

感应加热消除激光直接成形 DD4 零件裂纹

梁少端, 张安峰, 王 潭, 李涤尘

西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049

摘要 针对单晶镍基高温合金 DD4 在激光直接成形过程中熔覆层开裂的问题, 利用不同工艺在定向凝固 DZ125L 基体上成形 DD4 零件, 研究了 DD4 零件熔覆层的裂纹种类和裂纹特征以及基本工艺参数对 DD4 零件裂纹率的影响。提出了利用感应加热辅助激光直接成形的方法来消除 DD4 零件熔覆层裂纹。结果表明, DD4 零件熔覆层裂纹分为凝固裂纹和液化裂纹两种, 其中绝大多数裂纹为液化裂纹; 降低激光功率, 增大扫描速度, 选取合适的搭接间距和提升量都有利于降低 DD4 零件熔覆层的裂纹率。试验中通过优化工艺参数, 可将 DD4 零件裂纹率降低至 0.230 mm/mm^2 。裂纹率会随着感应加热温度的升高而下降, 感应加热温度为 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 时裂纹率可降低至 0.017 mm/mm^2 。

关键词 激光技术; 激光材料加工; 激光直接成形; DD4 零件; 裂纹消除; 感应加热

中图分类号 TG249; TG113.25

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0202003

Elimination of Laser Direct Forming Crack on DD4 Parts by Induction Heating

Liang Shaoduan, Zhang Anfeng, Wang Tan, Li Dichen

State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract To solve the problem of cladding layer cracking of single-crystal Ni-based superalloy DD4 during the laser direct forming process, DD4 parts are fabricated on the directionally solidified DZ125L substrate by different processes. The kinds and the characteristics of cracks in cladding layers of DD4 parts and the effects of basic process parameters on the crack rate of DD4 parts are investigated. The laser direct forming process which is assisted by induction heating is proposed to eliminate the cladding layer cracks of DD4 parts. The results indicate that the cracks in the cladding layers of DD4 parts mainly include solidification crack and liquidation crack, and most of the cracks are the latter one. Reducing laser power, increasing scanning speed, and choosing appropriate overlapping space and elevation can decrease the crack rate of cladding layers of DD4 parts. The crack rate of the DD4 parts can be reduced to $0.230 \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-2}$ by optimizing process parameters. The crack rate of DD4 parts decreases with the elevation of the induction heating temperature, and the crack rate is $0.017 \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-2}$ when the induction heating temperature is $1200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Key words laser technique; laser material processing; laser direct forming; DD4 parts; crack elimination; induction heating

OCIS codes 140.3390; 140.6810; 160.3900

1 引言

单晶镍基高温合金 DD4 具有优异的高温持久性能和抗蠕变性能, 通常用于先进航空发动机涡轮叶片及其他在高温环境下工作的零部件^[1]。但是, 航空发动机涡轮叶片长时间工作在高温高压环境中, 即使是单晶高温合金也会经常发生诸如叶尖侵蚀和叶尖磨损等失效损坏, 从而导致叶片无法继续服役^[2]。利用激光金

收稿日期: 2016-07-12; **收到修改稿日期:** 2016-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(51275392)、陕西省科技统筹创新工程计划(2015KTTSYG03-06)

作者简介: 梁少端(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光直接成形、叶片修复方面的研究。

E-mail: liangshaoduan@sina.cn

导师简介: 张安峰(1956—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光增材制造及装备制造技术方面的研究。

E-mail: zhangaf@mail.xjtu.edu.cn(通信联系人)

属成形技术可以修复失效的空心涡轮叶片,从而延长其使用寿命,节约成本^[3-4]。除此之外,相对于其他材料,DD4 中晶界有害元素较少,材料本身的裂纹敏感度较低,且 DD4 工作温度高,因此更适用于单晶及定向凝固叶片的修复。激光直接成形过程中若温度梯度大,熔池凝固速度快,会造成熔覆层内应力很大且无法释放^[5-6],使得熔覆层出现裂纹,从而导致修复失败。

针对单晶镍基高温合金在激光金属成形过程中出现的开裂问题,McNutt 等^[7]研究了激光直接成形过程中单晶镍基高温合金 CM247LC 的裂纹形成机理以及工艺参数对裂纹的影响;Anderson 等^[8]针对在单晶镍基高温合金 CMSX-4 的激光熔覆焊接过程中出现的裂纹问题进行了研究,通过降低熔池凝固过程中产生的转向晶和等轴晶的体积分数来减少大角度晶界的产生,从而降低熔覆层的开裂倾向;Rottwinkel 等^[9-10]针对 CMSX-4 基体 V 型缺口的激光直接成形修复过程,研究了缺口处多道多层熔覆组织的裂纹消除机理;Henderson 等^[11]通过严格控制成形过程中稳定地向熔池输入热来实现单晶叶片无裂纹修复。国内研究主要侧重于普通等轴晶以及定向凝固高温合金在激光成形工艺过程中的开裂问题^[12-14],少数针对单晶镍基高温合金激光加工工艺的研究主要侧重于单晶镍基高温合金表面重熔和熔覆过程中的组织生长演变规律^[15],几乎未涉及单晶镍基高温合金成形过程中熔覆层裂纹的产生和消除问题。国外主要利用单道单层或者几道搭接的方法来研究单晶镍基高温合金在激光熔覆和成形过程中裂纹的产生机理。本文重点研究了单晶镍基高温合金 DD4 激光直接成形过程中零件熔覆层裂纹的产生机理以及基本工艺参数对零件裂纹的影响规律,通过感应加热辅助激光直接成形工艺大幅降低了 DD4 零件在成形过程中的裂纹敏感性,基本消除了 DD4 零件熔覆层裂纹。

