊生产线加工一个批次是盈利还是亏损。

在窗口中输入各种数值,系统就可以通过内部算法得到批次生产收益与成本和设备磨损率进行经济性比值,如果这个比值小于1,那么激光拼焊生产线本次生产是处于亏损状态的。当然,这一评定方法还是比较简单,现实的情况总是不断变化,这里只是提供了一个有用的参考。

4.4 本章小结

通过对激光拼焊工艺库系统开发,可以得出以下结论:

- (1) 初步建立了激光拼焊数据库辅助工艺库系统, 该系统主要包括示范应用模块、工业应用模块、数据库维护模块、经济评估模块等几部分。
- (2) 本系统建立的激光拼焊示范应用模块, 能够实现对激光拼焊原理、激光拼焊生产线构造原理、激光拼焊工艺流程和激光拼焊设备信息等方面进行图文并茂的演示输出, 使非专业人士对激光拼焊成套装备能有一个初步的了解。
- (3) 本系统能实现对激光拼焊加工的工艺参数和激光拼焊设备的生产进行查询和管理, 对工业生产提供指导, 为现场制定激光拼焊工艺提供帮助。
- (4) 本系统将现有激光拼焊工艺参数和激光拼焊设备的信息建成后台服务器端的共享数据库, 通过数据库维护模块中开放的界面可方便的对后台数据库进行记录添加、删除、修改功能, 使得数据库不断完善。
- (5) 实现了查询结果的报表生成功能, 便于用户保存、打印和浏览。
- (6) 建立了经济评估模块, 系统根据用户输入来定性定量地判断激光拼焊生产线近期的工作效益, 每天、每星期、每月、每年和每生产批次的实际生产效益, 为生产决策提供参考。能对激光拼焊生产线实际生产和经济效益进行评估, 并给出一个定性的收益率, 为设备投资回收周期提供参考。
- (7) 系统采用 Client/Server 模式, 适应企业局域网的发展需要。
- (8) 提供了通俗易懂的使用帮助, 方便了用户的使用。

第5章 激光拼焊焊缝金相组织性能研究

5.1 引言

近年来,激光拼焊板在汽车制造业中获得了广泛应用。它是由几种不同强度、厚度和镀层的钢板焊接在一起构成一块平板,可被用来冲压成一个完整的汽车部件。在实际生产中,拼焊板以其生产成本低,材料利用率高等特点受汽车生产商的青睐,尤其是用激光拼焊板冲压成形的板料毛坯,可以减少冲模套数、焊装设备和夹具个数,可提高部件精度,减少焊缝数量,降低产品成本,减轻车身重量,减少零件个数。采用传统的焊接方法,如 TIG 焊,焊接速度慢,热输入较大,易造成焊缝区晶粒粗大,降低焊接接头的塑性和冲击韧度。而采用激光拼焊薄钢板时,由于焊接加热速度快,冷却速度快,焊缝接头强度高、组织细密,所以接头既有高的强度,又有足够的韧性^[109, 110]。

本章重点以不同的激光拼焊工艺参数对等厚及不等厚钢板进行拼焊,并对拼焊板进行了杯突及拉伸成形性能试验,分析激光拼焊板焊缝组织及硬度,研究激光功率、焊接速度等工艺参数对激光拼焊板基本成形性能的影响规律。

5.2 激光焊接快速冷却凝固特征

金属凝固是金属从液态向固态转变的过程。对于纯金属来说,这一转变一般发生在某一特定的温度,即该金属的熔点,而对合金来说。这一转变就要在一个温度区间内完成。在这温度区间内,合金组织中除有液相存在外,还会出现固相,其成分和液相有所区别,而且随着温度在区间的下降,固相的数量和相内的成分也都不断起着变化。例如,在铁—碳体系中,某液态合金碳含量超过共晶点的浓度时,在温度下降到该液态合金凝固的过程中,温度通过液相线以后,液相中出现 Fe_3C 相。随着温度继续下降,合金中的 Fe_3C 相增多。液相含碳量也逐渐下降,直到温度降至共晶温度,剩余的液相通过共晶反应全部转变成固相。由此可见,合金在一个温度区间内逐渐凝固的过程中,其组织和相的成分均不断地变化。凝固温度区间越大,变化也就越明显^[110-125]。

在凝固温度区间内,显微组织变化情况和一系列因素有关,其中包括:

(1) 合金性质和成分;

- (2) 液相/固相结晶前沿液相内的温度梯度;
- (3) 凝固速度;
- (4) 固/液界面上的表面能;
- (5) 凝固金属液中杂质和与此有关的非均相成核速度;
- (6) 均相成核速度和固相的生长速度。

液态金属在凝固过程中, 过冷的程度直接影响到金属凝固后的组织状态。由于快速凝固时过冷程度深, 合金体系就大大偏离了平衡状态, 有可能形成千百种非平衡合金相, 而合金元素的溶解度也增加很多。毋庸置疑, 深冷将使金属材料中形成非晶相。冷却速度对快速凝固显微组织的影响大致可以从图 5-1 看出。总的说来, 冷却速度越高, 显微组织趋于更加精细和均匀。

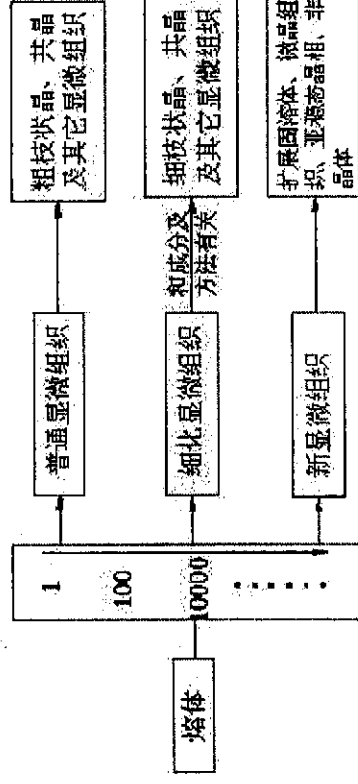


图 5-1 冷却速度对组织的影响

Fig 5-1 The effect of cooling rapidity on steel organic

合金的化学成分和凝固特征将决定其最终的性能, 而凝固条件又极大程度影响合金组织的结构及均匀性。对于常规凝固而言, 液态金属的冷却速率和过冷度都很小, 晶体的生长速率一般不超过 1 cm/s 。快速凝固则是液固相变快速进行(晶体生长速度大于 1 cm/s), 从而获得普通凝固条件下无法得到的成分分布、组织结构和相组成。快速凝固已经成为材料科学领域广泛研究的重要课题之一。

与传统的凝固方法相比, 在快速凝固条件下金属组织具有如下优点:

- (1) 偏析程度减小, 成分均匀。随着冷却速率的增大, 液固界面将发生完全扩散平衡——局域界面平衡——亚稳局域界面平衡——界面非平衡的转变。在快速凝固条件下, 固相和液相内部的溶质来不及充分扩散, 液固界面上的溶质迁移也将偏离平衡。

- (2) 晶粒细化, 微晶形成。快速冷却或者大过冷将导致晶体的形核率与生长速率很高, 这会使晶粒尺寸细化, 获得微晶甚至纳米晶。在某些合金系中存在一个临界过冷度, 当过冷度大于临界过冷度时会发生“枝晶——球状晶”的转变, 伴随着组织的大幅细化。快速凝固的显微

组织虽已细化,但仍具有通常凝固产物的晶粒、枝状晶和共晶组织等基本性质。

(3) 亚稳相形成。较大过冷度将抑制稳定相的形核,使得某些在近,平衡条件不可能形成的亚稳相获得了一定的驱动力,择优形核生长。

(4) 固溶度扩展。快速凝固会抑制溶质原的扩散,导致第一相来不及析出,从而在最终凝固组织中固溶体相的溶质含量远高于, B-平衡相图上的最大固溶度,形成过饱和固溶体。

(5) 非晶态形成。当合金熔体的冷却速率很大或过冷至玻璃态转变温度以下时,结晶过程被完全抑制,形成非晶态合金。非晶合金以金属键为结构特点,短程有序,长程无序,其物理性能、化学性能及力学性能随温度变化具有一定的连续性,显示出各向同性。

(6) 缺陷密度增加。与常规合金相比,快速凝固合金中的空位、位错等缺陷密度有较大增加。由于液态合金中空位形成能比固态合金的空位形成能小得多,所以液态合金中的空位浓度比固态合金高得多,快速凝固时大部分空位来不及析出而留在固态合金中,因而使得快速凝固合金一般都有很高的空位浓度。同时由于合金在快速凝固过程中受到较大的热应力,空位聚集崩塌后会形成位错环,这些因素都使快速凝固合金中的位错密度比一般铸态合金增加很多。

