

# 压片预置式激光多层熔覆厚纳米陶瓷涂层结合性能

王东生<sup>1,2</sup> 田宗军<sup>1</sup> 段宗银<sup>2</sup> 王泾文<sup>2</sup> 沈理达<sup>1</sup> 黄因慧<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016; <sup>2</sup>铜陵学院机械工程系, 安徽 铜陵 244000)

**摘要** 采用压片预置式激光多层熔覆制备了厚纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13%TiO<sub>2</sub> (质量分数)涂层,研究了涂层的微观组织和结合性能,并分析了涂层厚度对结合强度的影响。结果表明,陶瓷涂层各层之间无明显界面,过渡缓和自然,涂层内部致密、连续,基本无孔隙及贯穿性大裂纹等缺陷;涂层由等轴晶的完全熔化区和残留纳米颗粒的部分熔化区组成,并且涂层中的裂纹基本集中于部分熔化区,另外晶粒尺寸表现为上小下大的梯度过渡特征。随着涂层厚度的增加,结合强度逐渐下降,其减小的趋势为先快后慢。厚度为 175 μm 的试样结合强度高于 78.6 MPa,而厚度为 350、525、700 μm 的涂层结合强度分别为 66.3、47.4、36.2 MPa。

**关键词** 激光技术;激光熔覆;多层熔覆;压片预置;厚纳米陶瓷涂层;结合强度

中图分类号 TG156.99 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0203003

## Bonding Strength of Thick Nanostructured Ceramic Coating by Squash Presetting Type Laser Multi-Layer Cladding

Wang Dongsheng<sup>1,2</sup> Tian Zongjun<sup>1</sup> Duan Zongyin<sup>2</sup> Wang Jingwen<sup>2</sup>  
Shen Lida<sup>1</sup> Huang Yinhui<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China  
<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Tongling University, Tongling, Anhui 244000, China

**Abstract** The thick nanostructured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13%TiO<sub>2</sub> (mass fraction) ceramic coating is prepared by squash presetting type laser multi-layer cladding. The microstructure and bonding strength of coating are investigated, and the effect of coating thickness on bonding strength is analyzed. The results show that the laser-clad ceramic coating has no obvious interface between the layers but dense, continuous structure, and there is almost no pore and large penetrating crack. The coating is composed of fully melted regions (fine equiaxed grains) and partially melted regions (remained nanoparticles). In addition, most cracks in the coating are concentrated on the partially melted region. Due to multiple heating by laser beam, the grain size of lower layer is bigger than that of upper layer. The bonding strength of coating decreases with the increase of coating thickness, and the trend is fast at first and then slow. The bonding strength of coating with a thickness of 175 μm is beyond 78.6 MPa, while those of 350, 525, 700 μm thickness coatings are 66.3, 47.4, 36.2 MPa, respectively.

**Key words** laser technique; laser cladding; multi-layer cladding; squash presetting; thick nanostructured ceramic coating; bonding strength

**OCIS codes** 140.3390; 310.1515; 350.3390; 350.3580

## 1 引 言

现代航空航天发动机的工作温度越来越高,在

不断发展耐热合金材料和冷却技术的同时,大力发展高温防护涂层是更有效的措施。热障涂层是第四

收稿日期: 2011-10-17; 收到修改稿日期: 2011-11-07

**基金项目:** 国家自然科学基金(21171131, 51105204)、安徽省自然科学基金(12040606Q)、江苏省博士后科研资助计划(1102052C)、江苏省自然科学基金(BK2004005, BK2009375)、安徽省高等学校省级自然科学基金项目(KJ2011B185)和安徽省高等学校省级优秀青年人才基金项目(2012SQRL)资助课题。

**作者简介:** 王东生(1978—),男,副教授,主要从事激光加工技术、等离子喷涂技术、纳米材料加工技术、表面涂层技术以及加工过程的数值模拟等方面的研究。E-mail: wangdongsheng@tlu.edu.cn; wangds@nuaa.edu.cn

代耐热涂层,由于具有优越的耐高温、耐热腐蚀和低导热等性能,陶瓷材料成为最主要的热障涂层隔热层材料<sup>[1]</sup>。而热障涂层的隔热性能与隔热层厚度密切相关,因此制备大厚度热障涂层成为现阶段研究的一个热点。

