

第三章 多种热应力影响因素显著性分析

梯度层厚度、梯度层组成相体积分数和梯度层组成相长径比均对梯度材料热应力有影响,但对三者影响的显著性缺乏精确的数量估计。对各因素的影响进行精确的数量估计可以明确材料设计中考虑各因素的主次顺序,对材料的制备具有重要的指导意义。

正交设计是利用“正交表”进行科学的安排与分析多因素试验的方法,能从很多试验方案中挑选出代表性强的少数试验方案,并通过对这少数试验方案的试验结果的分析,推断出最优方案,同时还可以作进一步的分析,得到比试验结果本身给出的还要多的有关各因素的信息^[58]。

本章采用正交设计和有限元分析相结合的方法对梯度材料热应力的三个影响因素进行综合分析。首先对正交设计的各个方案进行有限元计算;其次采用正交试验设计的方差分析对影响梯度材料热应力的三个因素的重要程度给出精确的数量估计,并提供一个标准来考察、判断三个因素对热应力的影响是否显著;最后,采用正交试验设计的极差分析选取使热应力最小的最佳方案。

3.1 模型建立及边界条件

3.1.1 几何模型简化

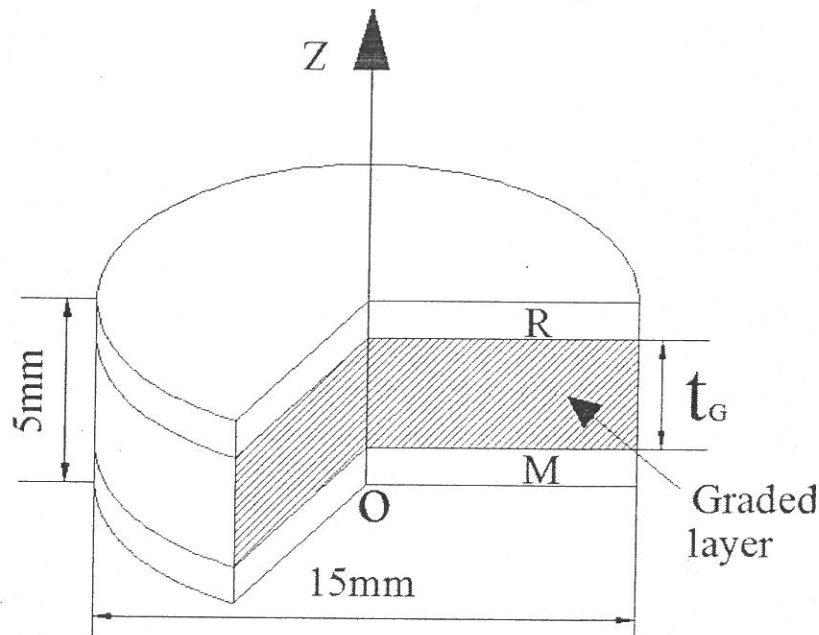


图 21 梯度复合材料几何模型

为分析梯度材料梯度层厚度、组成相体积分数和形态对梯度复合材料热应力

的影响,同时考虑到消除形状影响因素,本章建立了如图 21 所示梯度复合材料几何简化模型及其圆截面示意图。样品尺寸为 $\phi 15 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,沿 Z 轴正方向分别为纯材料层 M、梯度层和纯材料层 R,图 21 梯度复合材料几何模型中, t_G 表示梯度层厚度。梯度层由组成相 R 和基体相 M 组成,其中组成相的体积分数用 V_R 表示,其分布如图 22 所示以随机分布的方式排列,而其形态采用长径比 l/d 表征。材料的初始参考温度为 500°C ,置于 25°C 环境中,设定该过程为稳态过程。

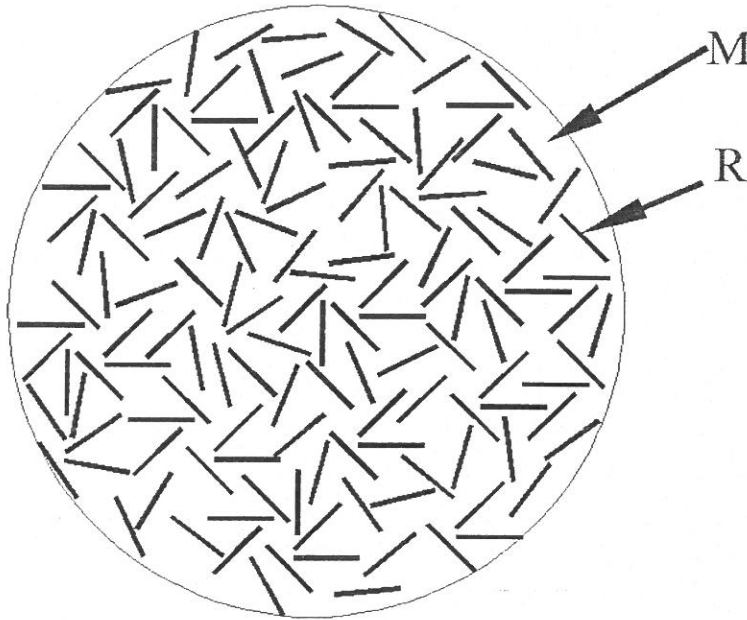


图 22 梯度层圆截面示意图

3.1.2 热物性参数模拟

热物性参数的模拟依然采用式 (7)、(8)、(9) 所示公式,而由于组成相 R 随机均匀分布在各向同性的均质基体 M 中,且仅考虑两相的热弹性问题,可简化梯度层为各向同性材料,其总体弹性模量 E 采用半经验公式计算,如式 (11) 所示。

$$E = 3E_1/8 + 5E_2/8 \quad (11)$$

由于 W、Cu 的热膨胀系数和弹性模量等物理性能差别悬殊,由这两种材料组成的复合材料热应力必然显著,而 W-Cu 复合材料在热沉材料^[59]上有广泛的应用且可望用作偏滤器材料,因而本文采用 W、Cu 的物理性能数据分别作为组成相 R 和基体相 M 进行计算,不仅能更清晰的反映梯度材料梯度层厚度、组成相

