

激光熔覆对改善等离子涂层界面结合性能的研究 *

马 岳 段祝平 吴承康

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 研究激光熔覆对改善等离子涂层界面的作用。基体待喷表面采用激光熔覆工艺预处理, 在涂层—基体的界面处形成成分、显微硬度呈梯度分布的熔覆层。三点弯曲试验结果表明: 界面梯度层明显改善喷涂材料的界面结合状况, 使界面承受外载荷的能力提高。并用相关的有限元程序分析了试样承载时界面处剪切应力的分布。

关键词 激光熔覆, 等离子涂层, 界面

中图法分类号 TG174.442, O343.4

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(1999)09-0985-04

IMPROVEMENT OF COHESION PROPERTIES OF INTERFACE IN PLASMA SPRAYING COATING BY LASER CLADDING

MA Yue, DUAN Zhuping, WU Chengkang

Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Correspondent: MA Yue, lecturer, Tel: (010)62545533-2201, Fax: (010)62561284,

E-mail: mayue62@hotmail.com

Manuscript received 1999-02-08, in revised form 1999-06-04

ABSTRACT The present study is focused on the improvement of cohesion properties of interface between plasma-sprayed coatings and substrate by a laser cladding technique(LCT). Within the laser-clad layer, there exists a gradient distribution in chemical composition and mechanical performance, which has been confirmed by SEM observation and micro-hardness measurement. The residual stress due to mismatches in thermal and mechanical properties between coatings and substrate can be markedly reduced and smoothed out. To examine the microstructure changes and crack propagation in the coating and interface during loading, an experimental test has also been conducted on three-point bending samples in an SEM with a loading equipment installed. The experimental results have shown clearly that the interface cohesion can be improved with LCT pretreatment, and the capability of the interface to withstand the shear stress as well as to resist micro-cracking has been enhanced, and analysis on distribution of shear stress at interface under loading has been conducted using ANSYS FEM code.

KEY WORDS laser cladding, plasma spraying coating, interface

在基体材料表面采用等离子喷涂工艺制备涂层, 能够大幅度地提高材料的耐磨、抗蚀、抗氧化和热冲击性能, 广泛用于航空、航天和民用结构部件, 因而在工业生产中具有广阔的应用前景 [1-4]。

等离子喷涂材料存在的主要问题是: 涂层的内在质量和表面质量较差, 以及与界面结合强度偏低 [5-7]。就目前的研究来看: 通过调整喷涂工艺参数、改进涂层热处理工艺可

以较好地解决涂层质量差的问题 [8-10], 对界面结合强度低的问题研究较少, 未从根本上予以解决。由于, 喷涂材料涂层—基体形成的界面存在热失配和力学失配而造成残余应力集中和缺陷的聚集, 使得材料的破坏通常发生在此处 [11]。因此, 喷涂材料的界面是决定整体强度的关键因素之一, 是一个重要而亟待解决的课题。

本文以氧化锆热障涂层为研究对象, 对基体表面进行激光熔覆预处理, 在涂层—基体的界面处形成过渡层, 其厚度约为 10—20 μm, 使由涂层到基体的物理、化学性能和其组织结构呈连续的梯度变化, 形成所谓“梯度界面层”。试验表明, 这种激光熔覆预处理技术能较好地从根本上解决金属—陶瓷复合体中存在的界面问题, 改善了界面结合状况和抵抗裂纹扩展能力, 从而可以提高喷涂材料的整体强度。

* 国家自然科学基金委资助的重大资助项目 19891180、中国科学院重点资助项目 K-951-1-201 和中国博士后基金资助项目

收到初稿日期: 1999-02-08, 收到修改稿日期: 1999-06-04

作者简介: 马 岳, 女, 1962 年生, 讲师, 博士后

1 实验方法

本试验所用基体材料为 DZ22 镍基高温合金，其成分(质量分数，%)为：C 0.12—0.16, Cr 8.0—10.05, Co 9.0—11.0, W 11.5—12.5, Al 4.75—5.25, Ti 1.75—2.25, Fe<0.35, Nb 0.75—1.25, Hf 1.0—2.0, B 0.01—0.02, Zr<0.01, Mn<0.20, Si<0.2。涂层材料为氧化锆+氧化钇粉(6—8)，熔覆层材料选为镍粉+铝粉+[氧化锆+氧化钇]粉(6—8)。首先，在基体材料的待喷表面均匀涂刷一层用环氧树脂做粘结剂的熔覆层材料，然后，采用功率为2kW的HJ-4CO₂连续激光器扫描熔覆处理，在基底表面形成激光熔覆层。