热喷涂是最常用的厚热障涂层制备技术之一,如 Jadhav 等<sup>[2]</sup>采用水溶液等离子喷涂技术制备了高性能的厚热障涂层;励德亮等<sup>[3]</sup>采用大气等离子喷涂技术,在 TC4 基体上制备出一种类似“钢筋混凝土”结构的碳纤维增强氧化锆热障烧蚀复合厚涂层。但热喷涂的工艺特点决定了涂层具有典型的层状结构,涂层中存在较高的非平衡相和孔隙率,并且界面结合的主要形式是机械结合,这些因素限制了热喷涂制备的厚热障涂层的应用范围及使用寿命。

激光熔覆以其高能量密度产生的加热快速性、功率输出精确可控性以及熔覆表面区域的可选择性等优点而广泛应用于表面涂层制备<sup>[4,5]</sup>。目前有很多研究者致力于通过激光多层熔覆制备大厚度涂层<sup>[6~9]</sup>,但所制备厚涂层多见于合金<sup>[10,11]</sup>、非晶<sup>[12,13]</sup>、金属陶瓷<sup>[14]</sup>及生物涂层<sup>[15]</sup>等,关于陶瓷涂层的报道还很少。原因在于陶瓷材料本身脆性较大、耐疲劳性能差、对应力和裂纹敏感,并且陶瓷涂层与金属基体的热膨胀系数差异以及激光熔覆急热急冷的加工特点,再加上激光多层熔覆时的应力叠加问题,使激光熔覆陶瓷层易产生裂纹和剥落<sup>[16,17]</sup>,影响了其性

能。因此,激光多层熔覆高性能厚陶瓷涂层是目前研究的一个难题。要实现多层熔覆高性能厚陶瓷涂层的制备,关键是要解决熔覆层的开裂问题,提高涂层结合力。

本文通过在熔覆过程中引入超声振动、采用保温箱预热和缓冷等系列熔覆层裂纹控制措施,以压片预置纳米团聚体  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13%  $\text{TiO}_2$  (n-AT13) (质量分数)粉末作为熔覆对象,基于激光多层熔覆方法,制备了纳米厚陶瓷涂层,研究了涂层的微观组织和结合性能,并分析了涂层厚度(熔覆层数)对其结合强度的影响,为激光多层熔覆高性能厚热障涂层提供一定的工艺参考。

## 2 试 验

### 2.1 试验材料

试验用基体材料为钢铁研究总院高温材料研究所熔炼的  $\gamma$ -TiAl 基合金(TAC-2),尺寸为  $\phi 25 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 。为了减小陶瓷材料与基体金属之间较大的物理性能差异,以北京矿冶研究总院金属材料所生产的名义成分为 Ni-20Co-18Cr-15Al-2Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (质量分数)的 KF-113A 粉末作为过渡层材料。纳米陶瓷粉末为美国 Inframat 公司采用喷雾干燥法制备的牌号为 Nanox S2613P 的纳米团聚体粉末,其名义成分为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13%  $\text{TiO}_2$ ,团聚体尺寸分布范围为 10~50  $\mu\text{m}$ ,相应粉末形貌如图 1 所示。

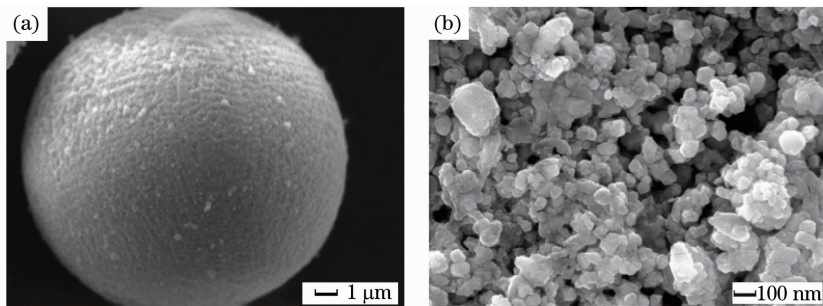


图 1 纳米团聚体粉末形貌。(a)整体;(b)内部

Fig. 1 Morphologies of nanostructured agglomerated powder. (a) Overall morphology; (b) internal morphology

