

# 等离子喷涂沉积率对梯度涂层结合强度影响研究

The Effect of Powder Deposit Efficiency on Combinative Intensity of Gradient Coatings in the Process of Plasma Spray

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

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

(School of Mechanical Engineering and Automation Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**摘要:** 研究了等离子喷涂粉末沉积率对功能梯度涂层的结合强度影响, 结果表明: 在设计比例下, 由于  $ZrO_2$  的沉积率低, 使涂层表面纯陶瓷层与次表层的成分梯度增大, 应力梯度增加, 导致界面结合变弱, 涂层结合强度降低。通过增加次表层  $ZrO_2$  含量, 可较大幅度增加涂层的结合强度。

**关键词:** 等离子喷涂; 沉积率; 功能梯度涂层; 结合强度

中图分类号: TB333 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2001) 05-0034-03

**Abstract:** The effect of powder deposit efficiency of plasma spray on combinative intensity of functionally gradient coatings is studied. The results show that deposit efficiency of  $ZrO_2$  is lower than Al/Ni, so the grads of component and stress between surface layer and the secondary one is more apparent increased, the combine of interface is more weakly and the combinative intensity of coatings is lower. Increase the content of  $ZrO_2$  in secondary layer can get the higher combinative intensity of coatings.

**Key words:** plasma spray; deposite efficiency; functionally gradient coatings; combinative intensity

等离子喷涂是把金属或陶瓷粉末送入高温高压的等离子射流, 将粒子加热至熔融或半熔融状态并以高速率、高动能撞击在工件表面, 通过碰撞变形、凝固结晶而形成涂层的一种表面改性技术。它可以大幅度提高材料的耐磨损、抗腐蚀、抗氧化等性能, 目前已经成为现代航空航天技术和机械制造技术的一种常用工艺手段<sup>[1]</sup>。由于其工艺具有可调范围大、沉积速度快、无需烧结、不受基体截面大小和形状的限制等优点, 因而成为近年发展的热应力缓和型功能梯度材料 (Functionally gradient material, FGM) 的主要制备方法<sup>[2]</sup>。本工作研究了在等离子喷涂制备功能梯度材料过程中, 喷涂粉末的沉积率对涂层性能的影响, 此研究对改善喷涂工艺, 提高涂层性能具有实际意义。

## 1 试验方法

试验采用 LY12 铝合金作为制备等离子喷涂 FGM 涂层的基体, 试样尺寸为  $36\text{mm} \times 10\text{mm}$  的圆柱形, 在试样端面进行等离子喷涂 (如图 1 所示)。涂层厚度为 2mm, 涂层材料选用 Al/Ni 和 8wt%  $Y_2O_3$  部分稳定  $ZrO_2$ , 涂层成分由靠近基体的纯 Al/Ni 逐渐

向涂层表层的纯  $ZrO_2$  过渡, 涂层层数和各层成分如表 1 中 S1 所示。试验采用 GDP-80 型等离子喷涂设备, 送粉方式采用预先混粉, 单枪同时喷涂金属和陶瓷的方法。涂层结合强度的测定按标准 HB5746-91 进行, 拉伸试验采用 WE-30B 型液压式万能试验机, 涂层断裂失效时的载荷与截面积之比为涂层的结合强度。涂层的断口分析采用 HITACHI S-530 扫描电镜。

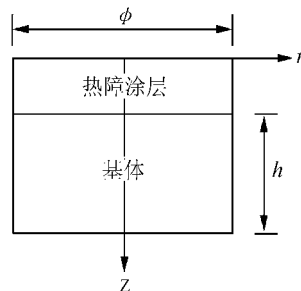


图 1 涂层结构和应力分析模型

Fig. 1 Model of coating structure and stress analysis

## 2 结果分析

涂层拉伸实验结果如表 2 所示, 从表 2 中可以看

出, S1 涂层的拉伸强度很低, 平均只有 6. 22MPa。

表 1 梯度涂层结构和成分

Table 1 Structure of gradient coatings and composition

成分 (vol% ZrO <sub>2</sub> )	Al/ Ni	20%	40%	60%	75%	80%	90%	ZrO <sub>2</sub>	总厚
S1/mm	0.3	0.3	0.3	0.3	—	0.3	—	0.5	2.0
S2/mm	0.3	—	0.3	—	0.3	—	0.5	0.6	2.0

表 2 涂层拉伸试验结果

Table 2 Drawing results of coatings

强度	1	2	3	平均值	断口形貌
S1/MPa	6. 284	6. 138	6. 246	6. 223	断口较平齐, 有层片状翘起
S2/MPa	9. 159	13. 74	11. 16	11. 35	断口呈不规则阶梯状

