

扫描方式对激光金属直接成形 DZ125L 高温合金薄壁件开裂的影响

Doan Tatkhao 李涤尘 卢秉恒 张安峰 贺斌 Do Xuantuoi

(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 为了消除激光金属直接成形 DZ125L 高温合金薄壁件中的裂纹,研究了激光扫描方式对薄壁件(单道多层)熔覆层应力分布和开裂的影响。对比了两种扫描方式(单向扫描和往复扫描)对薄壁件的应力分布和开裂的影响。模拟和实验结果表明,单向扫描方式下薄壁件的应力分布不均匀,引起薄壁件的两端出现严重的翘曲且中间部分出现裂纹;往复扫描方式下薄壁件的应力分布相当均匀,没有出现翘曲和裂纹,熔覆层表面比较平整。

关键词 激光光学;扫描方式;薄壁件;残余应力;裂纹

中图分类号 TG249;TG39 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1003002

Effect of Scanning Methods on the Cracking of the DZ125L Superalloy in Laser Direct Metal Forming

Doan Tatkhao Li Dichen Lu Bingheng Zhang Anfeng He Bin Do Xuantuoi

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract The effect of scanning methods on stress distribution and cracking of the DZ125L superalloy thin-wall structures is investigated numerically and experimentally. The results demonstrate that the stress distribution is not uniform in single-direction scanning method, which leads to warping in both sides of the structures and cracking in the middle regions. However, in back-and-forth scanning method, the stress distribution is relatively uniform, and the fabricated parts have smooth surface without any warping or cracking.

Key words laser optics; scanning method; thin-wall; residual stress; crack

OCIS codes 000.4157; 350.3390; 140.3390

1 引言

DZ125L 镍基高温合金是航空和航天零件的主要材料。叶片、加强筋、散热片等薄壁结构用传统的铸造、锻造等方法加工困难,用激光金属直接成形的的方法成形 DZ125L 薄壁件对航空和航天零部件制造有重要影响。然而, DZ125L 高温合金是一种热裂性较强的材料,在成形过程中熔覆层容易产生裂纹。熔覆层开裂直接影响到零件质量。

在以前激光直接成形制造(LDMF)的研究中许

多方法被用来解决成形件开裂问题,主要的方法有:调整材料的成分增加塑性^[1,2]、优化成形工艺参数^[3~7]、采用多种工艺复合制造^[8~10]、预热基板^[11,12]和成形后热处理^[13]。这些研究比较有效地减少了激光金属成形件的裂纹,然而很少有文献详细研究激光金属直接成形 DZ125L 高温合金薄壁件应力分布以及裂纹形貌和分布的问题。本文从不同扫描方式对薄壁件应力分布以及裂纹形貌的影响入手,模拟了各种扫描方式对激光金属直接成形

收稿日期: 2012-04-19; 收到修改稿日期: 2012-06-18

基金项目: 国家 973 计划(2007CB707704)和国家自然科学基金(51275392)资助课题。

作者简介: Doan Tatkhao(1980—),男,硕士研究生,主要从事激光金属直接成形方面的研究。

E-mail: doankhoactm@gmail.com

导师简介: 李涤尘(1964—),男,博士,教授,主要从事控形控性快速成形制造技术及其精密成形工艺和不锈钢抗菌材料抗菌机理与性能等方面的研究。E-mail: dcli@mail.xjtu.edu.cn

DZ125L 薄壁件应力分布的影响规律。实验验证了各种扫描方式下薄壁件的开裂现象。最后在优化的工艺参数条件下制造出了没有裂纹的 DZ125L 高温合金薄壁件。

2 建立数值模型

2.1 建立模型

通过有限元分析软件(ANSYS)的“生死单元”技术模拟激光金属直接成形金属薄壁件的温度场和应力场。在建模过程中,熔覆材料为 DZ125L 高温合金粉末,材料的热物理参数如表 1 所示^[14];基板材料为 316L 不锈钢,材料的热物理参数如表 2 所示^[15]。模型尺寸如图 1(a)所示,基板大小为 50 mm×10 mm×3 mm;熔覆层大小为 40 mm×0.5 mm×1 mm(10 层)。激光的扫描方式如图 1(b)和(c)所示。为了减少计算量,熔覆层采用较细的规则映射

网格;基板底部及基板与零件过渡处分别采用较粗的六面体网格和四面体网格如图 2 所示。基板单元采用 SOLID98 四面体十节点耦合单元,熔覆层单元采用 SOLID5 六面体八节点的耦合单元。工艺参数如表 3 所示。基板的初始温度是周围的环境温度(即 20 ℃);边界条件为对流传热;潜热处理被认为随温度变化的比热容;激活的单元熔池在熔化温度,忽略熔池的对流传热;开始阶段的应力假设是自由应力;基板的参考温度是环境温度,熔覆材料的参考温度是熔化温度。每 0.05 s 的时间步长激活一个 0.5 mm×0.5 mm×0.1 mm 的单元,加载热流的面积是 0.5 mm×0.5 mm,热源模型是均匀分布。最后通过激活相应单元的方法来定义扫描方式的不同如图 1(b)和(c)所示。应力分析过程包括传热分析和应力分析。