快速凝固合金由于微观组织结构的明显细化和均匀化,所以具有很好的晶界强化与韧化作用,固溶度的扩大,过饱和固溶体的形成不仅起到了很好的固溶强化作用,也为第一相析出、弥散强化提供了条件,位错密度的提高还产生了位错强化的作用。所以通常的铸态合金经过快速凝固后,硬度、强度、韧性、耐磨性、耐腐蚀性等室温力学性能和某些高温力学性能都有较大提高。

由于激光焊接本身的特性——冷却速度快,过冷度大。其焊缝组织转变必然与一般焊接方法焊缝组织转变存在差异。随着结晶速度的增大,由于扩散过程受到抑制,焊缝的微观化学不均匀性减小了。晶粒的化学微观不均匀性——即合金成分沿晶粒的界面和长度上的不均匀分布,随着焊接熔池结晶速度的增大而减小;而整个焊缝组织的微观不均匀性,也就是说,在晶轴之间的空间内,以及柱状晶之间有没有第一相存在,这种不均匀性无疑会随着焊接熔池结晶速度的增大而加剧。从物理冶金学原理可知,合金的化学成分决定其各种热处理状态和加工处理状态下的金相结构和组织。焊接条件、焊接规范、散热方向、结晶速度和冷却速度、焊接熔池体积等这些对焊缝组织都有显著的影响。以化学成分为基础,加上金相结构和组织决定着该合金材料的性能。合金的化学成分决定其各种热处理状态和加工处理状态下的金相结构和组织及性能。

5.3 激光拼焊碳钢板组织转变规律研究

5.3.1 试验材料与方法

试验材料为 DC04Z 钢板, 它属于深冲级冷轧钢板, 其化学成分(质量分数)如下表所示。

表 5-1 材料化学成分
Tab5-1 chemistry component of blank sheet

钢号	C	Si	Mn	P	S
DC06	0.008	0.03	0.03	0.02	0.015
DC04Z	0.08	—	0.04	0.02	0.003

规格: $\frac{470\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}}{470\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 2.0\text{ mm}}$

试验采用厚度为 2.0 和 1.5 两种钢板, 分别对这两种钢板进行等厚钢板激光拼焊, 焊后对焊缝部位进行杯突试验(GB / T4156-1984), 检验焊缝区深冲性能。将 1.5mm 和 2.0mm 板组合进行不等厚钢板激光拼焊, 焊后对试样进行拉伸试验(GB / T228-2002), 激光拼焊不等厚钢板时, 激光入射光束相对对于厚板偏移。选取不同焊接工艺参数下的拼焊板进行焊缝金相组织分析, 研究激光焊缝中金相组织对成形性能的影响, 找出焊缝成形良好、满足后序成形加工要求的激光焊接工艺参数, 以优化激光焊接工艺。

5.3.2 试验结果与分析

(1) 焊缝杯突试验

激光功率与焊接速度组合对于特定规格板材焊接的质量影响, 获得最优参数组合, 研究合格焊缝的参数变化范围。激光功率与焊接速度参数组合设计, 如表 5-2。

表 5-2 激光功率与焊接速度组合实验工况设计

Tab5-2The combination experiment of laser power and welding velocity

实验编号	焊接速度 (m/min)						
	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	
激光功率 (kW)	2.0	B11	B12	B13	B14	B15	B16
	2.5	B21	B22	B23	B24	B25	B26
	3.0	B31	B32	B33	B34	B35	B36
	3.5	B41	B42	B43	B44	B45	B46
	4.0	B51	B52	B53	B54	B55	B56

表 5-3 激光功率与焊接速度组合实验结果

Tab5-3The result of combination experiment

样品编号	杯突值 (mm)				均值 (mm)	杯突值比 (%)
母材 (薄)	12.70	12.90	12.31	11.85	11.80	100
母材 (厚)	13.45	13.45	13.45	13.45	13.45	----
B43	11.35	11.25	11.24	11.15	11.20	94.9
B44	11.25	11.00	11.13	11.00	11.25	95.3
B45	11.25	11.60	11.50	11.75	11.40	96.6
B46	11.00	11.20	11.10	11.20	11.00	93.2

杯突试验的结果表明,焊缝杯突值较母材有一定程度的降低,说明焊缝深冲性能低于母材。这是由于焊接热循环的作用,焊缝晶粒总有不同程度地长大,所以焊缝区晶粒比母材粗大,造成焊缝部位塑性和韧性的下降。

1.5mm 薄板拼焊,采用相同的激光功率而改变焊接速度的情况下,杯突值随焊接速度增加有所提高;而在采用相同焊接速度改变激光功率的情况下,杯突值变化不大。同样,在 2.0mm 薄板拼焊时,功率相同(均为 3.0kW)而焊接速度变化时,随着焊接速度的提高焊缝杯突值增加。可见焊接速度变化对杯突值大小有一定的影响。因此,在选用适宜的激光功率的前提下,提高焊接速度能增加焊缝杯突值,即提高焊接速度有利于提高焊缝的深冲性能。

另外,通过比较母材与焊缝杯突值发现:2.0mm 板焊缝杯突值与母材杯突值相差较大,而 1.5mm 的两者相差较小,产生这种现象的原因与焊缝的金相组织有关。

(2) 焊缝拉伸试验

第一组: $\frac{DC04 \times t = 1.0}{DC04 \times t = 1.5}$ 第二组: $\frac{DC04 \times t = 1.5}{DC04 \times t = 2.0}$

表 5-4 大功率、大离焦量、低速度焊接试验工况设计表

Tab5-4 The combination experiment of laser power and welding velocity

序号	功率 (KW)	焊接速度 (m/min)	离焦量 (mm)	焦点偏移量 (mm)	焊接间隙 (mm)	板材规格 (mm)
1	3.90	4.30	4.00	0.10	0.00	$\frac{DC04 \times t = 1.5}{DC04 \times t = 2.0}$
2	3.90	4.30	4.00	-0.20	0.00	
3	3.90	4.30	4.00	0.26	0.00	
4	3.50	4.30	4.00	0.20	0.00	
5	3.50	4.30	4.00	0.00	0.20	$\frac{DC04 \times t = 1.0}{DC04 \times t = 1.5}$
6	3.50	4.30	4.00	0.00	0.00	
7	3.50	4.30	4.00	-0.20	0.00	
8	3.50	4.30	4.00	-0.20	0.20	
9	3.70	4.30	4.00	0.00	0.10	$\frac{DC04 \times t = 1.0}{DC04 \times t = 1.5}$
10	3.70	4.30	4.00	0.00	0.20	

做单向拉伸试验时,将焊缝置于试样中部。这是由于当焊缝位置明显变化时,即厚薄两侧在试样中的比例不同时,板材在拉应力相同的情况下,应变会有很大不同,变形趋势是厚板所占比例越大,应变越小,伸长率低,变形稳定性差。具体试件如图 5-2 所示。