2 试验方法

基于西安交通大学自制激光直接成形系统进行试验,其中激光器为 Nd:YAG 光纤激光器(型号:JK1002SM),其波长为 1064 nm,可输出连续光。试验中选用的基体材料为定向凝固 DZ125L 高温合金的粉末为单晶镍基高温合金 DD4 粉末。DD4 粉末呈圆球形,粒度为 50~100 μm,粉末和基体的化学成分如表 1 所示。试验中重点研究了对激光直接成形零件质量影响最大的 4 个工艺参数,即激光功率 P 、扫描速度 V 、搭接间距 ΔX 和提升量 ΔZ 。对这 4 个工艺参数进行四因素四水平正交试验(S1~S16),具体工艺参数如表 2 所示。成形的 20 层 DD4 零件的尺寸为 20 mm×10 mm(试验中激光光斑直径为 0.5 mm),对每一组工艺参数采用先轮廓后填充的扫描策略,扫描方式为 Z 字型,层与层之间采用交叉扫描方式。成形完成后,利用线切割将零件沿长度方向平均剖分为 3 部分,并将该方向剖面称为纵截面,如图 1 所示。试验中用裂纹率来评价零件成形件的内部裂纹情况,裂纹率定义为单位面积上裂纹的长度,单位为 mm·mm⁻²。统计每个截面上的裂纹率,取所有截面上裂纹率的平均值作为该零件成形件的裂纹率,正交试验统计结果如图 2 所示。试样纵截面裂纹率统计完成后,对试样沿宽度方向进行切割,将此方向的剖面称为横截面,进一步观察裂纹的特征。

表 1 DD4 粉末和 DZ125L 基体的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of DD4 powder and DZ125L substrate (mass fraction) %

Composition	C	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Ta	B	Nb	Ni
DD4 powder	0.004	8.970	7.260	1.940	6.910	3.940	3.830	4.220	<0.003	0.780	Balance
DZ125L substrate	0.100	9.200	9.990	2.080	6.900	4.620	2.470	3.730	0.015	—	Balance

表 2 四因素四水平正交试验工艺参数

Table 2 Process parameters of four-factor and four-level orthogonal tests

Sample No.	P/W	$V/(mm \cdot s^{-1})$	$\Delta X/mm$	$\Delta Z/mm$
1	110	6	0.15	0.06
2	190	10	0.15	0.10
3	230	12	0.15	0.12
4	150	8	0.15	0.08
5	150	12	0.25	0.06

Sample No.	P / W	$V / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta X / \text{mm}$	$\Delta Z / \text{mm}$
6	230	10	0.20	0.06
7	190	8	0.30	0.06
8	110	12	0.30	0.06
9	230	6	0.30	0.08
10	110	10	0.25	0.08
11	150	10	0.30	0.12
12	150	6	0.20	0.10
13	190	6	0.25	0.12
14	190	12	0.20	0.08
15	230	8	0.25	0.10
16	110	8	0.20	0.12

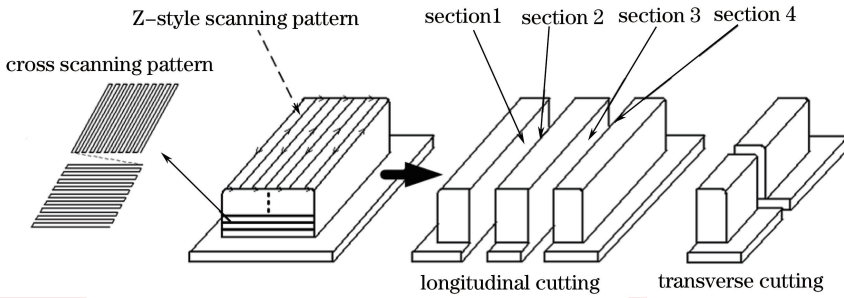


图 1 DD4 零件成形与线切割示意图

Fig. 1 Diagram of forming and wire cutting for DD4 part

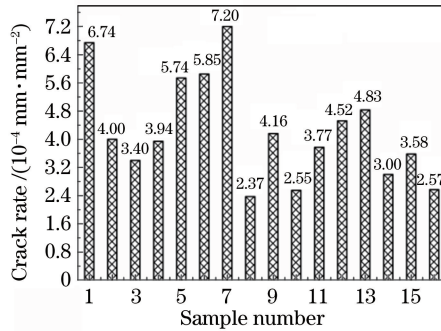


图 2 DD4 零件裂纹率统计结果

Fig. 2 Statistical results of crack rates of DD4 parts

利用感应加热辅助激光直接成形工艺进行 DD4 零件成形试验(L1~L6),原理示意图如图 3 所示。通过感应线圈将基体或已成形部位加热至设定温度。在成形过程中,通过直线滑台控制感应线圈,使其随成形

