

文章编号: 0258-7025(2009)01-0224-07

TiAl 合金表面激光重熔复合陶瓷涂层温度场数值模拟及组织分析

王东生^{1,2} 田宗军^{1,2} 沈理达² 刘志东^{1,2} 黄因慧^{1,2}

(南京航空航天大学¹ 江苏省精密与微细制造技术重点实验室,² 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要 为了研究激光重熔工艺参数对等离子体喷涂复合陶瓷涂层组织结构的影响,根据激光重熔的特点,采用 ANSYS 有限元软件参数化设计语言,建立了 TiAl 合金表面激光重熔等离子体喷涂 $\text{Al}_2\text{O}_3-13\%\text{TiO}_2$ (质量分数) 复合陶瓷涂层连续移动三维温度场有限元模型,对激光重熔温度场进行了分析。分析结果表明,当陶瓷涂层厚度较大时,受到陶瓷材料导热系数较低的影响,激光重熔时无法使整个陶瓷层实现完全重熔,根据重熔时作用区温度场分布,可将整个涂层分为重熔区、烧结区和残余等离子体喷涂区;在优化的工艺参数下,采用相对较低的激光重熔功率和较低的扫描速度能够获得厚度较大的重熔区和烧结区。实验结果表明,重熔后的陶瓷涂层形成了晶粒细小且致密的等轴晶重熔区、烧结区和片层状残余等离子体喷涂区,并且重熔区和烧结区厚度的计算值和实验值吻合较好。

关键词 激光技术;激光重熔;等离子体喷涂;复合陶瓷涂层;TiAl 合金

中图分类号 TG 156.99;TN 249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20093601.0224

Numerical Simulation on the Temperature Field and Microstructure Analysis of Laser Remelting Composite Ceramic Coating on TiAl Alloy Surface

Wang Dongsheng^{1,2} Tian Zongjun^{1,2} Shen Lida² Liu Zhidong^{1,2} Huang Yinhui^{1,2}

¹Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology,
²College of Mechanical and Electrical Engineering,
(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract In order to study the effects of laser remelting on microstructure of composite ceramic coating prepared by plasma spraying, in view of the characteristics of laser remelting, a finite element model for analyzing the transient temperature field of three-dimensional moving laser remelting $\text{Al}_2\text{O}_3-13\%\text{TiO}_2$ (mass fraction) composite ceramic coating prepared by plasma spraying was established by using the employment of ANSYS parametric design language. The temperature field in the coating and substrate was analyzed. The results show that the ceramic coating cannot be total remelted due to low conductivity of ceramic when the coating is thick enough. According to the distribution of temperature field, the coating can be divided into the remelted zone, the sintered zone and the remained plasma-sprayed zone. The thickness of the remelted zone and the sintered zone is larger using a lower laser power and scanning speed under optimum parameters. The experimental results show that the composite ceramic coating forms three different zones after laser remelting, i. e. the remelted zone (fine equiaxed grains structure), the sintered zone and remained plasma-sprayed zone (lamellar-like structure). The obtained experimental results show a good agreement with the simulation results, which indicates that the established numerical model is correct and reliable.

Key words laser technique; laser remelting; plasma spraying; composite ceramic coating; TiAl alloy

收稿日期:2008-01-30;收到修改稿日期:2008-04-22

基金项目:国家自然科学基金(59975046)和江苏省自然科学基金重点项目(BK2004005)资助课题。

作者简介:王东生(1978-),男,江苏人,博士研究生,主要从事激光加工技术及表面改性技术研究。

E-mail: wangds@nuaa.edu.cn

导师简介:黄因慧(1945-),男,福建人,教授,博士生导师,主要从事特种加工技术、激光快速成型技术和纳米材料在机械工程的应用等研究。E-mail: hyhlib@nuaa.edu.cn

1 引言

TiAl 基金属间化合物合金(以下简称 TiAl 合金)具有密度低、比强度和比刚度高、高温蠕变及高温疲劳性能好等优点,被认为是极具应用前景的新型轻质高温结构材料之一,特别是对未来航空航天、发动机以及燃汽轮机等极具吸引力^[1,2]。但是 TiAl 合金硬度较低,如 γ -TiAl 合金的硬度为 240~260 HV₁₀₀, α -Ti₃Al 合金的硬度为 260~380 HV₁₀₀,低硬度导致 TiAl 合金在工程应用中的耐磨性能较差,因此提高 TiAl 合金高温耐磨性是急需解决的问题^[3,4]。金属表面陶瓷涂层技术能有机地将基体金属和表面陶瓷涂层的特点结合起来,发挥两类材料的综合优势,同时满足对结构性能和环境性能的需要,获得相当理想的复合材料结构。

