

Inconel718 合金增材制造残余应力分布与数值模拟分析

姚晨光¹,安志斌²,杨竹芳²

(1. 中华女子学院 现代教育技术中心, 北京 100101;

2. 空军工程大学 等离子体动力实验室, 陕西 西安 710038)

摘要:由于 Inconel718 合金优异的力学性能,在航空发动机中被广泛应用。对于失效后的通过激光增材制造 In718 零部件,其修复表面残余应力对修复件力学性能有着重要的影响。研究了 In718 合金在 X 射线衍射(XRD)检测设备下的应力分布规律,采用 Sysweld 软件提供的应力场分析工具对修复件单道、多道进行残余应力进行数值模拟分析,将模拟结果与实际残余应力进行分析对比。XRD 残余应力结果表明:上下表面 x/y 方向平均残余应力值分别为 16.06 MPa/12.15 MPa 和 118.50 MPa/125.10 MPa。多道数值模拟最大值为 266 MPa,实际测量值的最大应力为 281.01 MPa,且所有应力值皆 >0 。

关键词:Inconel718 合金;激光增材制造;XRD;残余应力;Sysweld

中图分类号: TG115 文献标志码: B 文章编号: 1671-5276(2019)04-0134-03

Residual Stress Distributions of Laser Additive Manufactured Inconel 718 Alloy and Its Numerical Simulation and Analysis

YAO Chenguang¹, AN Zhibin², YANG Zhufang²

(1. Modern Educational Technology Centre, China Women's University, Beijing 100101, China;

2. Science and Technology on Plasma Dynamic Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Inconel718 alloy is widely used in aircraft engine, due to its excellent mechanical properties. The damaged In718 components, normally, are repaired by laser additive manufacturing. The residual stress on the surface has great influence on the dynamic performance of the repaired parts. Therefore, this paper mainly studies the residual stress distributions of In718 alloy by X ray diffraction(XRD), and uses Sysweld to simulate the one channel, multi-channel laser cladding. The simulated results is compared with that of the actual test. The mean values of XRD residual stress in x/y direction of upper/ lower surfaces are 16.06 MPa/12.15 MPa and 118.50 MPa/125.10 MPa respectively. The maximum value of multichannel numerical simulation is 266 MPa while the maximum value of the actual measured stress is 281.01 MPa, and all the stress values are >0 .

Keywords: Inconel718 alloy; laser additive manufacturing; XRD; residual stress; sysweld

0 引言

激光增材制造技术是一种固体无模成形技术、数字化技术和智能制造技术。该技术基于离散堆积原理,通过对零件进行三维扫描的方式,进行分层处理,进而得到各层截面的二维轮廓数据并形成了加工路径,并且将同步送进的粉末分层熔化堆积,达到零件的直接制造与修复的目的^[1-2]。该技术被广泛用于航空、航天、冶金、医用器材制造等行业中的高性能复杂结构、致密金属零部件的制造。但是由于在激光熔覆过程中的局部热输入所导致的不均匀温度场局部热效应,金属凝固结晶过程中形成较大热应力,在凝固结束后熔覆层中容易形成残余拉应力与热变形,这些缺陷会对成形件的疲劳强度、抗开裂性能、尺寸精度、静载强度等性能造成较大影响^[3],过大的拉应力会引起裂纹。因此,针对熔覆层残余应力方面,诸多学者有着

相关研究;许明三等人^[4]以激光功率、扫描速度和送粉量为变量,研究了不锈钢基体激光熔覆 Ni60A 的残余应力。残余应力测试结果表明主要影响因素为送粉量,扫描速度越大残余应力越大,激光功率、送粉量其次。许鹏云等^[5]计算了层间激光扫描方法对于激光双层熔覆的应力场数值,其结果表明层间激光扫描缓解释放前一层熔覆层残余应力,有利于抑制后一层的熔覆层裂纹效果。为了克服多道激光熔覆层开裂问题,胡木林等^[6]建立激光熔覆层残余应力测试方法并推导其计算公式。而董晓菲^[7]则利用有限元软件 ANSYS,对 45 钢激光熔覆过程中的温度场及其应力场进行数值模拟分析,其结果发现残余应力最大值出现在激光熔覆层与基体结合处位置,并随着熔覆层数的增加而增加。