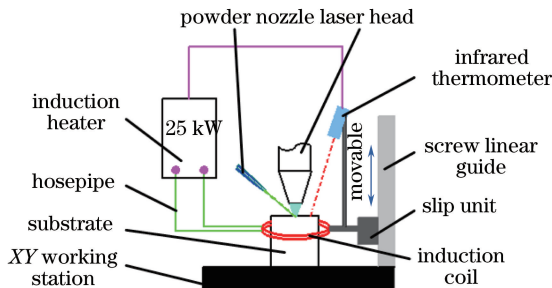


图 3 感应加热辅助激光直接成形示意图

Fig. 3 Diagram of laser direct forming assisted by induction heating

高度的增加而上升,从而实现随形加热。在定向凝固 DZ125L 圆柱基体上成形尺寸为 20 mm×10 mm 的 20 层 DD4 零件,具体工艺参数为: $P=110\text{ W}$, $V=12\text{ mm/s}$, $\Delta X=0.2\text{ mm}$, $\Delta Z=0.08\text{ mm}$,能量密度为 23.34 J/mm。试验 L1~L6 对应的感应加热温度分别为 400,600,800,1000,1200 °C。成形完成后,统计各组试样的裂纹率。

3 试验结果与讨论

3.1 DD4 零件裂纹特征

DD4 零件熔覆层典型裂纹如图 4 所示,主要表现为以下特征。

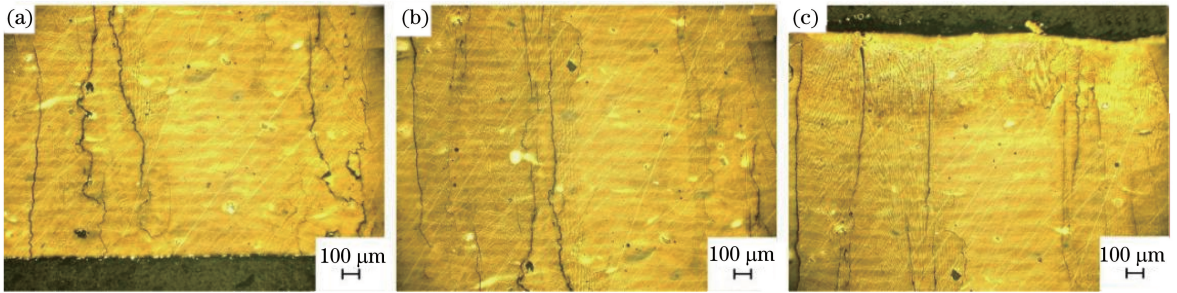


图 4 DD4 零件熔覆层典型裂纹(100×,纵截面)。(a) 底部; (b) 中部; (c) 顶部

Fig. 4 Typical cracks in cladding layers of DD4 parts (100×, longitudinal section). (a) Bottom; (b) middle; (c) top

1) 裂纹一般起源于两道搭接处,并沿着搭接区向上扩展,如图 5(a)所示。在 DD4 零件成形过程中,两道搭接区会发生重熔。搭接区位于熔池的边缘位置,搭接时基体为前一道熔覆层的圆弧表面,搭接区温度场和散热边界条件发生改变,使热应力环境变得复杂。该区域中的晶粒生长方向容易发生偏转,从而形成大角度晶界,破坏了定向凝固组织的连续外延生长,增大了裂纹产生的可能性。此外,两道搭接区容易出现一些沟壑等表面几何缺陷,成为应力集中和裂纹源敏感点,容易导致裂纹产生并沿该区域扩展。

2) 裂纹一般沿晶界开裂,并顺着沉积方向往上扩展。这是因为 DD4 零件的微观组织为沿沉积方向外延生长的细长柱状晶,方向性很强。晶粒呈细长柱状晶形态,横向晶界长度远大于纵向晶界长度。在凝固过程中,晶界为裂纹敏感区,由于横向晶粒的阻隔,裂纹一旦在晶界处形成,会沿着阻力最小的横向晶界方向扩展,贯穿层与层之间晶粒的结合处,并垂直扩展至多个熔覆层。

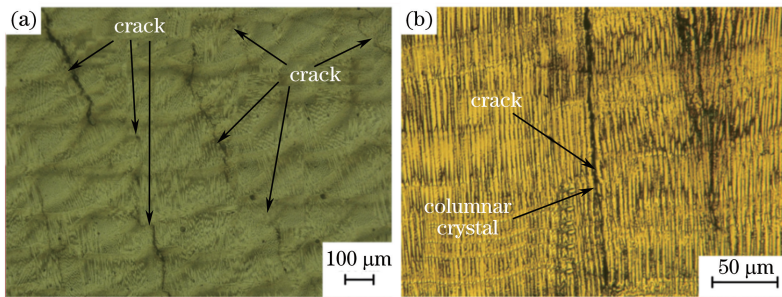


图 5 DD4 零件熔覆层裂纹。(a) 200×,横截面; (b) 1000×,纵截面

Fig. 5 Cracks in cladding layers of DD4 parts. (a) 200×, transverse section; (b) 1000×, longitudinal section

