

涂层基体条件对梯度涂层残余应力影响研究

Substrate Influence on Residual Stress of Gradient Coating

马 壮, 王全胜, 王富耻, 吕广庶 (北京理工大学机械工程与自动化学院, 北京 100081)

MA Zhuang, WANG Quan-sheng, WANG Fu-chi, LU Guang-shu

(School of Mechanical Engineering and Automation,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

摘要: 采用有限元法, 对结构一定的 Al/Ni-ZrO₂ 梯度涂层在基体条件改变时涂层的残余应力进行了分析, 结果表明, 基体材料的热膨胀系数对涂层的残余应力有显著的影响, 对于基体为圆柱形的涂层, 其基体与涂层界面的残余应力梯度、最大轴向拉应力均随热膨胀系数的增大而线性增大, 表面纯陶瓷层与次层界面残余应力梯度则随之减小。增大基体的直径和厚度, 可缓和涂层残余应力, 并在基体直径为 36mm, 厚度为 20mm 时各残余应力基本稳定。

关键词: 梯度涂层; 有限元法; 残余应力; 基体

中图分类号: TB333 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2002) 04-0015-04

Abstract: Finite element method was adopted in this paper to analyze substrate influence on residual stress of gradient coating when the substrate condition of gradient coating was changing, but the structure of gradient coating was unchanged. The results show that the residual stress of gradient coating is affected remarkably by the thermal expansion coefficient of substrate material. For the columnar substrate, both the difference of interface residual stress between substrate and coating and the maximal axial tensile stress increase linearly with the increasing of the thermal expansion coefficient, however, the difference of interface between ceramic layer and the second layer decrease. To increase the diameter and the thickness of substrate can abate the residual stress of coating, and all kinds of residual stress are stable when the diameter of substrate is 36mm and the thickness is 20mm.

Key words: gradient coatings; finite element method; residual stress; substrate

等离子喷涂制备金属—ZrO₂ 系热应力缓和型功能梯度涂层日益引起人们的重视^[1,2], 在制备过程中产生的残余热应力的大小及分布是制约涂层性能的重要因素, 同时也是进行涂层结构设计的主要理论依据和评价标准。当前, 通过涂层残余热应力优化进行涂层结构设计的方法多是针对某一特定的基体条件 (包括基体材质、形状、尺寸等) 改变梯度层的层数、厚度或成分分布指数 P , 以得到合理的涂层残余应力分布。然而实际工作中, 涂层基体部件的材质、形状和尺寸经常发生变化, 残余应力将随之改变, 这给涂层的设计造成了一定的困难。因此, 本文采用热弹性有限元方法, 对涂层结构相同, 而基体材质和尺寸改变时的涂层残余应力大小和分布情况进行分析, 为涂层的结构设计和实际应用奠定基础。

1 应力分析模型

本研究涂层残余应力分析模型见文献 [3], 功能

梯度涂层基体为圆柱形, 各种条件下涂层厚度均为 2mm, 涂层材料为 Al/Ni-ZrO₂ (8% Y₂O₃, 质量分数, 稳定的 PSZ), 涂层由靠近基体的纯金属 (Al/Ni) 逐渐向涂层表层的纯陶瓷 (ZrO₂) 过渡^[3]。采用实验方法分别测量了部分不同配比的单一金属—陶瓷涂层的物理性能参数, 并用插值方法求得各种所需配比涂层的物性参数值^[4]。由于结果的对称性, 只对截面的 $1/2$ ($r=0, z=0$) 进行单元格划分, 单元为四节点轴对称单元。涂层的零应力温度为涂层制备平均温度 625℃。

2 结果分析

2.1 基体材质对涂层残余应力的影响

选择 45 钢、Ni 合金和 LD8、ZL109、LY12 铝合金作为梯度涂层的基体材料, 它们在实际工件中应用范围广, 而且在很多情况下会承受很大的热负荷, 在表面制备梯度热障涂层是减小材料热负荷、提高材料

使用寿命的有效手段。其中铝合金由于和涂层之间的物性参数差异极大，而导致基体与涂层间产生的残余热应力使涂层甚至在制备过程中就会脱落失效，因此本文选择了三种常用铝基体与 45 钢和 Ni 合金基体相比较进行残余应力的分析。各种基体物理性能参数取自文献 [5, 6]，如表 1 所示。

