

[补充信息]

非真空激光定向凝固参数对 DZ22 合金熔覆层组织的影响

刘浩东1,应,喻辉2,戴京涛1,崔爱永1,魏华凯1,赵培仲1,卢长亮1

1 海军航空大学青岛校区,青岛 266041

2 中国人民解放军 92281 部队,潍坊 262200

[Supplementary Information]

Effect of Non-vacuum Laser Directional Solidification Parameters on Cladding Layer of Ni-based Superalloy

LIU Haodong^{1,⊠}, YU Hui², DAI Jingtao¹, CUI Aiyong¹, WEI Huakai¹, ZHAO Peizhong¹, LU Changliang¹

1 Qingdao Branch, Naval Aviation University, Qingdao 266041, China

2 No. 92281 Unit, People's Liberation Army of China, Weifang 262200, China

实验试剂与仪器

本实验初期采购的 DZ22 定向凝固高温合金为棒状,然后用线切割加工成两种不同规格的基材, 具体尺寸如图 S1 所示。其中半圆状基材[001]晶向沿厚度方向并与半圆面垂直,块状基材[001]晶向沿 长度方向且与其平行。将线切割后的试样上下两个表面打磨去除氧化层,然后用丙酮清洗干净后再在 其表面涂覆粉末,进行激光熔覆。



图 S1 基材尺寸 Fig. S1 Size of substrate

熔覆粉末是自行配置的,参照 DZ22 合金成分,将购买的单质粉末(200 目)按比例混合,混合 后的粉末成分见表 S1。

表 S1 熔覆粉末的合金成分

Table S1 Com	position	of claddi	ng powd	er					
金属元素	Cr	Co	W	Ti	Мо	AI	Fe	С	Ni
含量/wt%	18	15	1.5	5	3	2.5	0.5	0.1	Bal.

本实验进行激光熔覆研究所使用的设备是自主研制的 LER-3 型 Nd: YAG 激光在线抢修机以及日本



生产的 ERCR-HP3-AA00 型机械臂,其中激光发生器是 JHM-1GX-200B 型脉冲激光器,由武汉楚天激光设备有限公司生产。激光器是以 Nd: YAG 晶体为介质的固体激光器,采用双侧灯泵浦。激光束在半反镜后耦合到芯径 D=0.4 mm 的光纤实现激光的软传输。激光器具体参数见表 S2。

表 S2 激光器性能参数

Table S2 Performance parameters of laser

LER-3 型固体 Nd:YAG 激光器						
激光波长	1.06 µm					
最大输出功率	500 W					
最大工作电流	400 A					
脉冲宽度	0.1~15 ms					
最大单脉冲能量	60 J					
激光束发散角	<15 mrad					
能量不稳定度	<±5%					

本实验中激光器采用的各工艺参数范围: 电流 100~160 A、脉宽 5~10 ms、频率 4~20 Hz、扫描 速度 2~10 mm/s、光斑直径为 1 mm。还有一些参数通过测试获得,例如离焦量,首先是利用一块斜 薄纸板让激光依次紧密地在上面打一排点,其中半径最小的点距激光的距离就是焦距,然后朝远离工 件的 Z 方向调整激光头的位置,移动距离选取为 8 mm,即离焦量固定为 8 mm。激光熔覆实验过程中 采用氩气保护熔池不被氧化,送气量的选取方法是在一块金属板上铺一层薄金属粉末,在离焦量选定 的情况下开始不断加大送气量,直到平板上的粉末被吹开的直径大于熔覆层宽度,本实验选取送气量 为 1 L/min。

本实验使用的显微测试设备主要包括:KH-7700 三维体式显微镜(OM)、中船重工七二五所 ULTRA 55 场发射扫描电子显微镜(SEM)等。

激光定向凝固

激光熔池中液相与固相之间是紧密连接的,熔池内部热传递方向是液相一固相一基材,液相中的 形核质点也非常少,所以晶体生长主要是以固液界面向前推进的平面晶方式生长;在凝固过程中熔池 和基材也是紧密结合的,热传递介质单一,传热效率高,与传统的单辊等激冷技术相比,激光定向凝 固技术的冷却速度大得多。