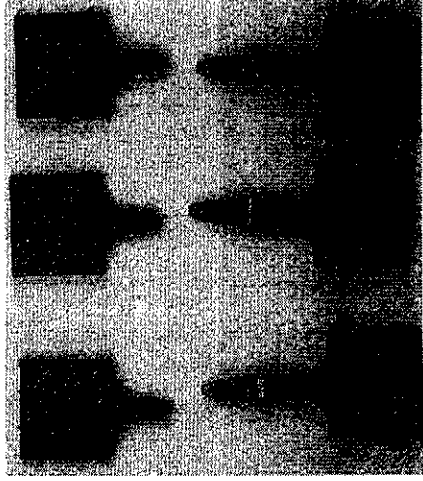


图 5-2 激光拼焊焊缝

Fig5-2 The result of elongated test

具体实验结果如表 5-5 所示。

表 5-5 大功率、大离焦量、低速度焊接试验结果

Tab5-5The result of combination experiment

Nr	拉伸试验			杯突试验	
	S0 mm2	Rm Mpa	试样标号	杯突值 (mm)	均值 (mm)
1	36.12	285.89	1—1 (薄) 母材断	12.70	12.65
	35.97	284.72	1—2 (薄) 母材断	12.75	
	36.04	287.45	1—3 (薄) 母材断	12.50	
2	36.01	284.55	2—1 (薄) 母材断	11.90	11.93
	37.42	275.69	2—2 (薄) 母材断	11.90	
	36.34	284.53	2—3 (薄) 母材断	12.00	
3	35.84	291.46	3—1 (薄) 母材断	12.00	11.88
	35.9	289.85	3—2 (薄) 母材断	11.90	
	36.04	289.98	3—3 (薄) 母材断	11.75	
4	24.65	284.53	4—1 (薄) 母材断	10.25	10.12
	24.81	302.55	4—2 (薄) 母材断	10.00	
	24.8	304.65	4—3 (薄) 母材断	10.10	
5	24.8	304.63	5—1 (薄) 母材断	9.50	9.25
	24.69	305.33	5—2 (薄) 母材断	8.75	
	23.53	322.13	5—3 (薄) 母材断	9.50	
6	24.6	304.35	6—1 (薄) 母材断	10.45	10.22
	24.4	305.03	6—2 (薄) 母材断	10.10	
	24.47	304.69	6—3 (薄) 母材断	10.10	
7	24.22	300.95	7—1 (薄) 母材断	10.25	10.13
	24.27	301.93	7—2 (薄) 母材断	10.10	
	24.22	299.66	7—3 (薄) 母材断	10.05	
8	24.79	299.46	8—1 (薄) 母材断	7.30	7.20
	24.26	304.44	8—2 (薄) 母材断	7.00	
	24.68	297.49	8—3 (薄) 母材断	7.30	
9	34.94	292.06	9—1 (薄) 母材断	10.95	11.08
	35.27	287.83	9—2 (薄) 母材断	11.20	
	35.64	284.85	9—3 (薄) 母材断	11.10	
10	35.93	290.83	10—1 (薄) 母材断	10.65	11.00
	35.74	291.12	10—2 (薄) 母材断	10.90	

35.97	290.57	10—3 (薄)	母材断	11.45
-------	--------	----------	-----	-------

各种焊接参数下试样拉断部位均位于非焊缝区,表明激光焊缝的抗拉强度高大于母材。这是因为激光焊缝形成时冷却速度快,其强度、硬度比母材有一定程度的提高,但塑性有所降低。

(3) 焊缝金相组织

采用激光焊接进行不等厚钢板拼焊,可获得外观上成形良好,焊缝平滑美观的接头。如图 5-2 所示。

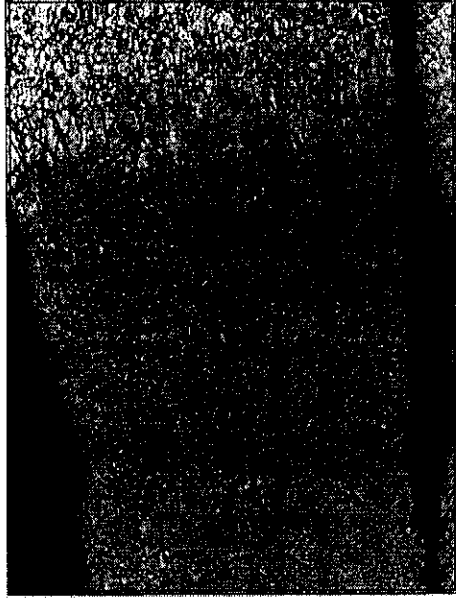
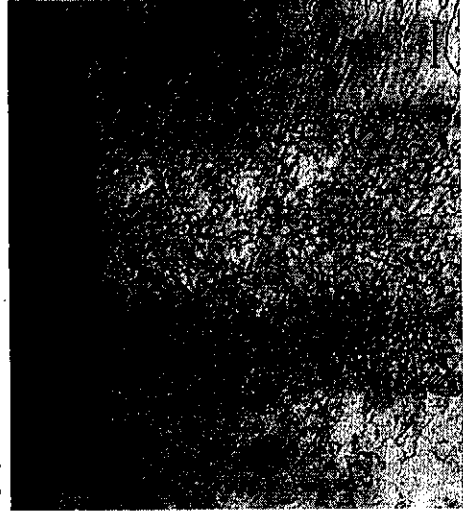


图 5-3 激光拼焊焊缝

Fig5-3 The welding line of tailor blank welding

1.5mm 厚 DC04Z 钢板激光拼焊, 焊接工艺参数为: 激光功率 3.3kW, 焊接速度 2.5m/min。由图 5-3 可以看出, 采用激光焊接热影响区窄, 焊缝平整美观, 接头中等轴晶和柱状晶分布均匀, 组织细密, 无明显边界。焊缝最终的金相组织为粗大柱状魏氏组织+上贝氏体+条状马氏体+铁素体, 见图 5-4。



图 5-4 激光拼焊焊缝金相组织

Fig5-4 The metallography of welding line

焊缝冷却时,先共析铁素体优先沿奥氏体晶界析出,晶内由于焊接热输入大,转变温度高,奥氏体晶粒急剧长大,使得原本应生成正常的针状铁素体组织,转变为粗大的针状铁素体组织,这种粗大的针状铁素体具有一定位向关系,即魏氏组织。

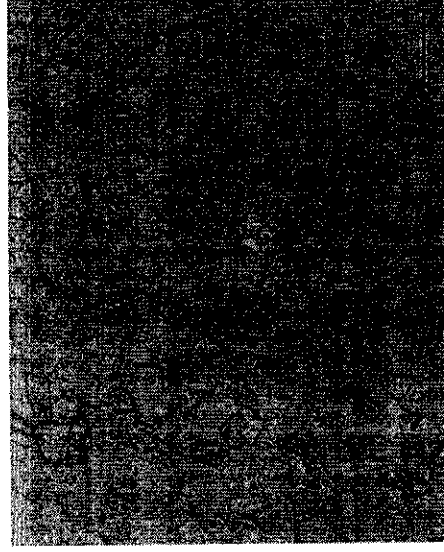


图 5-5 激光拼焊焊缝金相组织

Fig5-5 The metallography of welding line

针状铁素体是焊缝中希望的组织,在性能上随着针状铁素体细小密集,数量增大而韧性提高。但随着针状铁素体粗大,数量减少,形成粗大的柱状魏氏组织,材料性能恶化,尤其是冲击韧度下降严重,对焊缝部位的成形性能产生不利影响。魏氏组织降低钢的力学性能总是和奥氏体晶粒粗化联系在一起。一般不希望焊缝形成这种粗大的柱状魏氏组织。因此,减小焊接热输入,利用激光焊接加热速度快特点来减小奥氏体晶粒尺寸,控制奥氏体晶粒长大,降低转变温度,这样有利于生成细小密集的针状铁素体,改善焊缝的冲击韧度和塑性。

焊缝中的上贝氏体呈羽毛状,形成温度较高,铁素体晶粒和碳化物颗粒较粗大,碳化物呈短杆状平行分布在铁素体板条之间,铁素体和碳化物分布有明显的方向性,这种组织状态使铁素体条间易产生脆断。上贝氏体与马氏体形成混合组织会增加焊缝硬度,再加上粗大柱状魏氏组织的作用,降低焊缝冲击韧度,对成形加工产生不利影响,这也是为什么 1.6mm 厚钢板焊缝杯突值与母材杯突值相差较大的原因。

0.8mm 厚 DC04Z 钢板激光拼焊,焊接工艺参数为:激光功率 2.8kW,焊接速度 3.0m/min,焊缝最终的金相组织为铁素体+针状索氏体+魏氏组织+粒状贝氏体,见图 5-5。

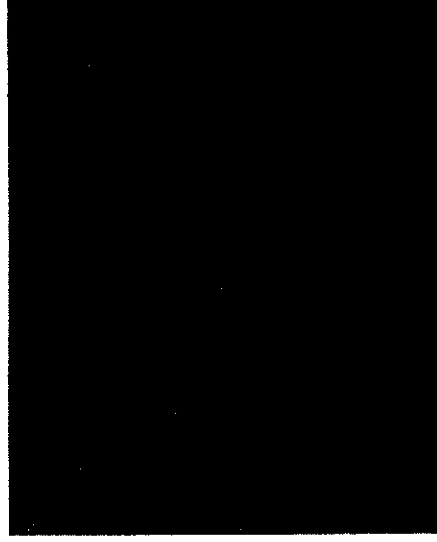


图 5-6 激光拼焊焊缝金相组织

Fig5-6 The metallography of welding line

当焊接工艺条件变化时,粒状贝氏体的形态随焊接热循环条件变化。冷却速度快时粒状贝氏体的颗粒细小,冷却速度缓慢时岛状物显著长大。快速冷却形成的粒状贝氏体组织比钢焊缝中常见的马氏体组织硬度较软,有利于薄板后序深加工。尤其采用较大的焊接速度,加快焊缝冷却,使焊缝中形成细小的晶粒,帮助提高焊缝塑性和韧性。因此,0.8mm 板的杯突值较接近母材的杯突值。