Inconel718(In718)合金是含铌、钼的沉淀硬化型镍铬铁合金,拥有较高的强度、抗蠕变性能和疲劳寿命。现代航空发动机零部件,诸如涡轮盘、叶片、机匣、轴、定

子、封严、支撑件、管路、紧固件等,均采用 In718 制成^[8]。因此对于通过增材制造修复 In718 部件所产生的残余应力的研究是有必要的。本文以增材修复后 In718 合金为研究对象,通过使用 Sysweld 软件对 In718 试样进行单、多道的残余应力数值模拟仿真,并通过 X 射线衍射测试试样表面残余应力值,揭示应力分布规律,并将二者相加比较,为该材料的后续工业化制造、修复提供理论支持与数据支撑。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

本文所采用 In718 合金的质量分数如表 1 所示。使用了 In718 粉体,由 Nadcap and UKAS 实验室提供测试,其粉末质量分数如表 1 所示。粉末 SEM 图及粒度分布如图 1 所示。

元素	Fe	Cr	Nb+Ta	Mo	Ti	Al	Co	Si	Mn
含量	15~21	17.5~19	4.75~5.25	3.0~3.1	0.85~0.95	0.4~0.6	<0.3	<0.15	<0.1

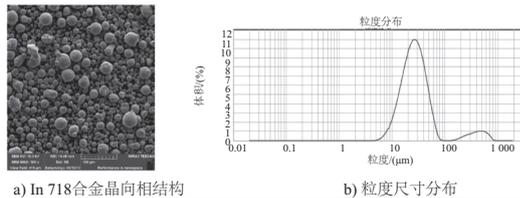


图 1 粉末 SEM 图及粒度分布图

1.2 激光选取熔化试验

本文中采取的激光选区熔化设备的型号为 Renishaw AM250。激光器波长 1071 nm,光斑直径为 75 μm。激光选取熔化试验过程中,首先准备粉体和成型基板。粉体需经过预热去潮、振动精筛,并使用 Autofab 软件对零件模型进行修正、添加支撑和切片,同时选择成型参数和成型策略。模型数据导入设备后,关闭成型舱门,进行气氛准备。抽取真空至 -90 kPa (标准大气压为 0 kPa),然后冲回保护气体。利用送粉装置和铺粉刮刀在基板上铺设、刮平粉体薄层,激光束按照切片轮廓在粉床上选择性熔化金属粉体并随后凝固,形成一层实体。

1.3 X 射线衍射应力分析

根据 GB7704-87 的要求被测部位的表面粗糙度为 $Ra < 10 \mu\text{m}$,尺寸为 $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times 4\text{mm}$ 。试验采用 Bruker 公司的 D8A-A25 X 应力测试仪。其中 X 射线衍射波长为 $2.103 \mu\text{m}$,衍射晶面方向为 $\langle 311 \rangle$,衍射角为 $2\theta = 155^\circ$ 。采用等距离取点法,表面、底面各测试 9 个点 2 个方向,等距离 5 mm,其余 4 个侧面等距离测取 3 个点 1 个方向。测量示意图如图 2 所示

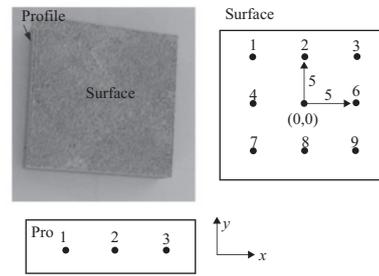


图 2 激光增材 In718 合金 X 射线残余应力测试点

2 结果

2.1 单道激光扫描应力模拟

图 3 所示为激光功率 300 W 单道顶面应力云图。从 300 W 顶面模拟云图中可以得到最大应力为 778.7 MPa,应力区域呈对称形状。从中间区域到两侧最大应力依次递减,而且应力梯度明显。从 770 MPa 区域直接下降到 200 MPa 区域。主要应力集中在中间区域。垂直焊道下的模拟云图中,主要应力集中在 400 MPa 区域,最大应力区域居于中部且呈带状分布。平行焊道的剖面模拟焊接云图中,最大应力区域也呈带状分布,且最大应力区域没有连续,出现间断现象。