体积分数和形态三种因素对梯度复合材料热应力的影响,同时也具有一定的现实意义。表 3 为选用 R、M 物理性能数据。

表 3 模拟梯度材料 R、M 两组成相的一些常规性能

	E/Pa	$\alpha/^{\circ}\text{C}^{-1}$	μ	$k/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$
W	4.1E+11	4.5E-06	0.28	145
Cu	8.5E+10	1.7E-05	0.33	400

3.2 正交试验设计

对三种影响因素的不同取值,本文采用正交表对有限元计算进行设计,计算程序见附录。由于每种因素均由五个水平,故采用 $L_{25}(5^6)$ 正交表^[60],三种因素的取值如表 4 所示。此正交设计,共需进行 25 个试验,各试验三种因素取值如表 5 所示。

表 4 三种因素的取值

水平 序号	梯度层 厚度/mm	梯度层组成相体积 分数	梯度层组成相长径 比
1	0.5	10%	3
2	1	20%	5
3	2	40%	9
4	3	50%	15
5	4	60%	30

3.3 计算结果及讨论

3.3.1 最大 Mises 等效热应力分布

热应力对工件的形状、尺寸和性能都有极为重要的影响,但在一定条件下控制应力使之合理分布对提高工件的机械性能和使用寿命有着深远的实际意义。经研究发现,本文所建立的模型其各种不同因素的 Mises 等效热应力的分布较相似,主要受体积分数的影响。如图 23 所示,随体积分数的增加,最大 Mises 等效热应力的位置逐渐由 R 层与梯度层界面处过渡到梯度层与 M 层界面。故对于不同考察因素的计算结果,本文统一取该两处中最大 Mises 等效热应力为衡量标准,来评判三种因素对热应力影响的显著性。

表 5 各试验三种因素取值

试验号	梯度层厚度	梯度层体积分数	组成相长径比
1	0.5mm	10%	3
2	0.5mm	20%	9
3	0.5mm	40%	30
4	0.5mm	50%	5
5	0.5mm	60%	15
6	1mm	10%	30
7	1mm	20%	5
8	1mm	40%	15
9	1mm	50%	3
10	1mm	60%	9
11	2mm	10%	15
12	2mm	20%	3
13	2mm	40%	9
14	2mm	50%	30
15	2mm	60%	5
16	3mm	10%	9
17	3mm	20%	30
18	3mm	40%	5
19	3mm	50%	15
20	3mm	60%	3
21	4mm	10%	5
22	4mm	20%	15
23	4mm	40%	3
24	4mm	50%	9
25	4mm	60%	30

3.3.2 三种因素对热应力的影响规律及显著性分析

正交试验设计的方差分析通过提供一个标准来考察、判断因素对试验结果的影响是否显著，可以对影响试验结果的各因素的重要程度给出精确地数量估计。本文在显著性水平 $\alpha=0.005$ 下，采用 F-检验对三种因素对最大 Mises 等效热应力的影响进行显著性分析。若计算出的观测值 $F_{\text{因}} \geq F_{1-\alpha}(f_{\text{因}}, f_{\text{e}})$ ($f_{\text{因}}$ 、 f_{e} 分别为因素和误差的自由度) 且 $F_{\text{因}}$ 越大，则以显著性水平 α 判断此因素对试验结果的影响越显著，否则判断此因素对试验结果的影响不显著。