表 1 DZ125L 高温合金粉末的热物理参数

Table 1 Parameters of the DZ125L superalloy powder

Temperature /℃	Elastic modulus /(10^9 Pa)	Coefficient of thermal expansion / ($10^{-5}/\text{℃}$)	Density / (kg/m^3)	Thermal conductivity / [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{℃})$]	Thermal capacity / [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{℃})$]	Poisson's ratio
20	211	1.48	8230	8.00	350	0.33
200	197	1.52	8230	9.67	385	0.33
400	188	1.56	8230	13.44	456	0.33
600	176	1.62	8230	16.79	498	0.33
800	157	1.69	8230	19.63	506	0.34
1000	120	1.75	8230	19.43	473	0.35
1100	118	1.80	8230	19.00	443	0.35

表 2 316L 不锈钢基板的热物理参数

Table 2 Parameters of the 316L stainless substrate

Temperature /℃	Elastic modulus /(10^9 Pa)	Coefficient of thermal expansion / ($10^{-5}/\text{℃}$)	Density / (kg/m^3)	Thermal conductivity / [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{℃})$]	Thermal capacity / [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{℃})$]	Poisson's ratio
20	195.1	1.524	7966	13.31	470	0.267
200	185.7	1.643	7893	16.33	508	0.290
400	172.6	1.744	7814	19.47	550	0.322
600	155.0	1.821	7724	22.38	592	0.296
800	131.4	1.883	7630	25.07	634	0.262
900	116.8	1.911	7583	26.33	655	0.24
1000	100.1	1.938	7535	27.53	676	0.229
1100	81.1	1.966	7486	28.67	698	0.223
1200	59.5	1.995	7436	29.76	719	0.223
1420	2.0	2.070	7320	31.95	765	0.223

表 3 工艺参数

Table 3 Process parameters

Laser power /W	Table feeding rate /(mm/s)	Powder mass flow rate /(g/min)	Laser beam diameter /mm
230	10	2.6	0.5

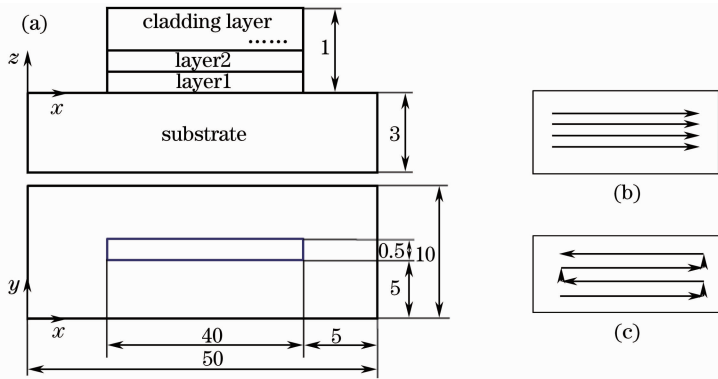


图 1 模型和激光扫描方式的描述。(a)模型;(b)单向扫描;(c)往复扫描

Fig.1 Schematic presentation of model and laser scanning method. (a) Model; (b) single direction scanning; (c) back-and-forth scanning

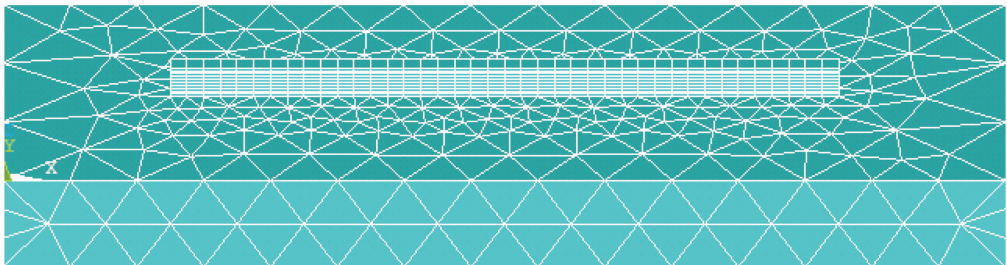


图 2 基板和熔覆层的有限元模型

Fig.2 Finite element model of the substrate and cladding layer

2.2 温度场和应力场分析

2.2.1 模型的温度场

图 3 为两种扫描方式下薄壁件完成第 10 层过 1 s 后温度的分布情况。从图 3 可看出,两种扫描方式下的温度梯度不相同。这是由于扫描方式的特点,单向扫描方式下,激光束扫描完一层,停 1 s 再

向 Z 方向增高,再返回到原点然后才开始扫描下一层,这样导致前一层的冷却时间较长,所以熔覆层的温度梯度大;往复扫描方式下,激光束扫描完一层,停 1 s 再向 Z 方向增高然后立刻扫描下一层,前一层的冷却时间缩短导致温度梯度较小,这样效果相当预热基板的效果即降低温度梯度。