### 2.2 涂层制备工艺和设备

压片预置式激光多层熔覆制备陶瓷涂层的步骤如下:首先,在上海大隆 WCB-b 型压力机上采用模压法把 KF-113A 及 n-AT13 粉末压制成  $\phi 25 \text{ mm}$ ,厚度约为 0.15 mm 的熔覆薄片;然后,在经过表面毛化及清洗等预处理的基体表面进行过渡层激光熔覆;最后,采用多层熔覆的方法制备厚陶瓷涂层。在试验中分别重复熔覆 n-AT13 模压薄片 2、4、6、8 次,制得了厚度约为 175、350、525、700  $\mu\text{m}$  的表面

陶瓷涂层。由于激光熔覆涂层表面粗糙度相对较大,如果不加以控制,在多层熔覆的叠加效应作用下会使表面粗糙度更大,甚至会影响到后续熔覆薄片的可熔覆性,因此在熔覆时对非最终熔覆表面进行机械磨削平整化处理、清洗干净并干燥后才能再熔覆下一熔覆层。

陶瓷材料多层熔覆是激光熔覆工艺的一个难题,一方面由于激光多层熔覆时的再次加热会对前一熔覆层产生很高的热应力,进而产生裂纹;另一方

面在激光熔覆陶瓷涂层过程中,由于加热和冷却速度很高,陶瓷材料的耐热冲击性差,陶瓷涂层与金属基体的热膨胀系数相差较大,涂层中大量气体外逸导致体积收缩等原因,使得激光熔覆陶瓷涂层易产生裂纹和剥落等问题。试验中所采用的熔覆装置如图2所示。主要从3个角度达到熔覆层的裂纹控制:1)从熔覆材料的角度出发,采用纳米团聚体粉末作为熔覆对象,利用涂层中纳米材料的强韧化作用可有效解决熔覆层易开裂的问题;2)从熔覆组织考虑,在激光熔覆过程中引入超声振动,改善熔池的流动性,加快气泡逸出,使得组织分布更加均匀;3)采用保温箱对熔覆试样进行预热和缓冷处理来降低激光熔覆过程中熔覆区与非熔覆区的温度梯度,减小熔覆层的开裂趋势。另外本试验中采用红外线测温仪对熔池温度进行实时监测。红外线测温仪固定在激光器上,其探测头对准试样的激光熔覆区域,测温信号经过数据采集卡处理后,传给工控计算机,通过控制激光器的输出功率和/或扫描速度实现对熔池温度的闭环控制,从而获得均匀的熔覆层。

激光熔覆采用 SLCF-X12×25 型 CO<sub>2</sub> 激光加工机,熔覆时氩气保护。过渡层熔覆工艺参数:激光初始功率为 950 W,矩形光斑尺寸为 5 mm×3 mm,激光扫描方向沿光斑 3 mm 侧,扫描速度为 600 mm/min,搭接量为 20%,预热温度为 400 °C,超声振动的频率为 50 kHz,在熔覆过程中调节激光输出功率控制熔池最高温度稳定在 1950 °C。陶瓷层熔覆参数:激光初始功率为 650 W,扫描速度为 700 mm/min,熔池闭环控制温度为 2500 °C,其余参数与过渡层相同。

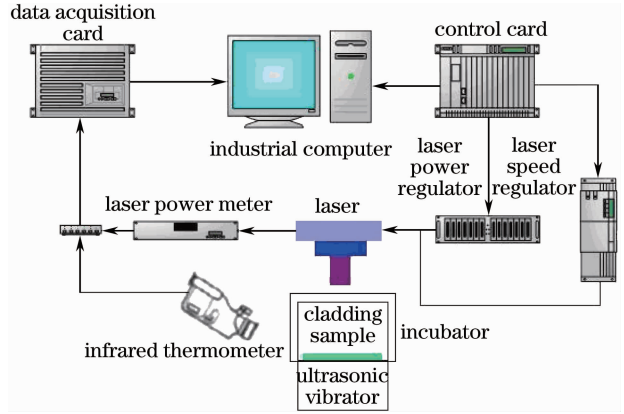


图2 激光熔覆装置示意图

Fig. 2 Schematic of laser cladding setup

### 2.3 分析及测试手段

利用 JSM-7100F 型(JEOL)场发射扫描电子显微镜(SEM)观察粉末及涂层的形貌。

涂层结合强度是涂层最为重要的力学参数之一,本试验涂层结合强度测试采用国家标准 GB/T 8642-2002《热喷涂-抗拉结合强度的测定》的 B 方法,每类试样测试三次取平均值。