表 1 基体物性参数

Table 1 Physical property of substrate materials					
材质	45 钢	Ni	ZL109	LD8	LY12
E / MPa	205	204	85	72	70
ν	0.30	0.28	0.35	0.34	0.31
$\alpha / (\times 10^{-6} / ^\circ\text{C})$	14.3	17.1	20.9	24.1	24.7

与脆性材料相似，涂层材料的破坏很大程度上受各界面位置应力梯度大小所支配，因为无论是拉应力还是压应力，大的应力差值都将使涂层承受大的剪应力，应力梯度越大，材料越容易破坏，即使在最大应力相同的情况下，应力梯度越小，材料所承受的载荷越大^[7]，因此，在分析梯度涂层的残余应力时，应该将涂层各界面应力梯度放在重要的位置。本文在分析时做如下定义：

- $\sigma_{\Delta rjt}$ —基体与涂层界面应力梯度绝对值；
- $\sigma_{\Delta rjc}$ —表面纯陶瓷层与次层界面应力梯度绝对值；
- $\sigma_{\Delta rmax}$ —涂层中各界面应力梯度绝对值的最大值。

图 1 是各种基体的涂层径向残余应力分布图。由图可以看出，不同基体涂层残余应力的 $\sigma_{\Delta rj}$ 有很大差别，45 钢基体的界面应力梯度最小，仅为 2.5MPa；LY12 的基体界面应力梯度最大，达到了 651.8MPa；其余各种基体涂层的界面应力梯度介于二者之间，这主要是由于各基体与涂层的物性参数差异，特别是热膨胀系数的差异造成的。

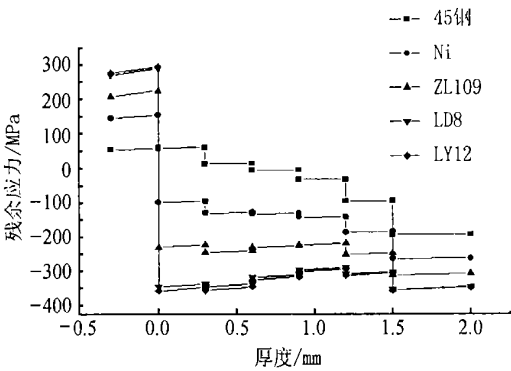


图 1 不同基体涂层径向残余应力

Fig. 1 Diametral residual stress of different substrates

图 2 给出了各基体与涂层的界面应力梯度随基体的热膨胀系数的变化关系，由图可以看出，界面应力梯度随基体的热膨胀系数增大而增大，且二者基本呈线性关系，经拟和后的线性方程为：

$$\sigma_{\Delta rjt} = 60.84\alpha_s - 830.92 \tag{1}$$

式中 α_s 为基体材料热膨胀系数。

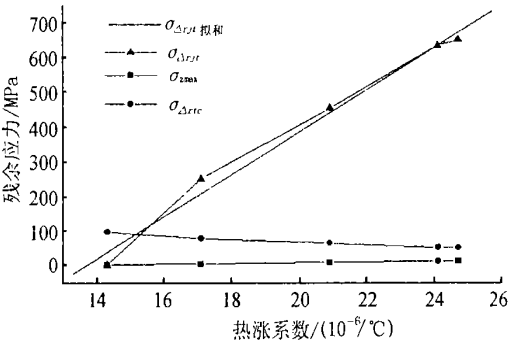


图 2 涂层残余应力与基体热膨胀系数关系

Fig. 2 The relationship of residual stress and thermal expansion coefficient of substrate

由图 1 可知，本文中不同基体的涂层内部 $\sigma_{\Delta rmax}$ 即为 $\sigma_{\Delta rjc}$ ，它和基体热膨胀系数的关系同时由图 2 给出。另外由有限元分析结果可知，涂层中最大轴向拉应力 σ_{zmax} 即为陶瓷层轴向应力 σ_{zjc} ，它对涂层结合强度有很大影响，因此在图 2 中一起给出。由图可知， $\sigma_{\Delta rjc}$ 随基体热膨胀系数增大而减小， σ_{zmax} 随基体热膨胀系数增大而增大，但变化不大，二者均与热膨胀系数呈线性关系，经拟和后的方程分别为：