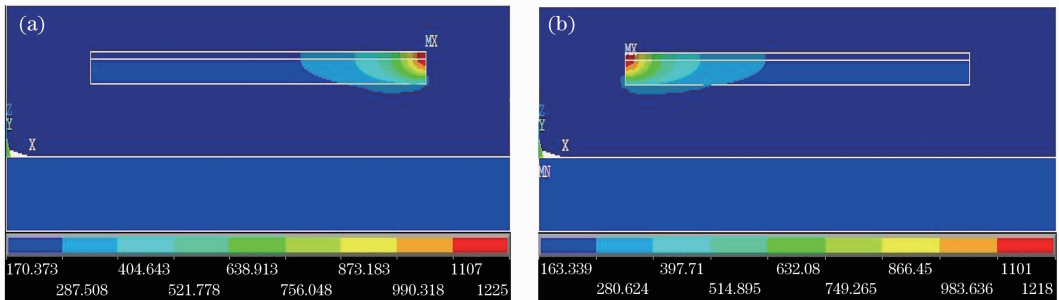


图 3 不同扫描方式下模型的温度场分布。(a)单向扫描;(b)往复扫描

Fig.3 Temperature distribution of the cladding layer after the last deposition step.

(a) Single direction of scanning; (b) back-and-forth scanning

2.2.2 模型的应力场

1) 单向扫描方式下的各个方向应力

图 4 为单向扫描方式下薄壁层 X, Y, Z 三个方向的应力分布情况。图 4(a)为单向扫描方式下的 X 方向(平行扫描方向)应力分布图,从图中可看出薄壁件的中部应力为拉应力,应力方向沿着扫描方

向(从左到右),应力倾向下降,应力数值为 500~200 MPa;沿着熔覆层高度,应力倾向增大,应力集中在中部的左边。图 4(b)为单向扫描方向下的 Y 方向(厚度方向)应力分布图,中部的应力分布相当均匀,应力数值为-20~20 MPa 的范围;左端的应力是压应力,应力数值约为-700 MPa;右端的应力

是拉应力,应力数值约为 900 MPa。图 4(c)为单向扫描方向下的 Z 方向(垂直扫描方向)应力分布图,中部的应力分布相当均匀;沿着薄壁件的高度,应力

倾向增大,从压应力转为拉应力,但应力数值较小,为-100~70 MPa 的范围。X 方向的应力大于 Y、Z 方向的应力,薄壁件的主应力为 X 方向应力。

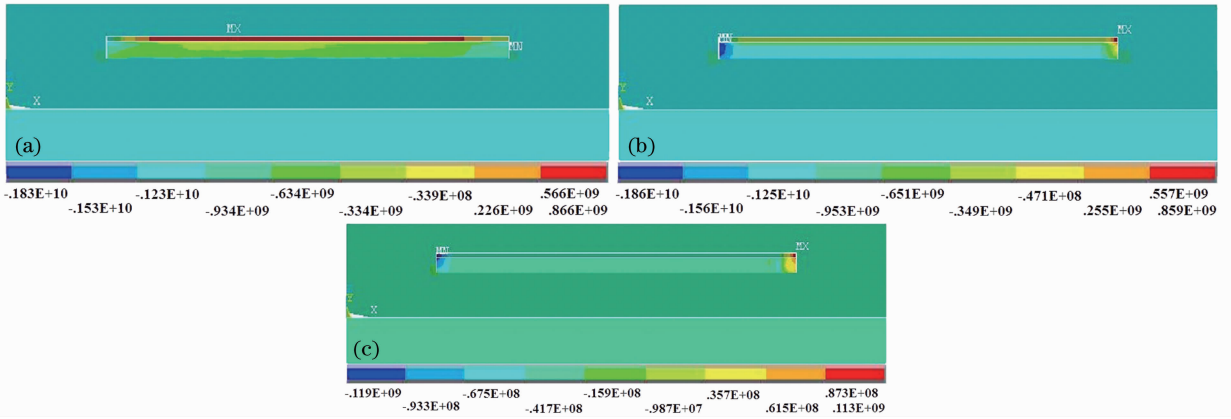


图 4 单向扫描方式下薄壁层 X (a),Y (b)和 Z (c)三个方向的应力分布

Fig. 4 Stress distributions of (a) X, (b) Y and (c) Z direction under single direction scanning

2) 往复扫描方式下的各个方向应力

图 5 为往复扫描方式下薄壁层 X,Y,Z 三个方向的应力分布情况。图 5(a)为往复扫描方式下的 X 方向应力分布图,从图中可看出应力集中在中部,应力为拉应力,应力方向沿着扫描方向(从左到右),应力数值为100~250 MPa 的范围。图 5(b)为往复扫描方式下的 Y 方向应力分布图,从图中可看

出薄壁件的两端和中部的应力分布相当均匀,应力数值为-80~-20 MPa 的范围。图 5(c)为往复扫描方向下的 Z 方向应力分布图,薄壁件上的应力分布相当均匀;沿着薄壁件的高度,应力倾向增大,从压应力转为拉应力但应力数值较小,为-80~20 MPa 的范围。X 方向的应力,大于 Y,Z 方向的应力即 X 方向的应力为主应力。