从图 5-4 和图 5-5 的比较来看,1.5mm 板焊缝区晶粒明显比 0.8mm 板焊缝晶粒细小,这是由于厚板的热传导性好于薄板,故 1.5mm 厚板的散热性能要好于 0.8mm 板。因此,在焊缝冷却时,1.5mm 板的冷却速度要比 0.8mm 板的冷却速度快,焊后焊缝区晶粒更细小。也正因为焊缝冷却速度不同,1.5mm 板焊后生成条状马氏体与上贝氏体的混合组织,而 0.8mm 钢板焊后生成针状索氏体与粒状贝氏体的混合组织。从组织上讲,1.5mm 板焊后焊缝的强度硬度高于 0.8mm 厚板,但硬度较软的针状索氏体与粒状贝氏体混合组织更利于提高焊缝的塑性和冲击韧度。

因此,对于 1.6 mm 厚 DC04Z 钢激光拼焊板焊缝冷却生成条状马氏体与上贝氏体混合组织,通过提高焊接速度加快焊缝冷却,形成细小晶粒,可获得较好的塑性成形性能。而对于 0.7mm 厚 DC04Z 钢激光拼焊板焊缝冷却生成针状索氏体与粒状贝氏体混合组织,本身硬度较软,配合较高的焊接速度,快速冷却形成细晶组织,可使焊缝成形性能更接近母材。

5.4 激光拼焊奥氏体型不锈钢组织转变研究

5.4.1 奥氏体型不锈钢组织转变

不锈钢是在普通碳钢的基础上, 加入一组铬的质量分数(wCr)大于 12% 合金元素的钢材, 它在空气作用下能够保持金属光泽, 也就是具有不锈钢的特性。这是由于在这类钢中含有一定量的铬合金元素, 能使钢材表面形成一层不溶解于某些介质的坚固氧化薄膜(钝化膜), 使金属与外界介质隔离而不发生化学作用, 在这类钢中, 有些除含较多的铬(Cr)外, 还匹配加入较多的其它合金元素, 如镍(Ni)使之在空气中、水中、蒸气中都具有很好的化学稳定性, 而且在许多酸、碱、盐的水溶液中也有一定的稳定性, 甚至在高温或低温环境中, 仍能够保持其耐一腐蚀的优点。

奥氏体型不锈钢其显微组织为奥氏体, 它是在高铬不锈钢中添加适当的镍(镍的质量分数为 8%-25%)而形成的具有奥氏体组织的不锈钢。奥氏体型不锈钢的综合性能很好, 既有足够的强度, 又有极好的塑性, 同时其硬度也不高, 其抗拉强度、屈服强度和硬度, 随着温度的降低而提高, 塑性则随着温度降低而减小, 随着温度的降低, 其冲击韧性减少缓慢, 不存在脆性转变温度, 而且在高温条件下, 奥氏体型不锈钢又有较高的热强性。

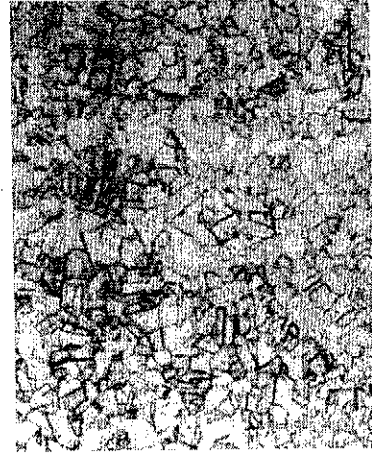


图 5-8 奥氏体型不锈钢显微组织

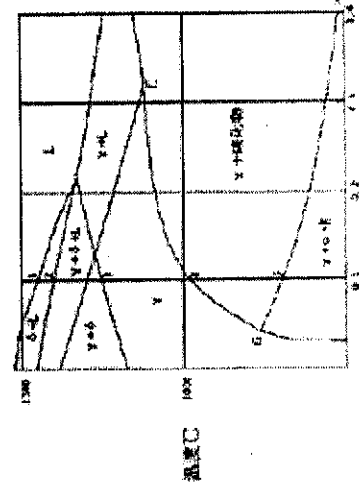


图 5-9 Fe-Cr-Ni-C 二元相图

Fig5-8 The metallography of welding line

Fig5-9 The metallography of Fe-Cr-Ni-C

铬镍奥氏体型不锈钢在液态缓慢凝固和冷却时的组织转变如图 5-8 所示, 含碳量为 0.1% 的奥氏体型不锈钢缓慢冷却组织转变情况基本为: 当温度达到液相线上点 1 的温度时, 从熔液中开始析出 δ -铁的体心立方晶格的铬镍一次铁素体晶体, 继续冷却时, 在点 2 上, 除了 δ -铁的晶体以外, 还开始析出成 γ -铁的而心立方晶格的铬镍奥氏体晶体, Fe-Cr-Ni 合金的结晶特点在于 β 和 γ 两相的混合结晶, 当达到固相线点 3 的时候, 整个熔液都凝固, β -铁转变为

γ -铁, 而钢便变成奥氏体组织, 当温度接近 900°C (点 4) 时, 在缓慢冷却的情况下, 由奥氏体晶粒(主要是晶粒边缘)开始析出碳化物, G-K 线表示碳化物在奥氏体中的溶解极限。继续缓慢的冷却, 从凝固的熔液中继续析出碳化物, 碳化物会使奥氏体的稳定性降低, 形成一次铁素体(点 5, $\gamma\text{-}\alpha$), G-K 线表示这一过程的温度一浓度条件。因此, 低于 G-K 线时, 奥氏体不锈钢在缓慢冷却的情况下, 其组织为沿晶粒边缘有一次碳化物和一次铁素体的奥氏体组织, 碳化物的析出和 γ 的转变主要聚集于晶粒的边缘, 晶粒的本身保持着奥氏体组织, 奥氏体边界上有碳化物和一次铁素体存在, 显著的使钢强化。

5.4.2 试验材料和方法

(1) 试验设备

1) 试验设备: 多功能数控加工实验台。

2) 主要参数:

- 激光器额定输出功率 2000 W;
- 激光波长 10.6 μm ;
- 光斑尺寸 $\phi 0.4\text{ mm}$;
- 焦距 7.5" ; (190.5mm)
- 工作台面 $600\times 500\text{mm}$;
- 工作台
 - X 方向行程 1200mm;
 - Y 方向行程 800mm;
 - Z 方向行程 200mm。

(2) 试验材料和规格

试验材料: $200\times 100\text{ mm}$ 不锈钢钢板, 材料牌号 SUS304, 化学成分(质量分数):

表 5-6 材料化学成分

Tab5-6 Chemistry component of blank sheet

C	Mn	Cr	Ni	备注
$\approx 0.08\%$	$\approx 0.9\%$	$\approx 18\%$	$\approx 9\%$	奥氏体

试验采用厚度为 2.0mm 和 1.0mm 两种钢板, 分别对这两种钢板进行等厚钢板激光拼焊, 焊后对焊缝部位进行杯突试验(GB / T4156-1984), 检验焊缝区深冲性能。将 2.0mm 和 1.0mm 板组合进行不等厚钢板激光拼焊, 焊后对试样进行拉伸试验(GB / T228-2002), 激光拼焊不等厚钢板时, 激光入射光束相对对于厚板偏移。选取不同焊接工艺参数下的拼焊板进行焊缝金相组织分析, 研究激光焊缝中金相组织对成形性能的影响, 找出焊缝成形良好、满足后序成形加工要求的激光焊接工艺参数, 以优化激光焊接工艺。

5.4.3 试验结果与分析

(1) 焊缝形状

激光焊接 304 不锈钢时, 焊缝深宽比大, 热影响区小。但由于激光焊接等离子体的影响, 容易形成“酒杯”状焊缝。激光焊接焊缝形貌见图 5-10,

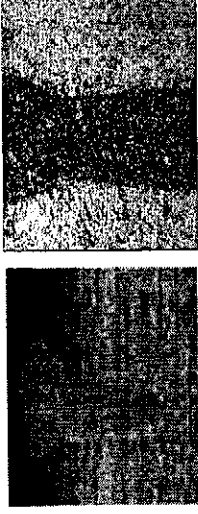


图 5-10 激光焊接焊缝形貌

Fig5-10 The picture of welding line zone

由于激光焊接加热集中, 温度梯度很大, 被焊金属的结晶温度范围很小, 从而“熔合区”宽度很小, 通常是不明显的, 基本上可以称为“熔合线”。激光焊接接头的热影响区很窄, 热影响区可以分为两个区域:

- a. 直接与焊缝相邻的晶粒长大区域;
- b. 奥氏体可能分解的区域;



图 5-11 激光焊接焊缝截面形貌

Fig5-11 The picture of welding line zone

图 5-11 为焊缝截面图, 从图中看出, 焊缝呈典型的小孔形貌, 焊接热影响过渡区很小, 熔区很快过渡到基体, 实现了穿透焊接, 焊缝深宽比大于 2: 1, 取得良好的焊接效果。

(2) 激光拼焊焊缝金相组织分析

激光焊接冷却速度很快, 加热集中, 温度梯度很大, 被焊金属的结晶温度范围较小, 晶粒非常细小, 焊缝中晶粒的结晶方向是垂直于熔合线而指向焊缝中心的, 由于激光焊接熔池内部几乎是同时冷却的, 在焊缝的中部容易出现等轴晶, 在熔合线附近, 刚开始结晶速度极快, 后结晶速度减慢, 出现树枝晶

组织。

激光焊接显著的特点就是冷却速度非常快,凝固过程通常在几十个毫秒内完成,易产生非平衡显微组织,激光焊接过程中,铬、锰等合金元素含量下降,镍等合金元素相对增加,铬为稳定铁素体元素,镍为稳定奥氏体元素,理论上分析,激光焊接奥氏体不锈钢应该得到稳定的单相奥氏体组织;然而实际得到的奥氏体型不锈钢激光焊接焊缝组织为奥氏体+少量的占铁素体柱状晶组织,组织较细,而且柱状晶截面较小,占铁素体夹于晶轴之间的空间和柱状晶的晶界上。试验焊缝金相组织如图 5-12。

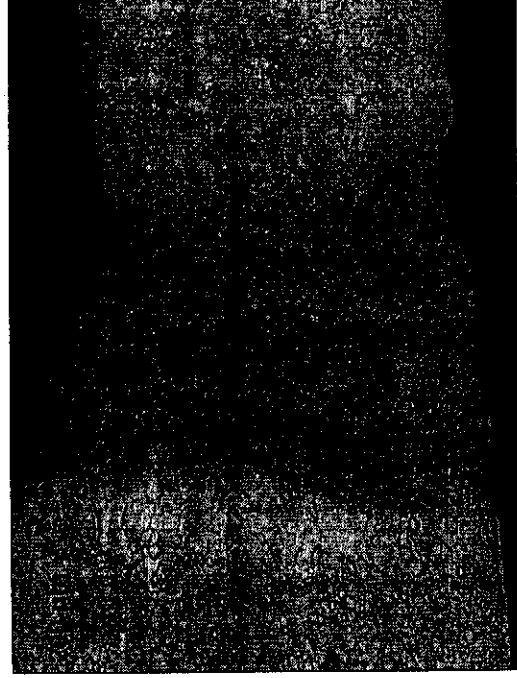


图 5-12 激光拼焊焊缝金相组织

Fig5-12 The metallography of welding line

这种组织的形成,是因为焊接熔池中有适当含量的铁素体形成元素,由于发生枝晶偏析,除了从液相中析出 γ -奥氏体晶粒以外,还连续析出具有 δ 铁素体晶格的晶粒,虽然从铁-碳状态图可知,当含碳量在 0.5% 以下的铁-碳合金从液体状态开始凝固时,只析出一种体心立方晶格的 δ -铁素体晶粒,只有在其完全凝固以后,再继续冷却时,部分 δ -铁素体晶粒转变成 γ -奥氏体晶粒,而当冷却到临界温度线时,冷却到变关系,全部 δ -铁素体晶粒都转变成 γ -奥氏体晶粒,当已凝固的金属继续以前,全部晶体都保持奥氏体晶格^[133]。而激光焊接不锈钢时,根据组织转开始从液相中析出 β -铁素体晶粒,然而,与上述情况不同的是,同时从母液中析出两种晶粒—奥氏体和铁素体,当焊缝继续冷却时,根据状态图,全部铁素体晶体都应该转变为奥氏体晶体,但是这一转变在激光焊接过程中由于激光焊接的特点受到了一定的抑制,从而发生了 δ -铁素体晶体与母液反应,反应的结果是产生另外一种晶体 γ -奥氏体晶体,虽然这种转变不是在等温下进行,但与包晶转变相类似。同时鲍奇瓦尔指出:“有两种固溶体和液体参与的包晶反应,进行得非常缓慢,而在冷却速度相当快得

合金中,反应未达终了。”所以在奥氏体不锈钢激光焊接焊缝组织中保留有一次 δ -铁素体,可能是因为包晶反应和焊接熔池结晶速度异常所致。

奥氏体钢在焊接热循环的作用下,多数不发生相变,存在一定的晶粒长大现象,但增大不是很明显,由于第一个区域的温度引起过剩相沿奥氏体晶粒边界上,沿着这些晶粒内部的滑移线和双晶生成线析出。过剩相如一次碳化物的存在能够引起焊缝在腐蚀性界质中产生晶间腐蚀现象。

奥氏体不锈钢焊缝的微观组织,一般分为一次结晶组织和二次结晶组织。一次组织即焊接熔池凝固所形成的焊缝金属组织,根据液体金属成分和一次结晶条件不同,一次组织可能是单相的或双相的。单相为典型的奥氏体组织,焊缝可能有下列形式的双相一次结晶组织:

- 1) 奥氏体-铁素体组织,它是Y奥氏体晶体和一次铁素体 δ 晶体的混合物;
- 2) 奥氏体-碳化物组织,它是奥氏体和一次碳化物的共晶体;
- 3) 奥氏体-共晶组织,但其共晶成分不是碳化物性质,它可能是由于硫、磷、硅、锆、铌、钛、硼或其它合金元素所引起的,这些合金元素能与焊缝的主要成分(铁、铬、镍)形成共晶体,或者它们互相之间形成共晶体。

(3) 激光拼焊焊缝组织性能分析

不锈钢焊缝金属的机械性能及耐腐蚀性是与化学成分和微观组织有着密切关系的。合金元素Mo、Mn、C有减少裂纹的倾向,相反,元素Cb、Si以及S、P是有害的,同时过量的Ni也会形成裂纹。对与一般焊接方法,焊缝有着很宽阔的凝固温度范围,使低熔点杂质仍然保持液状而集中在晶粒边界中,冷却过程中在收缩应力不易形成开裂。在奥氏体不锈钢中,如果含有4%以上的 δ -铁素体时,就会减少裂纹现象。因此激光焊接奥氏体不锈钢 δ -铁素体的存在有利于抑制凝固裂纹的产生,本试验焊缝组织中不存在凝固裂纹。对于激光焊接小锈钢焊缝,由于奥氏体不锈钢含碳量较低,一般不发生马氏体转变。所以焊缝金属中不存在马氏体。

在正常的焊接条件下,奥氏体不锈钢的凝固模式与成分有关。焊缝的一次组织由焊接熔池中奥氏体形成剂和铁素体形成剂的浓度比值来决定。如果在熔池中奥氏体形成剂占优势,则焊缝便具有单相组织;而如果铁素体形成剂的总浓度相当大,焊缝便具有双相奥氏体加铁素体的一次组织。

在奥氏体钢的焊缝中,由于奥氏体的高度稳定性,通常是不发生一次结晶的,也就是在焊接熔池凝固后的冷却过程中,一次结晶组织便固定下来,即使发生一次结晶,它也具有特点,在绝大多数情况下,它只引起沿晶粒边缘析出过剩相(一次碳化物,一次铁素体),而不涉及原有柱状晶组织(柱状晶保持着奥氏体组织),因此,在奥氏体钢焊缝中的一次组织,通常并不隐没一次结晶

的图形,而只是在一次结晶组织上添加一次结晶组织的图形。

5.5 本章小结

本章首先结合金属 FeC 相图,在激光焊接快速冷却、大过冷度条件下,分别从合金性质和成分、固/液界面上的表面能、成核速度、均相成核速度和固相的生长速度等角度,探讨了金相组织结构变化特征。然后通过试验分别研究了碳钢板和不锈钢板激光拼焊时,板材厚度、激光功率、焊接速度等工艺参数变化时,分别试验了汽车板激光拼焊焊接头的抗拉强度、显微组织硬度和金相组织结构的变化规律,找出了焊缝成形良好、满足后序成形加工要求的激光拼焊工艺参数,以期优化激光焊接工艺。

