

# 基于 Brook 理论的激光熔覆过程中纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$ 陶瓷颗粒生长研究

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

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

**摘要** 为了研究激光高能量密度下纳米颗粒的生长情况,从而为优化工艺参数提供参考,在 Brook 晶粒生长经典理论上,结合有限元软件 Ansys 数值模拟的激光熔覆温度场,计算了激光熔覆等离子体喷涂预置纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$  (质量分数)陶瓷涂层过程中纳米颗粒尺寸变化,并讨论了纳米颗粒初始尺寸及不同熔覆区域对其生长的影响。同时,对等离子体喷涂纳米涂层进行了激光熔覆试验。结果表明,纳米颗粒在激光熔覆试验中生长情况的总体趋势与理论计算结果基本一致,说明基于 Brook 理论的晶粒生长理论对了解纳米颗粒在激光熔覆过程中的生长有一定的理论指导意义。

**关键词** 激光技术;激光熔覆;纳米颗粒;颗粒生长;Brook 理论;温度场

**中图分类号** TG156.99 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0903003

## Research of $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$ Ceramic Nanoparticles Growth during Laser Cladding Process Based on Brook's Theory

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

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Tongling College, Tongling, Anhui 244000, China

<sup>2</sup>College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

**Abstract** In order to optimize the processing parameters of nanostructured coating during laser cladding, the changes of nanoparticles size under high energy density laser are investigated. Based on the Brook's classical theory about grain growth and temperature field of laser cladding with finite element software Ansys, the nanoparticles growth of laser-clad nanostructured  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$  (mass fraction) coating prepared by plasma spraying are investigated. The effects of nanoparticles original size and laser-cladding region on grain growth are studied. Meanwhile, experiment of laser cladding on nanostructured  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$  prepared by plasma spraying is carried out. The results show that the experimental overall trend of nanoparticles growth is consistent with the calculated result during laser cladding process, which indicates that the nanoparticles growth theory based on Brook's theory is correct and reliable. The theory provides theoretical basis for nanoparticles growth during laser cladding process.

**Key words** laser technique; laser cladding; nanoparticles; particle growth; Brook's theory; temperature field

**OCIS codes** 140.3390; 000.4430; 350.3390; 310.1620

## 1 引 言

激光熔覆技术是新兴的激光技术与历史悠久的

金属热处理相结合的产物,由于高能量密度产生极快的加热速度、功率输出精确可控和熔覆表面区域

收稿日期: 2011-03-02; 收到修改稿日期: 2011-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(59975046,50305010)、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)和铜陵学院自然科学基金项目(2010tlxy20)资助课题。

作者简介: 王东生(1978—),男,博士后,讲师,主要从事激光加工技术、等离子体喷涂技术、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

的可选择性,激光熔覆技术已引起了广泛的关注和重视,并已广泛应用于表面涂层制备<sup>[1~3]</sup>。而纳米材料由于其结构的特殊性,具有一般材料难以获得的优异性能,为表面涂层性能的提高提供了有利的条件,在2000年徐滨士等<sup>[4]</sup>就提出了“纳米表面工程”的概念。现在将纳米技术与激光熔覆技术相结合,制备纳米涂层已成为当前国内外研究的热点<sup>[5~9]</sup>。

在激光熔覆过程中,由于激光束的高能量密度作用,被熔覆纳米材料将出现结构失稳,包括晶粒长大、相分离、第二相析出等过程<sup>[10]</sup>。由于这些变化过程导致微观结构的改变,尤其是晶界形态和数量的变化会影响到纳米涂层的性能,从而可能使纳米涂层失去其优异的机械或理化性能。因此研究纳米材料在激光熔覆过程中的热稳定性具有重要的实际意义。晶粒尺寸的热稳定性是纳米材料热稳定性研究的重要内容之一,因此研究激光熔覆过程中纳米颗粒的生长已成为一个重要的课题,它的研究对深入了解激光熔覆过程中纳米颗粒尺寸变化规律,进而通过控制条件达到控制晶粒生长从而改善材料性能的目的,既具有重要的理论价值,又具有极大的实际意义。