在激光熔覆过程中,熔池内部各点的温度梯度是不同的,固液界面结合处的温度梯度 GL最大,而凝固速率 R最小接近于零,GL/R比值趋近于无穷大,固液界面以平界面生长形成平面晶;平面晶生长过程中,固液界面处的温度梯度 GL不断减小,凝固速率 R不断增大,界面开始呈胞状晶生长;随着凝固继续进行,基体温度开始升高,与熔池固液界面前沿接触的固相区是细晶平面晶,熔体温度梯度 也不断降低,冷却速度降低,凝固速度升高,界面开始呈树枝状生长;熔池表面温度梯度最低,凝固 速度最快,熔池流动导致内部形核质点往上层移动,液相中溶质聚集成分过冷变大,所以熔覆层顶部 最容易形成细小树枝晶或等轴晶组织。在扫描速度不变的情况下,熔池内部的温度梯度 GL 从底部到顶 部是不断减小的,而凝固速率 R 是不断增大的,熔池内部温度梯度 R 的变化见图 S2。





图 S2 熔池纵截面温度梯度

Fig. S2 Temperature gradient of longitudinal section of weld pool

激光以固定扫描速度辐照基材表面,合金粉末和基材一起熔融,并在激光光斑前后形成两个不同 区域:表面重熔凝固区、表面重熔熔化区。熔池形状与工件移动方向如图 S3 所示。随着光斑的移动, 两个区域也不断向前推进,激光扫描结束后得到致密的熔覆层。熔池内部的冷却速度主要通过激光功 率 *P* 和扫描速度 V_b控制,所以只要激光熔覆参数合适,就能获得沿基材外延生长的定向凝固组织。熔 池的熔深与激光功率和扫描速度之间存在一定关系:

$$D = \beta P^{\frac{1}{2}} V_b^{\gamma} \tag{S1}$$

式中: β和γ是只与材料性质有关的常数。在进行激光熔覆时,需要加氮气和氩气等惰性气体保护熔 池不被氧化。



Non-melting part

Movement direction of table

图 S3 激光熔覆原理图

Fig. S3 Schematic diagram of laser cladding





图 S4 温度梯度和凝固速度变化对晶体的影响

Fig. S4 Influence of temperature gradient and solidification velocity on crystal

在熔池一侧的凝固区的固液界面移动速度与激光扫描速度之间的关系为:

 $|R_n| = |V_h| \cos \theta$

(S2)

式中: *θ*为*R_n*和*V_b*之间的夹角,也叫凝固方向角。*θ*在熔深方向上的变化决定激光熔池形状,不同熔 深处的凝固速率以及凝固方向都与*θ*的大小(不同熔深处)密切相关。当*θ*=90°时(在熔池底部),凝 固速率接近于 0;当*θ*=0°时(在熔池顶部),凝固速率最大为 *R*_{max}。因为熔池底部温度梯度最大,所 以容易形成平面晶、柱状晶组织;熔池顶部温度梯度小,容易形成等轴晶、胞晶组织,图 S4 显示不 同凝固速度和温度梯度下的晶体生长形式。

与传统定向凝固方法熔体中枝晶生长类似,在激光定向凝固熔池内枝晶生长模型也适用。激光熔 池内枝晶的择优取向与固液界面推进方向不完全相同,有时会存在一定角度,Rappaz等在研究枝晶尖 端沿特定晶向的生长速度 V_{hkl}时得出其与扫描速度 V_b之间的关系:

$$\left|V_{hkl}\right| = \left|V_b\right| \frac{\cos\theta}{\cos\psi_{hkl}} \tag{S3}$$

式中: ψ_{hkl}是熔体表面法向与[hkl]晶向之间的夹角,如图 S5 所示,式(S3)表示枝晶生长方向与激光 束方向的关系。



图 S5 凝固界面移动方向与枝晶生长方向示意图

Fig. S5 Sketch of moving direction and dendrite growth direction of solidification interface

M mdlhd@sina.com



根据图 S5 所示的模型得出 cosψ_{hkl}的表达式, cosψ_{hkl}与[hkl]晶向在 x、y、z 三个方向的分量之间 的关系为:

 $\cos\psi_{hkl} = \vec{u}_{hkl} \cdot \vec{n} = u_x \cos\theta + (u_y \cos\phi + u_z \sin\phi) \sin\theta$ (S4)

式中: $u_x \, \cdot \, u_y \, \cdot \, u_z \, \mathbb{E}[hk]$ 晶向单位向量 \vec{u}_{kl} 在 $x \, \cdot \, y \, \cdot \, z$ 轴三个方向上的投影, $\phi \, \stackrel{\rightarrow}{n}$ 与y轴之间的夹

角; *n* 为凝固界面前进方向。