第6章 基于BP神经网络激光拼焊焊接性能预测

6.1 引言

激光拼焊板在实际生产中,存在着钢板机械性能随着焊接工艺规范变化差异大的问题,主要是钢板的抗拉强度、杯突值及焊缝硬度。通过研究发现板材厚度和拼焊工艺参数是影响焊接最终力学性能的主要因素,为适应用户对不同焊接产品力学性能的要求,建立性能预测模型,对力学性能进行预测,这对提高产品质量和减少检测样品参数具有实际意义。同时也为激光拼焊生产线满足最终用户所需要的焊接板材理化性能,找出焊缝成形良好、满足后序成形加工要求的激光拼焊工艺参数,提供优化依据。

6.2 人工神经网络在激光焊接中应用

目前,神经网络模型的种类已有40多种,其中应用最为广泛的神经网络模型有BP网络、Hopfield网络、ART网络和CMAC网络等等。神经网络按网络结构可分为前馈型和反馈性;按学习方式可分为有导师(指导)和无导师(自组织学习包括在内)学习^[130-140]。

与现代计算机相比较,人工神经网络吸取了生物神经网络的部分优点,具有以下的特点:

- (1) 人工神经网络在结构上与目前的计算机系统根本不同,是有很多的小处理单元相互联接而成的,每个单元的功能简单,但是通过大量处理单元集体的、并行的活动得到的预期的识别、计算结果,并具有较快的速度。
- (2) 人工神经网络具有很强的容错性,既具有局部或部分神经元损坏后,并不影响全局的活动。
- (3) 人工神经网络所记忆的信息是存储在神经元之间的联接权中,从单个权中看不出其存储信息的内容,而且是分布式存储方式。
- (4) 人工神经网络具有十分强的学习能力,人工神经网络中联接权和联接结构都可以通过学习得到。

计算机的发展促进了材料科学的进步,但在激光焊接科学领域中,影响激光焊接性能的因素多、作用复杂,可以将其看作“黑箱”。而人工神经网络的

结构与“黑箱”结构有很大的相似性,通过对已知样本数据的学习获得的网络连接权重作为“黑箱”中的“机器知识”。人们没有必要来关心这些权重的具体数值,因为这是机器模拟人脑活动学习后得到的一种状态,只要需要进行计算时,回忆记忆状态,可以根据输入参数,获得输出参数。由于组成神经网络的每一个神经元的结构和活动规律是相同的,可以将神经网络作为通用的方法来对实验数据学习。通过对样本数据的学习,神经网络除了可以记忆针对激光焊接科学研究的特点,要求要对大量的影响材料性能和激光焊接性能的因素进行分析,也就是对未知关系的逼近,鉴于BP网络有其独特的优势,在本研究中采用BP网络为研究工具。

6.3 BP网络及其学习算法

BP网络是基于BP(Back Propagation)误差反传算法的多层前馈型神经网络,每个神经元只前馈到其下一层的所有神经元,没有层内联接、隔层联接和反馈联接。网络训练方法为有导师指导学习,传递函数一般为Sigmoid型函数,根据逐层反传的误差信号用梯度下降法进行网络权重修正和优化。这种网络理论比较成熟,应用也最广,具有算法简单、结构明了的优点,其权的学习解析式十分明确,并已证明了3层以上的网络具有对任意函数的逼近能力^[145]。

多层网络可以解决非线性可分问题这一结论早已有了,由于有隐层后学习比较困难,限制了多层网络的发展。BP反向传播算法的出现解决了这一困难,促使多层网络的研究重新得到重视。多层前向网络中有两种信号在流通:(1)工作信号,它是施加输入信号后向前传播直到在输出端产生实际输出的信号,是输入和权值的函数;(2)误差信号,网络实际输出与应有输出间的差值即为误差,它由输出端开始逐层向后传播。

6.4 基于BP神经网络激光拼焊模型构建及学习

6.4.1 激光拼焊BP网络设计

在面对问题的时候,对多层前向网络来说,给定有限个样本,要求设计一个前向网络(选定网络结构及规模),并通过所给定的有限个样本学习来满意地逼近样本蕴含的规律。具体的来说就是找出一个能够满足要求的网络及其中的参数。然而对多数的实际问题来说,主要的困难来自样本数量限制。

(1) 隐层数目选择

理论上,对于任何在闭区间内的一个连续函数,都可以用含有一个隐层的BP网络来逼近。因而,一个三层的BP网络可以完成任意 n 维到 m 维的映射。对于一般问题,选用含有一个隐层的BP网络结构完全可以满足要求。

根据经验,采用两层以上的隐层时,误差反向传播的过程计算就会非常复杂起来,使训练的时间急剧增加;另一方面,隐层的增加,也会使局部极小点增多,造成网络训练的失真。但是,对于采用一个隐层时,如果需要很多的处理单元才能达到要求的,可以选用两个隐层,这样每层的处理单元就会大大减小,反而会得到较好的效果。鉴于以上的分析,由于所要解决问题的样本数量有限性以及问题的复杂程度,选择一个隐层的BP网络就能满足要求,所以确定选用只含有一个隐层的三层BP网络。

(2) 隐层单元数选择

对于用作函数逼近的BP网络,隐层单元数与要逼近函数的精度和函数本身的波动情况有关。事实上,由于隐层单元本身也可以展开为多项式或三角函数相加,这样隐层单元个数还与逼近函数本身性质有关。隐层单元数目的选择是一个十分复杂的问题。它与问题的要求、输入、输出单元的多少都有直接关系。隐层单元数太少,训练出来的网络不够强壮,不能识别以前没有看到过的样本,容错性差。但隐层的单元数太多,又使学习时间过长,误差也不一定最佳。因此存在一个最佳的中间单元数。如何求解,目前还没有很好的解析式来表达^[150-152]。

对于三层BP网络有以下几个经验公式:

$$(1) n_1 = p/(10m + 10n)$$

$$(2) n_1 = (m + n)^{0.5} + a \quad 0 \leq a \leq 10$$

$$(3) n_1 = (mn)^{0.5}$$

$$(4) n_1 = \log_2 n$$

其中: n_1 为隐层单元数; n 为输入层单元数; p 为训练样本的个数; m 为输出单元数。

另外,最优隐层可以通过试凑的方法得到,首先从较少的隐层处理单元试起,然后选择合适的准则来评价网络的性能,训练并检验网络的性能,然后稍增加隐层单元数,再重复训练和检验。

(3) 网络初始值设定

对于网络来说,初始值的选择同样重要,其中一个重要的要求是希望初始权在输入累加时,使每个神经元的状态值接近于零,这样可保证一开始不落在那些平坦区上。权一般取随机数,而且权的值要求比较小,这样可以保证每个神经元一开始都在它们转换函数变化最大的地方进行。

采用普遍使用的权值初始化的函数,利用随机的权值矩阵来初始化网络,矩阵的列被规范化为1。

6.4.2 基于BP神经网络激光拼焊模型拓扑结构设计

确定了网络的层数以及隐层的处理单元数之后,网络的大概框架已经建立起来,接下来就是具体的确定网络的输入输出参数。

(1) 输入输出参数确定

原则上,人工神经网络可以输入各种影响相关研究课题的因素,但是考虑到实际的实验状况和网络模型的收敛速度,应该在保证组织、性能预测模型所必需的信息量的基础上,尽量减小系统规模,所以要对各种影响因素进行充分分析和筛选。

在激光拼焊过程中,影响焊接性能的因素较多。实验中,我们所能控制的最主要因素有激光功率、焊接速度、离焦量、偏移量等,太少不能反应焊接的实际情况,太多影响网络的收敛速度。最终,我们确定了输入层为8个神经元,分别为板厚、激光功率、焊接速度、离焦量、保护气体流量、偏移量、焊接长度、端面直线度。

原则上,我们可以设定任意的与输入参数有关的指标作为输出,但是同样,网络模型的规模是影响网络收敛速度的重要因素。此时,考虑到全自动激光拼焊生产线的实际情况,除去哪些影响不重要的指标以减小网络规模,达到快速预测的目的。最终我们确定了输出层为3个神经元,分别为抗拉强度、杯突值和焊缝硬度。