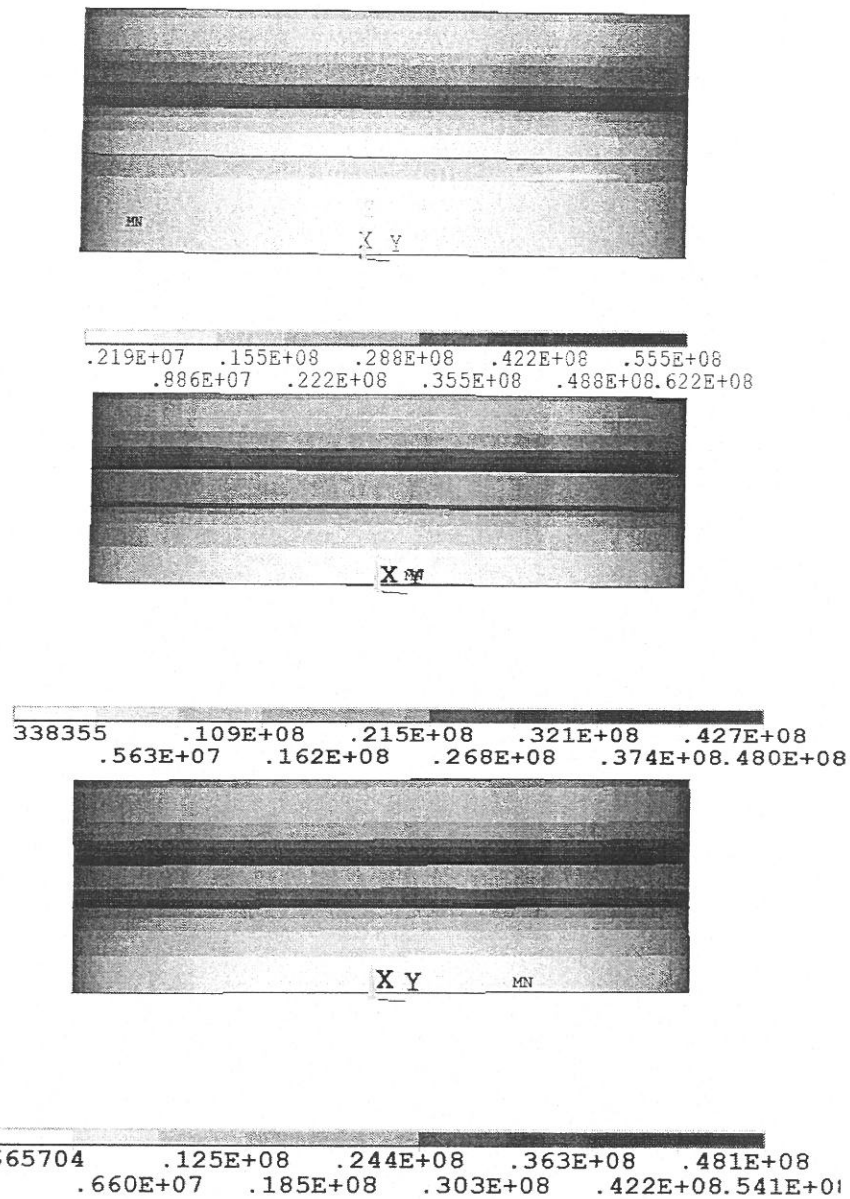


图 23 梯度层组成相不同体积分数的梯度复合材料热应力分布

表 6 为各试验水平号及试验结果，表中各数字为各因素所取水平号，未标出因素的三列为空白列，也称为误差列，在方差分析中有着重要作用。经计算，梯度层厚度、组成相 R 的体积分数及组成相长径比三种因素的观测值 $F_{\text{因}}$ 分别为 23.9、4.18、0.64，而 $F_{1-\alpha}(f_{\text{因}}, f_e)$ ($f_{\text{因}}=4$ 、 $f_e=16$) 为 3.01。这表明梯度层厚度对热应力的影响是高度显著的，体积分数的影响是显著的，而相对来说组成相的长径比的影响不显著。

图 24 为不同梯度层组成相 R 体积分数的梯度复合材料热应力随梯度层厚度变化曲线。可知，梯度层厚度对热应力的影响确实是高度显著的。当梯度层厚度较小时，梯度层组成相体积分数越大热应力越小。随梯度层厚度增加热应力总体

呈减小趋势,而不同组成相体积分数对热应力的影响不同,随体积分数的增大热应力减小趋势呈先增大后减小的趋势,体积分数为 60%的材料热应力甚至有小幅增大趋势,其结果是当梯度层厚度为 4 mm 时,梯度层体积分数为 60%、10%热应力最大。这说明梯度层厚度和梯度层体积分数对梯度材料热应力的影响有交互作用,而并非仅的如文献[43]所示梯度层越厚热应力缓和效果越好。

表 6 各试验水平号及试验结果

试验号	梯度层厚度	梯度层体积分数	组成相长径比				试验结果 /Mpa
1	1	1	1	1	1	1	69.5
2	1	2	3	4	5	2	66.3
3	1	3	5	2	4	3	61.2
4	1	4	2	5	3	4	58.9
5	1	5	4	3	2	5	57
6	2	1	5	4	3	5	62.2
7	2	2	2	2	2	1	55.7
8	2	3	4	5	1	2	48
9	2	4	1	3	5	3	54.1
10	2	5	3	1	4	4	51.2
11	3	1	4	2	5	4	48.4
12	3	2	1	5	4	5	38.7
13	3	3	3	3	3	1	36.2
14	3	4	5	1	2	2	48.8
15	3	5	2	4	1	3	51.6
16	4	1	3	5	2	3	39.3
17	4	2	5	3	1	4	29.3
18	4	3	2	1	5	5	35.9
19	4	4	4	4	4	1	43.4
20	4	5	1	2	3	2	48.8
21	5	1	2	3	4	2	37.3
22	5	2	4	1	3	3	27.5
23	5	3	1	4	2	4	30.3
24	5	4	3	2	1	5	35.7
25	5	5	5	5	5	1	40.4

由以上分析可知,梯度层组成相长径比对热应力的影响是不显著的。为考察其具体影响规律及大小。选取如图 24 所示对热应力缓和效果最差的梯度层厚度为 0.5 mm、组成相体积分数为 10%的模型,对不同长径比的梯度复合材料进行有限元分析。其结果如图 25 所示,可知,随长径比增加,梯度复合材料的热应

