

尖顶封闭结构件激光熔覆成形工艺研究

李东升,傅戈雁,李刚,苏昊

(苏州大学 机电工程学院,江苏 苏州 215021)

摘 要:采用中空激光光内送粉技术,成形尖顶封闭结构件。采用法向分层方法和顶端封口技术,熔覆成形尖点封闭结构件的圆台、圆筒以及圆锥连接结构。法向分层方法能够消除圆台和圆锥成形过程中的台阶效应,采用间歇熔覆和分段扫描相结合的方法,解决圆锥封口处在堆积时熔覆层产生热集聚效应而导致封口处塌陷的问题。检测结果表明,成形件形貌和质量较好,尺寸误差在 8% 以内。

关键词:激光熔覆;尖点封闭结构;法向分层;间歇熔覆;光内送粉

中图分类号:TP2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)03-0030-03

Study of Laser Cladding Forming Technology of Spindle Closed Structure

LI Dongsheng, FU Geyan, LI Gang, SU Hao

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China)

Abstract: The hollow laser light internal powder feeding technology is used to form the closed structure of spire. The normal stratification method is used with the top sealing technique to form a round table, a cylinder and a conical connecting structure for forming a cusp closed structure member. The normal stratification method can be used to eliminate the step effect in the forming process of the circular table and the cone. The combination of intermittent cladding and segment scanning is used to solve the collapse caused by the heat accumulation effect of the cladding layer when the cone is stacked at the sealing. The test results show that the shape and quality of the formed part is good, the size error is within 8%.

Keywords: laser cladding; cusp closed structure; normal stratification; intermittent cladding; intraoptical powder feeding

0 引言

尖点闭合结构件如航空发动机壳体、军用炮弹头、薄壁压力容器封头等,在航空航天、核电、化工领域都有广泛应用^[1-3]。传统加工闭合结构件的方法主要有锻压、铸造、机加工等,存在加工难度大、缺陷、成本高等缺点。激光熔覆成形(laser cladding forming, LCF)是一种金属零件的快速成形技术,可进行复杂形状零件的高致密、快速无模具制造^[4-6]。陈帅峰等人采用热冲压工艺成形出内径长轴 2300 mm、短轴 1150 mm 的椭圆形封头,并对一次和多次热冲压成形工艺进行数值模拟,发现封头多次成形载荷和壁厚受凹模直径大小的影响^[7]。周杰等人对封头零件制造过程中的起皱鼓包、壁厚不均以及回弹变形严重等缺陷展开研究,优化成形工艺方案,成形出平整无鼓包缺陷的薄壁封头^[8]。邓晓婷等人采用冲压成形工艺成形了半球形封头,利用 X 射线衍射法以及全释放法测量对封头残余应力进行检测,揭示了封头外壁残余应力分布规律^[9]。

本文采用中空激光光内送粉技术,成形出尖顶封闭结构件。利用光内送粉熔覆喷头进行堆积,具有光粉耦合效

果好、材料利用率高、成形件表面精度高等特点^[10-11]。将尖顶封闭结构件分 3 部分成形,并对成形件的尺寸和性能进行检测分析。

1 实验条件

激光直接成形系统包括 IPG-YLS 系列光纤激光器、GTV PF2/2 型程控送粉器、6 轴 KUKA 机械手、光内送粉激光熔覆喷头、回转工作台以及制氮系统、3D 层高控制系统。其中回转工作台、激光器、送粉器以及 KUKA 机械手集成于 KUKA 控制柜中;KUKA 机械手操控中空激光熔覆喷头;制氮系统一方面为送粉器提供输送粉末的载气,另一方面为激光熔覆喷头喷嘴提供粉末准直保护气。

实验用基体材料为 304 不锈钢。Fe313 粉末作为熔覆材料,其粒度为 -140/+20 目(75~106 μm)。Fe313 质量分数组成:C 为 0.1%,Si 为 2.5%~3.5%,Cr 为 13%~17%,B 为 0.5%~1.5%,余量为 Fe。

2 成形工艺过程

尖顶封闭结构包括 3 个形状,将按照从下往上一次成

基金项目:国家自然科学基金(51675359);国家重点研发计划(2016YFB1100300)