图3(a)是拉伸试样制作示意图,将试样置于两对偶件之间,分别使用 E7 强力胶(上海合成树脂研究所出品,抗拉强度大于 70 MPa)粘结,并置于干燥箱中固化。图3(b)为固定对偶件的夹具,通过该装置可以保证粘结时对偶件与试样同轴。图3(c)为拉伸设备:WE-100 型液压式万能试验机。对偶件试样在试验机上拉伸,整个加载过程缓慢而连续(加载速度控制在 10 kN/min),直至对偶件被拉开,记录分离载荷。根据试样表面积和测得的载荷换算出涂层的平均结合强度。

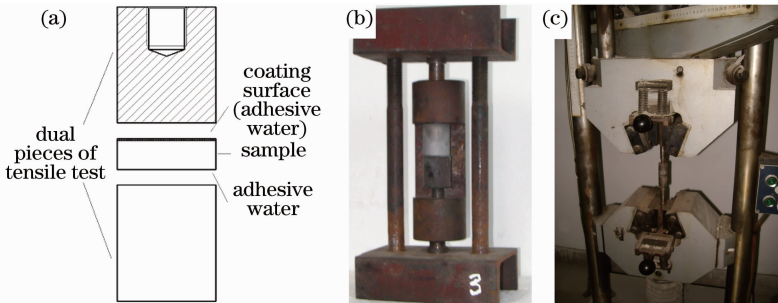


图3 试样拉伸试验。(a)拉伸试件制作示意图;(b)固定夹具;(c)拉伸设备

Fig. 3 Tensile test of specimen. (a) Schematic of fabricating the tensile test sample; (b) clamping equipment; (c) tensile setup

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 涂层组织结构

图4为陶瓷涂层横截面 SEM 形貌。可见整个

涂层中各层之间无明显界面,过渡缓和自然,涂层内部致密、连续,基本无孔隙及贯穿性大裂纹等缺陷。另外涂层由部分熔化区和完全熔化区两部分组成,

其中完全熔化区为晶粒细小的等轴晶,而部分熔化区由残留纳米颗粒组成。激光熔覆陶瓷涂层时通常形成沿热流方向生长(垂直于基体方向)的柱状晶<sup>[18]</sup>,但是由于本试验中采用纳米团聚体粉末作为熔覆材料,加上熔覆过程中施加了超声振动,从而显著地改变了熔覆涂层的组织结构。超声振动在激光熔覆过程中的作用主要是减少熔覆层开裂趋势、细化晶粒及提高涂层致密性<sup>[19,20]</sup>。在激光熔覆过程中施加超声振动,将有助于熔池各处温度分布均匀化,减小熔覆层产生裂纹的概率;超声振动在熔池凝固时还能将正在长大的枝晶打碎,细化熔覆层组织晶粒;此外超声振动在熔池中产生的扰动和空化作用有益于溶解气体的析出,减少熔覆层的气孔等缺陷。

由图4可知,涂层中的裂纹基本集中在部分熔化区的残留纳米组织区。其原因是激光熔覆纳米陶瓷涂层中保留了相当比例的纳米颗粒,对陶瓷涂层起到了增韧作用,这些组织可以在材料断裂时促使裂纹发生偏转和分叉,消耗断裂能,有效地缓解涂层中的微裂纹扩展<sup>[21,22]</sup>,因此在熔覆层中没有出现对涂层性能有很大影响的贯穿性大裂纹。

比较不同位置熔覆层的组织形貌,可以看出,相对于上部完全熔化区,下部完全熔化区的晶粒比较粗大,表现为上小下大的梯度过渡特征。其原因是本试验是基于激光多层熔覆的方法制备厚陶瓷涂层,下部区域会经历激光的周期性反复加热,生成回火组织,出现比较粗大的晶粒<sup>[23]</sup>,因此下部区域的平均晶粒直径要略大于上部位置的晶粒直径。