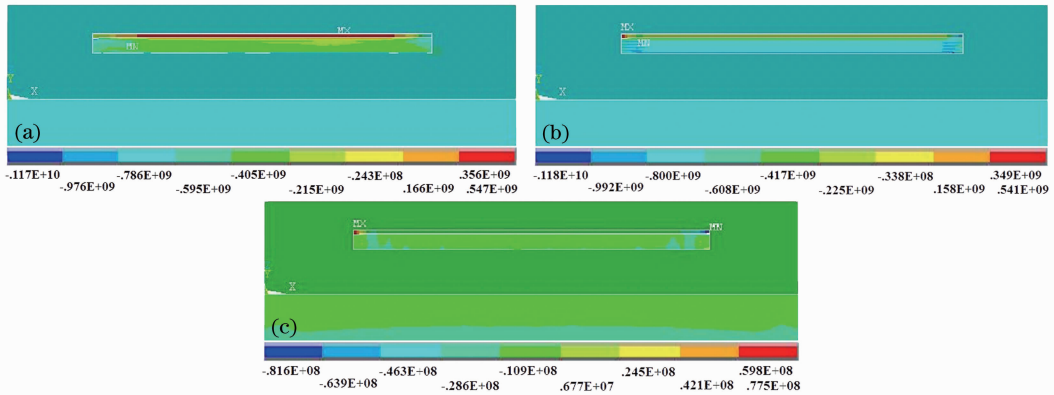


图 5 往复扫描方式下薄壁层 X (a),Y (b)和 Z (c)三个方向的应力分布

Fig. 5 Stress distributions of (a) X, (b) Y and (c) Z direction under back-and-forth scanning

3) 两种扫描方式下薄壁件不同位置残余应力大小的比较

图 6 为不同扫描方式下薄壁层的等效应力分布情况。图 6(a)为单向扫描方式下熔覆层的等效应力分布图,图 6(b)为单向扫描方式下的残余应力分布曲线图,从图中可看出,单向扫描对熔覆层的两端和中部的应力分布的影响比较明显,左端的应力为1500~1700 MPa 的范围;右端的应力为 1200~1600 MPa 的范围;至于中部的应力为 400~600 MPa

的范围,中部的应力分布相当均匀。沿着扫描方向(从左到右),残余应力倾向降低。沿着熔覆层高度(Z 方向)残余应力倾向增大。因此残余应力集中在薄壁件的两端和中部的左边,熔覆层越高此地方的残余应力越大。

图 6(c)为往复扫描方式下熔覆层的等效应力分布图,图 6(d)为往复扫描方式下的残余应力分布曲线图,从图中可看出薄壁件的两端和中部的应力分布相当均匀,左端的应力为 350~450 MPa 的范

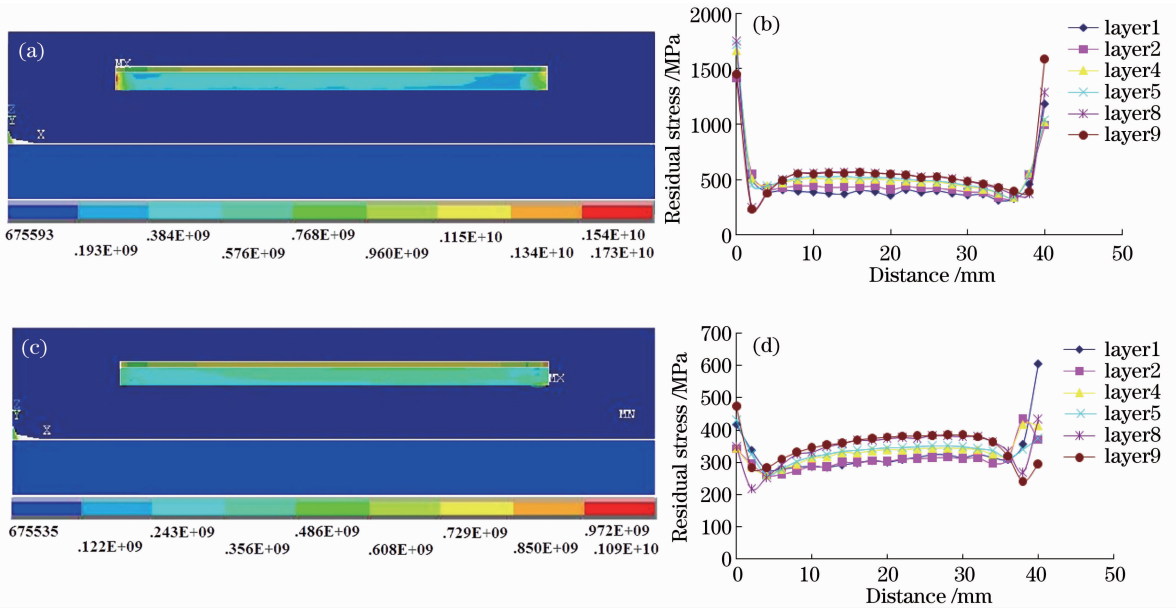


图 6 不同扫描方式下薄壁层的等效应力分布图和曲线图。(a), (b)单向扫描; (c), (d)往复扫描

Fig. 6 Residual stress distributions under different scanning methods on X-ray of each layers.