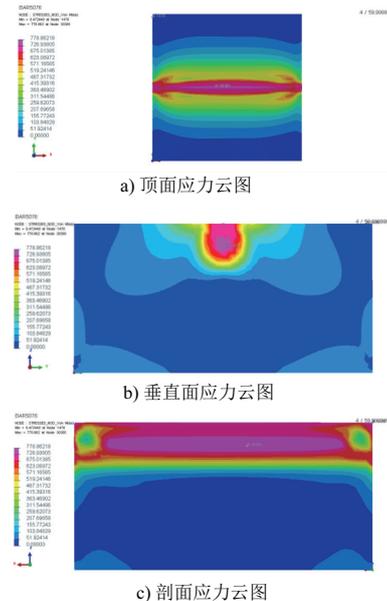


图 3 单道激光功率 300 W 下,激光增材 In718 合金应力分布

2.2 多道激光熔覆的残余应力数值模拟及测试

1) 多道激光熔覆 X 射线衍射残余应力测试

如图 4 所示,对表面所有测试点进行统计分析,可以发现表面所有测试点的正应力值均 > 0 ,即均为拉应力,x 方向平均应力值为 16.06 MPa,y 方向平均应力值为

12.15 MPa。对底面进行统计,可以发现所有应力值均> 0,即均为拉应力。得出 B 面 x 方向的平均应力值为 118.50 MPa,y 方向的平均应力值为 125.10 MPa。对 4 个侧面 C、D、E、F 面进行测试,仅测量 1 个方向的应力值,得到的应力分布如图 5 所示。

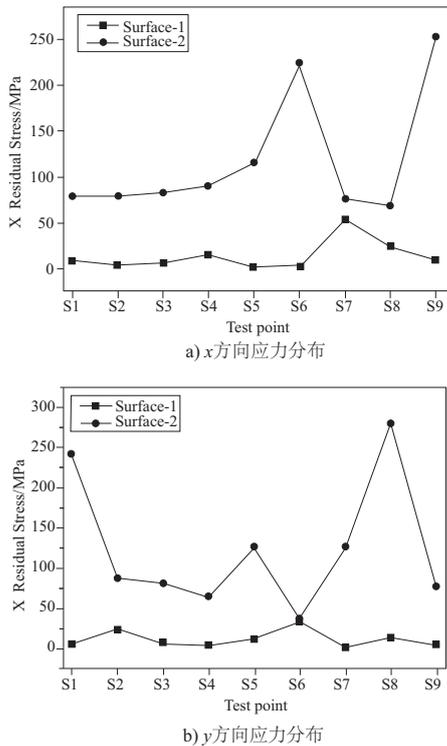


图 4 表面 Surface-1 及底面 Surface-2 xy 方向应力分布

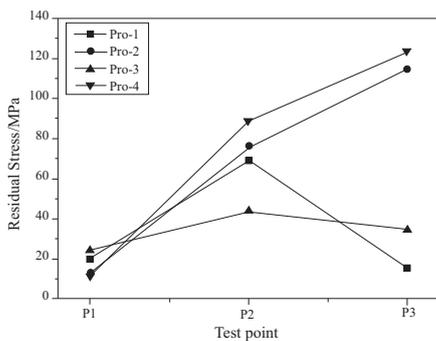


图 5 4 个侧面: Pro-1、Pro-2、Pro-3、Pro-4 的应力分布

4 个侧面的主应力值均>0,即均为拉应力。Pro-1 面的平均主应力值为 34.78 MPa,Pro-2 面的平均主应力值为 67.58 MPa,Pro-3 面的平均主应力值为 34.09 MPa,Pro-4 面的平均主应力为 74.57 MPa。

2) 多道激光熔覆残余应力数值模拟

经过 34 根焊道的模拟焊接,可以得到如图 6 所示多道激光熔覆数值模拟及不同应力区域的应力分布云图。可以看出其最大应力是 266.216 MPa,处于第 50533 节点处。除了底面没有应力外,其余几个模拟面均有应力,应力区域呈对称形状。在顶面可以看出应力从中间依次向周边递增,与单根焊道有明显的差异,且分布得不是特别