在众多的陶瓷材料中,Al₂O₃ 是最重要最广泛应用的一类耐磨陶瓷涂层材料,但其韧性不足,在 Al₂O₃ 陶瓷中加入适量的 TiO₂,可提高其韧性、致密度和粘结强度,有利于耐磨性的进一步提高。因此,Al₂O₃-TiO₂ 涂层被大量用于航空工业和化纤等行业,有效延长了部件的使用寿命。

等离子体喷涂是最常用的金属表面陶瓷涂层技术,但等离子体喷涂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,界面结合的主要形式是机械结合等,这些因素使等离子体喷涂涂层难以适应较恶劣的环境,因而限制了它的应用范围及使用寿命^[5]。等离子体喷涂层的激光重熔为这一技术的解决提供了新的途径,激光重熔技术^[6~8]是一种将激光技术和热处理相结合的激光表面强化技术,能有效消除喷涂层的层状结构、大部分孔隙和氧化物夹杂,形成均匀致密的陶瓷涂层,保证涂层的性能,从而提高了工件的使用寿命^[5,9]。

但是激光重熔过程是快速熔化和凝固的冶金过程,在重熔过程中存在复杂的传热、传质、对流、扩散、相变等物理和化学现象。在当前技术条件下难以通过对重熔过程进行实时测量来获得精确的实验数据,然而,确定激光重熔的温度变化对建立工艺参数与组织结构、性能之间的关系是极其重要的。因此,采用数值模拟的方法对激光表面重熔温度场进行分析有其重大的意义。

本文利用 ANSYS 有限元软件,建立了 TiAl 合金表面激光重熔等离子体喷涂 Al₂O₃-13%TiO₂(质量分数,AT13)复合陶瓷涂层温度场计算模型,讨论了激光重熔工艺参数对温度场的影响,并结合实验结果对激光重熔等离子体喷涂 AT13 复合陶瓷涂层

横截面组织结构进行了分析。

2 激光重熔温度场有限元模型的建立

2.1 温度场的数学模型

基体材料为钢铁研究总院高温材料研究所熔炼的 γ -TiAl 基合金(TAC-2),其名义化学成分为 Ti-46.5%Al-2.5%V-1%Cr(原子数分数)。过渡层为北京矿冶研究总院金属材料所生产的粒度为 -140~+325 目,由 Y₂O₃ 弥散的 NiCoCrAl 超合金粉末(KF-113A),其名义成分为 Ni-20%Co-18%Cr-15%Al-2%Y₂O₃(质量分数)。陶瓷材料为沈阳荣华生产的粒度为 15~45 μ m 普通机械破碎不规则 AT13 陶瓷粉末。

试样基体尺寸为 20 mm×16 mm×5 mm,过渡层厚 0.1 mm,陶瓷层厚 0.35 mm,为了节省计算时间,取试样关于 xz 平面对称的一半进行建模,如图 1 所示。

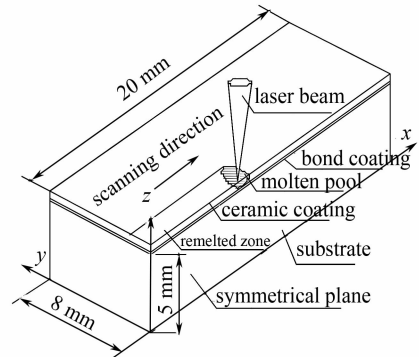


图 1 激光重熔过程示意图

Fig. 1 Schematic of the laser remelting process

2.2 材料热物性参数

ANSYS 程序中以表格的方式给定各典型温度处的参数值,利用插值法和外推法确定各未知温度处的值。TiAl 合金, KF-113A 高温合金, Al₂O₃ 陶瓷和 TiO₂ 陶瓷的热物性参数参见文献^[10~12]。

