

文章编号: 0258-7025(2001)10-0949-04

基材晶体取向对激光多层涂覆 微观组织的影响*

冯莉萍 黄卫东 李延民 陈 静 林 鑫 丁国陆

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室 西安 710072)

提要 采用镍基合金粉研究了激光多层涂覆过程中基材晶体取向对涂层凝固组织的影响规律。实验发现,在适当的工艺条件下,若基材表层的晶体取向与合金择优取向相近或一致时,可得到与基材晶体取向一致的涂覆层,整个涂层中呈现细小、规整且与基材组织连续的定向柱状枝晶,仅顶端存在一薄层取向改变的枝晶生长区。而当基材表层晶体取向与合金择优取向不同时,涂层中得到的是取向不规则的细小枝晶。

关键词 激光多层涂覆 激光近形制造 定向凝固 单晶 镍基合金

中图分类号 TG 665 文献标识码 A

Influences of Crystal Orientation of Substrate on Microstructure of Multi-layer Laser Cladding

FENG Li-ping HUANG Wei-dong LI Yan-min CHEN Jing LIN Xin DING Guo-lu

(State Key Laboratory of Solidification Processing,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract The influence of the crystal orientation of the substrate on microstructure is investigated by multi-layer laser cladding with the powder of nickel-base superalloy. With properly organized processing conditions, if the crystal orientation of the surface of the substrate is parallel to the preferred crystal orientation, claddings with the identical crystal orientation to the substrate can be obtained. The cladding layers exhibits fine and regular columnar dendrite except that a thin layer with altered orientation appears at the surface of the external layer. When the experiment was performed on other crystal faces of the substrate, there appears fine and random oriented dendrite.

Key words multi-layer laser cladding, laser engineered net shaping, unidirectional solidification, single crystal, nickel-base superalloy

激光多层涂覆是近年来激光涂覆领域中研究的热点。由于激光涂覆时热输入很集中,熔池中具有很高的正温度梯度(最高可达 10^6 K/m),因此激光熔池中一般不产生形核和等轴晶的生长,固液界面以外延方式推进,使得涂覆层组织受基底材质与晶体取向的影响很大。在工艺条件一定的情况下,选择不同的基板,可以获得满足不同要求的,组织可控且细小、致密的多层涂覆件。目前,已有研究者将其用来进行单晶叶片的修补^[1]。另外,将激光多层涂覆与快速原型技术相结合,就成为近年来发展非常迅速的激光立体成形又称激光近形制造(Laser

engineered net shaping,简称 LENS 技术^[2-5]。该技术的原理是首先在计算机中生成零件的三维 CAD 模型,再将它按一定厚度分层,将零件的三维信息转换成一系列二维信息,随后用激光涂覆或烧结的方法将材料进行逐层堆积,最终形成三维实体零件,采用该技术可实现金属零件的无模具制造。

本文利用一套自制激光多层涂覆系统进行多层涂覆实验,分析了基材晶体取向对涂层微观组织的影响规律,并对试件的组织结构特征进行研究。

1 实验方法

实验在 S850 型 5 kW CO₂ 激光器上进行,送粉系统由 JPSF-1 送粉器和带保护气帘的喷嘴组成,保护气为氩气。

* 航空基础科学基金(97z53002,97G53065)资助项目。

收稿日期:2000-07-14;收到修改稿日期:2000-10-13

采用逆向送粉法,系统工作原理如图1所示。在涂覆过程中,为保证涂覆每层材料时,有相同的光斑尺寸及粉末始终送入激光熔池中,在每涂完一层之后,喷嘴和激光头

沿z轴上升一个距离 ΔZ ,再涂覆下一层材料。 ΔZ 的数值与每层涂层的厚度大致相当。

表1 粉末成分(wt-%)