为探讨激光熔覆层对等离子喷涂材料结合状况的改善作用，选取了经激光熔覆处理和未经处理的两种基体材料，每一种基体材料又取75 mm×15 mm×1 mm两块，进行等离子喷涂，获得两组四块涂层试样，采用等离子喷枪的功率为35 kW，80 mm的喷涂距离，送粉速率50 g/min，喷嘴直径6.3 mm，在氩气+氢气+氮气的气氛中，在基体待喷表面形成0.3 mm厚的氧化锆热障涂层。

试样涂层的组织结构和熔覆层的成分分布采用STEREOSCAN 360扫描电子显微镜及EDAX能谱分析仪分析。三点弯曲试样如图1，尺寸为21 mm×4 mm×1 mm，取样在每一块涂层试样的中部(消除边缘效应)，并使弯曲试样的长度方向与激光扫描方向平行，取两个三点弯曲试样。每一组两块涂层试样上共选取4个三点弯曲试样。用配有加载台的扫描电镜S-570进行三点弯曲试验，观察和记录加载过程中涂层与界面的组织结构变化状况，每一组选三个相近的结果，取其中一个具有代表性的结果进行分析。用配有POLYVAR MER显微硬度仪测量其硬度值，并用ANSYS程序分析两组不同试样在承载时的应力分布。

2 实验结果

对无熔覆层、有熔覆层的两组试样表面等离子喷涂后进行三点弯曲试验，不同载荷下的涂层与界面的状况示于图2。

由图2看出：无熔覆层试样(图2a, b)在初始状态(载荷为零，图2a)时，界面无裂纹。承载50 N时，试样呈弓形，在承载点附近沿界面微裂纹贯通产生一个大裂纹。涂层与基体分离，同时在试样承载点处的涂层断裂，界面和涂层

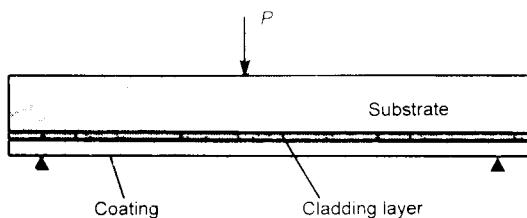


图1 三点弯曲试样图

Fig.1 The three-point bending sample

都产生破坏。图2c, d, e为有熔覆层试样，承载到50 N时，承载点附近的界面上产生的微裂纹仅有少量的连通；当载荷加到63.2 N时，承载点附近界面上的微裂纹才开始大部分贯通，形成裂纹，但涂层与基体没有完全分离，还有少量牵连。同时，在试样承载点附近，靠近界面的基体中产生垂直于界面的裂纹，界面和基体同时破坏。

3 结果分析及讨论

3.1 熔覆层分析

图3为熔覆层中的成分及显微硬度的分布。由图3看出：在熔覆层中，从表面到基体沿厚度方向Zr含量逐渐减少，相应的显微硬度也逐渐降低，表明了采用激光熔覆对基体表面预处理能够形成一个梯度过渡层。

3.2 喷涂试样承载中应力分布分析

将三点弯曲试样承载简化为平面应变问题，采用具有复合层的弹性力学模型。

平衡方程

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau}{\partial x_2} = 0 \quad \frac{\partial \tau}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_2}{\partial x_2} = 0 \quad (1)$$

其中： σ_1, σ_2 分别为沿 x_1, x_2 方向的正应力； τ 为剪切应力； x_1, x_2 分别为三点弯曲试样的长度方向和高度方向坐标。

本构方程

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1-v^2}{E} [\sigma_1 - \frac{v}{1-v} \sigma_2], \\ \varepsilon_2 &= \frac{1-v^2}{E} [\sigma_2 - \frac{v}{1-v} \sigma_1], \quad \varepsilon_{12} = \frac{1}{2G} \tau \end{aligned} \quad (2)$$

其中： $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 分别为沿 x_1, x_2 方向的正应变， ε_{12} 为剪切应变， E, G, v 为材料的弹性常数。