力是逐渐增大的,且相对于梯度层厚度及组成相体积分数的影响长径比对热应力的影响很小。

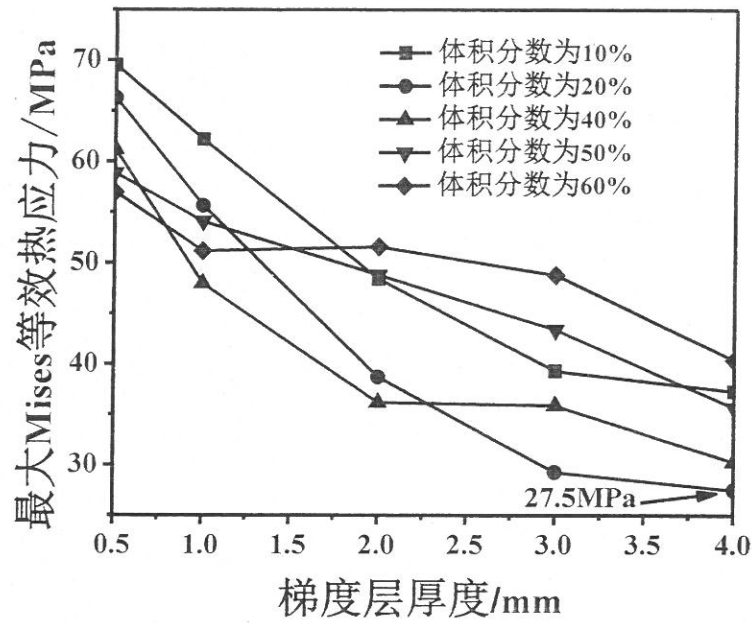


图 24 不同梯度层组成相体积分数的
梯度复合材料热应力随梯度层厚度变化曲线

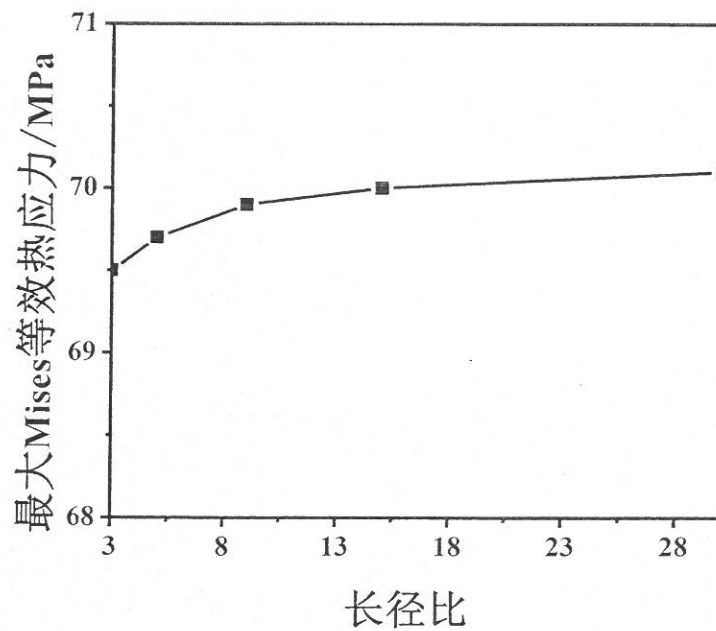


图 25 梯度层厚度为 0.5 mm、组成相体积分数为 10% 时
长径比对最大 Mises 等效热应力的影响

3.3.3 三种因素最优选择

由于热应力越小越好,根据以上显著性分析及每个水平热应力的平均值,即可确定最优试验方案。采用极差分析计算各因素五种水平最大 Mises 等效热应力平均值(表 7),可知,梯度层厚度为、梯度层组成相 R 体积分数及组成相长径比分别选取 5、2、1 号水平时材料热应力最小,即所建模型的最优方案为梯度层厚度为 4 mm,梯度层组成相体积分数为 20%、长径比为 3。该方案并不包含在正交表中已做过的 25 个试验方案之中,经有限元计算验证发现,梯度层厚度为 4 mm,梯度层组成相体积分数为 20%、长径比为 3 的梯度复合材料其最大 Mises 等效热应力为 27MPa,较之于图 24 中所示最正交试验方案中最小热应力 27.5MPa 更小,较之于两种材料直接连接不含梯度层的材料的热应力 78.7MPa 降低了 65.7%。这说明,本文所采用正交设计方法是有效的,也充分体现了正交设计的优越性。

表 7 各因素不同水平最大 Mises 等效热应力平均值/MPa

水平号	梯度层厚度	梯组成相体积分数	组成相长径比
1	62.58	51.34	44.86
2	58.96	42.32	47.88
3	44.74	43.5	50.46
4	39.34	48.18	48.28
5	34.24	54.52	48.38

3.4 小结

1) 梯度层厚度、梯度层组成相体积分数对梯度复合材料热应力有显著的影响,梯度层厚度的影响尤为显著,而梯度层组成相长径比的影响较小。

2) 度层厚度和梯度层体积分数对梯度材料热应力的影响有交互作用,梯度复合材料热应力随梯度层厚度增加总体呈减小趋势,不同组成相体积分数对热应力减小趋势的影响不同,随体积分数的增大热应力减小趋势呈先增大后减小的趋势。

3) 可以通过正交有限元设计得出使热应力最小的最优方案,针对本章所建 W-Cu 梯度复合材料模型,该最优方案为梯度层厚度为 4 mm,梯度层组成相体积分数为 20%、长径比为 3。

3.5 基于热物理参数的梯度材料设计原则

以热应力缓和为目的的梯度材料优化设计,其设计的一般方法是寻找各种影响因素的最佳配置使梯度材料热应力最小。本文采用有限元的计算方法,首先计算了梯度层组成相为不同长径比的梯度材料热应力,分析了长径比对梯度材料热应力的影响规律;然后从热物理参数的角度解释了梯度层层数和梯度分布指数两个影响因素影响规律;最后采用正交有限元分析的方法,以准确的数量估计考察了梯度层为单层的梯度材料梯度层厚度、梯度层体积分数和梯度层组成相长径比三个热应力影响因素的重要性。

根据以上分析,提出以下梯度材料设计原则:

- 1) 在工艺条件的允许下,选择尽量多的梯度层层数或者使梯度成分呈连续变化;
- 2) 根据材料的力学性能和尺寸要求,选择尽量厚的梯度层厚度;
- 3) 在选定的梯度层厚度和层数条件下,设计梯度层成分分布指数使各层间线膨胀系数差值 $\Delta\alpha$ 和弹性模量差值 ΔE_I 尽量接近。
- 4) 在力学性能要求下,选择尽量小的梯度层组成相长径比。

结论

1. 建立了梯度层组成相为不同长径比的平板状 W/Ti 梯度材料物理模型, 选择合理的热物理参数计算方法, 设计梯度材料有限元计算程序计算了梯度材料从 500℃ 冷却至室温 25℃ 的热应力。结果表明: 几何模型对热应力有形状影响作用, X 轴热应力明显较大, Y 轴热应力最小; 组成相形态对梯度材料 Mises 热应力有明显的影响, 最大 Mises 等效热应力随梯度层组成相长径比 l/d 的增大, 且当 l/d 大于一特定值时, 最大 Mises 等效热应力增加趋势减缓并逐渐趋于恒定。

2. 从热物理参数角度分析, 表明: 弹性模量 ΔE 随长径比 l/d 的增大而增大, 且当 l/d 大于一特定值时, ΔE 趋于恒定的变化是造成梯度材料随长径比 l/d 变化重要原因; 梯度层层数和梯度层成分分布指数对梯度材料热应力优化作用的实质在于均匀减小材料层间弹性模量差值 ΔE 和线膨胀系数差值 $\Delta\alpha$ 。

3. 建立了热物性参数差距更大的 W/Cu 梯度材料圆盘物理模型, 对梯度层厚度、梯度层体积分数、梯度层组成相长径比三个影响因素进行了正交分析, 并对三个影响因素的显著性给出了准确的数量估计。经有限元计算, 结果表明: 梯度层厚度对热应力的影响高度显著, 梯度层组成相体积分数影响显著, 而梯度层组成相长径比的影响相对较小; 度层厚度和梯度层体积分数对梯度材料热应力的影响有交互作用, 梯度复合材料热应力随梯度层厚度增加总体呈减小趋势, 不同组成相体积分数对热应力减小趋势的影响不同, 随体积分数的增大热应力减小趋势呈先增大后减小的趋势。

4. 通过以上分析, 总结了梯度材料设计原则:

1) 在工艺条件的允许下, 应选择尽量多的梯度层层数或者使梯度成分呈连续变化;

2) 根据材料的力学性能和尺寸要求, 选择尽量厚的梯度层厚度;

3) 在选定的梯度层厚度和层数条件下, 设计梯度层成分分布指数使各层间线膨胀系数差值 $\Delta\alpha$ 和弹性模量差值 ΔE 尽量接近;

4) 在符合材料力学性能要求下, 选择尽量小的梯度层组成相长径比。

附录

组成相形态对梯度材料热应力的影响 APDL 命令流程序

```
/PREP7
ET,1,SOLID5                                !选择计算单元
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,3,0
KEYOPT,1,5,0
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,19300
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,3.50E+11
MPDATA,PRXY,1,,0.28
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
UIMP,1,REFT,,
MPDATA,ALPX,1,,4.50E-06
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,1,,174                          !第一层材料物性参数设定
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,2,,16342
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,2.71E+11
```

MPDATA,PRXY,2,,0.286

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

UIMP,2,REFT,,

MPDATA,ALPX,2,,4.73E-06

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,KXX,2,,143.58

!第二层材料物性参数设定

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,DENS,3,,13384

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,3,,2.13E+11

MPDATA,PRXY,3,,0.292

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

UIMP,3,REFT,,

MPDATA,ALPX,3,,5.06E-06

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,KXX,3,,113.16

!第三层材料物性参数设定

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,DENS,4,,10426

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,4,,1.67E+11

MPDATA,PRXY,4,,0.298
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
UIMP,4,REFT,,
MPDATA,ALPX,4,,5.55E-06
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,4,,82.74 !第四层材料物性参数设定
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,5,,7468
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,5,,1.30E+11
MPDATA,PRXY,5,,0.304
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
UIMP,5,REFT,,
MPDATA,ALPX,5,,6.37E-06
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,5,,52.32 !第五层材料物性参数设定
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,6,,4510
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,6,,1.00E+11

MPDATA,PRXY,6,,0.31

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

UIMP,6,REFT,,

MPDATA,ALPX,6,,8.00E-06

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,KXX,6,,21.9

!第六层材料物性参数设定

K,1,0,0,0,

K,2,0,0,0.0025,

K,3,0,0,0.005,

K,4,0,0,0.0075,

K,5,0,0,0.01,

K,6,0,0,0.0125,

K,7,0,0,0.015,

K,8,0,0.02,0.015,

K,9,0,0.02,0.0125,

K,10,0,0.02,0.01,

K,11,0,0.02,0.0075,

K,12,0,0.02,0.005,

K,13,0,0.02,0.0025,

K,14,0,0.02,0,

!自底向上建模确定关键点

FLST,2,4,3

FITEM,2,1

FITEM,2,2

FITEM,2,13

FITEM,2,14
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,2
FITEM,2,3
FITEM,2,12
FITEM,2,13
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,3
FITEM,2,4
FITEM,2,11
FITEM,2,12
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,4
FITEM,2,5
FITEM,2,10
FITEM,2,11
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,5
FITEM,2,6
FITEM,2,9
FITEM,2,10
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,6