Table 1 Nominal composition of powder, in wt.-%

C	Cr	Co	Al	Ti	Mo	W	Nb	Zr	B	Ni
0.07	13	8	3.5	2.6	3.5	3.5	3.8	0.05	0.010	Other

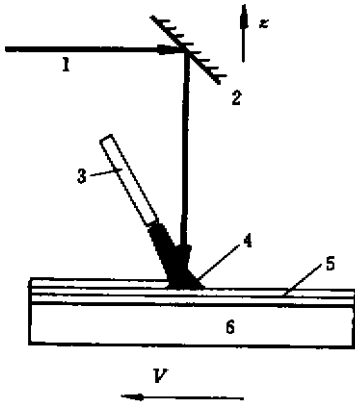


图1 激光多层涂覆实验示意图

1 激光束 2 反射镜 3 送粉器 4 熔池 5 涂层 6 基底

Fig.1 Schematic drawing of the multi-layer laser cladding apparatus

1: laser beam; 2: beam reflector; 3: powder feeder; 4: molten pool; 5: coatings; 6: substrate

粉末材料选用镍基高温合金粉,成分如表1所示。粉末粒度约为 $80 \sim 120 \mu\text{m}$,基材分别选择45#碳钢和镍基高温合金(Ni-16.0 Cr-3.66 Ti-2.47 Mo-5.45 W-9.08 Co-3.24 Al),试样尺寸为 $\phi 30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。为提高基材对激光的吸收率,实验前将基材表面进行喷砂处理。

2 实验结果与讨论

图2是在镍基定向凝固高温合金的(100)面上多层涂覆镍基合金粉的宏观组织照片,箭头所指上部为涂覆层,下部为基材。涂层实际厚度最大约3 mm,单层厚度约为0.4~0.6 mm,基底的粗大定向凝固晶粒肉眼可见,尺度大约在1~3 mm之间,基底的晶粒一直延伸到涂层的顶部,晶粒内部为细小规整的定向凝固组织。

图3是图2所示试样涂层底部到顶部不同微区

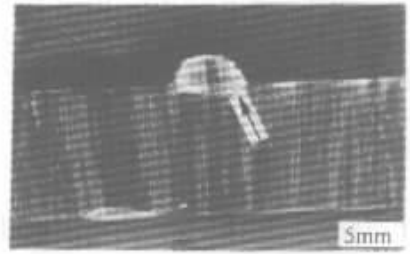


图2 基材为镍基高温合金(100)面的激光多层涂覆试样宏观组织

Fig.2 Macrostructure of multi-layer laser cladding sample on the crystal face(100) of Nickel-base superalloy

的光学显微照片。图3(a)上部的涂层组织相比下部的基底组织要细小得多。图3(b)为界面及其以上部位的多层涂覆试样组织,箭头所指之处为相邻涂层之间的界面,涂层中定向凝固组织细小而规整,枝晶一次间距为 $10 \sim 30 \mu\text{m}$ 。图3(c)为最外层涂层的上表面,可以看到存在约 $250 \mu\text{m}$ 厚的细小、取向改变的枝晶层。之所以出现这种生长规律,是因为在通常情况下,枝晶主轴的取向一般沿晶体的择优晶向生长,对于本文所研究的镍基合金,其主要相组成为面心立方晶体,择优晶向为100,而在临近熔池底部,由于热流取向与垂直向上的100方向夹角很小,涂层中的镍基合金沿原晶向竖直向上连续生长。对于在外表面所出现的一薄层取向改变的枝晶层,是因为在单层涂覆过程中,在激光熔池的顶部,热流方向将会由熔池底部的垂直方向改变为趋于与扫描方向平行^[6],使得熔池顶部枝晶的另一个水平择优取向100与热流方向的夹角变小而优先生长,改变了原来枝晶主轴的生长方向。而在多层涂覆时,由于激光的热流密度大,涂覆新层时将会把前一薄层的取向变化的枝晶层熔化并顺原垂直向上的100方向外延生长,这就保证了涂层生长的连续性。利用这一特点,可用激光外延生长方法获得定