(a), (b) Single direction scanning; (c), (d) back-and-forth scanning

围;右端的应力为 300~600 MPa 的范围;中部的应力为 250~350 MPa 的范围。

3 实验和讨论

3.1 实验设备和材料

如图 7 所示,成形系统包括: Nd:YAG 激光器、送粉器、送粉喷嘴、三轴联动工作台和简易气氛保护箱(含氧含量分析仪)及数控系统(CNC unit)。激光器: 型号为 JK1002SM, 额定功率为 1 kW, 聚焦距离为 160 mm, 光斑直径为 0.5 mm; 送粉器: 北京航空制造工程研究所研制, 型号为 DSPF-2; 气氛保护箱中氧含量(质量分数)最低可以控制在 5×10^{-5} 以内。

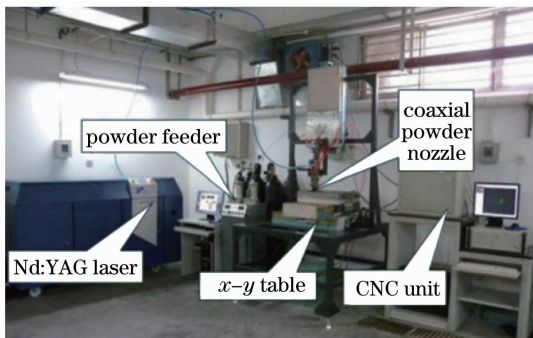


图 7 激光金属直接成形系统原理图

Fig. 7 Laser direct metal forming system schematic

实验采用 DZ125L 高温合金粉末, 粉末粒度大小为 $45 \sim 100 \mu\text{m}$; 基体材料为 316L 不锈钢, 几何尺寸为 $60 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 。实验前, 将金属粉末

在真空干燥箱内加热至 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 保温 4 h 以去除水分, 经检测成形前粉末中吸附的氧质量分数为 3.2%; 基板经过砂纸打磨后再分别用丙酮、乙醇清洗去除油脂与污渍。

3.2 实验方法

实验中的部分工艺参数如表 4 所示。实验步骤如下:

1) 将保护罩内的含氧量(质量分数)控制在 $10^{-4} \sim 1.5 \times 10^{-4}$, 在共同的实验环境和工艺参数(见表 4)下, 采用两种扫描方式: 单向扫描和往复扫描进行成形薄壁件, 如表 5 所示。

表 4 工艺参数

Table 4 Process parameters

Laser power / W	Table feeding rate / (mm/s)	Powder mass flow rate / (g/min)	Laser beam diameter / mm	Oxygen contents / 10^{-4}
230	10	2.6	0.5	< 1.5

表 5 试样类型和尺寸

Table 5 Sample types and dimensions

Sample	Scanning method	Dimension / mm^3	Cladding layer number
No. 1	Single direction	$40 \times 0.5 \times 10$	100
No. 2	Back-and-forth	$40 \times 0.5 \times 10$	100

2) 采用三维 X 射线断层扫描设备(YXLON 型)照相不同薄壁件裂纹的形貌和出现位置;

3) 采用 X 射线应力测定测量(X-350A 型)薄壁件的残余应力分布。

3.3 实验结果和讨论

3.3.1 扫描方式对熔覆层应力分布的影响

图 8 为不同扫描方式下激光金属直接成形

DZ125L 薄壁件试样图, 试样 1 号、试样 2 号如表 5 所示。

成形零件后进行测量熔覆层的应力分布, 测量方法如图 9 所示。测量结果如表 6 所示。

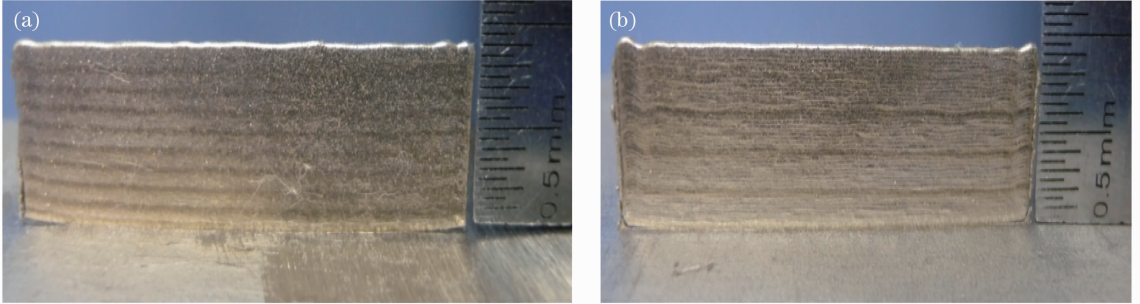


图 8 不同扫描方式下的薄壁件图。(a)试样 No.1 单向扫描;(b)试样 No.2 往复扫描

Fig. 8 Thin-wall parts under different laser scanning method. (a) Sample No. 1 single-direction scanning; (b) sample No. 2 back-and-forth scanning