FITEM,2,7

FITEM,2,8

FITEM,2,9

A,P51X

!由关键点生成六个面

et,1,200,6

!对于不平行于 XOY 平面的面采用 Mesh200 进行网格划分

FLST,5,19,4,ORDE,2

FITEM,5,1

FITEM,5,-19

CM,_Y,LINE

LSEL, , , ,P51X

CM,_Y1,LINE

CMSEL, ,_Y

LESIZE,_Y1, , ,10,-2, , , ,1

!在线上确定网格密度

MSHAPE,0,2D

MSHKEY,1

FLST,5,6,5,ORDE,2

FITEM,5,1

FITEM,5,-6

CM,_Y,AREA

ASEL, , , ,P51X

CM,_Y1,AREA

CHKMSH,'AREA'

CMSEL,S,_Y

AMESH,_Y1

CMDELE,_Y

```
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2                                !对面进行网格划分
ESIZE,0,25,
ET,2,SOLID5
TYPE, 2
EXTOPT,ESIZE,0,0,
EXTOPT,ACLEAR,0
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,1
REAL,_Z4
ESYS,0
VOFFST,1,0.1,, !使用 SOLID5 单元和第一层物性参数对 1 号面进行单元拉伸
TYPE, 2
EXTOPT,ESIZE,0,0,
EXTOPT,ACLEAR,0
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,2
REAL,_Z4
ESYS,0
VOFFST,2,0.1,, !使用 SOLID5 单元和第二层物性参数对 2 号面进行单元拉伸
TYPE, 2
EXTOPT,ESIZE,0,0,
EXTOPT,ACLEAR,0
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,3
REAL,_Z4
ESYS,0
VOFFST,3,0.1,,
```

```
TYPE, 2
EXTOPT,ESIZE,0,0,
EXTOPT,ACLEAR,0
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,4
REAL,_Z4
ESYS,0
VOFFST,4,0.1,,
TYPE, 2
EXTOPT,ESIZE,0,0,
EXTOPT,ACLEAR,0
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,5
REAL,_Z4
ESYS,0
VOFFST,5,0.1,,
TYPE, 2
EXTOPT,ESIZE,0,0,
EXTOPT,ACLEAR,0
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,6
REAL,_Z4
ESYS,0
VOFFST,6,0.1,, !依次对 3,4,5,6 层进行单元拉伸
FLST,2,6,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-6
ACLEAR,P51X !清除端面上单元
```

NUMMRG,ALL,, ,LOW	!合并重合元素
NUMCMP,ALL	!压缩元素数目至最小
ALLSEL,ALL	
FINISH	
/SOL	
ANTYPE,0	!设定分析类型为稳态分析
TIME,1	
TUNIF,500,	!设定体温度
FLST,5,5,5,ORDE,5	
FITEM,5,9	
FITEM,5,14	
FITEM,5,18	
FITEM,5,22	
FITEM,5,26	
ASEL,U, , ,P51X	
NSLA,S,1	
FLST,2,4702,1,ORDE,22	
FITEM,2,1	
FITEM,2,-1005	
FITEM,2,1222	
FITEM,2,-1752	
FITEM,2,3697	
FITEM,2,-3980	
FITEM,2,4197	
FITEM,2,-4502	
FITEM,2,6447	
FITEM,2,-6730	
FITEM,2,6947	

```

FITEM,2,-7252
FITEM,2,9197
FITEM,2,-9480
FITEM,2,9697
FITEM,2,-10002
FITEM,2,11947
FITEM,2,-12230
FITEM,2,12447
FITEM,2,-12752
FITEM,2,14697
FITEM,2,-15502
/GO
SF,P51X,CONV,110,30
ALLSEL,ALL
SOLVE
FINISH

```

!设定热传导方式
!设定环境边界条件
! 开始计算

多种热应力影响因素显著性分析 APDL 命令流

```

/PREP7
ET,1,SOLID5
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,3,0
KEYOPT,1,5,0
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,4.1E+11
MPDATA,PRXY,1,,0.28

```

!选择计算单元

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
UIMP,1,REFT,,
MPDATA,ALPX,1,,0.0000045
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,1,,145
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,1.02631E+11
MPDATA,PRXY,2,,0.325
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
UIMP,2,REFT,,
MPDATA,ALPX,2,,1.26383E-05
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,2,,374.5
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,850000000000
MPDATA,PRXY,3,,0.33
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
UIMP,3,REFT,,
MPDATA,ALPX,3,,0.000017
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0

MPDATA,KXX,3,,400

!设定各层物性参数

/VIEW,1,0,0,1

/VUP,1,Z

/REPLOT

/VIEW,1,1,1,1

/ANG,1

/REP,FAST

!设定视角

CYLIND,0.0075,0,0,0.00225,0,360,

CYLIND,0.0075,0,0.00225,0.00275,0,360,

CYLIND,0.0075,0,0.00275,0.005,0,360,

! 建立物理模型

FLST,5,30,4,ORDE,2

FITEM,5,1

FITEM,5,-30

CM,_Y,LINE

LSEL,,,P51X

CM,_Y1,LINE

CMSEL,_,_Y

LESIZE,_Y1,,,25,,,,,1

FLST,5,4,4,ORDE,4

FITEM,5,9

FITEM,5,-10

FITEM,5,29

FITEM,5,-30

CM,_Y,LINE

LSEL,,,P51X

```
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1,,,10,-2,,,,1
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,19
FITEM,5,-20
CM,_Y,LINE
LSEL,,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1,,,2,,,,1
```

! 设定网格密度

```
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
FLST,5,3,6,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-3
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VSWEEP,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
```