在激光直接成形过程中,镍基高温合金熔覆层产生的裂纹主要分为凝固裂纹和液化裂纹两种^[16-18]。凝固裂纹主要发生在熔池糊状区,在糊状区已凝固的枝晶连成一片,将未凝固的金属液隔离成一个个独立的液膜区间。已凝固区域进一步收缩,但得不到流动金属液补充,最终在收缩应力下被撕开,形成裂纹。镍基高温合金 DD4 的凝固温度为 1284~1339 °C,凝固温度范围较大,因此熔池在凝固过程中存在一个较大的糊状区,糊状区很容易产生凝固裂纹。在扫描电子显微镜(SEM)下观察到的 DD4 零件熔覆层某条裂纹的形态如图 6 所示。在裂纹的断面上,柱状枝晶的形貌清晰可见,晶界面相当圆滑,说明在裂纹形成时熔池还没有完全凝固,因此可以推断该裂纹为凝固裂纹。液化裂纹主要发生在热影响区,由于已凝固区域晶界处低熔点

共晶 γ/γ' 在激光热循环作用下熔化, 形成液膜, 大幅降低了晶界强度。液膜在热应力和其他局部约束力的作用下被撕扯开, 形成裂纹。图 7 为 DD4 熔覆层典型的液化裂纹, 裂纹边缘白色发亮带为残余液膜凝固后的产物。白色物质沿裂纹面连续均匀分布, 裂纹表现出沿晶界开裂的特征, 裂纹断面处晶界面圆滑, 存在树枝状突起且突起处发生了明显的液化再凝固。裂纹断面处呈现大小不一的土豆状, 这是晶间液膜撕裂的结果, 属于液化裂纹。DD4 零件熔覆层中绝大多数裂纹属于液化裂纹。

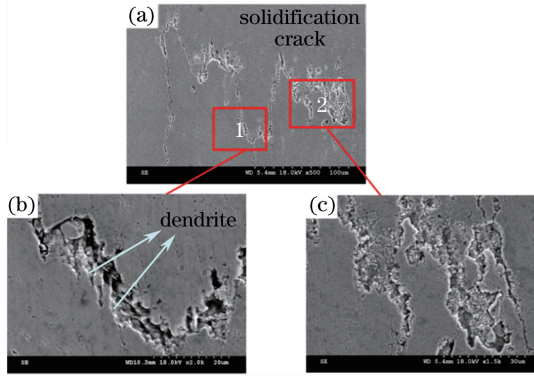


图 6 DD4 零件熔覆层凝固裂纹 SEM 图像(纵截面)。(a) 500 \times , 整体; (b) 2000 \times , 局部 1; (c) 1500 \times , 局部 2
Fig. 6 SEM images of solidification cracks in cladding layers of DD4 parts (longitudinal section).

(a) 500 \times , overall; (b) 2000 \times , local 1; (c) 1500 \times , local 2

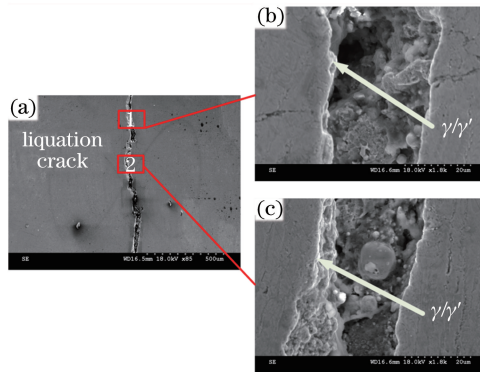


图 7 DD4 零件熔覆层液化裂纹 SEM 图像(纵截面)。(a) 85 \times , 整体; (b) 1800 \times , 局部 1; (c) 1800 \times , 局部 2
Fig. 7 SEM images of liquation cracks in cladding layers of DD4 parts (longitudinal section).

(a) 85 \times , overall; (b) 1800 \times , local 1; (c) 1800 \times , local 2

3.2 基本工艺参数对 DD4 零件裂纹的影响

对正交试验得到的裂纹率进行方差分析, 根据显著性水平, 得到 4 个工艺参数对 DD4 零件裂纹率的影响程度从大到小依次为提升量(0.001)、扫描速度(0.013)、激光功率(0.021)、搭接间距(0.160)。使 DD4 零件裂纹率最低的工艺参数组合为: $P=110\text{ W}$, $V=12\text{ mm/s}$, $\Delta X=0.2\text{ mm}$, $\Delta Z=0.08\text{ mm}$ 。每个工艺参数对裂纹率的影响如图 8 所示。由图 8(a)、(b) 可见, DD4 零件的裂纹率随激光功率的增大而增大, 随扫描速度的减小而增大, 激光功率 P 和扫描速度 V 主要影响熔池的热输入。熔池的热输入可以通过能量密度 E 来反映, E 可以表示为

$$E = \frac{4P}{\pi \times D \times V}, \quad (1)$$

式中 D 为激光光斑直径, $D=0.5\text{ mm}$ 。根据激光直接成形的工艺特点, 在 DD4 零件成形过程中, 已凝固部分的循环受热为产生液化裂纹的主要原因之一。提升量和搭接间距主要通过影响热循环的次数来间接影响液化裂纹的产生。在零件尺寸确定的前提下, 增大提升量可减少成形所需的层数, 进而减少已凝固部分的热循环次数; 增大搭接间距会减少每层成形所需的搭接道数, 进而减少已凝固部分的热循环次数。由图 8(c) 可以看出, 在搭接间距从 0.15 mm 增大至 0.3 mm 的过程中, 裂纹率呈现先降低后升高的趋势, 搭接间距为