激光熔覆可分为同步式激光熔覆和预置式激光熔覆,目前常用的预置工艺有热喷涂法、粘结法和预置片法。本文以激光熔覆等离子体喷涂预置纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$ (质量分数, n-AT13)陶瓷涂层为研究对象,在 Brook 晶粒生长经典理论基础上,结合有限元软件 Ansys 计算的激光熔覆温度场,分析了激光熔覆过程中纳米颗粒的生长,并通过试验对计算结果进行了验证,以为激光表面熔覆制备纳米涂层的工艺参数优化提供参考。

## 2 激光熔覆过程中纳米颗粒生长理论

纳米材料的烧结通常分为两种情况<sup>[10]</sup>:1)较低温度的长时间烧结,此时表面扩散起主导作用,但表面扩散不能促进材料的烧结,只能引起颗粒的粗化,这对于纳米材料的制备是不利的;2)较高温度的快速烧结,试图以极高的升温速率和极短的保温时间,在烧结过程中快速跳过表面扩散阶段,直接进入晶界扩散阶段,以促进烧结,减少晶粒生长。激光熔覆是典型的快速加热、快速冷却加工方式,因此激光熔覆纳米涂层有利于纳米材料制备过程中晶粒过度生长问题的解决,从而获得优质的纳米结构涂层。

由于纳米材料中很高的界面体积百分数使之处

于较高的能量状态,因此晶粒长大的驱动力很高。从传统的晶粒生长理论中可知晶粒长大驱动力( $\Delta\mu$ )与晶粒尺寸( $d$ )的关系可由 Gibbs-Thomson 方程描述<sup>[10]</sup>:

$$\Delta\mu = \frac{4\Omega\gamma}{d}, \quad (1)$$

式中  $\Omega$  为原子体积,  $\gamma$  为界面能。由此可见,当晶粒尺寸  $d$  细化到纳米量级时,晶粒长大的驱动力很高,甚至某些纳米晶材料在室温下即可长大。然而同预测结果相矛盾,大量试验结果表明,通过各种方法制备的大多数纳米材料,在一定程度上都具有很高的晶粒尺寸稳定性,表现为其晶粒长大的初始温度较高。因此对纳米晶体材料晶粒尺寸热稳定性的研究对深入理解晶粒尺寸长大动力学本质机理具有重要的价值。

在等温加热的情况下,纳米颗粒生长规律可以用 Brook 模型进行估计分析<sup>[11,12]</sup>:

$$d^n - d_0^n = kt, \quad (2)$$

式中  $d$  表示时间  $t$  时刻纳米颗粒平均直径;  $d_0$  表示纳米材料原始的晶粒平均直径;  $t$  表示加热时间; 晶粒生长的指数  $n = 1 \sim 4$ ; 在理论上,在纯单项的烧结中,  $n = 2$ ; 在存在相间溶解的情况下,  $n = 3$ ; 在微孔存在的情况下,  $n = 4$ 。  $k$  遵循 Arrhenius 定律

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (3)$$

式中  $k_0$  表示与原子迁移有关的比率常数,其量级近似于材料的热振动频率。  $Q$  表示晶粒长大表面活化能(激活能),不同的温度对应不同的值,但变动不大,可近似为常数。晶粒长大过程表面活化能是晶粒尺寸稳定性的一个重要参数,它代表晶粒长大对应的扩散过程所需克服的能量势垒。摩尔气体常数  $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $T$  是烧结温度。

对于等离子体喷涂纳米团聚体粉末,在等离子体焰流中发生晶界吞并长大的驱动力在较低的温度和极短的时间内不足以使部分熔化区的纳米颗粒长大,因此,这些区域获得经过一定长大但仍保持在纳米尺度的纳米颗粒,虽然与原始纳米团聚体粉末相比,喷涂后的残留纳米颗粒致密性增加,但仍存在一些孔隙<sup>[13]</sup>,因此,对本论文研究对象,  $n = 4$ 。所以(2),(3)式变为

$$d^4 - d_0^4 = k_0 t \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right). \quad (4)$$