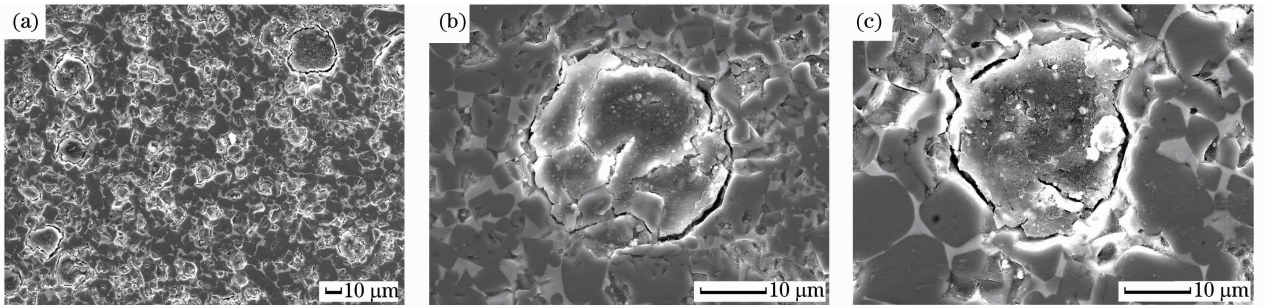


图4 激光熔覆 n-AT13 涂层横截面 SEM 形貌。(a)整体形貌;(b)上部区域;(c)下部区域  
Fig. 4 Cross-sectional SEM morphology of laser-clad n-AT13 coating. (a) Overall morphology;  
(b) high magnification of upper region; (c) high magnification of lower region

### 3.2 拉伸试验结果

在拉伸试验中,陶瓷层厚度为 175 μm 的三个试样拉伸分离面都在涂层与对偶件之间,表明涂层的内聚强度、表面陶瓷层与过渡层及过渡层与基体的结合强度都大于 E7 胶的抗拉强度,试验中测得的结合强度实际是 E7 胶的粘结强度,而不是涂层的结合强度,而其余厚度的试样拉伸分离面都在表面陶瓷层与过渡层之间。试样拉伸试验结果见表1。由表1可知,随着涂层厚度(熔覆层数)的增加,涂层平均结合强度逐渐减小,当涂层厚度为 175 μm 时其结合强度大于 78.6 MPa,而当涂层厚度为 700 μm 时其平均结合强度只有 36.2 MPa。另外,如果不考虑未反映涂层真实结合强度的厚度为 175 μm 试样,可见随着涂层厚度的增加,结合强度的标准偏差绝对值逐渐增加,而结合强度本身随着厚度的增加而逐渐减小,因此结合强度标准偏差的相对值增加更大,如涂层厚度为 350 μm 的试样的结合强度标准偏差的相对值是 5.4%,而涂层厚度为 700 μm 的试样相应值为 13.5%。这表明随着熔

覆层数的增加,同厚度下不同试样结合强度的差异性显著增加。

表1 涂层结合强度试验结果

Table 1 Test results of bonding strength of coatings

Coating thickness / μm	175	350	525	700	
Tensile force <i>P</i> /kN	Sample 1	42.3	32.8	22.5	15.2
	Sample 2	35.8	34.1	21.6	19.9
	Sample 3	37.7	30.6	25.8	18.3
Average tensile force $\bar{P}$ /kN	38.6	32.5	23.3	17.8	
Average bonding strength $\bar{\sigma}_F$ /MPa	78.6	66.3	47.4	36.2	
Standard deviation of bonding strength	6.8	3.6	4.5	4.9	

马咸尧等<sup>[24]</sup>的研究表明,激光熔覆厚度为 80 μm 的常规 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13% TiO<sub>2</sub> 陶瓷涂层结合强度可达到 200 MPa 左右,考虑到随着涂层厚度增加结合强度逐渐减小的因素及纳米涂层对结合强度的有益成份,厚度为 175 μm 的试样其实际结合强度应大于 100 MPa。图5是经过修正的涂层结合强度与厚度的关系,可以看出,随着涂层厚度的增加,结合