向及单晶组织,也可用于进行单晶涡轮叶片的修复。

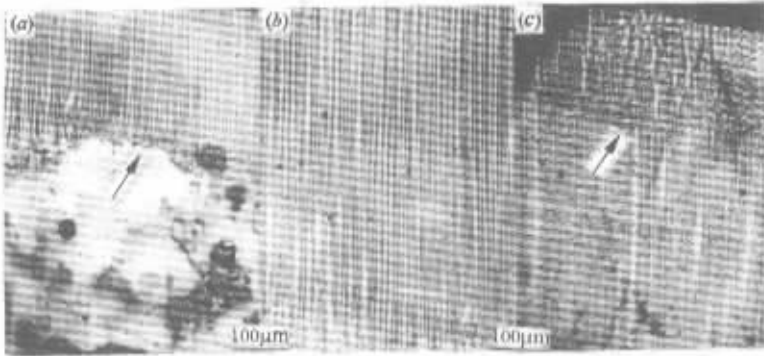


图3 基材为镍基高温合金(100)面的激光多层涂覆试件微观组织

(a)涂层与基底界面处中的微观组织 (b)激光多层涂覆试样的内部组织 (c)涂层顶部微观组织

Fig.3 Microstructure of multi-layer laser cladding sample on the crystal face(100)of Nickel-base superalloy

(a) microstructure of the interface of the multi-layer and the substrate (b) microstructure of the inner part of multi-layer (c) microstructure on the surface of external layer

图4是与此种镍基合金粉末相同成分的铸态组织光学显微照片,枝晶间距约为 $200 \sim 300 \mu\text{m}$,比前述激光多层涂覆组织大了一个数量级。文献[7]指出,枝晶一次间距 λ 与温度梯度 G 和凝固速度 V 存在如下关系

$$\lambda \propto G^{-a}V^{-b}$$

式中 a, b 为正的常数,且随合金系的不同而变化,因此当温度梯度和凝固速度增大时,枝晶的一次间距随之减小。在激光加工过程中,激光熔池中具有极高的温度梯度(高达 10^6 K/m)和很快的凝固速度(约 $2 \sim 5 \text{ mm/s}$),二者均比常规的铸造过程高几个数量级,由此造成了激光多层涂覆组织比常规的铸态组织小一两个数量级。而细小的凝固组织对应着优良的性能,因此激光多层涂覆和激光近形制造作为新兴的零件制造与修复方法,其优势是显而易见的。

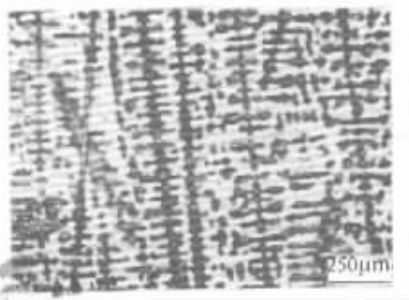


图4 镍基合金粉末铸态组织

Fig.4 As-Cast microstructure of Nickel-base superalloy

在与(111)晶面平行的镍基合金基材表面上涂覆镍基高温合金粉,从激光熔池的底部向上依次出现了白亮的

冶金结合层、竖直向上的胞晶层(厚约 $300 \mu\text{m}$)取向与扫描方向基本平行的柱状枝晶和取向比较杂乱的最外层枝晶层(图5)。之所以出现上述组织变化,是因为在熔池底部温度梯度 G 很高而凝固速度 R 值很低,随着距熔池底部的距离增大,温度梯度 G 逐渐减小和凝固速度 R 值逐渐增大,界面处的低速平界面失稳出现胞状生长,形成了细小的胞晶,胞晶间距约为 $20 \mu\text{m}$ 。受传热方向的影响,胞晶组织的取向与固液界面垂直。值得注意的是在涂层的中部(图5(a))观察到了典型的胞枝转变(箭头所指),图中枝晶二次臂清晰可辨,一次枝晶间距约为 $10 \sim 30 \mu\text{m}$ 。这是该部位 G/R 的值进一步减小,出现由胞晶向枝晶的转变所致。在熔池的表面出现紊乱的枝晶组织,这是由于表面热流转向使得枝晶的三个择优取向皆不平行于扫描方向所致[8]。在通常条件下,受热流方向的影响,激光熔池中的组织将垂直于熔池底部向上生长,但是在(111)面上进行涂覆时,并没有观察到向上连续生长的现象,而在涂层中部出现了转折(图5(b)箭头所指),可见,与胞晶生长不同,择优取向对枝晶生长方向的影响要较热流的影响大。

图6显示了基底为45#钢的多层涂覆试件的横截面显微组织。与前述在镍基定向凝固高温合金上涂覆的多层组织不同,凝固组织主要由致密的柱状枝晶组成,枝晶间距范围为 $20 \sim 40 \mu\text{m}$ 。受基底多晶取向的影响,涂层中的枝晶取向比较杂乱。