$$\sigma_{\Delta rjc} = -4.3825\alpha_s + 157.43 \tag{2}$$

$$\sigma_{zmax} = 1.0823\alpha_s - 13.60 \tag{3}$$

同时从图 1 可知，各种基体的涂层径向残余应力除了以 45 钢为基体的涂层在富金属区（纯金属层和 20% 陶瓷层）存在拉应力外，其余均为压应力。45 钢基体涂层中的残余应力之所以为拉应力，是由于其热膨胀系数比涂层中纯金属层的热膨胀系数略小，涂层应力平衡位置向涂层内部转移的结果。涂层中虽然存在残余拉应力，但其处于涂层富金属区域（最大值为 60.1MPa），这部分的涂层自身强度高^[4]，足以抵抗残余拉应力的作用，不会使涂层破坏。其余不同基体涂层中的应力绝对值随热膨胀系数的增大而增大，但均为压应力，而且各涂层中的最大应力值均在金属较多的区域（ ZrO_2 含量小于 40%），各涂层内部径向应力分布较为理想。

弹性模量、泊松比对残余应力虽然也有一定的影

响,但规律并不是很明显,弹性模量对各项残余应力指标的增减趋势与热膨胀系数相反,但没明显的数学规律,泊松比对残余热应力的影响则更没规律。

由此可见,对于成分和结构相同的涂层而言,其残余应力与基体材质有明显的关系,有限元分析结果表明,涂层各残余应力指标与基体的热膨胀系数基本呈线性关系,铝基体的热膨胀系数较大,因此其残余应力在各种基体的涂层中对性能的影响最大。

2.2 基体直径对界面残余应力的影响

实际工件尺寸变化很大,不同尺寸基体上喷涂梯度涂层的残余应力会有所不同,本文中各种基体均为圆柱状,首先考虑基体的直径对涂层残余应力的影响。以热膨胀系数最大的 LY12 为例,基体直径由 10mm 到 200mm 变化,采用有限元方法计算得到涂层的各残余应力分布情况,分别见图 3、图 4 和图 5。

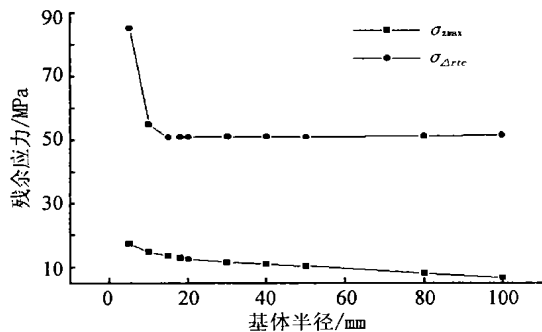


图 5 陶瓷层残余应力与基体直径关系

Fig. 5 The relationship of ceramic layer residual stress and diameter of substrate

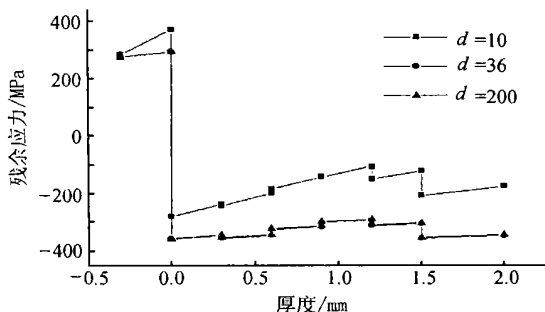


图 3 涂层径向应力分布与基体直径关系

Fig. 3 The relationship of diametral residual stress and diameter of substrate

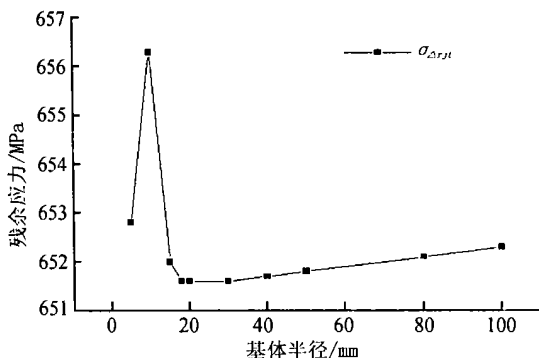


图 4 基体界面应力梯度与基体直径关系

Fig. 4 The relationship of interface stress difference and diameter of substrate

图 3 是涂层径向应力大小和分布随试样直径的变化情况,图 4 给出 $\sigma_{\Delta rj}$ 随试样直径的变化情况,由图可以知道,虽然 $\sigma_{\Delta rj}$ 随基体直径变化略有改变,但是从