强度先快速下降,随后下降趋势变缓,表现出先快后慢的特征。

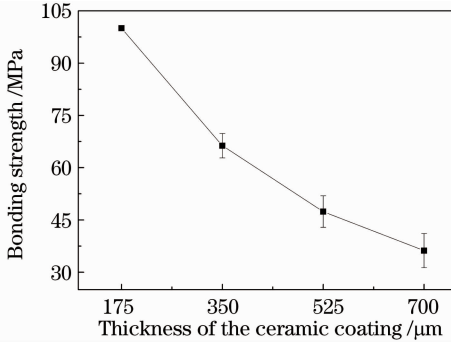


图5 涂层结合强度与厚度的关系

Fig. 5 Relationship between thickness and bonding strength of the coating

### 3.3 讨论

对于激光多层熔覆纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13%  $\text{TiO}_2$  陶瓷涂层,各层之间无明显界面,此外纳米  $\text{TiO}_2$  起到了陶瓷材料增韧介质与导热介质的作用<sup>[25]</sup>,在微裂纹增韧陶瓷材料的同时,将激光高能量密度产生的热量均匀传递给周围的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,并且由于自身的熔化而起到黏结相的作用,使陶瓷涂层更加均匀致密,因而陶瓷涂层内部的结合强度(内聚强度)很高。另外陶瓷涂层中的纳米  $\text{TiO}_2$  向界面结合侧扩散偏聚并发生化学反应,实现陶瓷涂层与过渡层一定程度的化学结合,陶瓷涂层与过渡层的结合也较好。因此,在陶瓷涂层厚度较薄(熔覆层数较少)时,涂层的结合强度很高。虽然在激光熔覆过程中,采取了一系列措施控制熔覆层裂纹,但是随着熔覆层数的增加,涂层中的残余应力不可避免地增加。由于陶瓷涂层与过渡层界面处存在杂质和缺陷,加之二者的热物性差异较大,因此在此区域易于出现应力集中,导致裂纹萌生。萌生后的裂纹沿界面扩展,形成长条裂纹,从而减少陶瓷层与过渡层的粘结力。因此,随着涂层厚度的增加,涂层结合力显著下降。对于不同的试样,界面处杂质分布及缺陷数量存在一定差异,在熔覆过程中其裂纹萌生和扩展差异更大,因此厚涂层结合强度的个体差异变大,表现为结合强度标准偏差的绝对值和相对值都随着熔覆层数的增加而增大,特别是结合强度标准偏差相对值随着涂层厚度增加而显著增加。

试验结果表明,厚度为 350  $\mu\text{m}$  的激光熔覆陶瓷涂层的平均结合强度为 66.3 MPa,远高于厚度相当的等离子喷涂常规  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13%  $\text{TiO}_2$  陶瓷涂层的 19.6 MPa,也高于等离子喷涂纳米结构  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13%

$\text{TiO}_2$  陶瓷涂层的 31.5 MPa<sup>[26]</sup>,这说明与等离子喷涂试样相比,在结合强度方面激光熔覆试样较有优势。热障涂层是陶瓷涂层一个很重要的应用领域,而热障涂层隔热性能与涂层厚度成正比。另外,热障涂层要有良好的结合性能,否则在热冲击过程中涂层极易剥落而失效。然而激光熔覆试样结合强度随着涂层厚度增加而减少,虽然强度减小的趋势是先快后慢,但是当涂层达到足够厚度(熔覆层数足够多)时,例如达到几毫米时,仍然有可能使其结合强度较低,甚至开裂剥落,从而影响其在热障涂层方面的应用。试验结果表明,激光熔覆陶瓷涂层结合强度的薄弱点为表面陶瓷层与过渡层界面,因此为了进一步提高涂层的结合性能,可在过渡层与陶瓷层间熔覆一梯度过渡层,如在过渡层上依次熔覆 75% 过渡材料+25%陶瓷材料、50%过渡材料+50%陶瓷材料及 25%过渡材料+75%陶瓷材料的梯度过渡层,最后再在其表面熔覆陶瓷涂层,如图 6 所示。梯度涂层既可以减小过渡层与陶瓷层热物性之间的差异,又具有应力缓和作用<sup>[27]</sup>,因此可显著改善涂层的结合性能。另外也可以对熔覆试样进行后处理,如进行适当的热处理,一方面可减小残余应力,另一方面可促进陶瓷层与过渡层之间界面附近元素的互扩散<sup>[28]</sup>,从而提高其结合强度。

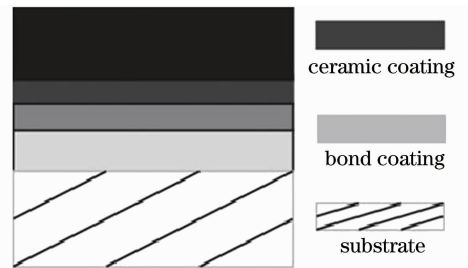


图6 梯度涂层示意图

Fig. 6 Schematic illustration of graded coating

## 4 结论

1) 激光多层熔覆 n-AT13 陶瓷涂层各层之间无明显界面,过渡缓和自然,涂层内部致密、连续,基本无孔隙及贯穿性大裂纹等缺陷;涂层由残留纳米颗粒的部分熔化区和由细小等轴晶构成的完全熔化区组成,晶粒尺寸表现出上小下大的梯度过渡特征。