(2) 传递函数确定

人工神经网络中,神经元的传递函数直接影响到网络的收敛速度以及网络模型运行的稳定性,因此,传递函数根据所在层的不同采取用不同的形式。

在隐层中,为了保证函数波动的范围和样本误差平方和不能太大以至于影响其收敛性,有必要对样本数据进行归一化,并且,采用双曲正切S型(Sigmoid)传递函数(tansig)比较好:

$$f_i(v_i) = \frac{1 - \exp(bv_i)}{1 + \exp(bv_i)} \quad \text{其中 } b \text{ 为常数}$$

$$v_j = \sum \omega_{pj} x_i - \theta_j$$

在输出层,采用最简单的线性传递函数((purelin))就足够了,同时还能保证输出参数有足够的变化空间。

$$f_i(v_i) = a + bv_i$$

$$v_i = \omega_{in} x_i - \theta_i$$

由于本网络的输入层神经元较多为 8 个, 隐层的神经元个数过少, 学习过程将会不收敛或效果不好, 隐层单元数多。则网络的学习和推理频率变差, 性能下降, 经过多次实验确定选择 40 个隐层单元较为合适。中间隐层的神经元的激发函数取 Sigmoid 函数, 即选取 Matlab 中的 logsig 函数作为传递函数。输出层传递函数选线性函数 purelin, 网络模型如下图所示。

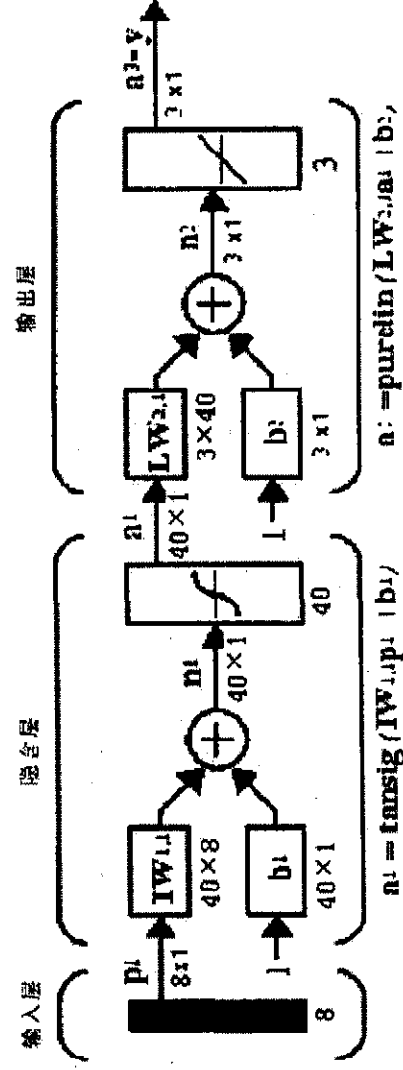


图 6-1 网络拓扑结构图

Fig 6-1 The network structure of BP topology

图中 P, 为输入参数矩阵, 根据实际情况, 决定输入矢量的数目, 在这里, P 是输入层的主要参量: IW1.1, LW2.1 分别为隐层和输出层的权值矩阵, 网络的训练也正是对此进行调整, 力求使网络处于稳定状态, b1, b2 为隐层和输出层的阈值, 决定了输入激励或是抑制, 每一层权值与输入向量的乘积通过累加器, 然后经过传递函数的作用输出; 隐层的输入量是作为下一层的输入向量, 就是输出层的输入参数; 同样在输出层中, 通过权值和阈值的调整对网络训练, 累加的结果通过线性传递函数输出。

6.4.3 样本数据

BP 网络是有导师训练的模型, 为了使神经网络在实际应用中能有效地解决问题, 必须在学习环境中选择一些有效的样本数据, 对其进行训练, 通过不断调整网络的权值, 直到得到合适的输入输出关系。由此可见, 能反映实际情况的导师数据决定了网络性能。因而, 在实际应用中, 不仅要考虑如何获取样本数据, 还要对所得到的样本数据进行恰当的分析 and 处理。

(1) 样本数据试验采集

在网络模型基本建立好以后,就要针对网络模型进行样本数据的搜集。对于人工神经网络来说,训练网络需要大量的数据才能使网络稳定,以达到预测的目的。在本文的样本数据中,全部来源于激光拼焊生产实际实验数据。

(2) 样本数据预处理

人工神经网络只能处理表示成熟的输入数据,所以经常需要将所采集的样本数据进行变换或编码。由于训练样本数据中各数据的物理量各不相同,数值差别也很大,为了保证样本数据的可比性,提高预测模型的收敛可靠性及收敛速度,在进行训练之前,有必要对所选择的数据进行预处理。所谓预处理,主要是对所有数据进行归一化处理,将所有数据经过换算成为[1,1]区间之内的数据。归一化所采用的一般公式如下:

$$T_i' = \frac{2T_i - T_{i,\max} - T_{i,\min}}{T_{i,\max} - T_{i,\min}}$$

其中: $T_{i,\max}$ 、 $T_{i,\min}$ 和 T_i 分别时数据 T 的极大值和极小值, T_i' 是转换后的数据。

6.4.4 基于BP神经网络激光拼焊模型网络训练学习

用人工神经网络解决实际问题时,先要确定网络的结构和网络中各层神经元所选用的传递函数。确定网络中神经元之间的连接权值以及神经元的 W 值,也就是确定向量 W 的值。确定 W 的方法和过程就称为人工神经网络的学习过程,也叫做对网络的训练。它包括对连接神经元的每个权重的调节。通过调整整个网络的权重的值,人工神经网络的输出可以根据输入数据组的不同而改变。训练过程是调整权值直到使每一组的输入值对应的输出尽可能的和实际输出接近为止,也就是使网络能够准确地对我们所建模的系统进行仿真为止。

反向传播法(BP算法)是给网络初始化一个随机的权值,一般情况下权值的初始化都比较小。接下来就是要进行数据输入,可以一次输入一组,也可以成批的输入数据进行批处理,这样来调整权重来减小与输入相应的输出误差。这种方法对每一组数据进行重复计算,直到误差平方和达到一个很小的值,这个值是在网络的初始化时设置的。

三层的BP网络的训练步骤如下:

步骤1:用小的随机数对每一层的权值 w 和阈值 b 初始化,以保证网络不会被大的加权输入饱和,同时还要进行一下参数的设定和初始化:

- (1) 设定期望误差的最小值:err_goal
- (2) 设置最大循环次数:max_epoch

(3) 设置修正权值的学习速度: $lr=0.01-0.7$

(4) 从 1 开始的循环训练网络: `for epoch=1:max epoch`

步骤 2: 计算网络各层输出矢量 A_1 和 A_2 , 以及网络误差 E :

$$A_1 = \tan \operatorname{sig}(w_1 * p, b_1);$$

$$A_2 = \operatorname{purelin}(w_2 * A_1, b_2);$$

$$E = T - A;$$

步骤 3: 计算各层反向传播的误差变化 D_2 和 D_1 , 并计算各层权值的修正值及新的权值:

$$D_2 = \operatorname{deltalin}(A_2, E);$$

$$D_1 = \operatorname{deltalin}(A_1, D_2, w_2);$$

$$[dw_1, db_1] = \operatorname{learnbp}(p, D_1, lr);$$

$$[dw_2, db_2] = \operatorname{learnbp}(A_1, D_2, lr);$$

$$w_1 = w_1 + dw_1$$

$$b_1 = b_1 + db_1;$$

$$w_2 = w_2 + dw_2;$$

$$b_2 = b_2 + db_2;$$

步骤 4: 再次计算权值修正后的误差平方和:

$$SSE = \operatorname{sumsqr}(T - \operatorname{purelin}(w_2 * \tan \operatorname{sig}(w_1 * p, b_1), b_2));$$

步骤 5: 检查 SSE 是否小于 `err-goal`, 若是, 则训练结束, 否则继续。

6.5 BP 神经网络优化

为了克服常规 BP 学习算法的缺陷, Matlab 神经网络工具箱对常规 BP 算法进行了改进, 并提供了一系列快速学习算法, 以满足解决不同问题的需要。

快速 BP 算法从改进途径上分为两大类: 一类采用启发式学习方法, 如引入动量因子的学习算法(`traingdm` 函数)、变学习速率学习算法(`traingda` 函数)和“弹性”学习算法(`trainrp` 函数)等; 另一类则是采用更有效的数值优化方法, 如共轭梯度学习算法(包括 `traincgf`、`traincg`、`traincgb`、`traincsg` 等函数)、quasi-Newton 算法(包括 `trainbfg`、`trainoss` 等函数)以及 Levenberg-Marquardt 优化方法(`trainlm` 函数)等。

对于不同的问题, 在选择学习算法对 BP 网络进行训练时, 不仅要考虑算法本身的性能, 还要视问题的复杂度、样本集大小、网络规模、网络误差目标和所要解决的问题类型(判断其属于“函数拟合”还是“模式分类”问题)而定。在前馈反向传播网络应用中, 对某一特定的问题, 很难确定哪种训练算法最快。