对于复合陶瓷材料 AT13,分别根据 Al₂O₃ 和 TiO₂ 的热物性参数,采用混合定律折算出相应的热物性参数^[13]:

$$y_e = \sum k_i y_i \quad (1)$$

式中 y_e , y_i 分别为混合材料、材料 i 的某种热物性参数; k_i 为材料 i 的质量分数。

等离子体喷涂陶瓷涂层存在一定的孔隙率,由于气体导热系数远低于固体/液体导热系数,因此孔隙不利于传热,其导热系数用麦式方程^[13]计算,对密度和比热容等热物性参数,通过乘上相应的比例因子来调节

$$\lambda_2 = \frac{1 - \varphi}{1 + \varphi} \lambda_1, \quad (2)$$

$$p_2 = (1 - \varphi) p_1, \quad (3)$$

式中, λ_1 为致密材料导热系数; λ_2 为折算的材料导热系数; φ 为孔隙率, 由等离子体喷涂涂层横截面的抛光扫描电镜(SEM)图像, 在选定的灰度水平下, 转变成黑白二进制图像, 然后用 ASIA 高级图像分析程序得到涂层的孔隙率约为 5%; p_1 为致密材料的密度或比热容等热特性参数; p_2 为折算的材料密度或比热容等。

关于温度场的简化假设、激光热源、边界条件和相变潜热的处理等参见文献[14,15]。

2.3 几何模型和网格划分

为了能够准确反映激光重熔温度场的分布规律, 需要较小的网格尺寸, 以获得足够的计算精度, 同时为了避免过多的网格划分, 引起计算时间过长, 在建模过程中, 靠近激光扫描区域采用较细的网格划分, 离激光扫描区域较远处采用较大的网格。具体如下: 将基体上部作细映射网格划分, 下部作粗映射网格划分, 中间部分用自由网格过渡, 涂层采用映射网格划分, 所建立的有限元模型见图 2 所示。

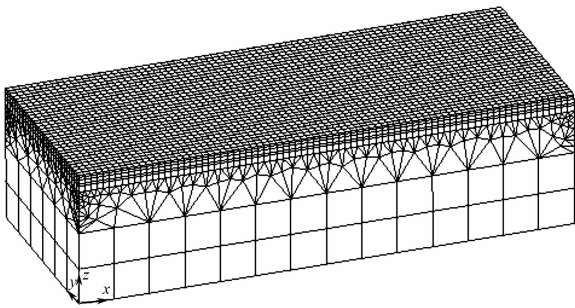


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

3 温度场的计算结果与分析

激光扫描轨迹为试样上表面中心线, 模拟计算的工艺参数如表 1 所示, 激光扫描方向沿光斑 3 mm 侧。

表 1 模拟计算的工艺参数

Table 1 Process parameters of numerical simulation

Process parameters	Set1
Laser power P / W	650
Beam size $l \times w$ / mm	5×3
Scanning rate v / (mm/min)	1200
Thermal absorption coefficient ρ_0	0.7
Initial temperature T_0 / $^{\circ}\text{C}$	20

图 3 分别为激光扫描 0.15 s, 0.5 s, 0.85 s 时的温度场云图, 可见随着激光扫描的进行, 热影响区的范围越来越大, 温度场的动态特征也越来越明显, 在图中温度高于 1890 $^{\circ}\text{C}$ (AT13 熔点) 的区域为熔池区。

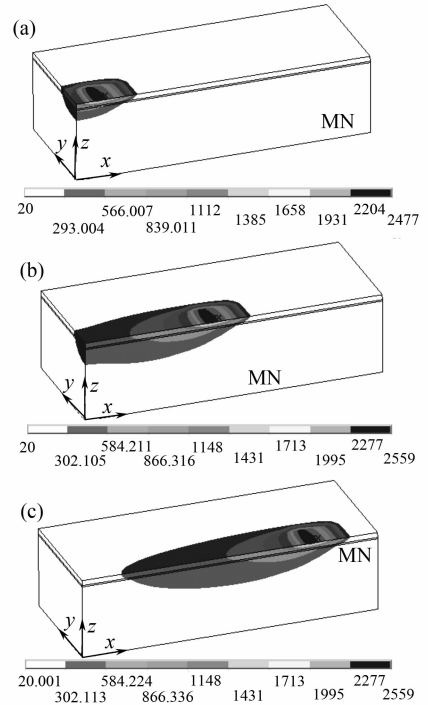


图 3 不同时刻的温度场云图

Fig. 3 Temperature field distributions at different time of (a) 0.15 s, (b) 0.5 s and (c) 0.85 s

图 4 为 0.5 s 时不同面上的温度场云图。可以看出, 在上表面移动的激光热源所形成的温度场的形状不同于静止的激光束产生的环形分布, 而是呈现一个拖着尾巴的彗星状^[16], 在熔池的前端温度梯度较大, 尾部的温度梯度较小。具体表现为熔池前端的温度等值线比后端区域要细密, 这是由光斑的快速移动造成的。在对称面的温度分布等值线呈勺状, 在横截面上的温度分布等值线呈月牙形, 从局部放大图上可以看出在激光重熔中心位置有相当范围的均匀温度区。