0.2 mm 时,裂纹率最低。这是因为:搭接间距较小时,同样宽度的试样搭接道数增多,造成热循环次数增多,而且更容易造成热积累,使热影响区温度升高,增大了裂纹产生的可能性;但是,过大的搭接间距会造成成形表面不平整,在两道搭接区出现沟壑等几何特征,这些沟壑很容易成为应力集中点和裂纹源,从而造成裂纹数增多。由图 8(d)可以看出,随着提升量从 0.06 mm 升高到 0.08 mm,裂纹率显著下降。

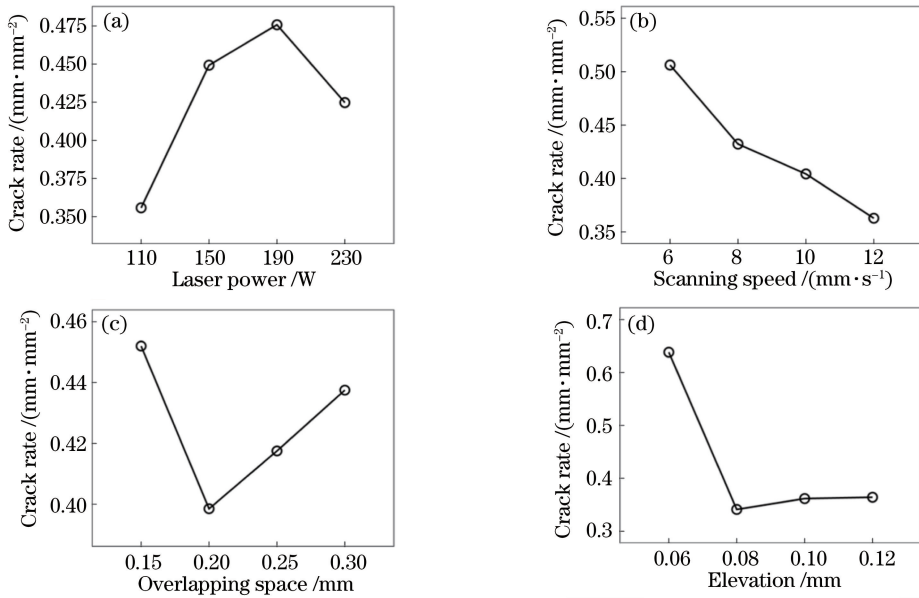


图 8 基本工艺参数对 DD4 零件裂纹率的影响。(a) 激光功率; (b) 扫描速度; (c) 搭接间距; (d) 提升量
Fig. 8 Effects of basic process parameters on crack rate of DD4 part. (a) Laser power; (b) scanning speed; (c) overlapping space; (d) elevation

图 9 为能量密度与裂纹率的关系折线图,可以看出,裂纹率与能量密度呈现大致相同的升降趋势。产生这种现象的原因为:1)液化裂纹主要产生于熔覆过程中的热影响区,能量密度较大时熔池的热输入较大,使得热影响区的范围变大,而且熔池和热影响区的温度升高导致更多已凝固区域晶界处的低熔点 γ/γ' 共晶组织液化并形成液膜,从而为液化裂纹的产生提供条件;2)熔池温度的升高使得温度梯度增大,晶界处液膜受到的拉应力也随之增大,从而使裂纹出现的可能性增大,最终导致更多液化裂纹的出现;3)熔池的热输入增大,导致熔池尺寸(特别是糊状区)增大,从而使凝固裂纹出现的可能性增大,因此裂纹率会随着功率密度的增大呈现上升趋势,反之则呈现下降趋势。因此,降低激光功率、提高扫描速度可以有效降低能量密度,从而使 DD4 零件裂纹率降低。若能量密度过低,夹渣、未熔物等缺陷产生的可能性会明显增加,导致裂纹源增多、零件熔覆层质量下降,从而影响成形稳定性。值得注意的是,如图 8(a)所示,当激光功率从 190 W 增大至 210 W 时,裂纹率出现了下降趋势,这是因为当激光功率增大到一定程度后,更多已凝固区域的温度会升高并维持一定时间,从而间接降低了这些区域的冷却速度,内应力得到一定程度的释放,最终造成裂纹率的降低。

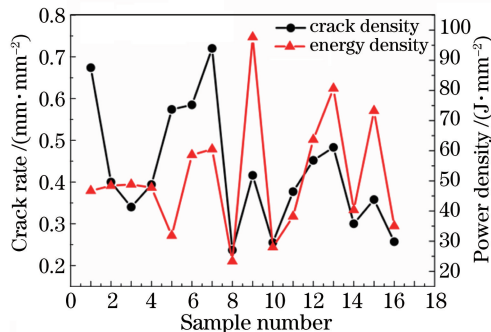


图 9 DD4 零件裂纹率与功率密度的关系
Fig. 9 Relationship between crack rate and power density of DD4 part