几何关系

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \quad \varepsilon_2 = \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \quad \varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) \quad (3)$$

其中 u_1, u_2 分别表示沿 x_1, x_2 方向的位移

材料参数：DZ22: $E=198$ GPa, $v=0.336$, $G=74.1$ GPa；氧化锆： $E=51$ GPa, $v=0.333$, $G=19.1$ GPa。这里，在熔覆层中，假定弹性模量沿厚度方向呈线性分布，用相关的有限元程序计算试样承载破坏时，界面剪切应力 τ 沿试样长度方向的分布见图4。

有熔覆层和无熔覆层两种试样沿界面的剪切应力均以试样长度的平分线为对称轴均匀地分布。在试样的中部(承载处)应力梯度大，容易产生较大的应力集中。因此，两种试样在承载时，都是在此处的界面上先萌生裂纹，涂层也在此处破坏。

两种试样界面处承受最大剪切应力的能力却不同。根据试验的样品尺寸和极限载荷可以计算得出：无熔覆层的界面

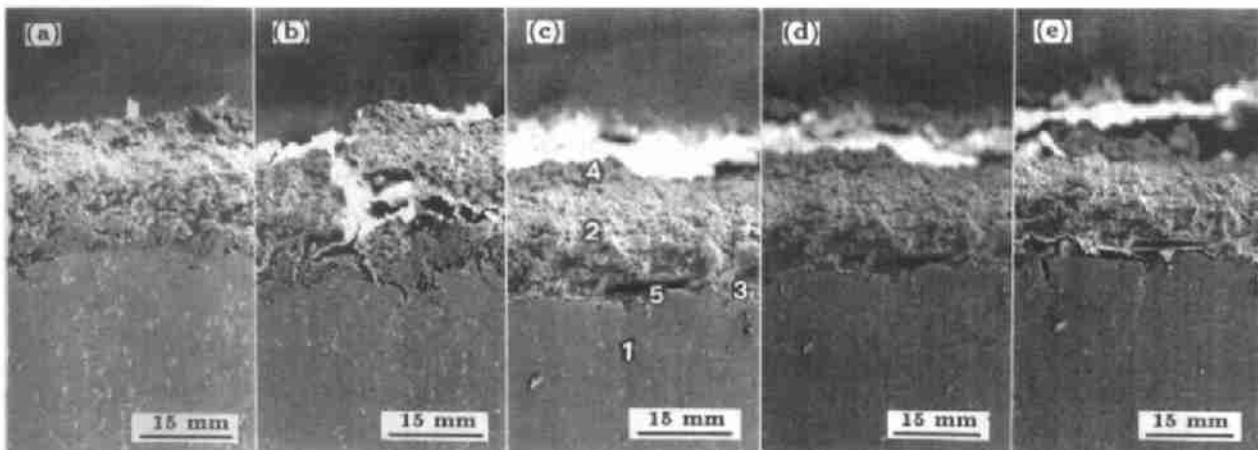


图 2 涂层—基体界面的结合状况

Fig.2 The coherence of interface between coating and substrate

(a), (b) without laser cladding layer (c), (d), (e) with laser cladding layer

(a), (c) with zero load (c), (d) with about 50 N load (e) with about 63.2 N load

1—substrate 2—coating 3—interface 4—surface 5—laser cladding layer

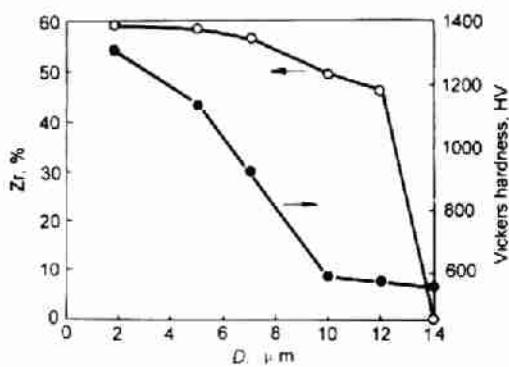


图 3 激光熔覆层的元素分布及硬度分布

Fig.3 The element distribution and hardness distribution within large cladding layer
D: the distance from the surface of large cladding layer