图 5(a) 是 0.5 s 时试样上表面和界面沿激光扫描中心线上的温度分布曲线, 此时激光光斑中心在距激光扫描起始点 10 mm 处, 最高温度点并不在激光光斑中心, 而是稍稍滞后于光斑中心。由于陶瓷材料较低的导热系数, 热量较难向深度方向传递, 因此上表面和界面温差较大。

图 5(b) 为 0.5 s 时最高温度点深度方向上的温

度分布。在深度方向上 1 mm 的区域内温度差超过 2100℃,故在深度方向上产生很高的温度梯度。通过模拟结果可以预测激光重熔时熔化状况,对 AT13 陶瓷,温度超过 2980℃ (AT13 沸点)将产生汽化,温度在 1890(AT13 熔点)~2980℃ 范围为重熔区,温度在 1400(AT13 烧结温度)~1890℃ 范围为烧结区。在深度方向上 0.11 mm 左右处,温度为 1890℃,即表明重熔区的厚度大约为 0.11 mm;在深度方向上 0.21 mm 左右处,温度为 1400℃,即表明烧结区的厚度大约为 0.10 mm。

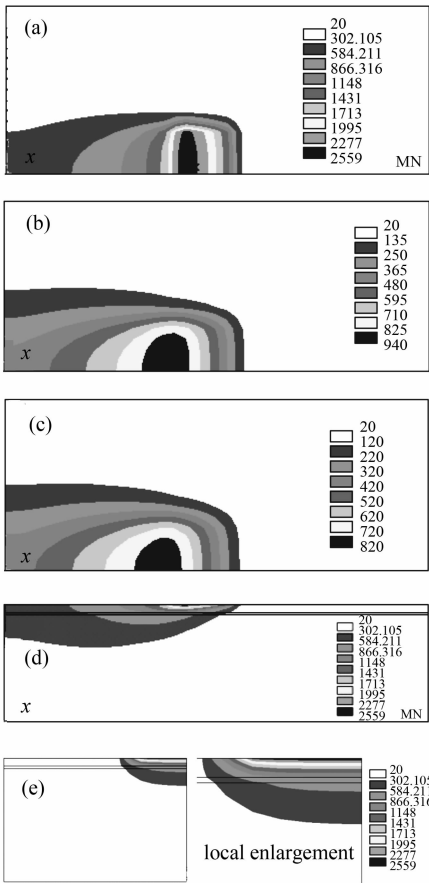


图 4 0.5 s 时不同面上的温度场云图。

- (a) 上表面;
- (b) 陶瓷层与过渡层界面;
- (c) 过渡层与基体界面;
- (d) 对称面;
- (e) 横截面

Fig. 4 Temperature field distributions on different plane at 0.5 s . (a) Top surface ; (b) interface between ceramic coating and bond coating; (c) interface 2 between bond coating and substrate;

(d) symmetrical plane;(e) cross-section

图 5(c)为 0.5 s 时试样上表面和界面上最高温度点横向温度分布,可见温度变化相对于深度方向温度变化小得多,通过该图可以判断熔化区和烧结区的宽度,熔化区宽度可以用于多道搭接扫描时选

择扫描间距。

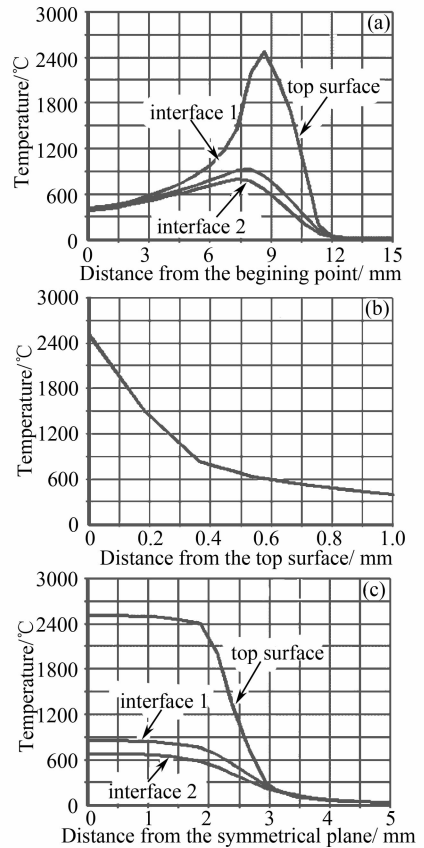


图 5 0.5 s 时沿不同线上的温度分布。(a) 激光扫描中心线 (x 方向);(b) 最高温度点深度方向 (z 方向); (c) 最高温度点横向方向 (y 方向)