2. 1 喷涂粉末的沉积率

对 S1 涂层进行成分分析时发现, 各梯度涂层的实际 ZrO<sub>2</sub> 含量与设计比例不同, 普遍存在 ZrO<sub>2</sub> 含量偏低的现象, 具体测量结果如图 2 所示, 由图可知, 各梯度涂层中实际 ZrO<sub>2</sub> 含量分别比设计值低 12% ~ 18%, 这主要是由喷涂工艺决定的。

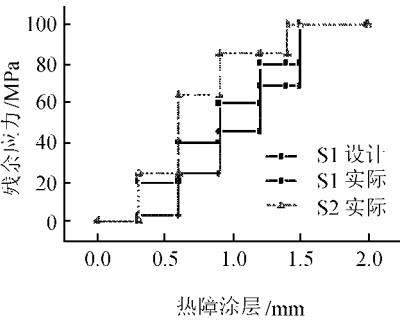


图 2 涂层成分分布

Fig. 2 Distribution of coatings content

本工作在喷涂梯度涂层的过渡层时, 喷涂粉末的送粉方式是采用预先混粉, 单枪同时喷涂金属 (Al/Ni) 和陶瓷 (ZrO<sub>2</sub>) 的方法进行, 在一定工艺条件下, 按设计比例混合的 Al/Ni 和 ZrO<sub>2</sub> 同时由送粉器送入等离子射流, 经加热至熔融或半熔融状态, 沉积在基体上形成涂层。粉末在等离子射流中加热时, 由于 Al/Ni 比重大于 ZrO<sub>2</sub>, 其飞行速度和获得的动能都要比 ZrO<sub>2</sub> 大, 在一定功率下, ZrO<sub>2</sub> 的熔点远高于 Al/Ni, 熔融程度不如 Al/Ni, 易产生溅射, 因此, 二者沉积的比例有所不同, 此外, 金属粉的沉积率可达到 80%, 而 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷的沉积率仅有 30% ~ 40%, 以上各因素导致梯度涂层中金属、陶瓷的比例严重失调。这一现象对涂层残余应力分布和结合状况有显著影响。

2. 2 涂层残余应力分析

梯度涂层中的残余应力分布对涂层的结合强度有决定性的影响, 因此, 分析涂层中的残余应力具有重要意义。在此采用热弹性有限元方法进行了涂层残余应力分析。涂层残余应力计算模型如图 1 所示, 通过实验分别测量了部分不同配比的金属-陶瓷单一涂层的物理性能参数<sup>[3]</sup>, 并用插值方法求得了各种配比涂层的物理性能参数。LY12 铝基体的物理性能参数取自文献 [4], 由于问题的对称性, 只对截面的 1/2 ( $r=0, z=0$ ) 进行了单元格划分, 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 °C。计算所得设计配比与实测配比两种条件下涂层的应力分布如图 3 所示。

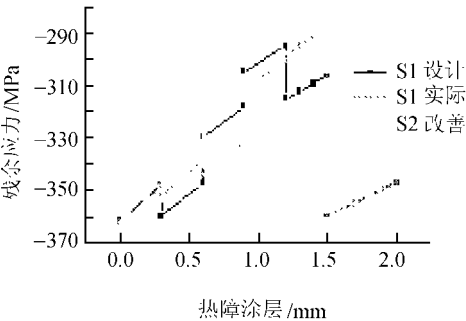


图 3 涂层残余应力分布

Fig. 3 Distribution of coatings remained stress

由图 3 可知, 纯陶瓷层设计应力值与实际涂层的应力值没有差异, 均为 -347.0MPa; 次表层 (即设计 ZrO<sub>2</sub> 含量为 80% 层) 实际应力最大值 (-288.5MPa) 要大于设计应力最大值 (-306.5MPa), 而在次表层界面处的实际应力梯度绝对值 (71.0MPa) 更大于设计涂层的界面应力梯度绝对值 (52.7MPa)。而对于脆性材料而言, 其破坏状况很大程度上受应力梯度大小所支配, 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, 材料所能承受的载荷也会越大<sup>[5]</sup>。本文中等离子喷涂的 Al/Ni-ZrO<sub>2</sub> 系梯度涂层, 其应力梯度最大值是在纯陶瓷层与次表层之间的界面处, 在拉伸条件下, 此处最容易断裂失效, 而实际涂层中应力梯度的增加必然导致涂层失效几率的增大, 致使涂层结合强度降低。导致这种应力差异的主要原因就是 ZrO<sub>2</sub> 沉积率低, 实际涂层中次表层 ZrO<sub>2</sub> 的含量比设计值要小近 12%, 与表层的成分差异比设计的要大, 由于成分的差异使二者之间的物理性能 (主要是热膨胀系数) 产生更大差异, 残余热应力不能较好地缓和, 界面应力梯度增大, 涂层结合强度很低。在图 3 中, 富金属区存在实际应力值和应力梯度大于设计应力的