最大值时的 656.3 MPa 到最小值时的 651.6 MPa,相差不到 5 MPa,因此,基体直径对其没有大的影响,这是因为 $\sigma_{\Delta rj}$ 主要由基体与涂层之间的热膨胀系数差值决定的,当基体直径改变时,其热膨胀系数不会发生变化,因此,应力值不会有大的变化。

如图 5 所示,基体直径为 10mm 时, $\sigma_{\Delta rj} = \sigma_{\Delta rtc} = 85.2 \text{ MPa}$,当试样直径为 36mm 时,值降低至 51.1 MPa,此后,基本保持不变,不随试样直径的增大而改变。涂层中最大轴向拉应力 $\sigma_{\Delta rj}^{\max}$ 位置不随试样直径变化,均在表面纯陶瓷层靠近边缘处,应力大小随试样直径改变而改变,当直径从 5mm 开始增大时, $\sigma_{\Delta rj}^{\max}$ 较快下降,当直径达 36mm 时,下降速度趋于缓慢,两段分别近似为线性时,得到直径从 5mm 到 36mm 时 $\sigma_{\Delta rj}^{\max}$ 轴向拉应力下降速率为 0.173 MPa/mm,当直径大于 36mm 时,下降速率为 0.039 MPa/mm,二者有较大差别,这一规律与 $\sigma_{\Delta rj}^{\max}$ 的变化规律有相似之处,即直径达到 36mm 时应力值减小速率趋于缓慢,分析认为,这主要是由于涂层在基体直径很小时,径向应力和轴向应力的边界效应较为明显,当直径达到 36mm 时,边界效应影响减小。

由图 3 可以看出,各涂层中径向应力均为压应力,且最大应力值均在 40% 金属层(涂层厚度 1.2mm 处),压应力绝对值随试样直径的增大而增大,同时当直径到达 36mm 后,涂层中径向应力分布与直径为 200mm 的涂层径向应力分布没有很大差别。

2.3 基体厚度对涂层残余应力影响

在讨论涂层残余应力与基体直径的关系后,就试样直径不变(36mm),基体厚度由 1mm 增加到 100mm 时,用有限元法分析涂层残余应力分布情况。图 6 为涂层的径向应力分布与基体厚度的关系曲线,图 7 为 $\sigma_{\Delta rj}$ 随基体厚度变化关系曲线。由图 7 可见, $\sigma_{\Delta rj}$ 的总体趋势在基体厚度较小时随着厚度的增加而增加,但当厚度达到 20mm 时,可以认为 $\sigma_{\Delta rj}$ 基本稳

定, 没有大的变化。而涂层中表面纯陶瓷层和次表层之间的应力梯度绝对值 $\sigma_{\Delta r/c}$ (即为涂层最大的层间应力梯度绝对值 $\sigma_{\Delta r/\max}$) 在基体厚度较小时随着厚度的增加而减小, 同样当厚度为 20mm 时基本稳定, 不再有很大的变化。由图 6 给出涂层径向应力的分布可以看出, 当基体厚度为 1mm、2mm 时, 涂层中富陶瓷区 (ZrO_2 的含量大于 60%) 残余应力为拉应力, 这无疑将对涂层的性能产生不利影响, 导致涂层的径向开裂, 形成龟裂等; 当厚度为 3mm 时, 应力转换为压应力, 并随厚度的增大压应力绝对值增大。

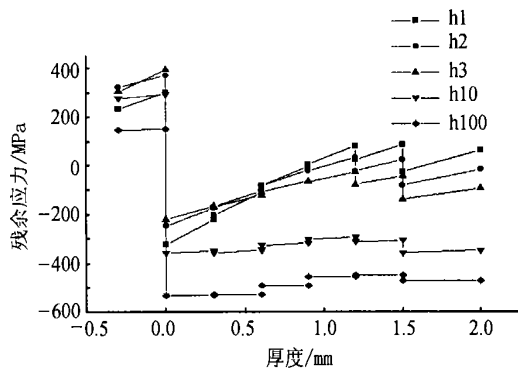


图 6 涂层径向应力分布与试样厚度关系

Fig. 6 The relationship of diametral residual stress and thickness of substrate

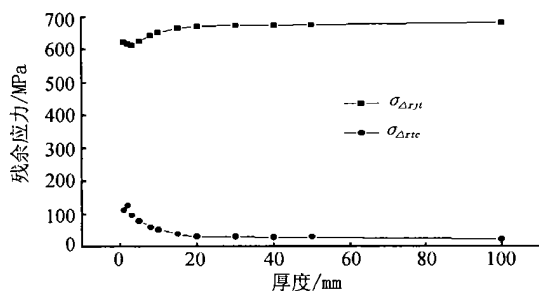


图 7 界面应力梯度随试样厚度变化

Fig. 7 The relationship of interface stress difference and thickness of substrate