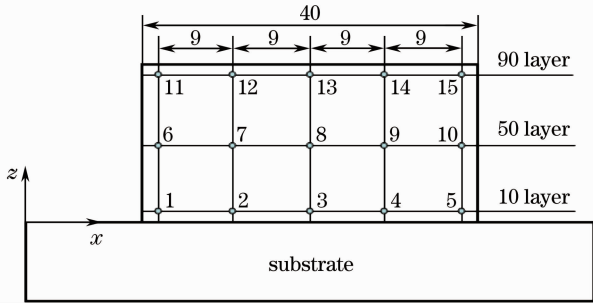


图 9 测量应力位置图

Fig. 9 Measurement of stress location map

图 10(a)为单向扫描下成形薄壁件的测量 X 方向应力分布结果,图 10(b)为熔覆层的 X 方向应力分布模拟结果。从图中可看出测量结果和模拟结果不相同,由于薄壁层成形后出现严重的裂纹和翘曲,熔覆层的缺陷影响到应力分布所以测量结果和模拟结果不相同。

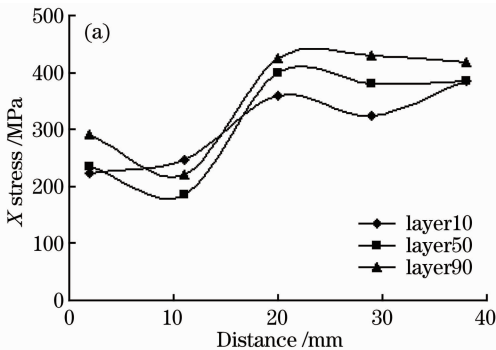


表 6 熔覆层的 X 方向应力

Table 6 Measurement results of X direction stress

		MPa				
	Distance /mm	2	11	20	29	38
No. 1	Layer10	223	246	359	325	385
	Layer50	235	185	398	380	385
	Layer90	290	220	425	430	418
No. 2	Layer10	286	293	305	418	425
	Layer50	312	355	324	425	430
	Layer90	334	410	468	460	510

图 11 为往复扫描下成形薄壁件的 X 方向应力测量结果和模拟结果。从图中可看出熔覆层的 X 方向应力分布测量结果和模拟结果相同。模拟结果表明:沿着熔覆层高度的增大,应力倾向增大,第 8 层的应力值为 230~280 MPa;实验结果表明,沿着熔覆层高度的增大,应力倾向增大,第 10 层的应力值为 300~400 MPa。

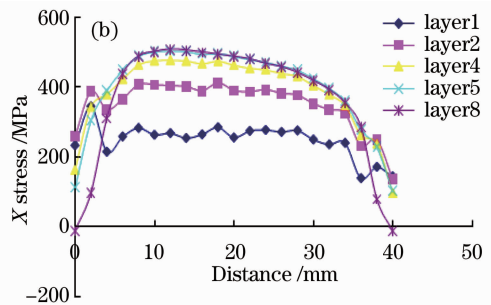


图 10 单向扫描下成形零件的 X 方向应力分布图。(a)测量结果;(b)模拟结果

Fig. 10 X direction stress distribution under single direction scanning. (a) Measurement results; (b) simulation results

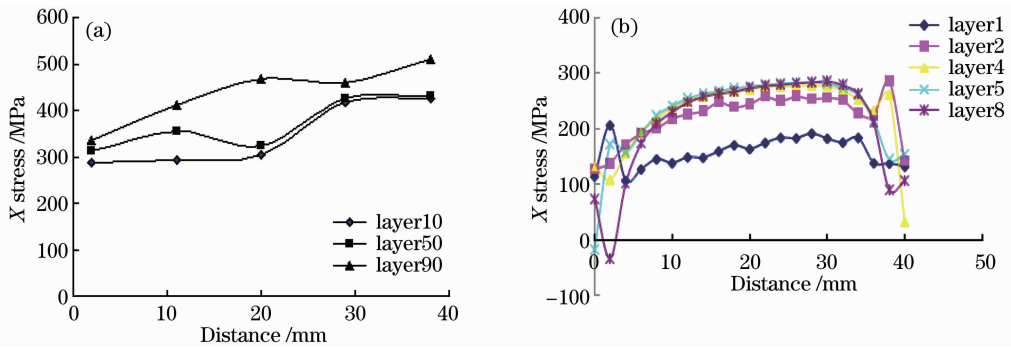


图 11 往复扫描下成形零件的 X 方向应力分布图。(a)测量结果;(b)模拟结果

Fig. 11 X direction stress distribution at back-and-forth scanning. (a) Measurement results; (b) simulation results

不同扫描方式下薄壁层的残余应力分布不相同,由于温度梯度直接影响到熔覆层的残余应力分布,单向扫描方式下薄壁层的温度梯度大于往复扫描方式下薄壁层的温度梯度,而且因为前一层的一部分残余应力被后一层消除,消除应力的方向与扫描方向是相反的,因此往复扫描方式下熔覆层的残余应力分布相当均匀,残余应力值小于单向扫描方式下的残余应力。