Fig. 5 Temperature distributions along different lines at 0.5 s. (a) laser scanning centerline (x direction) ; (b) depth direction (z direction) and (c) transverse direction (y direction) of the highest temperature point

文献[14]的研究表明,与激光功率相比,激光扫描速度对温度场影响较小,因此在保证涂层不产生汽化,即激光重熔区最高温度不超过 2980℃ 的前提下,在相对优化的工艺参数下,采用较低的激光功率和较低的激光扫描速度能够得到厚度较大的重熔区和烧结区,其原因是激光扫描速度较低时,激光辐照时间较长,熔池存在时间较长,可以向深度方向传递更多的热量,因此在深度方向的温度梯度较小,在最高温度相同时,重熔区和烧结区厚度更大。但是对于激光功率和扫描速度都有一个较优的范围,扫描速度决定了熔池孕育和存在的时间,随着扫描速度的增加,激光能量来不及传递到材料内部,熔池寿命变短,气体来不及排出,导致孔洞增加,并且重熔层

裂纹倾向严重,而扫描速度过低,如果能够熔透整个陶瓷涂层则将增加基材熔化深度,导致稀释率上升,同样,激光功率也存在一个最佳范围。

Set2 为在 Set1 工艺条件下把激光功率降为 500 W,激光扫描速度降为 600 mm/min,图 6 为 Set2 工艺条件下激光光斑扫描至试样中心点时最高温度点深度方向上的温度分布。其最高温度 2563 °C 与 Set1 工艺条件下最高温度 2559 °C 基本相当,但其重熔区厚度为 0.14 mm,烧结区厚度为 0.12 mm,明显高于 Set1 工艺条件下的重熔区和烧结区厚度,但是由于陶瓷涂层较厚,加之陶瓷材料的导热系数较低,因此还是无法使整个陶瓷涂层实现完全重熔。如果进一步降低速度或增加功率,则激光重熔时最高温度将有较大增加,会出现汽化现象,从而影响到涂层表面质量。因此对厚度较大的陶瓷涂层,很难通过一次激光扫描实现涂层的完全重熔。

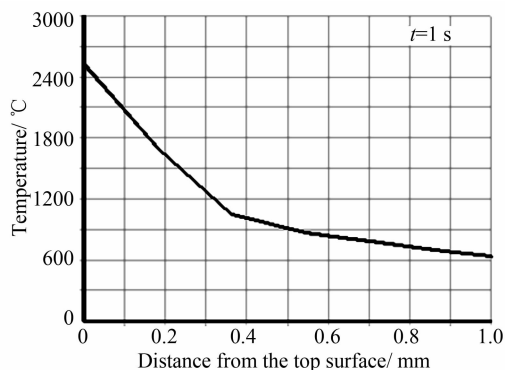


图 6 Set 2 工艺条件下最高温度点深度方向的温度分布
Fig. 6 Temperature distribution along depth direction of the highest temperature point under set2

4 实验结果与分析

用线切割方法制备尺寸为 20 mm×16 mm×5 mm 的 TiAl 合金长方体小块(与计算模型尺寸相同),喷涂前试样经打磨、除油、喷砂处理。等离子体喷涂在美国普莱克斯公司生产的 3710 型等离子体喷涂系统上进行。为了缓解 AT13 陶瓷与 TiAl 合金之间较大的物理性能差异,以 KF-113A 合金作为过渡层,以松弛应力,避免涂层开裂,喷涂工艺参数见表 2。然后用 SLCF-X12×25 型 CO₂ 激光器进行重熔处理,重熔时氩气保护。涂层横截面 SEM 组织形貌采用 JSM-7100F 型(JEOL)场发射扫描电子显微镜(FE-SEM)观察。

表 2 等离子体喷涂参数

Table 2 Plasma spraying parameters

Process parameters	Bond coating (KF-113A)	Ceramic coating (AT13)
Current/A	710	850
Voltage/V	42	42
Primary gas, Ar/PSI	65	45
Secondary gas, He/PSI	115	140
Carrier gas, Ar/PSI	45	45
Powder feed rate/(r/m)	2	3
Spray distance/mm	110	110
Traverse speed/(mm/s)	100	100
Coating thickness/ μm	~100	~350