激光熔覆过程中纳米颗粒的温度历程是一个动态的、不等温的过程,(4)式是一个基于静态过程的经验公式,不能够直接用于分析激光熔覆的过程。

但可以把激光熔覆的过程划分为许多近似于静态作用的单元组成,进而可以初步描述激光熔覆纳米材料晶粒生长的过程。

激光熔覆的过程可近似地理解为由许多的熔池组成,对于每一个熔池的熔覆时间  $t$  可划分成若干个单元  $dt'$ ,在每一个时间单元  $dt'$  内,温度  $T(t')$  可以近似地认为是一个静态的加热过程,(4)式可以演化为适用于激光熔覆的模型分析公式

$$d^t - d_0^t = k_0 \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{Q}{RT(t')}\right] dt', \quad (5)$$

式中  $t'$  为激光熔覆过程中单元熔池晶粒生长的时间; $T(t')$  是  $t'$  时刻的局部温度。

### 3 激光熔覆过程中的温度历程

激光熔覆过程受到很多因素的影响,这些因素主要包括激光功率、光斑尺寸、激光束模式、扫描速度、材料性能(如吸收率、热传导率和熔点等)、熔覆层厚度和搭接量等。这些因素都不同程度地影响激光熔覆过程中的温度场,并通过一些过程输出参量(如熔池的形状和尺寸、熔池温度、熔池冷却速率等)体现出来。在整个激光熔覆过程中,影响纳米颗粒长大主要包括两个阶段:激光束照射时的快速加热及激光束离开时的急剧冷却过程。现在虽然可以采用 CCD 摄像机或红外线测温仪对激光熔覆过程中熔池温度进行测量,但获得的温度精度并不太高,而且只是熔池表面温度,无法获得熔池内部的温度分布,因此现阶段通过试验的方法获得整个熔池温度场的精确分布还有很大困难。实际中通常是采用数值模拟的方法掌握激光熔覆过程中温度场的分布及变化规律<sup>[14,15]</sup>。

本文中激光熔覆过程的温度历程也是通过数值模拟的方法获得的。基于前期的激光熔覆复合陶瓷涂层温度场模型<sup>[15]</sup>,利用 Ansys 有限元软件,建立了相应的激光熔覆等离子体喷涂 n-AT13 复合陶瓷涂层连续移动三维温度场计算模型。试样基体尺寸为  $20 \text{ mm} \times 16 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ,过渡层厚  $0.1 \text{ mm}$ ,陶瓷层厚  $0.35 \text{ mm}$ ,图 1 为相应的激光熔覆过程示意图。模拟计算的工艺参数为:激光功率  $500 \text{ W}$ ,矩形光斑尺寸  $5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ,激光扫描方向沿光斑  $3 \text{ mm}$  侧,扫描速度  $700 \text{ mm/min}$ ,材料表面对激光的吸收率  $0.7$ ,初始温度  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。激光扫描一道的时间是  $1.714 \text{ s}$ 。

图 2 分别为  $0.857 \text{ s}$ (激光扫描至试样中点)及  $5 \text{ s}$  时(一道扫描结束并冷却  $3.286 \text{ s}$ )的温度场云

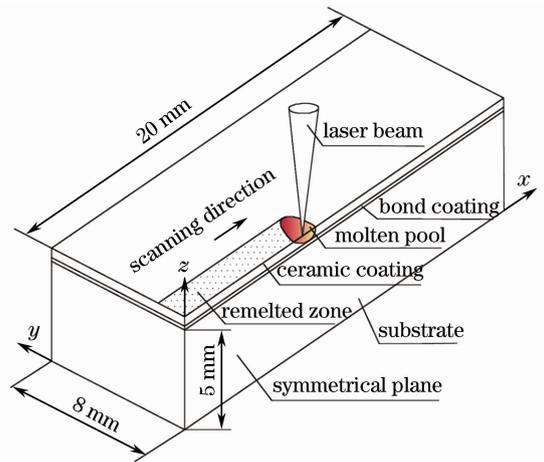


图 1 激光熔覆过程示意图

Fig.1 Schematic of laser cladding process

图。在图 2(a)中温度高于  $1890 \text{ }^\circ\text{C}$ (n-AT13 熔点)的区域为熔池区,在最高温度点深度方向上  $0.118 \text{ mm}$  处温度为  $1890 \text{ }^\circ\text{C}$ ,即表明熔化区的厚度大约为  $0.12 \text{ mm}$ 。图 2(b)表明结束扫描并冷却  $3.286 \text{ s}$  后整个试样温度已比较均匀,而且最高温度只是  $150.515 \text{ }^\circ\text{C}$ ,考虑到纳米颗粒在低温下晶粒生长非常有限,可以忽略不计,为减少激光熔覆过程中纳米颗粒生长的计算工作量,计算中的温度历程取为  $5 \text{ s}$ 。