现象,但是由于此处金属含量高,涂层间的粒子结合紧密,结合强度远大于富陶瓷区,断裂不会发生在此区域,所以对整体涂层的结合强度影响不大。

### 2.3 涂层结构分析

由图4的涂层断口形貌可知,断裂主要发生在涂层中各粒子间的界面处。有研究表明<sup>[6]</sup>,等离子喷涂 $\text{ZrO}_2\text{-Ni}$ 基复合涂层中,金属和陶瓷以机械结合为主,二者晶格参数和各种物理化学性能有极大差异,润湿性很差,冶金结合极微弱,因此异相界面结合力很小,这在本身内聚强度低的富陶瓷区表现尤为明显,特别是纯陶瓷层与次表层之间,由于 $\text{ZrO}_2$ 沉积率低,次表层的实际陶瓷含量只有68%,与表层差距加大,金属和陶瓷的异相界面增多,涂层结合力降低。



图4 涂层断口形貌 (SEM)

Fig.4 SEM micrograph of fracture

### 2.4 改善涂层强度方法

上述分析表明,涂层破坏主要发生在表面纯陶瓷层与次表层之间,提高涂层的结合强度,应增加涂层次表层的 $\text{ZrO}_2$ 含量,同时因富金属区应力情况对涂层的结合强度影响不大,可适当减少富金属区的过渡层,因此,设计层数和结构如表1中S2的涂层。

拉伸实验结果表明,S2涂层的拉伸强度达到11.35MPa,比S1有较大幅度的提高。粉末实际沉积情况如图2所示,应力分析结果如图3所示。结果表明,S2涂层的次表层 $\text{ZrO}_2$ 含量约为85%,比S1涂层次表层 $\text{ZrO}_2$ 含量高出17%,这对涂层的应力分布有很大的改善,由图3可见,S2表面纯陶瓷层应力(-344.2MPa)稍有增加,而次表层应力最大值降低至-323.3MPa,纯陶瓷层与次表层应力梯度绝对值也大幅度降低至35.9MPa。比S1实际应力梯度绝对值降低了32%,这无疑对增加涂层的结合强度有益。同时表层与次表层之间 $\text{ZrO}_2$ 含量差异减小,二者异相界面减少,结合强度增加。因此,增加涂层次表层 $\text{ZrO}_2$ 含量是增加涂层结合强度的有效手段,减少富金属区梯度层数对涂层结合强度没有太大的影响。

## 3 结论

(1) 由于等离子喷涂工艺限制,功能梯度涂层中各过渡层中实际 $\text{ZrO}_2$ 含量普遍低于设计值12%~18%。

(2) 涂层次表层 $\text{ZrO}_2$ 含量降低,使界面应力梯度绝对值增加,涂层结合强度降低。

(3) 涂层次表层 $\text{ZrO}_2$ 含量降低,与表面纯陶瓷层异相界面增加,涂层结合力减弱。

(4) 增加涂层次表层 $\text{ZrO}_2$ 含量,可使涂层结合强度增加将近一倍,合理减少涂层梯度层数对涂层结合强度没有影响。

### 参考文献

- [1] (苏).BB库吉诺夫.等离子涂层[M].北京:科学技术出版社,1981.
- [2] 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.
- [3] 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.北京理工大学博士论文,1998.
- [4] 徐京娟等.金属物理性能分析[M].上海:上海科学技术出版社,1988.
- [5] 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,1993,11:31.
- [6] 刘正义,向兴华.等离子喷涂陶瓷-金属界面结构.98材料表面与界面会议论文集,黄山:1998,1:12-19.

收稿日期:2000-10-16; 修订日期:2001-02-16

作者简介:马壮(1974-),男,北京理工大学机械工程与自动化学院在读博士,主要研究等离子喷涂功能梯度材料,联系地址:北京理工大学机械工程与自动化学院(100081)。

本文编辑:孙常青

\* \* \* \* \*

(上接第11页)

- Nonferrous Metals Society of China (English Edition), 1999, 10 (2) 200-203.
- [8] K T Park, E J Lavernia and F A Mohamed. High temperature deformation of 6061Al[J]. Acta metall. Mater, 1994, 42(3) 667-678.
- [9] C H Jiang, D Z Wang and C K Yao. The relaxation behavior of thermal stress in a  $\text{SiC}_w/\text{Al}$  composite. Journal of Materials Science Letters [J]. 2000, 19: 1285-1286.
- [10] T L Dragone and W D Nix. Steady state and transient creep properties of an aluminum alloy reinforced with alumina fibers [J]. Acta metall. Mater, 1992, 40 (10) 2781-2791.

收稿日期:2000-11-28; 修订日期:2001-03-09

作者简介:姜传海(1963-),男,博士后,从事复合材料及X射线分析工作。联系地址:上海交通大学材料学院X光分析室(200030)

本文编辑:李海霞