图 7 为 Set1 工艺条件下激光重熔后复合陶瓷涂层的横截面组织形貌,从右至左依次为 AT13 陶瓷层, KF-113A 过渡层及 TiAl 合金基体。由于受到激光功率,能量密度,激光作用区温度场分布, AT13 陶瓷导热系数和涂层厚度等因素的综合影响,致使激光重熔时无法使整个陶瓷层实现重熔,重熔后的 AT13 陶瓷层出现了明显的分层结构特征。依据组织形态的不同,可将其大致分为:重熔区、烧结区和残余等离子体喷涂区^[17~19],相应的组织形貌见图 8 所示。

在激光重熔时,瞬间产生的高温使厚度约为 0.12mm 的表面陶瓷层发生熔化,形成高温熔池。在随后的凝固过程中,陶瓷层导热系数较低,使冷态

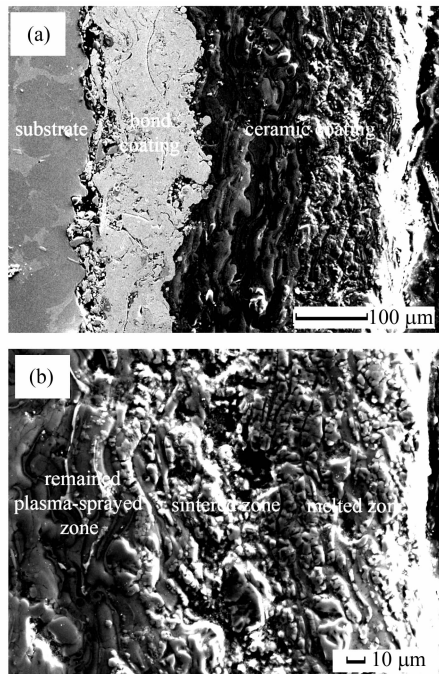


图 7 激光重熔 AT13 陶瓷涂层横截面 SEM 形貌
Fig. 7 Cross-sectional SEM morphologies of laser-remelted AT13 coating

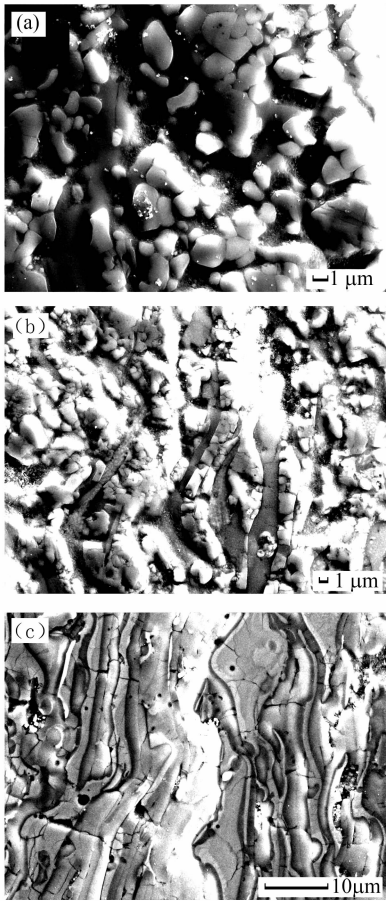


图 8 激光重熔后组织形貌。(a) 晶粒细小的重熔区;
(b) 烧结区;(c) 片层状残余等离子体喷涂区

Fig. 8 SEM morphologies of (a) remelted (fine equiaxed grains structure), (b) sintered and (c) remained plasma-sprayed (lamellar-like structure) zones

基体对其产生的冷却作用相对较小,从而熔池的热量散失主要依靠向空气的热辐射和对流进行,但是由于在重熔时采用了吹气保护的方法,因此熔池的冷却速度还是较快。由于过冷度较大,在重熔区形成了晶粒细小且较密的等轴晶,这与通常情况下由于熔池低的冷却速度而形成的沿热流方向生长的柱状晶组织^[17~20]有一定区别。位于重熔区之下厚度约为 0.08 mm 的层区则因重熔区热传导使其温度达到 AT13 陶瓷的烧结温度。在烧结过程中,以表面能降低为驱动,物质通过不同扩散途径向颗粒间颈部和气孔部位填充,使颈部渐渐长大,细小的颗粒相互键联,晶粒长大,孔隙和晶界渐趋减少,涂层致密度增加,最终形成烧结区。而在靠近过渡层的陶瓷层区域,由于陶瓷材料导热系数较低,重熔区的热量难以传到,温度较低,致使该层区仍保持原等离子体喷涂态典型的片层状结构特征^[18,19],该区域呈明显深浅相间的层状结构,其中浅色组织为富 TiO₂