D: the distance from the surface of large cladding layer

能够承受的最大剪切应力为 2.77 MPa，而有激光熔覆层的界面能够承受的最大剪切应力为 5.61 MPa。

3.3 激光熔覆层在改善涂层界面结合性能中的作用

采用激光熔覆对基体表面预处理形成的熔覆层中 Zr 呈连续的梯度变化，显微硬度也呈连续的梯度变化。涂层—基体界面梯度层消除了氧化锆涂层—高温合金基体间的明显界面，使物化性能和组织结构也呈连续的过渡，降低了涂层制备过程中界面的热失配和力学失配，减缓界面处残余应力的集中。对基体表面进行激光熔覆预处理形成的激光熔覆层与基体成冶金结合。同时，对待喷表面也有激光粗化的作

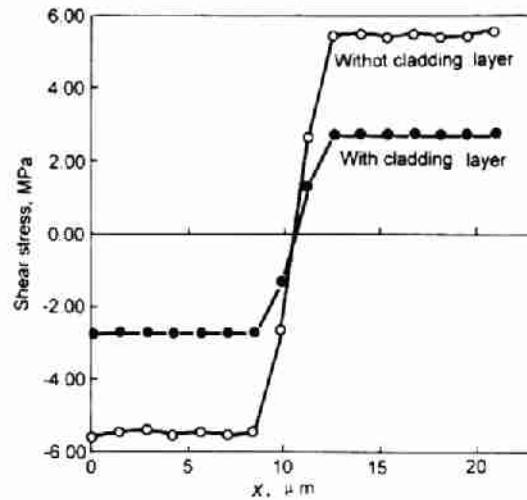


图 4 试样中涂层—基体界面承受剪切应力的能力

Fig.4 The capability of withstand stress in the substrate-coating interface
X: the position in the length direction of sample

用，增加了与涂层的结合面积，改善涂层—基体的界面结合状况，提高了界面处的承载能力。而等离子喷涂后进行激光重熔处理，仅适用于较薄的涂层。厚涂层时，激光热量难以传到基体表面，起不到重熔改善界面结合的作用。当界面处形成 10—20 μm 的梯度层时，界面承受的最大剪切应力增加一倍多，涂层的强度也有所提高。因此，有熔覆层试样的界面裂纹扩展很慢，涂层也没有断开。当外载荷为 62.3 N 时，界面裂纹才贯通，而没有熔覆层的试样界面裂纹扩展很快，外载荷为 50 N 时，界面裂纹贯通，且涂层在应力梯度较大处发生断裂。

4 结论

(1) 采用激光熔覆对基体表面预处理, 能够形成梯度过渡层。过渡层中 Zr 含量呈连续的梯度变化, 显微硬度也呈连续的梯度变化。

(2) 梯度过渡层能够改善涂层- 基体界面的结合状况, 提高界面承受外载荷的能力, 因此激光熔覆技术在改善等离子涂层界面结合性能方面能起到重要作用。

本文得到王文标教授、黄晨光博士和张榕京硕士的帮助, 计算和 SEM 试验工作中分别得到了陈永智硕士和李端义高级工程师的帮助, 在此表示谢意。

参考文献

- [1] Gu Y W, Khor K A, Fu Y Q, Wang Y. *Surf Coat Technol*,

- 1997; 96: 305
[2] Xiang X H, Zhu J C, Yin Z G, Lai J G. *Surf Coat Technol*, 1996; 88: 66
[3] Pei Y T, Ouyang J H, Lei T C. *Surf Coat Technol*, 1996; 81: 131
[4] Liu Z L, Ding Z X, Huang W L. *Surf Technol*, 1997; 26: 4
(刘正林, 丁彭雄, 黄文玲. 表面技术. 1997; 26: 4)
[5] Kobayashi A. *Surf Coat Technol*, 1997; 90: 197
[6] Hu W, Guan H, Sun X, Li S. *Surf Coat Technol*, 1998; 105: 102
[7] Zeng X T, Zhang S, Hsieh J. *Surf Coat Technol*, 1998; 102: 108
[8] Bull S J, Jones A M. *Surf Coat Technol*, 1996; 78: 173
[9] Liang G Y, Wong T T. *Surf Coat Technol*, 1997; 89: 121
[10] Hsu I C, S K Wu. *Surf Coat Technol*, 1997; 90: 6
[11] Movchan B A, Marinski G S. *Surf Coat Technol*, 1998; 100: 309