2) 表面陶瓷涂层厚度分别为 175、350、525、700  $\mu\text{m}$  的试样的结合强度分别为 78.6、66.3、47.4、36.2 MPa,随着涂层厚度的增加,结合强度逐渐下降,其减小的趋势为先快后慢,表面陶瓷层与过渡层界面是涂层结合的薄弱点。

## 参考文献

- Liu Chunbo, Lin Feng, Jiang Xianliang. Current state and future development of thermal barrier coating[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, **17**(1): 1~13  
刘纯波, 林 锋, 蒋显亮. 热障涂层的研究现状与发展趋势[J]. *中国有色金属学报*, 2007, **17**(1): 1~13
- A. Jadhav, N. P. Padture, F. Wu *et al.*. Thick ceramic thermal barrier coatings with high durability deposited using solution-precursor plasma spray [J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2005, **405**(1/2): 313~320
- Li Deliang, Cheng Xudong, Ye Weiping *et al.*. Carbon fiber reinforced zirconia thermal barrier and ablative thick composite coating[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010, **32**(8): 18~21  
励德亮, 程旭东, 叶卫平等. 碳纤维增强氧化锆热障烧蚀复合厚涂层的研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2010, **32**(8): 18~21
- Niu Wei, Sun Ronglu. Effect of h-BN content on microstructures and wear resistance of laser cladding self-lubricant coatings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0803011  
牛 伟, 孙荣禄. h-BN 含量对激光熔覆自润滑涂层微观组织和磨损性能的影响[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0803011
- Wang Yanfang, Li Li, Lu Qinglong *et al.*. Laser cladding Fe-based amorphous coatings on stainless substrate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603017  
王彦芳, 栗 荔, 鲁青龙等. 不锈钢表面激光熔覆铁基非晶涂层研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603017
- L. Pawlowski. Thick laser coatings: a review[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1999, **8**(2): 279~295
- Chen Changjun, Wang Dongsheng, Wang Maocai. Laser multi-layer cladding of Mg-based alloys [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2003, **13**(1): 78~82
- Wu Peigui, Zhang Guangjun. Status and development of multi-layer laser cladding technology [J]. *Journal of Shanghai University of Engineering Science*, 2009, **23**(4): 374~378  
吴培桂, 张光钧. 激光多层熔覆技术的研究现状及发展[J]. *上海工程技术大学学报*, 2009, **23**(4): 374~378
- Zhang Changchun, Shi Yan. Current status and development of high thickness coating by laser cladding technology[J]. *Laser Technology*, 2011, **35**(4): 448~452  
张昌春, 石 岩. 激光熔覆高厚度涂层技术研究现状及发展趋势[J]. *激光技术*, 2011, **35**(4): 448~452
- V. Ocelik, U. Oliveira, M. Boer *et al.*. Thick Co-based coating on cast iron by side laser cladding: analysis of processing conditions and coating properties[J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2007, **201**(12): 5875~5883
- Chen Jing, Zhang Fengying, Tan Hua *et al.*. Alloying mechanics in moving melt pool during laser solid forming from blended elemental powders [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2154~2159  
陈 静, 张凤英, 谭 华等. 激光多层熔覆沉积预混合 Ti-xAl-yV 合金粉末在熔池中的熔化与偏析行为[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2154~2159
- T. M. Yue, Y. P. Su. Laser multi-layer cladding of Zr<sub>65</sub>Al<sub>7.5</sub>Ni<sub>10</sub>Cu<sub>17.5</sub> amorphous alloy on magnesium substrates[J]. *J. Mater. Sci.*, 2007, **42**(15): 6153~6160
- X. L. Wu, Y. S. Hong. Fe-based thick amorphous-alloy coating by laser cladding [J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2001, **141**(2/3): 141~144
- G. J. Xu, M. Kutsuma, Z. J. Liu *et al.*. Characteristic behaviours of clad layer by a multi-layer laser cladding with powder mixture of Stellite-6 and tungsten carbide[J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2006, **201**(6): 3385~3392
- M. Y. Zhang, C. Ye, Y. J. Erasquin *et al.*. Laser engineered multilayer coating of biphasic calcium phosphate/titanium nanocomposite on metal substrates[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2011, **3**(2): 339~350