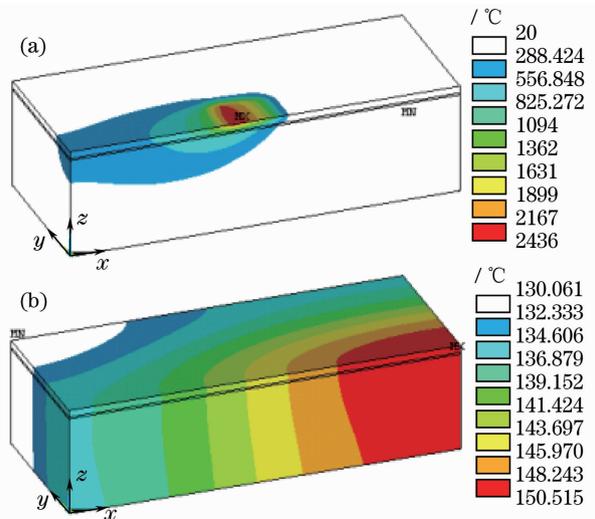


图 2 不同时刻的温度场云图。(a)  $0.857 \text{ s}$ ; (b)  $5 \text{ s}$

Fig.2 Temperature field distributions at different time.

(a)  $0.857 \text{ s}$ ; (b)  $5 \text{ s}$

图 3 为试样对称面上不同点的温度循环曲线 ( $Z_1, Z_2, Z_3$  和  $Z_4$  到涂层上表面的距离分别为  $0, 0.1, 0.2$  和  $0.35 \text{ mm}$ )。当激光束扫描到该点之前,该点温度缓慢升高;当激光束扫描到该点时,该点的温度迅速升至高温,随后又随着激光束的离开而迅速冷却,表现为激光加工典型的快速加热、快速冷却

特征。由于陶瓷材料的热传导系数较低,从试件的上表面开始,由表及里,随深度的增加各点温度循环曲线的最高温度依次降低;另外由于热传导影响,从上至下各点出现最高温度的时间略有滞后。

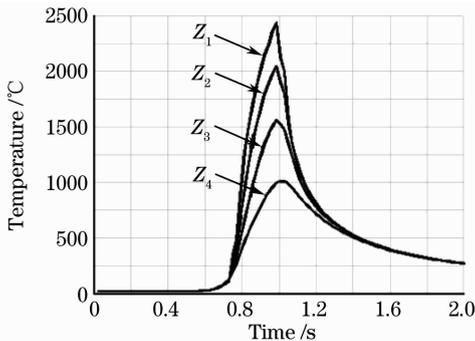


图 3 不同点的温度循环曲线

Fig. 3 Thermal circulation curves of different points

## 4 计算结果与分析

晶粒的生长与激光熔覆参数的关系非常复杂,对于不同的材料,其中的一些与材料有关的参数也是变化的。因此对纳米晶粒生长模型进行分析是一件很复杂的工作。由于在文献中查不到 n-AT13 的相关参数,因此借用文献[16]中多晶氧化铝的热激活能参数( $Q=5.43 \times 10^5$  J/mol),自扩散系数( $k_0=4.65 \times 10^{-17}$  m<sup>4</sup>/s)取自文献[17]中不同温度下扩散系数的平均值,对激光熔覆过程中纳米晶粒生长进行初步的分析,计算的温度历程包括预置涂层在激光熔覆时的加热以及随后的冷却过程,总时间为 5 s。