一般来说,网络具有几百个权值时,采用 Levenberg—Marquardt 算法收敛速度最快。在网络设计时,利用 1—10—1 拓扑结构,50 个样本对,期望误差为 0.01。可以看出采用 Levenberg—Marquardt 算法网络收敛最快,所以在此模型中选取 Matlab 中的 trainlm 函数为训练函数。

在 MATLAB 工具箱中自带的 Levenberg-Marquardt 优化方法的训练函数为 trainlm.m,其训练参数有:训练次数 epochs、训练步长 show、误差函数指标 goal、训练时间 time、最小梯度 min_grad、减少内存系数 mem_reduce 以及 u 的初始值、增加系数、减小系数和最大值以及训练时间 time。一旦训练达到了最大的训练次数或者低于最小梯度,或者网络函数指标降低到期望误差之下,都会使网络停止学习。

6.6 结果与分析

分别计算出了网络输出结果曲线,抗拉强度和维氏硬度指标值检测结果输出基本满意,它们与目标输出关系系数分别达到了 0.84 和 0.88。现场实际应用时,可输入焊接功率和不同的焊接速度,由此预报产品力学性能。也可在满足力学性能的前提下,得出需要的焊接速度和焊接功率,为生产操作提供指导。

随机抽取 15 组样本对神经网络测试样本,结果如图 6-2 所示。

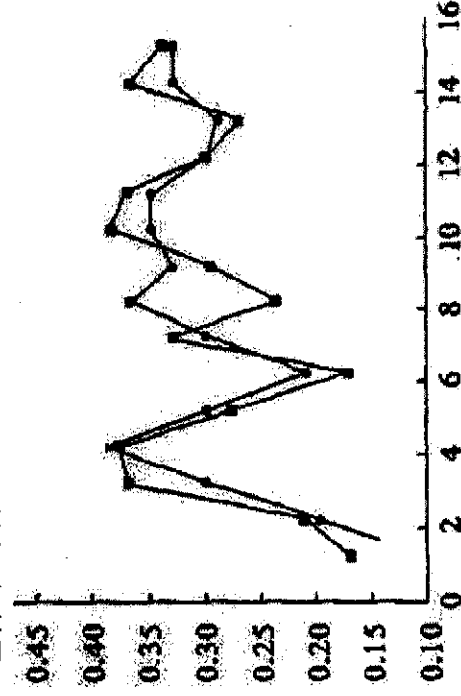


图 6-2 预测计算值与试验值对比分析

Fig 6-2 Contrast of prediction value and experimental value

训练后的神经网络对 15 组测试样本进行预测的结果,预测值误差在 $\pm 15\%$ 以内的样本个数为 13,占学习样本数的 86.67%;预测值误差在 $\pm 5\%$ 以内的样本个数为 4,占学习样本数的 25.7%。

6.7 本章小结

本章以 BP 神经网络技术为研究方法, 针对激光拼焊钢板实际生产中, 钢板性能随着焊接工艺规范变化差异大的问题, 利用激光拼焊生产线实际获得的数据, 以汽车常用板激光拼焊为研究对象, 构建了反映激光拼焊过程中板厚、激光功率、焊接速度、离焦量、保护气体流量、偏移量、焊接长度、端面直线度-力学性能关系的网络预测模型, 建立了基于 BP 神经网络激光拼焊焊接性能预测模型, 对激光拼焊中工艺参数与焊接组织性能之间的关系进行了分析, 同时利用建立网络预测模型来优化工艺参数。通过以上的分析和研究, 得出结论如下:

- (1) 利用神经网络技术, 基于 BP 算法建立了激光拼焊焊接接头力学性能人工神经网络预测模型, 该模型的预测结果与实验值之间有很好的对应关系, 可以用该模型研究激光光工艺参数与力学性能之间的相互关系。
- (2) 初步实现了根据工艺参数的改变, 可以直接预测焊接力学性能的新方法, 克服了激光拼焊初期需大量试验性研究的缺点, 为工艺参数优化的研究提供了有效的手段。
- (3) 人工神经网络可以作为通用的算法用于实验数据的处理, 在激光拼焊焊接接头性能预测中的运用是可行的。

结 论

激光拼焊成套装备开发是一个面临挑战的新课题,它涵盖了声、光、电、机、冶金、金属材料等多学科多类别的系统性课题。本文结合激光成套装备项目开发中的具体要求,在激光拼焊定位夹紧对中机构开发、激光拼焊工艺及激光拼焊焊接性能预测等方面作了大量工作,主要完成了以下研究内容:

- (1) 针对激光拼焊板材介于刚体和弹性体之间的柔性体特征,结合传统的定位原理“3-2-1”,提出了“N-2-1”的定位方法,给出了激光拼焊夹具定位原理及设计准则,初步建立了激光拼焊夹具参数化零件库和相应准则,并对激光拼焊夹紧机构进行了柔性分析,给出了拼焊夹具的柔性评价方案。

- (2) 针对激光拼焊成套装备项目实际开发需要,系统研究了大功率 YAG 激光拼焊生产线激光功率、焊接速度、离焦量和侧吹保护气体喷嘴高度、倾斜角度及气体流量等因素变化对焊接质量的影响规律,得到了变化规律曲线。系统全面地研究了目前汽车行业常用板材全厚度系列激光拼焊工艺规范,得到了适用于自主研发地全自动激光拼焊生产线最优工艺规范。

- (3) 针对中国市场中,激光拼焊成套装备销售必须附带汽车行业常用工艺规范库的现实问题,初步建立了激光拼焊工艺库系统,实现了激光拼焊示范应用、激光拼焊工艺参数查询、经济评估等功能,满足激光拼焊生产线的基本要求。

- (4) 针对激光拼焊焊接冷却速度快、过冷度大的特征,分别研究了碳钢板和不锈钢板激光拼焊时,板材厚度、激光功率、焊接速度等工艺参数变化,对激光拼焊接头的抗拉强度、显微组织硬度和金相组织结构的影响,获得了变化规律曲线。

- (5) 针对在激光拼焊实际生产中,存在着钢板性能随着焊接工艺规范变化差异大的问题,利用激光拼焊生产线实际得到的数据,建立了基于 BP 神经网络激光拼焊焊接性能预测模型,初步实现了根据工艺参数变化,可直接预测焊接力学性能的新方法,克服了激光拼焊初期需大量试验性研究的缺点。

在本文的研究工作中,有以下创新点:

- (1) 依据激光拼焊板材介于刚体和弹性体之间的柔性体特征,在传统“3-2-1”定位原理的基础上,结合激光拼焊生产线实际条件,首次提

出了“N-2-1”的定位方法,探讨了激光拼焊夹具定位原理及设计准则,建立了激光拼焊夹具参数化零件库和相应准则。

- (2) 首次系统地研究了采用大功率 YAG 激光器对汽车常用板材全厚度系列激光拼焊工艺,获得了全自动激光拼焊生产线的最优化工艺规范。
- (3) 针对中国市场中,激光拼焊成套装备销售必须附带汽车行业常用工艺规范库的现实问题,首次针对全自动激光拼焊生产线,建立了激光拼焊工艺库系统,实现了激光拼焊示范应用、激光拼焊工艺参数查询、经济评估等功能,基本满足激光拼焊生产线要求。
- (4) 针对激光拼焊快速冷却、过冷度大的特征,首次采用大功率高性能 YAG 激光器,在全自动化激光拼焊条件下分别研究了碳钢板和不锈钢板激光拼焊时,板材厚度、激光功率、焊接速度等工艺参数变化,对汽车板激光拼焊焊接接头的抗拉强度、显微组织硬度和金相组织结构的影响,获得了变化规律曲线。

本文的研究还有许多不足,结合研究背景今后还有以下工作需要做进一步的探讨:

- (1) 夹紧定位机构柔性化研究。针对异形板材激光拼焊,曲折线激光拼焊等都需要大量试验工作。
- (2) 激光拼焊工艺优化。针对激光拼焊中诸多不确定因素,激光工艺研究应着眼于更多参数一起优化,以期达到更加高效,可靠的激光焊接。
- (3) 激光拼焊工艺库。目前建立的激光拼焊工艺库仅实现了部分功能,而且尚未进行整体优化,以后应在工艺库优化和功能拓展上,以期实现工艺库具有一定的推理功能。
- (4) 激光拼焊焊接接头力学性能预测。目前进行的预测由于训练样本的有限性,尚不能得到十分令人满意的结果,今后还要做大量的试验,丰富训练样本,以期达到完全符合实际的模型。

总之,激光拼焊成套设备开发任重而道远,必须花费相当的时间才能开发出完全符合国情的设备。