与涂层径向残余应力随直径变化不同的是, 当基体厚度很小时, 涂层中各梯度层轴向应力 σ_z 出现了很大正值, 即拉应力状态, 各涂层轴向应力分布如图 8 所示, 当基体厚度为 1mm 时, 涂层中轴向应力均为拉应力, 这主要是基体厚度很小, 对涂层的束缚较弱, 其应力状态接近无基体状态。当基体厚度为 5mm 时, 只有含陶瓷 20% 的梯度层有很小的拉应力, 基体厚度为 10mm 时, 涂层中 $\sigma_{\Delta r/\max}$ 与表面纯陶瓷层轴向拉应力 $\sigma_{z/c}$ 相同, 并且其他梯度层的压应力绝对值缓慢增大, 基本稳定, 如图可见, 基体厚度为 10mm 与 100mm 的涂

层中轴向应力没有太大的差别。图 9 中 $\sigma_{z/c}$ 的数值变化程度与各界面应力梯度相比不是很大, 从基体厚度 1mm 时的 23.5MPa 很快减小到基体厚度为 10mm 时的 13.1MPa, 之后不再变化。

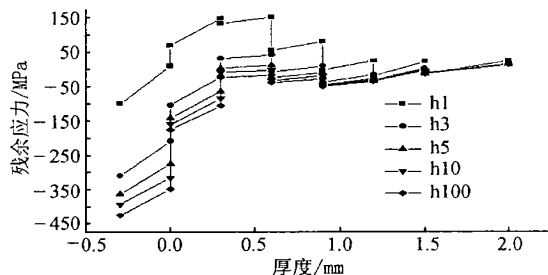


图 8 涂层轴向应力分布与试样厚度关系

Fig. 8 The relationship of axial residual stress and thickness of substrate

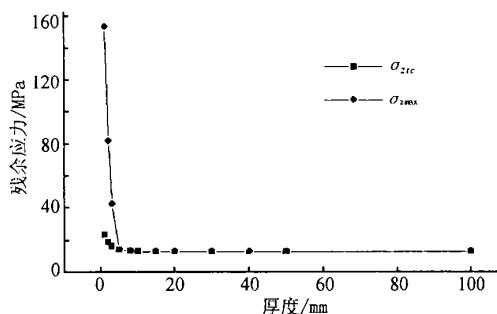


图 9 涂层轴向应力随试样厚度变化

Fig. 9 The relationship of axial residual stress and thickness of substrate

3 结论

(1) 金属基体材质对等离子喷涂梯度涂层的残余应力有显著影响。有限元分析结果表明, 对于结构一定的涂层, 随基体热膨胀系数增大, 基体与涂层界面的残余应力梯度、涂层残余最大轴向拉应力均随热膨胀系数的增大而线性增大, 表面纯陶瓷层与次层界面残余应力梯度则随之线性减小。

(2) 圆柱形 LY12 铝基体直径增大, 基体与涂层界面残余应力梯度基本不变, 而最大轴向残余应力和表面纯陶瓷层与次层界面应力梯度在直径大于 36mm 时基本稳定。

(3) 圆柱形 LY12 铝基体厚度增加对涂层残余应力分布有利, 基体与涂层界面残余应力梯度和表面纯陶瓷层与次层应力梯度均在基体厚度为 20mm 时达到稳定, 而最大轴向残余应力在厚度为 10mm 时达到稳定。

(下转第 37 页)

4 结论

在实际应用中应针对不同的材料试验机在不同的试验环境下的具体情况分析其干扰的来源和通道，并采取相应的抗干扰措施以达到抑制干扰提高微机控制试验机系统性能的目的。通过对微机控制试验机系统干扰源的分析（包括来自电网、信号通道、地线、空间电磁干扰和反电动势产生的干扰），采用软硬件相结合的办法来抑制干扰、其中硬件抗干扰措施包括采用开关电源、加隔离变压器、配置去耦电容、加瞬态抑制管、采用光电隔离措施等，软件措施包括数字

(上接第 18 页)

参考文献

[1] 魏涛, 雷廷权, 周玉等. 陶瓷热障涂层的研究进展 [J]. 宇航材料工艺, 1997, 3: 1.