### 4.1 温度历程对纳米颗粒晶粒生长的影响

纳米颗粒在激光熔覆过程中的尺寸变化与其温度历程密切相关,而在熔覆过程中的温度历程又由其所处的位置决定,纳米颗粒的平均尺寸与其在激光熔覆过程中经历的最高温度的关系如图 4 所示(计算中假设纳米颗粒初始尺寸为 70 nm)。可以看出,纳米颗粒的生长对温度非常敏感,在涂层下部区域,经历的温度相对较低,其生长并不明显,但随着经历最高温度的增加,纳米颗粒尺寸急剧增加,如距涂层表面分别为 0, 0.1, 0.2 和 0.35 mm 的 4 点在激光熔覆过程中的最高温度分别为 2436, 2043, 1560 和 1010 °C,其熔覆后的尺寸分别为 171.97, 91.77, 71.50 和 70.07 nm。另外可知,在熔池上表面中心区域,由于经历温度较高,纳米粒子已经长大到亚微米量级,超过了通常的纳米尺度(1~100 nm)上限,从而可能会影响到整个熔覆纳米涂层的性能。要控制激光熔覆过程中纳米颗粒的生

长,关键是要控制其熔覆过程中经历的温度值及时间,因此采用大功率密度进行大厚度涂层(大熔池)的激光熔覆不利于纳米颗粒的保留,对于厚涂层,可采用小厚度多层激光熔覆的方法制备。

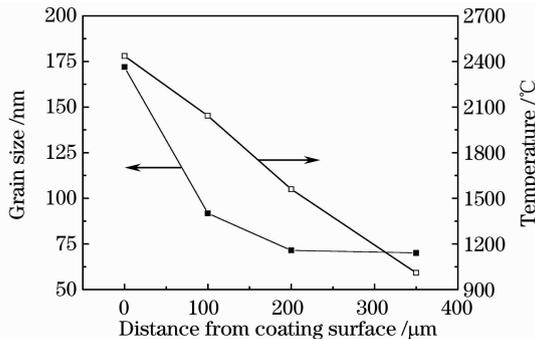


图 4 纳米颗粒温度历程对其晶粒生长的影响

Fig. 4 Effect of temperature evolution on grain size for nanoparticles

### 4.2 纳米颗粒初始尺寸对其晶粒生长的影响

为了比较不同初始直径纳米颗粒对其激光熔覆过程中晶粒长大的影响,分别对初始直径为 40, 70 和 100 nm 的纳米颗粒进行了计算,图 5 为相应的计算结果。可以看出,3 条曲线都呈类似的变化趋势,越靠近涂层表面晶粒长大越快,表现为曲线的上升越快。另外,小尺度纳米颗粒在同等条件下生长更快,随着其经历的最高温度的增加,不同尺度的纳米颗粒在激光熔覆后尺寸差距缩小,如涂层表面初始直径为 40, 70 和 100 nm 的颗粒经过熔覆后其尺寸分别为 170.91, 171.97 和 175.59 nm,趋于接近化。

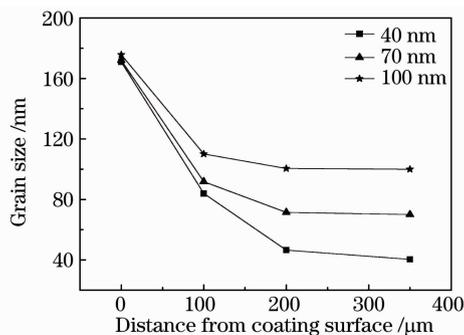


图 5 纳米颗粒初始尺寸对其晶粒生长的影响

Fig. 5 Effect of original size on grain size for nanoparticles

## 5 试验结果

试验所用陶瓷粉末是采用喷雾干燥然后烧结制备的美国 Inframat 公司牌号为 Nanox S2613P 的纳米团聚体粉末,其名义成分为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 13% TiO<sub>2</sub> (质量分数, n-AT13),粉末尺寸分布范围为 10~

50  $\mu\text{m}$ , 图 6 是相应的纳米团聚体粉末形貌。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, 试验参数见文献[13]。然后用 SLCF-X12 $\times$ 25 型  $\text{CO}_2$  激光器进行熔覆处理, 工艺参数见文献[18]。涂层横截面扫描电镜 (SEM) 形貌采用 JSM-7100F 型 (JEOL) 场发射扫描电镜 (FE-SEM) 观察。