第一作者简介:李东升(1993—),男,河南信阳人,硕士,研究方向为激光熔覆增材制造。

通信作者简介:傅戈雁,女,教授,博士生导师,研究方向为激光熔覆增材制造。

形。最下端为圆台结构,中间为圆筒结构,最上端为圆锥封闭结构。

2.1 模型建立

建立如图1所示的圆台、圆筒和圆锥连接结构模型,圆台最小半径为14 mm,最大半径为25 mm,高度为50 mm;圆筒半径与圆台最大半径相同,圆柱高度为20 mm;圆锥最大半径也是25 mm,圆锥母线与 z 轴方向中心线之间的夹角大小为 30° 。

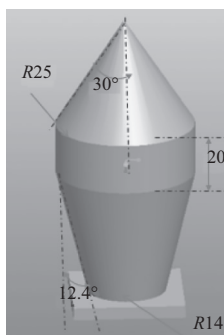


图1 圆台、圆筒和圆锥连接结构模型

2.2 尖顶封闭结构激光熔覆成形

a) 水平分层方法

水平分层方法是始终保持熔覆喷头在竖直方向上,在水平方向上做不同路径的扫描,从而得到一定形状的结构件。从扫描路径上看,后一层的路径是前一层路径的重复或者是某些位置的路径变化。对于圆筒成形虽然可行,但是针对圆台和圆锥成形,若采用水平分层方法进行分层,上层单元和下层单元之间存在一定的错位,有部分单元下部无基体支撑,即部分熔池需要依靠张力裸露在外部。

b) 法向分层方法

法向分层方法由孟伟栋、石拓等提出,其分层方法如图2所示。在堆积成形过程中,喷头轴线方向与待成形基面法线方向始终保持一致。从图2可以看出喷头的姿态随着成形件轮廓切线方向的变化而变化,每完成一层材料的熔覆后,使喷头沿待成形面的法向移动一层材料的距离,相邻两熔覆层之间没有错位,熔池具有足够的支撑面积,可进行大倾角堆积,实现倾斜面、无支撑悬臂结构的成形,消除水平分层堆积出现的台阶效应,成形件表面精度高。

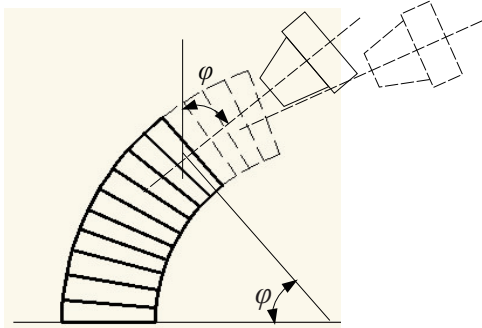


图2 法向分层示意图

c) 斜定向错位分层方法

结合水平错位分层和法向无错位分层的特点,本试验采用斜定向错位分层的切片方法来成形圆锥封口部分。如图3所示:熔覆成形过程中,喷头轴线方向与竖直方向的夹角 φ 为定值,即喷头姿态保持不变,沿成形件轮廓的切线方向进行熔覆堆积,结构倾角 α 不断变化,其值大小与 φ 值大小不相等。喷头轴线方向与成形件轮廓切线方向的夹角 β 随着加工位置的改变而不断变化。每完成一层材料的熔覆后,使喷头沿轮廓切线方向移动一层材料的距离,相邻两熔覆层之间存在错位。光束在层间沿光束轴线和轴线垂直方向进行偏移,避免光束与已成形区域发生干涉。

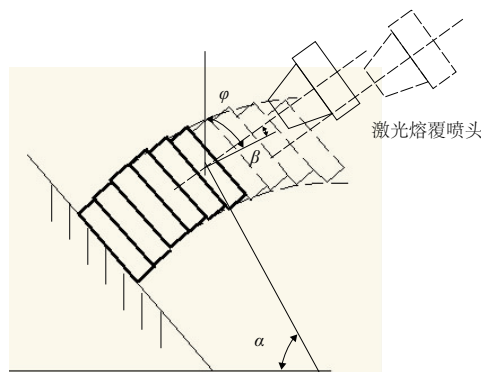


图3 斜定向错位分层示意图

d) 斜定向错位分层偏移模型

类比于圆锥封口模型,现以倾斜的薄壁直墙为研究对象,建立激光光束相对于熔道的偏移模型。为了便于建立数学模型,现作如下两点假设:

- 1) 将弧形熔覆层横截面轮廓简化为矩形;
- 2) 工艺参数稳定时,每层熔覆层的生长状况完全相同,熔覆层形貌相同。

图4(a)为斜墙堆积偏移模型示意图, θ 为斜墙倾角, φ 为光束倾角, H 为熔覆层高度, ΔL 为下一层在光束轴线垂直方向偏移量, x_1 、 z_1 分别为光束加工位置在坐标系 x 轴和 z 轴方向的偏移量。每熔覆完成一层,光束沿其轴线方向提升量为熔覆层的高度 H ,偏移量 ΔL 满足下面关系:

$$\Delta L = H \cdot \tan(\theta - \varphi) \quad (1)$$

如图4(b),将光束加工位置偏移向量 $\mathbf{ab}$ 向 x 轴和 z 轴投影可得到 x_1 、 z_1 的计算公式:

$$x_1 = (H / \cos(\theta - \varphi)) \cdot \sin\theta \quad (2)$$

$$z_1 = (H / \cos(\theta - \varphi)) \cdot \cos\theta \quad (3)$$

根据式(1)可知,当斜墙倾角 θ 一定时,采用斜定向错位分层时熔覆层的无支撑悬伸量 ΔL 比水平错位分层悬伸量 Δx 要小。熔覆层高度 H 和悬伸量 ΔL 相同时,采用斜定向错位分层可堆积比水平错位堆积具有更大的倾角。并且当偏移量 ΔL 满足熔道不塌陷条件且一定时,可堆积斜墙倾角 θ 随光束倾角 φ 的增加而增加。因此在堆积大倾角结构时可通过增加光束倾角以增加堆积角度。

e) 成形过程

采用法向分层方法成形圆台部分,水平分层方法成形圆筒部分,法向分层方法成形圆锥部分的下端,斜定向错

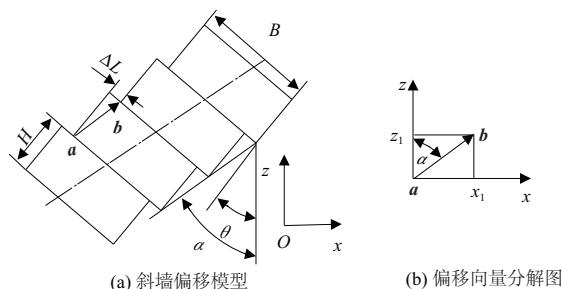


图4 斜定向错位分层偏移模型

位分层成形圆锥封口部分,具体实施过程如下:

在激光熔覆前先将激光熔覆喷头沿着 KUKA 机器人 C 轴旋转 -12.4° ,确保开始时熔覆喷头方向时刻与圆台母线方向一致,进而采用法向分层方法成形圆台;当圆台部分成形结束后再将激光熔覆喷头沿着 KUKA 机器人 C 轴旋转 12.4° ,使得激光熔覆喷头垂直于基体平面,采用水平分层方法成形圆筒。

当圆筒部分成形结束后将激光熔覆喷头沿着 KUKA 机器人 C 轴旋转 30° 成形圆锥结构的下端;接近封口部位时即采用斜定向错位分层法进行剩余结构堆积成形,此时将喷头轴线方向与圆锥母线切线方向的夹角变为 20° ,采用间歇熔覆和分段扫描的方法熔覆。经过上述熔覆过程,最终成形出圆台、圆筒和圆锥连接结构,成形过程如图5所示。

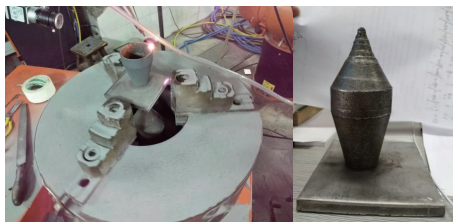


图5 圆台、圆筒和圆锥连接结构成形过程

f) 成形过程中热量控制

转台的回转运动和熔覆喷头在平面内的移动共同完成半球的成形,转台每转动1周,喷头移动1次。每层扫描线速度保持为 5 mm/s ,在接近封口部分,回转半径减小到 9.5 mm 时,转台达到最大转速 5 r/min ,扫描线速度逐渐减小。

试验过程中,为避免层间热累积的影响,每堆积完成一层关闭激光冷却 2 s 后继续进行。为减少速度减小而导致的层间热量积累的影响,设定在回转半径 $<9.5\text{ mm}$ 时,每层的扫描分段进行,每层共分为4段,每完成一段后关光,旋转到对称位置继续,如图6所示,数字为扫描次序,箭头方向为旋转台方向。