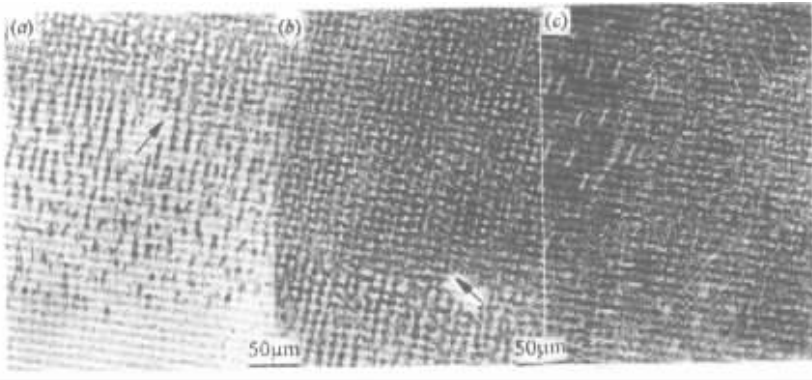


图 5 在镍基高温合金(111)面上进行激光多层涂覆试件微观组织

(a)界面处微观组织 (b)激光多层涂覆涂层内部微观组织 (c)涂层顶部微观组织

Fig.5 Microstructure of multi-layer laser cladding sample on the crystal face(111) of Nickel-base superalloy

(a)microstructure of the interface of the multi-layer and the substrate;(b)microstructure in the inner part of the multi-layer;(c)microstructure on the surface of the multi-layer

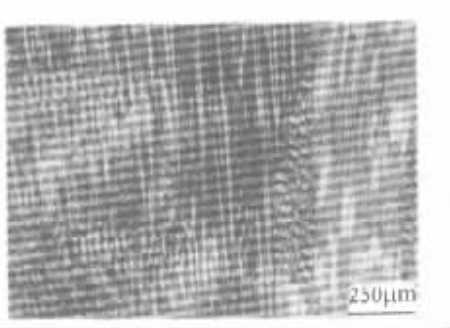


图 6 基材为碳钢的激光多层涂覆试件微观组织

Fig.6 Microstructure of multi-layer laser cladding sample on the 45# steel

参 考 文 献

- 1 M. Gäumann, H. Rusterholz, W. Kurz. Single Crystal Turbine Components Repaired by Epitaxial Laser Metal Forming. Materials for Advanced Power Engineering 1998', J. Lecomte-Beckers *et al.* (eds). Germany: Forschungszentrum Jülich, 1998. 1497 ~ 1486
- 2 J. L. Koch, J. Mazumder. Rapid Prototype by Laser Cladding. Presented at ICALEO 1993, Orlando FL, 1993. 556 ~ 565
- 3 J. E. Smugeresky, D. M. Keicher. Using the the laser engineered net shaping (LENS) process to reduce complex components from a CAD solid model. *SPIE*, 1997, **2993** 91 ~ 97
- 4 F. G. Arcella, David H. Abbott, M. A. House. Rapid laser forming of titanium structures. *Powder Metallurgy World Congress*, 1998, 1 ~ 6
- 5 David H. Abbott, Frank G. Arcella. Laser forming titanium components. *Advanced Materials & Process*, 1998, (5) 29 ~
- 6 YANG Sen. Research on Laser Rapid Directional Solidification with Ultra-high-Temperature, Ph. D. theses, Northwestern Polytechnic University, China, 2000
- 7 Hunt J D. In *Solidification and Casting of Metals*. London: The Metal Society, 1979. 3
- 8 HUANG Weidong, MAO Zhiying, ZHOU Yaohe. Influence of changing heat flow direction on crystal growth direction during directional solidification. *Acta Metall Sinica*, 1986, **22**(5):51 ~ 53 (English Lett.)

3 结 论

1) 研究了激光多层涂覆过程中基材晶体取向对涂层凝固组织的影响规律。实验发现,在工艺参数适当的情况下,利用激光熔池中外延生长的特点,若所选取的粉末材料与基材相同或相近,可以得到与基底晶体取向一致的定向涂覆层。

2) 由于激光熔池中很高的温度梯度和凝固速度,可以获得细小、致密的内部组织,与铸态组织相比其组织要细小一个数量级。