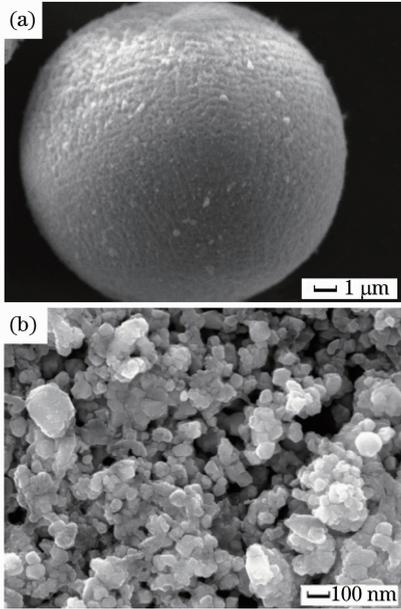


图 6 纳米团聚体粉末整体(a)和内部(b)形貌

Fig. 6 Morphologies of nanostructured agglomerated powder. (a) Overall morphology and (b) internal morphology

图 7 为等离子体喷涂 n-AT13 涂层的横截面 SEM 形貌。从图中可以看出, 喷涂后的纳米陶瓷涂层由一定比例的纳米颗粒完全熔化区和部分熔化区两部分组成。完全熔化区具有等离子体喷涂态的典型层状结构。根据组织结构的不同, 部分熔化区又分为两类<sup>[13]</sup>: 1) 由  $\text{TiO}_2$  选择性熔化而形成的由亚微米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子镶嵌在  $\text{TiO}_2$  基质相的三维网状或骨骼状结构的部分熔化区 1; 2) 由  $\text{TiO}_2$  选择性熔化区包围的未熔化纳米颗粒组成的部分熔化区 2, 如图 7(b) 所示。

对于未熔化区的纳米颗粒, 虽然在等离子体喷涂过程中经历了一定的高温作用, 但由于粉末内部的温度相对较低, 加上粉末在等离子体射流中停留时间较短, 纳米颗粒在焰流中发生晶界吞并长大的驱动力在极短的时间内不足以使其长大, 因此在此区域保留着经过一定长大但仍保持在纳米尺度的纳米颗粒。关于等离子体喷涂 n-AT13 涂层的组织结构及不同组织的形成机理在文献[13]中已做了详细

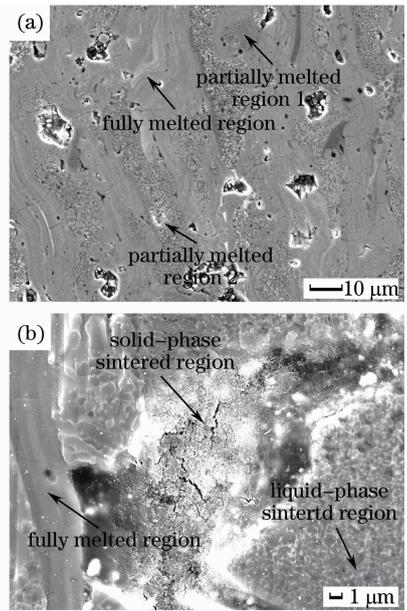


图 7 等离子体喷涂 n-AT13 层形貌

Fig. 7 SEM images of plasma-sprayed n-AT13 coating

讨论, 这里不再展开。

经过激光熔覆后, 在重熔区形成了晶粒细小且致密的等轴晶, 如图 8 所示, 这与通常情况下形成的沿热流方向生长的柱状晶组织有一定区别<sup>[18]</sup>。分析其原因主要有以下两点: 本实验中, 由于希望在熔覆后的陶瓷层中保留一定比例的纳米组织, 熔覆时采用了相对较低的激光功率和能量密度, 在激光熔覆时, 瞬间产生的高温使表面相对较薄的陶瓷层发生熔化, 形成高温熔池, 在随后的凝固过程中, 由于熔池较小, 过冷度较大, 从而形成细小致密的等轴晶; 其次, 原等离子体喷涂层中的部分熔化区 (残留纳米颗粒) 对熔覆后的陶瓷涂层组织也产生一定影响, 在激光熔覆过程中, 由于分散的纳米颗粒抑制了熔覆区晶粒的生长, 减缓了晶粒的异常长大, 因此形成了晶粒均匀细小的显微结构, 同时也减少了晶粒内部缺陷的数量。另外, 比较重熔区上部与下部的组织可以看出, 在重熔层上部由于经历的温度较高, 纳米颗粒已长大成亚微米粒子, 超出了纳米量级范围; 在重熔区下部由于经历的温度较低, 纳米颗粒仍然能保持在纳米尺度, 如图 8(c) 所示。