如图 10 所示,提升量增大,在进行第二层熔覆时,前一层重熔区和热影响区变小,降低了液化裂纹发生的可能性。但是,本试验中,在提升量由 0.08 mm 增大至 0.12 mm 的过程中,裂纹率变化不明显,如图 8(d) 所示。这是因为试验中以层数作为成形高度单位(所有零件试样成形 20 层),在相同的层数、不同的提升量条件下成形得到的零件高度不同,但是高度方向的热循环次数并未减少,裂纹会沿着成形高度方向扩展,因此裂纹率的变化不大。

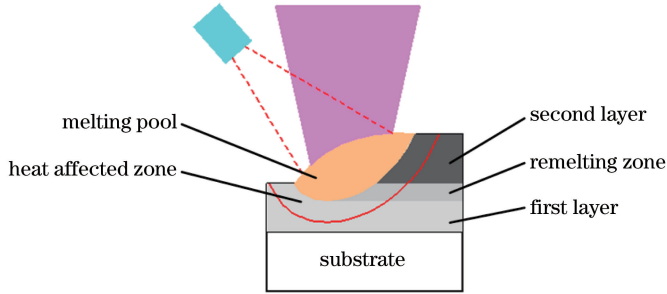


图 10 DD4 零件成形过程中各区域示意图

Fig. 10 Diagram of different regions during forming of DD4 part

3.3 感应加热温度对 DD4 零件裂纹的影响

感应加热温度对 DD4 零件裂纹率的影响如图 11 所示。当感应加热温度范围为 400~1200 °C 时,DD4 零件的裂纹率随着感应加热温度的升高而显著下降,当感应加热温度为 1200 °C 时,裂纹率下降至 0.017 mm⁻¹。感应加热温度为 1200 °C 条件下的熔覆层组织如图 12 所示。DD4 零件熔覆层组织裂纹基本被消除,只是在熔覆层顶部出现了微量细小的裂纹,这些裂纹通常以氧化物夹渣等缺陷为裂纹源并向上扩展,但扩展范围基本上只局限于最顶部 1~2 层熔覆层内。通过重熔或表面加工可以去除裂纹层,也可以通过提高粉末的质量来改善其球形度、降低空心粉和氧化物夹渣的含量、降低有害元素(硫、磷等)的含量等方法来消除熔覆层可能产生的微裂纹。感应加热温度为 1200 °C 时,DD4 零件熔覆层顶部微裂纹的形态及生长状态如图 13 所示。

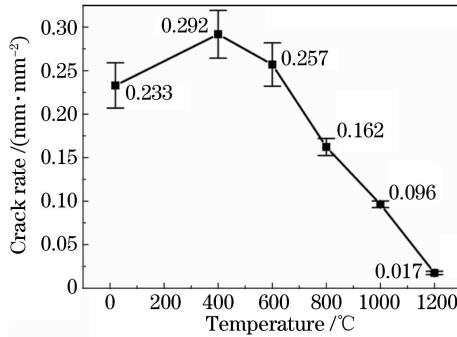


图 11 感应加热温度对 DD4 零件裂纹率的影响

Fig. 11 Effect of induction heating temperature on crack rate of DD4 part

随着感应加热温度的升高,裂纹率显著下降的原因主要有:1)感应加热温度升高,可以降低成形过程中熔覆层的热应力;2)较高的感应加热温度可以加快熔池的凝固速度并促进金属液的流动,从而加剧了裂纹的扩展。

在激光熔覆过程中,熔覆层热应力 σ ^[19] 可表示为

$$\sigma = \frac{E_c(a_c - a_m)(T_c - T_{m0})}{1 - \kappa}, \quad (2)$$

式中 E_c 为熔覆层材料的弹性模量; a_c 和 a_m 分别为熔覆层材料和集体材料的热膨胀系数; T_c 为熔覆层材料的熔点; T_{m0} 为成形时前一层基体的温度; κ 为熔覆层材料的泊松比。

利用感应加热对已成形区域进行加热,可以提高每一层熔覆前的基体温度,增大 T_{m0} 可明显减小熔覆过程中产生的热应力,从而降低裂纹产生的可能性。同时,提高成形时的温度可降低熔池的凝固速度,使内应

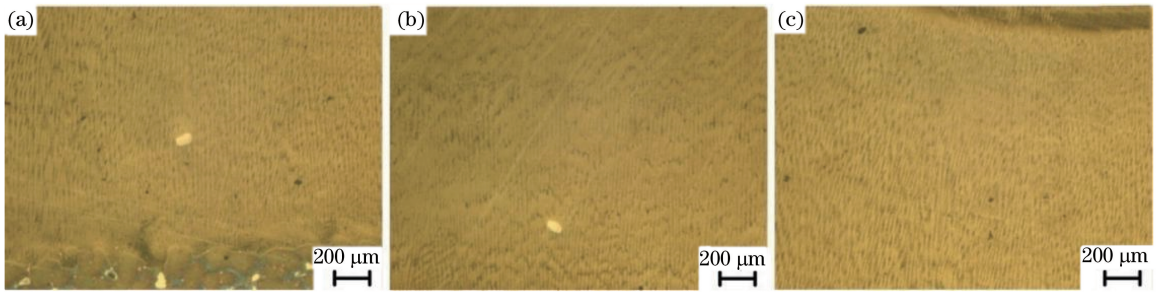


图 12 感应加热温度为 1200 °C 时的 DD4 零件熔覆层组织(100×, 纵截面)。(a) 底部; (b) 中部; (c) 顶部
 Fig. 12 Cladding layer organizations of DD4 part when induction heating temperature is 1200 °C (100×, longitudinal section). (a) Bottom; (b) middle; (c) top