! 网格划分

```
NUMMRG,ALL,,,,LOW
```

```
NUMCMP,ALL                                !重合元素压缩
ALLSEL,ALL
FINISH

/SOL
ANTYPE,0                                  !设定分析类型为稳态分析
TIME,1
TUNIF,500,                                !设定体温度
FLST,5,2,5,ORDE,2
FITEM,5,2
FITEM,5,5
ASEL,U,,P51X
NSLA,S,1
/SOLU
FLST,2,3966,1,ORDE,4
FITEM,2,1
FITEM,2,-833
FITEM,2,2500
FITEM,2,-5632
/GO                                        !设定热传导方式
SF,P51X,CONV,110,30                      !设定环境边界条件
ALLSEL,ALL
SOLVE                                    !开始计算
FINISH
```


参考文献

- [1] 李永, 宋健, 张志民. 梯度功能材料[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 3
- [2] Giannakopoulos A.E., Suresh S., Finot M.. Elastoplastic analysis of thermal cycling: layered materials with compositional gradients[J]. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1995, 43(4): 1335-1354
- [3] Cho J.R., Oden J.T.. Functionally graded material: a parametric study on thermal-stress characteristics using the Crank-Nicolson-Galerkin scheme[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2000, 188(1-3): 17-38
- [4] Suresh S, Mortensen A. Fundamentals of functionally graded materials[M]. London: IOM Communications Ltd., 1998
- [5] Jin G, Nishikawa T, Honda S, et al. Stress analysis in multilayered FGM plate under thermal shock[J]. *Materials Science Forum*, 2003, 423-425: 693-698
- [6] LING Yunhan, BAI Xinde, GE Changchun. Design and thermal shock performance of W/Cu functionally graded materials used as plasma facing component[J]. *Materials Science Forum*, 2003, 423-425: 49-54
- [7] Gasik M M. Micromechanical modeling of functionally graded materials[J]. *Computational Materials Science*, 1998, 13: 42-55
- [8] Ravichandran K S. Thermal residual stress in a functionally graded material system[J]. *Mater Sci Eng A*, 1995, 201: 269-276
- [9] 朱信华, 孟中岩. 梯度功能材料的研究现状与展望[J]. *功能材料*, 1998, 29(2): 121-127
- [10] Schmauder S., Weber U.. Modeling of functionally graded materials by numerical homogenization[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2001, 71: 182-192
- [11] Dao M., Gu P., Maewal A. et. al. A micromechanical study of residual stresses in functionally graded materials. *Acta Mat*, 1997, 45: 3265-3276
- [12] Grujicic M., Zhang Y.. Determination of effective elastic properties of functionally graded materials using Voronoi cell finite element method[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1998, 251: 64-76
- [13] 戴起勋, 赵玉涛. 材料设计教程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 34-35, 166-169
- [14] Cho J.R., Ha D.Y.. Averaging and finite-element discretization approaches in the numerical analysis of functionally graded materials[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 302: 187-196
- [15] 孟牧. 金属零件激光快速成型温度场数值模拟[D]. 北京: 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 2010
- [16] 周志光, 张联盟, 沈强等. 热应力缓和型梯度材料的计算机辅助设计系统[J]. *武汉理工大学学报*, 2004, 26(7): 1-3
- [17] 胡于进, 王璋奇. 有限元分析及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 6, 12-13, 229-235
- [18] Delale F, Erdogan F. The crack problem for a non-homogeneous plane. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1983, 50(3): 609-614

- [19] Delale F, Erdogan F. Interface crack in a non-homogeneous elastic medium. *International Journal of Engineering Science*, 1988, 26(6): 559-568
- [20] 程站起, 仲政. 功能梯度板条断裂分析. *力学季刊*, 2005, 26(4): 544-548
- [21] Cheng ZQ, Zhong Z. Fracture analysis of a functionally graded strip under plane deformation. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2006, 19(2): 114-121
- [22] Cheng ZQ, Zhong Z. Fracture analysis of a functionally graded interfacial zone between two dissimilar homogeneous materials. *Science in China(Series G)*, 2006, 49(5): 540-552
- [23] 程站起, 仲政. 功能梯度材料涂层平面裂纹分析. *力学学报*, 2007, 9(5): 685-691
- [24] Zhong Z, Cheng ZQ. Fracture analysis of a functionally graded strip with arbitrary distributed material proper-ties. *International Journal of Solids and Structures*, 2008, 45(13): 3711-3725
- [25] Guo LC, Noda N. Modeling method for a crack problem of functionally graded materials with arbitrary properties—piecewise-exponential model. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44(21): 6768-6790
- [26] Dag S, Erdogan F. A surface crack in a graded medium loaded by a sliding rigid stamp. *Engineering Fracture Me-chanics*, 2002, 69(14-16): 1729-1751
- [27] Erdogan F, Wu BH. The surface crack problem for a plate with functionally graded properties. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1997, 64(3): 449-456
- [28] Guo LC, Wu LZ, Zeng T, et al. Mode I crack problem for a functionally graded orthotropic strip. *European Journal of Mechanics—A/Solids*, 2004, 23(2): 219-234
- [29] Chakrabortya A., Gopalakrishnana S., Reddyb J.N.. A new beam finite element for the analysis of functionally graded materials[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2003, 45: 519-539
- [30] 黄剑锋, 曹丽云, 曹建坤. 有限元在梯度功能材料研究中的应用[J]. *中国陶瓷*, 2001, 37 (6): 37-39
- [31] Markworth AJ, Ramesh KS, Parks Jr WP. Modelling studies applied to functionally graded materials[J]. *Journal of Material Science* 1995, 30: 2183-2193
- [32] DELFOSSE D, CHERRADI N and ILSCHNER B. Numerical and experimental determination of residual stresses in graded materials[J]. *Composites Part B: Engineering*, 1997, 28(1-2): 127-141
- [33] CAO Pin-lu, LIU Baochang, YIN Kun, ZHANG Zupei. Optimization design and residual thermal stress analysis of PDC functionally graded materials[J]. *J Zhejiang Univ Science A*, 2006, 7(8): 1318-1323
- [34] JIN Gang, AWAJI Hideo. Residual thermal stresses in multilayered functionally graded material plate[J]. *Materials Science Research International*, 2003, 9(2): 125-130
- [35] LIEW KM, KIRIPORNCHAI S, ZHANG XZ, LIM CW. Analysis of the thermal stress behavior of functionally graded hollow circular cylinders[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, 40(10): 2355-2380