[2] Takeuchi Y R, Kokini K. Thermal fracture of multilayer ceramic thermal barrier coatings [C]. J Eng for Gas Turbines and Power, ASME, 1994, 116: 266.

[3] 马壮, 吕广庶, 王富耻等. 等离子喷涂沉积率对梯度涂层结合强度影响研究 [J]. 材料工程, 2001, 5: 34.

[4] 王鲁. 功能梯度热障涂层的材料设计基础理论和断裂机制研究 [D]. 北京: 北京理工大学博士学位论文, 1999.

[5] 田蔚, 李秀臣, 刘正堂. 金属物理性能 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1994.

[6] C. 诺德林, J. 奥斯特曼. 简明物理手册 [M]. 韦秀清, 姚为克, 陈菊华译. 北京: 北京科学出版社, 1989.

[7] 唐新峰, 张联盟, 袁润章. 具有热应力缓和功能的梯度材料的特性评价技术 [J]. 材料科学与工程, 1993, 11 (1): 31.

收稿日期: 2001-03-26; 修订日期: 2001-08-27
作者简介: 马壮 (1974-), 男, 博士, 联系地址: 北京理工大学机械工
程与自动化学院 (100081)。

(上接第 34 页)

表 2 AC 系列氧化铝基陶瓷型芯主要性能比较

Table 2 Main property comparison of
AC series ceramic core

室温性能	测试项目	AC-1	AC-2
	烧成抗弯强度 σ^{20} /MPa	9~12	9~11
高温性能	抗弯强度 σ^{20} /MPa	25~29	20~28
	收缩率 δ %	1.5	<1
	挠度 $\Delta H^{1550} \times 0.5$ /mm	0.8~1.6	0.3~0.7
	抗弯强度 σ^{1550} /MPa	5~7	6~8

了。微观方面: AC-2 型型芯收缩率和挠度的减小得益于焙烧过程中新生相的形成。

3 结论

(1) AC-2 型氧化铝型芯性能与 AC-1 相比, 在保

滤波、选择工频周期整数倍的采样时间, 上述大部分软硬件抗干扰措施在实际应用中取得较好效果, 提高了材料试验数据的可靠性和精确度。

参考文献

[1] 陶时澍. 电磁测量线路与仪器的屏蔽防护 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1985: 6.

收稿日期: 2001-04-12; 修订日期: 2001-10-09
作者简介: 刘晓华 (1966-), 女, 工程师, 联系地址: 北京 81 信箱 23 分箱 (100095)。

(上接第 29 页)

参考文献

[1] Hirschman K D, et al. Silicon-based visible light emitting devices integrated into microelectronic circuits [J]. Nature, 1996, 384: 338~341.

[2] Canham L T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers [J]. Appl Phys Lett, 1990, 57 (10): 1046~1048.

[3] Jung K H, Shih S, Kwong D L. Developments in luminescent porous Si [J]. J Electrochem Soc, 1993, 140 (10): 3046~3064.

[4] Sen S, Siejka J, Savtchouk A, Lagowski J. Assessment of conditions influencing porous Si electro-luminescence [J]. J Electrochem Soc, 1997, 144 (6): 2230~2233.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (69971014, 60071006, 69890221)
收稿日期: 2001-07-30; 修订日期: 2002-01-15
作者简介: 张华 (1979-), 男, 硕士, 主要研究方向是半导体材料。联系地址: 山东师范大学半导体研究所 (250014)。

证足够的烧成抗弯强度前提下, 收缩率和挠度有了明显改善。

(2) AC-2 型芯中新生相的出现有利于型芯性能, 特别是烧成收缩率 and 高温抗变形。

参考文献

[1] 曹腊梅. 国外定向单晶空心叶片用型芯工艺特点 [J]. 材料工程, 1995, 5.

[2] 曹腊梅. 单晶叶片用氧化铝基陶瓷型芯 AC-1 [J]. 材料工程, 1997, 9.

收稿日期: 2001-07-05; 修订日期: 2001-12-12
作者简介: 薛明 (1973-), 男, 工程师, 从事专业: 高温合金精密铸造工艺研究, 通信地址: 北京 81 信箱 1 分箱 (100095)。