应该指出, Brook 晶粒生长经典理论是基于烧结过程的晶粒生长经验公式, 其是否适用于激光熔覆过程中还有待进一步证明。另外, 为方便计算, 除温度随时间变化外其余的参数都是按常数处理的, 这与实际情况有一定差别。但是试验结果与计算结果在总体趋势上吻合较好, 说明这种简化在现阶段材料参数不全、相关研究还有待进一步深入的情况

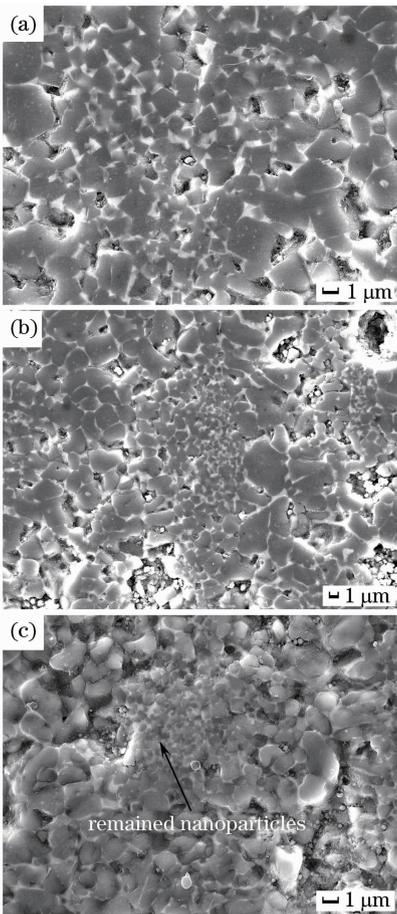


图 8 激光熔覆 n-AT13 (a)上部;(b)中部和 (c)下部的重熔层形貌

Fig. 8 SEM images of laser-remelted n-AT13 coating (a) top region; (b) middle region; (c) bottom region in the remelted zone

下是可取的。基于 Brook 理论的晶粒生长理论对激光熔覆过程中纳米颗粒生长的理论研究及工艺参数优化仍然具有一定的指导意义。

## 6 结 论

1) 在 Brook 晶粒生长经典理论的基础上,结合有限元软件 Ansys 数值模拟的激光熔覆温度场,计算了激光熔覆等离子体喷涂预置纳米  $Al_2O_3 + 13\% TiO_2$  (质量分数)涂层过程中纳米颗粒晶粒的生长。结果表明,纳米颗粒的生长对温度非常敏感,在温度相对较低时,其长大并不明显,但随着温度的继续升高,纳米颗粒尺寸急剧增加;小尺度的纳米颗粒较大尺寸的纳米颗粒生长更快;在高温下,不同初始尺度的纳米颗粒经熔覆后尺寸趋于接近。