- Chen Chuanzhong, Lei Tingquan, Bao Quanhe *et al.*. Problems and the improving measures in laser remelting of plasma sprayed ceramic coatings[J]. *Materials Science & Technology*, 2002, **10**(4): 431~435  
陈传忠, 雷廷权, 包全合等. 等离子喷涂-激光重熔陶瓷涂层存在问题及改进措施[J]. *材料科学与工程*, 2002, **10**(4): 431~435
- Zhang Wanhong. Present and evolution of laser cladding ceramic coating[J]. *Hot Working Technology*, 2009, **38**(24): 39~42  
张万红. 激光熔覆陶瓷涂层的研究现状及发展[J]. *热加工工艺*, 2009, **38**(24): 39~42
- Y. L. Gao, C. S. Wang, M. Yao *et al.*. The resistance to wear and corrosion of laser cladding Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic coating on Mg alloy [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2007, **253**(12): 5306~5311
- Song Jianli, Deng Qilin, Ge Zhijun *et al.*. The cracking control technology of laser rapid forming nickel-based alloys[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2006, **40**(3): 548~552  
宋建丽, 邓琦林, 葛志军等. 镍基合金激光快速成形裂纹控制技术[J]. *上海交通大学学报*, 2006, **40**(3): 548~552
- Cheng Changyuan, Deng Qilin, Song Jianli. The influence of ultrasonic vibration on the process of laser cladding [J]. *Electromachining & Mould*, 2011, **44**(1): 67~70  
陈畅源, 邓琦林, 宋建丽. 超声振动对激光熔覆过程的影响[J]. *电加工与模具*, 2011, **44**(1): 67~70
- Y. Wang, C. G. Li, L. X. Guo *et al.*. Laser remelting of plasma sprayed nanostructured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> coatings at different laser power [J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2010, **204**(21/22): 3559~3566
- Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Shen Lida *et al.*. Influences of laser remelting on microstructure of nanostructured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13wt. %TiO<sub>2</sub> coatings fabricated by plasma spraying[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, **255**(8): 4606~4610
- Cui Aiyong, Hu Fangyou, Yi Dexian *et al.*. Ti-base functional gradient wear-resistance coating prepared by laser[J]. *Applied Laser*, 2010, **30**(5): 370~373  
崔爱永, 胡芳友, 易德先等. 钛基梯度功能耐磨涂层激光制备[J]. *应用激光*, 2010, **30**(5): 370~373
- Ma Xianyao, Tao Zengyi, Wang Aihua *et al.*. Measurement of cohesive strength and analysis of forming cracks for laser remelting of plasma spraying ceramic coatings[J]. *Chinese J. Lasers*, 1993, **20**(1): 73~77  
马咸尧, 陶曾毅, 王爱华等. 激光熔覆陶瓷层结合强度测量与裂纹形成分析[J]. *中国激光*, 1993, **20**(1): 73~77
- Gao Xuesong, Huang Yinhui, Tian Zongjun *et al.*. Characteristics and mechanism analysis of nano-sized TiO<sub>2</sub> in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2009, (12): 45~48  
高雪松, 黄因慧, 田宗军等. 纳米 TiO<sub>2</sub> 在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层中的特征及作用机理[J]. *材料工程*, 2009, (12): 45~48
- Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Zhang Shaowu *et al.*. Erosion resistance of conventional and nanostructured plasma sprayed ceramic coatings[J]. *Materials Protection*, 2011, **44**(1): 67~70  
王东生, 田宗军, 张少伍等. 常规和纳米陶瓷等离子喷涂层的抗冲蚀性能的对比如[J]. *材料保护*, 2011, **44**(1): 67~70
- Y. T. Pei, T. C. Zuo. Gradient microstructure in laser clad TiC-reinforced Ni-alloy composite coating[J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 1998, **241**(1-2): 259~263
- Yuan Hongbin, Wang Zehua, Zhang Jingjing *et al.*. Effect of heat treatment on bonding strength of plasma sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13% TiO<sub>2</sub> coating[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2011, **35**(1): 65~68  
袁鸿斌, 王泽华, 张晶晶等. 热处理对等离子喷涂 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13% TiO<sub>2</sub> 涂层结合强度的影响[J]. *机械工程材料*, 2011, **35**(1): 65~68