- [36]陈福义, 介万奇. MgO/Ni 梯度材料的有限元设计[J]. 功能材料, 2001: 1732-1734
- [37]李云凯, 王勇, 韩文波. PSZ/Mo 功能梯度材料的优化设计[J]. 机械工程材料, 2003, 27(2): 14-16
- [38]程军, 陈英, 李禾. SiC/Al 梯度功能材料热应变测试与有限元分析[J]. 机械强度, 2008, 30(3): 488-492
- [39]Williamson R. L., Rabin B. H., Drake J. T. Finite element analysis of thermal residual stresses at graded ceramic-metal interfaces. Part 1. Model description and geometrical effects[J]. J. Appl. Phys., 1993, 74 (2): 1310-1320
- [40]王红卫, 孙敏, 魏永前. Ti6Al4V-TiN 系梯度材料的设计[J]. 材料开发与应用, 2000, 15(1): 1-4
- [41]凌云汉, 白新德, 李江涛, 葛昌纯. W/Cu 功能梯度材料的热应力优化设计[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(12): 976-980
- [42]凌云汉, 白新德, 葛昌纯. 偏滤器部件 W/Cu 功能梯度材料的热应力缓和[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(6): 750-753
- [43]陶光勇, 郑子樵, 刘孙和. W/Cu 梯度功能材料板稳态热应力分析[J]. 中国有色金属学报, 2006, 4(16): 694-700
- [44]刘彬彬, 谢建新. W-Cu 梯度热沉材料的成分与结构设计[J]. 稀有金属, 2005, 29(5): 757-761
- [45]Gasik M M. Micromechanical modeling of functionally graded materials[J]. Computational Materials Science, 1998, 13: 42-55
- [46]Paul B. Prediction of elastic constants of multiphase materials[J]. Trans. Met Soc AIME, 1960, 218(1): 36
- [47]Kerner EH. The elastic and thermo-elastic properties of composite media [J]. Proc. Phys. Soc., Section B, 1956, 69: 808
- [48]Hashin Z., Shtrikman S. A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1963, 11 (2): 357
- [49]仲政, 吴林志, 陈伟球. 功能梯度材料与结构的若干力学问题研究进展[J]. 力学进展, 2010, 40(5): 528-535
- [50]陈烈民, 杨宝宁. 复合材料的力学分析[M]. 北京: 中国科技出版社, 2006: 55
- [51]王耀先. 复合材料结构设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 45-47
- [52]Halpin JC, Kardos JL. The Halpin-Tsai Equations: a review[J]. Polymer Engineering and Science, 1976, 16(5): 344-352
- [53]王玲, 赵浩峰. 金属基复合材料及其浸渗制备的理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005:144-145
- [54]沈强, 涂溶, 张联盟等. TiC/Ni3Al 系梯度材料的残余应力与工作应力计算及结构优化[J]. 材料研究学报, 1997, 11(1): 96-100
- [55]张国兵, 郭全贵, 刘朗等. 圆板状 SiC/C 功能梯度材料残余热应力特征有限元分析[J]. 功能材料, 2007, 7(38): 1102-1105
- [56]李臻熙, 张同俊, 李星国. Al₂O₃-Ti 系梯度功能材料的优化设计[J]. 宇航材料

工艺, 1998, 1: 30-35

[57] 张幸红, 曲伟, 张学忠. TiC-Ni 梯度功能材料的优化设计[J]. 材料科学与工程, 2001, 1(8): 81-83

[58] 孙海燕, 周梦, 李卫国等. 应用数理统计[M]. 北京: 北京航空航天大学数学系, 2008

[59] 王涂根. W-Cu 三层梯度热沉材料的制备和性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007

[60] 韩於羹. 应用数理统计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006: 433

致谢

本论文是在王华明老师的精心指导和督促下完成的。在两年半的学习、生活过程中，王老师都给予了我极大地帮助和指导，尤其对论文的评阅倾注了大量的心血。王老师广博的学识、宽广的胸怀、严谨的作风和忘我的工作态度都让我非常佩服，给我人生很大的启迪。

实验室汤海波老师、方艳丽老师、王玉岱博士、李佳博士、李旭硕士、刘建弟硕士等也提供了许多有益的帮助和建议，并在研究和实验工作中给予大力的支持。特别感谢冯淑容同学在论文撰写中给予的无私帮助。

本课题得到国家自然科学基金及 973 项目的支持，在此表示感谢。

再次对所有关心和帮助过我的老师和同学表示衷心的感谢。

攻读硕士学位期间取得的研究成果

发表文章:

1. 范世通, 汤海波, 张述泉, 王华明. 梯度复合材料热应力影响因素正交有限元设计, 材料工程, (EI 源)。
2. 范世通, 汤海波, 张述泉, 王华明. 梯度复合材料热应力有限元分析, 热加工工艺, (中文核心期刊)。