区,深色组织为富 Al₂O₃ 区,且富 TiO₂ 区与富 Al₂O₃ 区之间存在成分相互扩散。

通过比较重熔区和烧结区厚度的计算值与实际值可以看出,两者比较接近,只是重熔区实际值比计算值略大,可能是模拟时把激光热源简化为表面热源,没有把实际重熔时激光加热材料的深度考虑进去,另外在建模时没有考虑熔池的流动,熔池的流动将会把热量由熔池中心往边缘和底部传递,从而使熔池加深、加宽。应该指出,为简化运算过程,在数学模型中作了一些形式上与实际情况不相吻合的假设,例如作用光斑为等强度的矩形光斑,而实际能量分布是比较均匀但总体上为中低边高的“马鞍形”分布;材料表面对激光的吸收率不随温度变化等等。但是,计算值和实际测量结果能够较好地吻合,表明所作的简化假设仍然是可取的,所建立的模型也是正确和可靠的。

5 结 论

1) 根据激光重熔的特点,利用 ANSYS 有限元软件,建立了 TiAl 合金表面激光重熔等离子体喷涂 AT13 复合陶瓷涂层温度场计算模型。

2) 当陶瓷涂层厚度较大时,受到陶瓷材料导热系数较低的影响,激光重熔时无法使整个陶瓷层实现完全重熔,根据重熔时作用区温度场分布,可将整个涂层分为重熔区、烧结区和残余等离子体喷涂区;在优化的参数下,采用较低的激光重熔功率和较低的激光扫描速度能够获得厚度较大的重熔区和烧结区。

3) 重熔后的陶瓷涂层形成了晶粒细小且致密的等轴晶重熔区、烧结区和片层状残余等离子体喷涂区,并且重熔区和烧结区厚度的计算值和实验值吻合较好。

参 考 文 献

- 1 Yang R., Cui Y. Y., Dong L. M. *et al.*. Alloy development and shell mould casting of gamma TiAl [J]. *Journal of Material Processing Technology*, 2003, **135**(2~3): 179~188
- 2 Wang Dongsheng, Huang Yinhui, Tian Zongjun *et al.*. Research states of surface coating technology of TiAl alloys [J]. *Materials Review*, 2007, **21**(11): 72~75
王东生, 黄因慧, 田宗军等. TiAl 合金表面涂层技术研究现状 [J]. *材料导报*, 2007, **21**(11): 72~75
- 3 Liu Xiubo, Wang Huaming. Effects La₂O₃ on microstructure and properties of laser clad γ /Cr₇C₃/TiC composite coatings on TiAl intermetallic alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7): 1011~1016
刘秀波, 王华明. La₂O₃ 对 TiAl 合金激光熔覆 γ /Cr₇C₃/TiC 复合材料涂层组织与性能的影响 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(7):