3 成形件检测

1) 尺寸误差分析

尖顶封闭结构的设计厚度为 2.38 mm ,沿着成形件母线每隔 10 mm 取1个点,绘制成点线图。由图7可知,沿着成形件母线方向,成形件厚度在设计尺寸附近

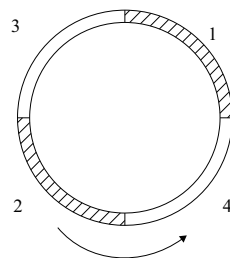


图6 层内分段扫描顺序图

波动,最大绝对误差在 0.2 mm 左右,最大相对误差在 8% 左右。成形件厚度在圆台和圆筒连接处以及圆筒和圆锥连接处稍微偏大,这是因为此时光斑形状改变,造成光斑略微偏大。

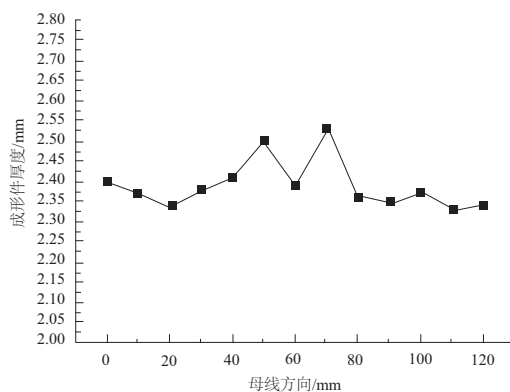


图7 成形件厚度沿着母线方向的变化

2) 硬度分析

采用显微硬度计测量尖顶封闭结构硬度沿着母线方向的变化,如图8所示。成形件硬度值保持在 $685\sim 720\text{ HV}$ 之间,速度较小的位置硬度较低,这是因为这两处扫描速度小,熔覆层厚度相对较高,导致稀释率偏大,所以硬度偏低。其余部分硬度略有波动但整体较为平稳。

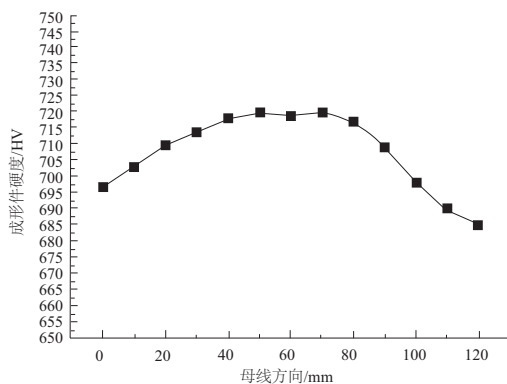


图8 成形件硬度沿着母线方向的变化

3) 组织分析

取圆台和圆筒连接处及圆锥封口处进行打磨、抛光、腐蚀处理,在 SEM 电镜下观测显微组织。激光熔覆成形是一个金属粉末快速熔化且快速凝固的过程,凝固过程中具有较大的冷却速度和较大的过冷度,所以晶粒较为细

(下转第86页)

表6 叶片加工变形平均值方差分析表

来源	平方和	自由度	均方	F 值 (方差值)	分位数
前角	0.016 9	3	0.005 6	152	6.39
后角	0.004 0	3	0.001 3	36	6.39
刃倾角	0.001 3	3	0.000 4	11	6.39
刀尖圆角	0.018 1	3	0.006 0	163	6.39
误差	0.000 1	15-3×4=3	0.000 033		
总和	0.040 4	15			

5 结语

1) 本文采用金属切削有限元模拟技术对薄壁叶片的加工过程进行模拟,得到了相对理想的模拟结果,故本文所采用的 ABAQUS 有限元模拟切削加工的方法切实可行,为以后的金属切削模拟加工提供了一种参考方法。

2) 通过运用优化的刀具几何参数(刀具前角、后角、刃倾角、刀尖圆角)进行汽轮机静叶片的铣削加工实验,汽轮机叶片加工变形得到了有效改善,废品率有所下降。

参考文献:

[1] 潘永智,艾兴,唐志涛.基于切削力预测模型的刀具几何参

数和切削参数优化[J].中国机械工程,2008,19(4):428-431.