3.3.2 扫描方式对熔覆层开裂的影响

图 12(a)为采用三维 X 射线断层扫描设备照相的试样 1 号图,其中 S_x 和 S_z 分别代表 M 点处的残余应力在 x 和 z 方向上的分力, S_E 表示 M 点处的含应力的方向, S 为点 M 处的开裂方向。从图中可看出薄壁件的两端出现翘起;中部的左边明显出现 3 行裂纹,裂纹出现情况如表 7 所示。薄壁件两端

与基板的结合处出现翘曲。由于熔覆材料和基板材料的热膨胀系数不同,此地方的残余应力集中较大,在成形过程中的残余应力超过材料的屈服极限应力时就出现翘起。薄壁件中部的左边明显出现 3 行裂纹(从第 30 层开始开裂),裂纹展开的方向垂直总应力方向。模拟结果表明,单向扫描下薄壁件中部的左边, X 方向的拉应力较大;沿着熔覆层高度的增大,中部和顶部 Z 方向的应力为拉应力但应力值相当小;薄壁件的厚度相当小(0.5 mm), Y 方向的应力值较小,所以总应力的方向如图 12(a)所示;因此残余应力超过材料屈服极限应力($\sigma_{0.2} = 900$ MPa)时,此地方就出现裂纹同时垂直总应力方向扩散。另一方面,模拟结果表明熔覆层第 9 层的应力约为 500 MPa,所以第 30 层的应力会达到材料的屈服应力,导致出现裂纹。

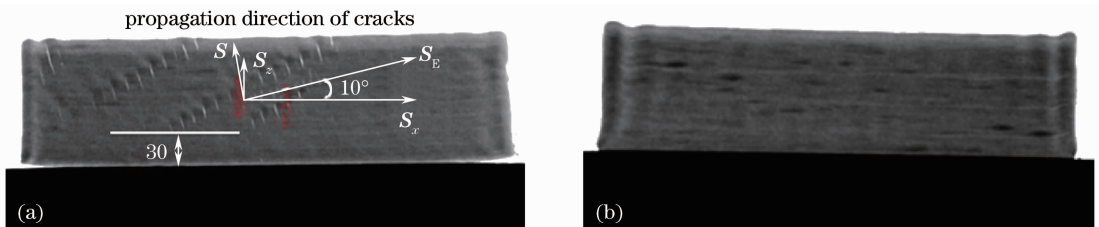


图 12 不同扫描方式下的 3DCT 薄壁件图。(a)试样 No. 1 单向扫描;(b) 试样 No. 2 往复扫描

Fig. 12 3DCT thin-wall parts under different laser scanning methods. (a) Sample No. 1 single-direction scanning; (b) sample No. 2 back-and-forth scanning

表 7 裂纹出现情况

Table 7 Cracking of parameters

Crack numbers	Maximum length of crack /mm	Minimum length of crack /mm	Average length of crack /mm	Maximum width of crack /mm	Oblique angle /($^{\circ}$)
31	3	1	1.5	0.07	10

采用扫描电镜(SEM)来观察裂纹的形状和断口,如图 13 所示。图 13(a)为裂纹的形貌,图 13(b)为裂纹的断口。从图中可看出裂纹内没有杂质所以可以说明裂纹出现的原因是:因 DZ125L 是一种多成分高温合金,元素的熔点相差较大,在快速冷却过

程中,不能使成分扩散均匀,结果使得每个晶粒内部的化学成分不均匀,造成先结晶的部分含有高熔点组元相对较多,后结晶部分含有低熔点组元较多。低熔点组元聚集在晶界处,此时在凝固过程中产生的热应力作用下,晶界处是材料内部组织的弱化处,

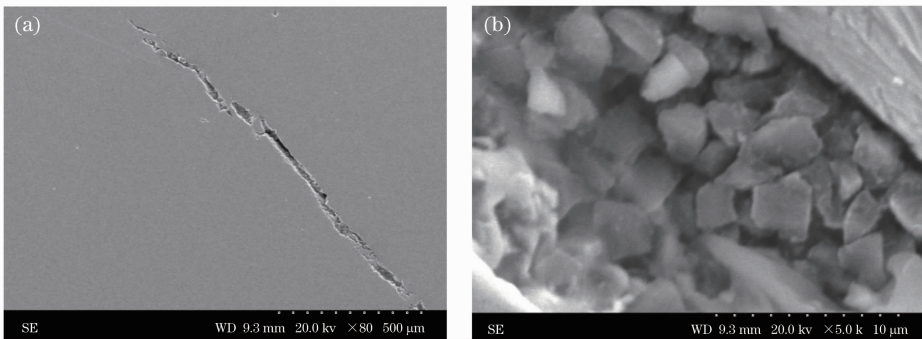


图 13 SEM 下照相裂纹的形貌(a)和断口图(b)

Fig. 13 SEM photograph of (a) crack morphology and (b) fracture

裂纹在晶界处产生且扩展。

图 12(b)为采用 XYLON 型的 X 射线设备照相的式样 2 号图。从图中可以看出熔覆层的质量良好,没有出现裂纹、翘曲,薄壁件各地方的应力分布相当均匀,最大应力值不超过材料的屈服极限应力。