2) 试验结果表明,在相对优化的激光熔覆工艺参数下,经过激光熔覆后,获得了细小等轴晶的重熔层,在重熔层上部的纳米颗粒长大成亚微米粒子,在

重熔区下部的纳米颗粒仍然能保持在纳米尺度,试验结果与计算结果在总体趋势上吻合较好。

## 参 考 文 献

- 1 R. S. Sun, Y. W. Lei, W. Niu. Laser clad TiC reinforced NiCrBSi composite coatings on Ti-6Al-4V alloy using a CW CO<sub>2</sub> laser[J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2009, **203**(10-11): 1395~1399
- 2 Liu Xiubo, Shi Shihong, Fu Geyan *et al.*. Ni-Cr-C-CaF<sub>2</sub> composite laser cladding on  $\gamma$ -TiAl intermetallic alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1591~1594  
刘秀波, 石世宏, 傅戈雁等.  $\gamma$ -TiAl 合金 Ni-Cr-C-CaF<sub>2</sub> 复合材料激光熔覆[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1591~1594
- 3 Ma Xingwei, Jin Zhuji, Gao Yuzhou. Effect of rare earth La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on microstructure and tribological property of laser cladding FeAl based alloys and TiC reinforced composites coatings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 271~276  
马兴伟, 金洙吉, 高玉周. 稀土 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对激光熔覆铁铝基合金及 TiC 增强复合材料涂层组织及摩擦磨损性能的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 271~276
- 4 Xu Binshi, Ou Zhongwen, Ma Shining *et al.*. Nano-surface-engineering[J]. *China Mechanical Engineering*, 2000, **11**(6): 707~712  
徐滨士, 欧忠文, 马世宁等. 纳米表面工程[J]. *中国机械工程*, 2000, **11**(6): 707~712
- 5 E. Yarrapareddy, R. Kovacevic. Synthesis and characterization of laser-based direct metal deposited nano-particles reinforced surface coatings for industrial slurry erosion applications [J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2008, **202**(10): 1951~1965
- 6 S. H. Zhang, M. X. Li, T. Y. Cho *et al.*. Laser clad Ni-base alloy added nano- and micron-size CeO<sub>2</sub> composites [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2008, **40**(5): 716~722
- 7 H. Y. Wang, D. W. Zuo, Y. L. Sun *et al.*. Microstructure of nanometer Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dispersion strengthened Ni-based high-temperature protective coatings by laser cladding[J]. *Transac. Nonferr. Metal. Soc. China*, 2009, **19**(3): 586~591
- 8 Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Shen Lida *et al.*. Research development of nanostructured coatings prepared by laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1698~1709  
王东生, 田宗军, 沈理达等. 激光表面熔覆制备纳米结构涂层的研究进展[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1698~1709
- 9 Li Yaozhong, Wang Cunshan, Li Ting *et al.*. Influence of nano-SiC particle on microstructure and properties of laser clad NiFeBSi alloy coating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1356~1360  
李耀忠, 王存山, 李 婷等. 纳米 SiC 颗粒对激光熔覆 NiFeBSi 合金涂层组织性能的影响 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1356~1360
- 10 Zhang Lide, Xie Sishen. Nano-Material and Nano-Structure[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005  
张立德, 解思深. 纳米材料和纳米结构 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005
- 11 R. J. Brook. Pore-grain boundary interactions and grain growth [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1976, **52**(1): 56~57
- 12 Li Wei, Gao Lian, Gui Linhua *et al.*. Analysis of the grain growth of nano Y-TZP materials[J]. *J. Inorganic Materials*, 2000, **15**(3): 536~540  
李 蔚, 高 灏, 归林华等. 纳米 Y-TZP 材料烧结过程晶粒生长的分析[J]. *无机材料学报*, 2000, **15**(3): 536~540
- 13 Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Shen Lida *et al.*. Microstructures and formation mechanism of plasma-sprayed nanostructured composite ceramic coatings [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2009, **19**(1): 77~83  
王东生, 田宗军, 沈理达等. 等离子喷涂纳米复合陶瓷涂层的组织结构及其形成机理[J]. *中国有色金属学报*, 2009, **19**(1):

- 14 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
- 15 Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Shen Lida *et al.*. Numerical simulation on the temperature field and microstructure analysis of laser remelting composite ceramic coating on TiAl alloy surface [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 224~230  
王东生, 田宗军, 沈理达等. 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[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 224~230
- 16 Li Jiguang, Sun Xudong, Wang Yarong *et al.*. Sintering kinetics of nanocrystalline  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  powder[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1998, **34**(2): 195~199  
李继光, 孙旭东, 王雅蓉等.  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  纳米粉末烧结动力学[J]. *金属学报*, 1998, **34**(2): 195~199
- 17 D. S. Horn, G. L. Messing. Anisotropic grain growth in  $\text{TiO}_2$ -doped alumina [J]. *Mat. Sci. Engng. A-Struct.*, 1995, **195**: 169~178
- 18 Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Shen Lida *et al.*. Microstructure and properties of laser-remelted nanostructured  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13% $\text{TiO}_2$  ceramic coatings[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, **38**(9): 1542~1546  
王东生, 田宗军, 沈理达等. 激光重熔纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13% $\text{TiO}_2$  陶瓷涂层组织及性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009, **38**(9): 1542~1546