- 1011~1016
- 4 Liu Xiubo, Wang Huaming. Study on wear and high-temperature oxidation properties of laser clad metallic silicide composite coatings on TiAl intermetallic alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8): 1143~1149
刘秀波, 王华明. TiAl 合金激光熔覆金属硅化物复合材料涂层耐磨性和高温氧化性能研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(8): 1143~1149
 - 5 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, 雷延权, 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]. *材料科学与工艺*, 2002, **10**(4): 431~435
 - 6 Wang Ling, Chen Zhigang, Zhu Xiaorong *et al.*. Effects of laser remelting on wear resistance of Ni-WC composite coatings by flame-spraying [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 281~286
王玲, 陈志刚, 朱小蓉等. 激光重熔对火焰喷涂法制备 Ni-WC 复合涂层耐磨性能的影响 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 281~286
 - 7 Wang Dongsheng, Huang Yinhui, Tian Zongjun *et al.*. Effect of laser remelting on microstructure and properties of nanocrystalline nickel coating prepared by fet electrodepositing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 142~146
王东生, 黄因慧, 田宗军等. 激光重熔对喷射电沉积纳米镍涂层组织与性能的影响 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 142~146
 - 8 Liu Rongxiang, Ji Zesheng. Microscopic morphology and microstructure of phases between dilution zone and clad zone in laser remelting NiCrBSi/TiN layer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1292~1296
刘荣祥, 吉泽升. 激光重熔层稀释区与熔覆区界面区域的组织结构 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1292~1296
 - 9 Hua Guoran, Huang Yinhui, Zhao Jianfeng *et al.*. Plasma sprayed ceramic coating by laser cladding of Al₂O₃ nanoparticles [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metal*, 2004, **14**(2): 199~203
花国然, 黄因慧, 赵剑峰等. 激光熔覆纳米 Al₂O₃ 等离子喷涂陶瓷涂层 [J]. *中国有色金属学报*, 2004, **14**(2): 199~203
 - 10 Gan Yong, Tian Zhiling, Dong Han *et al.*. Handbook of the Chinese Material Engineering (Vol. 3) [M]. Beijing: Chemical Industry Publishing House, 2006. 822
干勇, 田志凌, 董瀚等. 中国材料工程大典(第3卷) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. 822
 - 11 Khor K. A., Gu Y. W.. Effects of residual stress on the performance of plasma sprayed functionally graded ZrO₂/NiCoCrAlY coatings [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2000, **277**(1): 64~76
 - 12 Ma Qingfang, Fang Rongsheng, Xiang Licheng *et al.*. Practical Handbook of Thermophysical Properties [M]. Beijing: China Agricultural Machinery Publishing House, 1986. 144~175
马庆芳, 方荣生, 项立成等. 实用热物理性质手册 [M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1986. 144~175
 - 13 Ying Lixia, Wang Liqin, Chen Guanci *et al.*. Simulation and calculation of 3D laser cladding temperature field of ceramic-metal composite coatings by finite element method [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2004, **29**(7): 24~28
应丽霞, 王黎钦, 陈观慈等. 3D 激光熔覆陶瓷-金属复合涂层温度场的有限元仿真与计算 [J]. *金属热处理*, 2004, **29**(7): 24~28
 - 14 Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Shen Lida *et al.*. Numerical simulation of temperature field of laser remelting MCrAlY coating prepared by plasma spraying on titanium alloy [J]. *Applied Laser*, 2007, **27**(6): 444~449
王东生, 田宗军, 沈理达等. 钛合金表面激光重熔等离子喷涂 MCrAlY 涂层温度场数值模拟 [J]. *应用激光*, 2007, **27**(6): 444~449
 - 15 Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Shen Lida *et al.*. Thermal-mechanical coupling finite element analysis of laser remelting MCrAlY coating prepared by plasma spraying on TiAl alloy surface [J]. *Applied Laser*, 2008, **28**(2): 92~98
王东生, 田宗军, 沈理达等. TiAl 合金表面激光重熔等离子喷涂 MCrAlY 涂层热力学耦合有限元分析 [J]. *应用激光*, 2008, **28**(2): 92~98
 - 16 Xi Mingzhe, Yu Gang. Numerical simulation for transient temperature field of 3D moving laser molten pool [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1527~1532
席明哲, 虞钢. 连续移动三维瞬态激光熔池温度场数值模拟 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1527~1532
 - 17 Gao Yali, Wang Cunshan, Yao Man *et al.*. The resistance to wear and corrosion of laser-cladding Al₂O₃ ceramic coating on Mg alloy [J]. *Applied Surface Science*, 2007, **253**(12): 5306~5311
 - 18 Wang Cunshan, Gao Yali, Yao Man. Microstructure and properties of laser remelted Al₂O₃ coating on magnesium alloy AZ91HP surface [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2007, **43**(5): 493~497
王存山, 高亚丽, 姚曼. 镁合金 AZ91HP 表面激光重熔 Al₂O₃ 涂层的组织及性能 [J]. *金属学报*, 2007, **43**(5): 493~497
 - 19 Gao Yali, Wang Cunshan, Yao Man *et al.*. Microstructure analysis and numerical simulation of laser cladding Al₂O₃ coating on magnesium [J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(6): 393~397
高亚丽, 王存山, 姚曼等. 镁合金表面激光熔覆 Al₂O₃ 涂层组织分析及数值模拟 [J]. *应用激光*, 2006, **26**(6): 393~397
 - 20 Chen Chuanzhong. Microstructure of laser-cladded Al₂O₃ + TiO₂ composite ceramic coating [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2000, **28**(2): 133~138
陈传忠. 激光熔覆 Al₂O₃ + TiO₂ 复合陶瓷涂层的微观结构 [J]. *硅酸盐学报*, 2000, **28**(2): 133~138