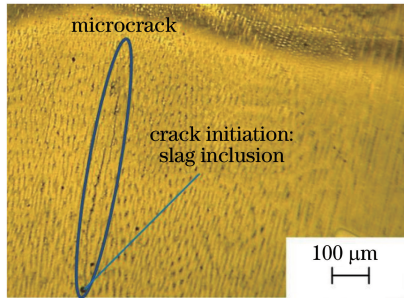


图 13 感应加热温度为 1200 °C 时的 DD4 零件熔覆层顶部微裂纹(200×, 纵截面)

Fig. 13 Microcracks in top layer of DD4 part when induction heating temperature is 1200 °C (200×, longitudinal section)

力得到充分释放,从而使得未凝固金属液体对裂纹进行填充自愈合,最终抑制了裂纹的扩展。

此外,由图 11 可以看出,感应加热温度为 400 和 600 °C 时,裂纹率分别为 $0.292 \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-2}$ 和 $0.257 \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-2}$,比无感应加热时的裂纹率($0.23 \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-2}$)高,这是因为熔覆层热影响区液化裂纹是晶界间低熔点共晶和热应力共同作用的结果。 γ/γ' 共晶组织在高温下液化,并在晶界处形成液膜,使晶界强度大幅降低,在热应力的作用下被撕开,形成裂纹。感应加热会使熔池及周围热影响区的温度升高,促进 γ/γ' 共晶组织的熔化,使晶界处液膜体积分数增大。在加热温度范围 400~600 °C 内,温度梯度和冷却速度依然维持在较高水平;热应力虽然有一定程度的降低,但是依然在液膜被撕开的应力临界值(与液膜的表面张力和液膜厚度有关^[20])之上,此时液膜体积分数的增加对裂纹的影响更加显著,从而导致裂纹数目的增多,同时裂纹的宽度也有所上升。

在无感应加热以及感应加热温度分别为 400 °C 和 600 °C 的条件下分别成形 DD4 零件,统计 DD4 零件中间纵截面上各条裂纹的宽度,如图 14 所示,可以看出,在感应加热温度为 400 °C 和 600 °C 条件下,大多数裂纹宽度比无感应加热条件下的裂纹宽度宽,这也间接证明了液膜的体积分数增大可使晶界的液膜厚度增加,从而导致裂纹宽度的增大。因此,裂纹的产生是液膜体积分数和热应力共同作用的结果,当感应加热温

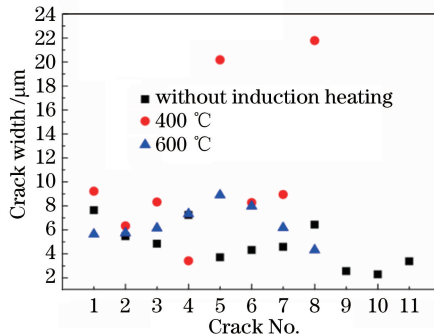


图 14 不同感应加热温度下的裂纹宽度

Fig. 14 Crack widths under different induction heating temperatures

度超过 600 °C 时,虽然液膜体积分数会增多,但是温度梯度和凝固速度显著减小,导致熔覆层热应力显著减小,不足以拉开液膜而形成裂纹;同时,凝固速度的降低会使熔覆层应力得到释放,熔池液体流动更充分,从而降低了凝固裂纹产生的可能性。所以,当温度大于 600 °C 时,熔覆层裂纹率开始降低,而到 1200 °C 时熔覆层基本无裂纹产生。综上所述,感应加热对 DD4 零件熔覆层裂纹的作用存在一个临界温度,当达到临界温度时,感应加热对裂纹的消除作用开始显现,并随着温度的进一步升高,裂纹率显著下降。

4 结 论

针对单晶镍基高温合金 DD4 在激光直接成形零件过程中熔覆层开裂的问题,研究了 DD4 零件熔覆层裂纹的种类以及裂纹的特征,分析了基本工艺参数对 DD4 零件裂纹率的影响规律,得到以下结论。

1) 单晶镍基高温合金 DD4 在激光直接成形过程中具有明显的开裂倾向。熔覆层裂纹主要包括凝固裂纹和液化裂纹两种,其中绝大多数裂纹为液化裂纹。该裂纹的产生是由低熔点共晶 γ/γ' 的液化和熔覆层内应力共同作用引起的。

2) DD4 零件裂纹率会随着激光功率的减小而减小,随扫描速度的增大而减小,随搭接间距的增大先减小后增大,随提升量的增大而减小并趋于稳定。通过工艺优化可以明显弱化 DD4 零件成形过程中的开裂倾向。