- [2] 周宇.细长轴加工中刀具几何参数的选择[J].机械制造与自动化,2011,40(3):45-46.
- [3] 白万金.航空薄壁件精密铣削加工变形的预测理论及方法研究[D].杭州:浙江大学,2008.
- [4] 颜聪明,林有希,相泽锋.高速切削过程有限元分析的研究进展[J].机械制造,2010,48(10):48-52.
- [5] 李琳,解丽静,王西彬.金属切削加工中难加工材料 2Cr13 的本构模型[J].中国机械工程,2009,20(20):2466-2469.
- [6] 黄素霞,李河宗,崔坚.基于 ABAQUS 的金属切削数值模拟分析[J].工具技术,2010,44(2):56-59.
- [7] 梁磊.刀具几何参数对切削过程的影响[J].工具技术,2009,43(9):29-32.
- [8] HOWERTON D H. An experient and numerical investigation of orthogonal machining of aluminum6061-T6[D]. Raleigh:North Carolina State University, 1989.
- [9] STRENKOWSKI J S, MOON K J. Finite element prediction of chip geometry and tool/workpiece temperature distribution in orthogonal metal cutting[J]. Tran ASME J Eng Ind, 1990, 112(4):313-318.
- [10] 武凯,何宁.基于变形控制的薄壁结构件高速铣削参数选择[J].机械科学与技术,2005,24(7):788-791.

收稿日期:2018-12-06

(上接第 32 页)

小。由图 9 可以看出,a、b 位置处的金相组织以树枝晶为主,随着熔覆过程的进行,成形件受到热循环作用而产生热量积累,成形件温度较高,过冷度减小,冷却速度降低,熔池寿命增长,晶粒尺寸略有增大。法向分层区和斜定向分层区组织无明显差别,成形件整体组织过度均匀,组织致密,成形质量良好。

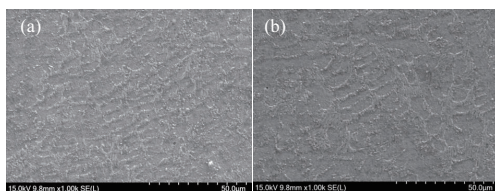


图9 不同位置处金相组织图

4 结语

本文采用光内送粉技术,熔覆成形出尖顶封闭结构件。采用法向分层和圆弧分段熔覆以及间歇熔覆的方法,解决了顶端封闭问题。成形件检测尺寸误差控制在 8% 以内,硬度保持在 685~720 HV 之间,成形区域显微组织致密均匀。

参考文献:

[1] 程小元,黄明涛,张明岐,等.精密电解加工在航空发动棚整体结构件制造中的应用[J].航空制造技术,2015,493(Z2):54-56.

- [2] 熊洪森,李春,王家宣,等.炮弹壳体液态模锻模设计[J].模具工业,2008,34(2):61-63.
- [3] 王家宣,李春,熊洪森,等.炮弹壳体的液态模锻模具结构设计[C].北京:半固态金属加工技术研讨会,2002.
- [4] HUANG Weidong. Laser solid forming [M]. Xi'an: North-western Polytechnic University Press, 2007.
- [5] LI Jianzhong, LI Xiangfeng, ZUO Dunwen, et al. Influence of defocusing amount on the process of Al/Ti cladding above 7050 aluminum alloy based on numerical simulation study [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(4):1126-1133.
- [6] LI Rui, YANG Xiaojun, ZHAO Wei, et al. Effect of femtosecond laser micromachining on the roughness of cladding sidewalls [J]. Infrared and Laser Engineering. 2015, 44(11):3244-3249.
- [7] 陈帅峰,王守东,雷玉川,等.大型厚壁椭圆封头多次热冲压成形分析[J].锻压技术,2015,40(2):37-40.
- [8] 周杰,罗艳,王珣,等.基于响应面的封头冲压成形工艺多目标优化[J].吉林大学学报(工),2016,46(1):205-212.
- [9] 邓晓婷,张士良,刘劲松,等.球形封头热冲压成形残余应力分析[J].锻压技术,2016,41(4):14-18.
- [10] 石世宏,傅戈雁,王安军,等.激光加工成形制造光内送粉工艺与光内送粉喷头:中国,CN101148760[P].2008-03-26.
- [11] 狄科云.激光熔覆快速成形光内同轴送粉斜壁堆积的初步研究[D].苏州:苏州大学,2008.

收稿日期:2019-03-11