4 结 论

在激光金属直接成形薄壁件的过程中,扫描方式对薄壁件内部残余应力的大小和分布方式影响较大。在单向扫描方式下,薄壁件内部残余应力较大且分布不均匀,两端残余应力和中间残余应力差值 1300 MPa;在往复扫描方式下,薄壁件内部残余应力较小且分布均匀,两端应力值和中部应力值的差距相当小。在单向扫描方式下薄壁件中间部位有明显的裂纹且两端开裂严重,开裂方向与主应力方向近似垂直;往复扫描方式下薄壁件内部无裂纹且两端不开裂。

参 考 文 献

- 1 Y. Huang, X. Zeng. Investigation on cracking behavior of Ni-based coating by laser-induction hybrid cladding [J]. *Applied Surface Science*, 2010, **256**(20): 5985~5992
- 2 Fujun Wang, Huaidong Mao, Dawei Zhang *et al.*. The crack control during laser cladding by adding the stainless steel net in the coating[J]. *Applied Surface Science*, 2009, **255**(21): 8846~8854
- 3 Ding Yangxi, Ouyang Zhiming. Influencing factors of the cladding layer cracks after laser cladding[J]. *Materials Research and Application*, 2008, **2**(3): 211~214
丁阳喜, 欧阳志明. 激光熔覆层裂纹的影响因素[J]. *材料研究与应用*, 2008, **2**(3): 211~214
- 4 Yang Ning, Yang Fan. Effect of laser cladding parameters on the quality of cladding layer[J]. *Heat Treatment Technology and Equipment*, 2010, **31**(4): 17~19
杨宁, 杨帆. 激光熔覆工艺参数对熔覆层质量的影响[J]. *热处理技术与装备*, 2010, **31**(4): 17~19
- 5 Zhao Hai'ou, Li Chunhua. Investigation on process and crack sensitivity during laser cladding[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2001, (1): 18~21
赵海鸥, 李春华. 激光熔覆工艺特性及裂纹敏感性研究[J]. *金属热处理*, 2001, (1): 18~21

- 6 Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen *et al.*. Study of carrier gas flow rate on forming quality of thin wall parts in laser metal direct manufacturing[J]. *Applied Laser*, 2009, **29**(4): 275~281
朱刚贤, 张安峰, 李涤尘等. 激光金属直接制造中载气流量对薄壁零件成形质量的研究[J]. *应用激光*, 2009, **29**(4): 275~281
- 7 Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 296~301
朱刚贤, 张安峰, 李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 296~301
- 8 F. Huang, Z. Jiang, X. Liu *et al.*. Microstructure and properties of thin wall by laser cladding forming[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, **209**(11): 4970~4976
- 9 Zhu Gangxian, Li Dichen, Zhang Anfeng *et al.*. Influence of deposited layer's structure on flow field of coaxial powder feeding nozzle[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1636~1642
朱刚贤, 李涤尘, 张安峰等. 沉积层结构对同轴送粉喷嘴粉末流场的影响规律[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1636~1642
- 10 Gangxian Zhu, Dichen Li, Anfeng Zhang *et al.*. Numerical simulation of metallic powder flow in a coaxial nozzle in laser direct metal deposition [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2011, **43**(1): 106~113
- 11 Fu Chunxia, Jiang Jiang, Bian Xiufang *et al.*. Effects of heat treatment on microstructure and wear resistance of laser clad Ni alloy coating[J]. *Hot Working Technology*, 2007, **36**(15): 44~47
付春霞, 姜江, 边秀房等. 热处理对激光熔覆 Ni 基金属层组织耐磨性的影响[J]. *热加工工艺*, 2007, **36**(15): 44~47
- 12 Su Ronghua, Liu Weijun, Long Risheng. Effects of different substrate preheating temperature on temperature field during laser metal deposition shaping [J]. *Journal of Engineering Design*, 2009, **16**(1): 44~49
苏荣华, 刘伟军, 龙日升. 不同基板预热温度对激光金属沉积成形过程温度场的影响[J]. *工程设计学报*, 2009, **16**(1): 44~49
- 13 Su Ronghua, Long Risheng, Liu Weijun *et al.*. Effects of substrate preheating parts formed by laser temperature on microstructures of metal deposition shaping [J]. *Journal of Engineering Design*, 2009, **16**(3): 210~216
苏荣华, 龙日升, 刘伟军等. 基板预热温度对激光金属沉积成形零件微观组织的影响[J]. *工程设计学报*, 2009, **16**(3): 210~216
- 14 C. Zhou, N. Wang, H. Xu. Comparison of thermal cycling behavior of plasma-sprayed nanostructured and traditional thermal barrier coatings [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, **452-453**: 569~574
- 15 W. Jiang, K. Yahiaoui, F. R. Hall. Finite element predictions of temperature distributions in a multipass welded piping branch junction[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2005, **127**(1): 7~12

栏目编辑:宋梅梅