3) 利用感应加热辅助激光直接成形工艺可以进一步降低 DD4 零件裂纹率。裂纹率在感应加热温度为 400~1200 °C 范围内会随着感应加热温度的增加而显著降低,最终在 1200 °C 条件下基本消除了 DD4 零件熔覆层裂纹,获得良好的熔覆层组织。

参 考 文 献

- [1] Editorial Board of China Aeronautical Materials Handbook. China aeronautical materials handbook[M]. Beijing: China Standard Press, 2001: 806-813.
《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 806-813.
- [2] Zhang Lihui, Tang Dingzhong, Cao Xuegang. Damage and fracture characteristics of single crystal superalloy[J]. Failure Analysis and Prevention, 2012, 7(3): 148-152.
张丽辉, 唐定忠, 曹雪刚. 单晶高温合金损伤与断裂特征研究[J]. 失效分析与预防, 2012, 7(3): 148-152.
- [3] Liu Yesheng, Han Pinlian, Hu Shoufeng, *et al.* Development of laser additive manufacturing with metallic materials and its application in aviation engines[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(10): 62-67.
刘业胜, 韩品连, 胡寿丰, 等. 金属材料激光增材制造技术及在航空发动机上的应用[J]. 航空制造技术, 2014(10): 62-67.
- [4] Xue Lei, Huang Weidong, Chen Jing, *et al.* Application of laser forming repair technology on the aerial castings[J]. Foundry Technology, 2008, 29(3): 391-394.
薛蕾, 黄卫东, 陈静, 等. 激光成形修复技术在航空铸件修复中的应用[J]. 铸造技术, 2008, 29(3): 391-394.
- [5] Qi Baolu, Zhang Anfeng, Zhang Wenlong, *et al.* Research on mechanical properties of DZ125L columnar crystal blade directionally repaired by laser direct forming[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0603002.
齐宝路, 张安峰, 张文龙, 等. 激光定向生长修复 DZ125L 柱状晶叶片力学性能研究[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0603002.
- [6] Vilar R, Almeida A. Repair and manufacturing of single crystal Ni-based superalloys components by laser powder deposition - A review[J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27(s1): s17004.
- [7] McNutt P A. An investigation of cracking in laser metal deposited nickel superalloy CM247LC[D]. Birmingham: University of Birmingham, 2015: 14-21.
- [8] Anderson T D, Dupont J N. Stray grain formation and solidification cracking susceptibility of single crystal Ni-based superalloy CMSX-4[J]. Welding Journal, 2011, 90(2): 27-31.
- [9] Rottwinkel B, Schweitzer L, Noelke C, *et al.* Challenges for single-crystal (SX) crack cladding[J]. Physics Procedia, 2014, 56: 301-308.
- [10] Rottwinkel B, Nölke C, Kaierle S, *et al.* Crack repair of single crystal turbine blades using laser cladding technology[J]. Procedia CIRP, 2014, 22: 263-267.
- [11] Henderson M B, Arrell D, Larsson R, *et al.* Nickel based superalloy welding practices for industrial gas turbine applications[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2004, 9(1): 13-21.

- [12] Zhao Xiaoming, Chen Jing, He Fei, *et al.* The cracking mechanism of Rene88DT superalloy by laser rapid forming[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, 36(2): 216-220.
赵晓明, 陈 静, 何 飞, 等. 激光快速成型 Rene88DT 高温合金开裂机理研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(2): 216-220.
- [13] Zhong M, Sun H, Liu W, *et al.* Boundary liquation and interface cracking characterization in laser deposition of Inconel 738 on directionally solidified Ni-based superalloy[J]. *Scripta Materialia*, 2005, 53(2): 159-164.
- [14] Xi Mingzhe, Gao Shiyu. Microstructure and mechanism of cracks forming of Rene 80 high-temperature alloy fabricated by laser rapid forming process[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0803008.
席明哲, 高士友. 激光快速成形 Rene 80 高温合金组织及裂纹形成机理[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0803008.
- [15] Zhang F, Tan H, Chen J. Elimination of turned dendrite in laser multilayer deposition of Rene88DT superalloy on DD3 single crystal[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(4): 041401.
- [16] Huang Weidong, *et al.* Laser solid fabrication[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007: 250-276.
黄卫东. 激光立体成形[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007: 250-276.
- [17] Wang N, Mokadem S, Rappaz M, *et al.* Solidification cracking of superalloy single-and bi-crystals [J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(11): 3173-3182.
- [18] Ojo O A, Chaturvedi M C. Liquation microfissuring in the weld heat-affected zone of an overaged precipitation-hardened nickel-base superalloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2007, 38(2): 356-369.
- [19] Acharya R. Multiphysics modeling and statistical process optimization of the scanning laser epitaxy process applied to additive manufacturing of turbine engine hot-section superalloy components[D]. Atlanta: Georgia Institute technology, 2014: 50-80.
- [20] Miller W A, Chadwick G A. On the magnitude of the solid/liquid interfacial energy of pure metals and its relation to grain boundary melting[J]. *Acta Metallurgica*, 1967, 15(4): 607-614.