规整。

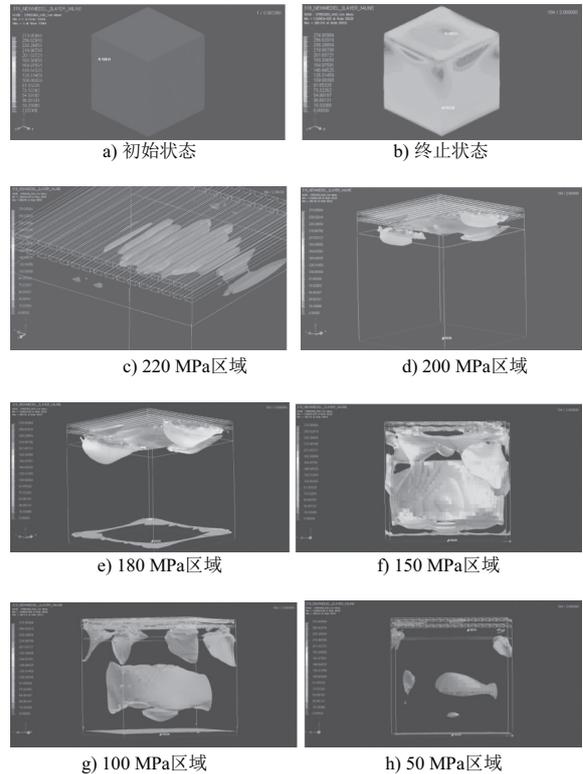


图 6 不同应力的区域分布图

从 220 MPa 应力分布可以看到其应力分布区域主要集中在顶部及顶面以下,而且应力分布的面积比较少。而从 220 MPa 区域可以看出其应力区域主要分布在顶部,并且呈对称分布。180 MPa 区域主要分布在整个区域的顶面和底面,顶面与 200 MPa 应力分布的区域相似,底面应力主要分布在 4 个顶角及边上,中间则没有。150 MPa 区域分布比较广泛,可以明显地看出其主要在正方体区域内且呈现对称情况。100 MPa 地区域看起来比较简单,在顶面和顶角均有应力分布,在区域中心有不规则的应力分布。相比较 50 MPa 区域的应力分布区域最小,有零星几块应力区域分布。以上为对不同应力值区域的逐个阐述。图 7 所示为模型 xy 方向的应力云图。



图 7 xy 方向应力云图

xy 方向的最大应力为 266.216 MPa,但最大应力没有出现在原三维模型的顶面,这和原来 220 MPa 区域的数值模拟结果保持基本一致。从原图来看,顶面的中心区域并非最大应力区域,反而是最小的应力区域,中心处的最小应力区域向四周进行扩散,呈递增态势。

图 8 为 xz 方向的应力云图,即原模型的侧面方向。侧面存在最大应力集中区域,但该区域的范围较小,其中可以发现应力区域较为复杂,不存在明显的规律性,没有

(下转第 179 页)

3 结语

苏通 GIL 综合管廊工程中 GIL 设备运输与预就位过程作业空间受限、作业条件复杂、安全质量要求高,经空间尺寸计算分析,GIL 运输专用机具运行过程中与已安装的 GIL 单元最小水平净空距离仅为 140 mm,且对机具行走机构就位精度要求高,必须采用有轨道的运输方案确保人身和设备安全。

同时根据 GB/T 16622《压配式实心轮胎规格、尺寸与负荷》中规定,压配式实心轮胎“用于间歇作业,单个作业行程最大距离为 2000 m,若需要更长距离作业或用于翻转机械轮胎时,应与制造厂协商”。制造厂提出连续作业 10 km 时应间歇 1 h,否则存在爆裂风险,为满足 GIL 设备运输连续作业要求,专用机具行走机构不适宜采用实心轮胎。

轨道式(双轨)方案与轮胎式(单轨)方案相比,整机尺寸小,结构简单可靠;行走机构采用变频驱动技术,更有利于加速度平稳控制。且轨道对地面其他轮式车辆影响小,不影响在管廊地面中部设置消防逃生通道。

综上,考虑到长距离、大坡度、多变径的作业环境与重负荷、高强度、精就位的作业需求,结合 3 种行走机构优缺点,最终选取轨道式(双轨)方案作为苏通 GIL 综合管廊工程 GIL 运输专用机具行走机构的技术方案。

参考文献:

- [1] GB/T16622 压配式实心轮胎、规格、尺寸与负荷[S].
- [2] 汽车工程手册编辑委员会. 汽车工程手册·设计篇[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [3] 陈家瑞. 汽车构造(下)[M]. 北京:机械工业出版社,2000.

收稿日期:2019-04-29

(上接第 136 页)

对称性。从图 8 可以发现,在侧面表面形成一个封闭的类似圆环的区域,该区域中间应力最大,向下外部递减。放大该应力所在区域,最大应力区域呈现不规则的点状及带状分布,且从中间向外围呈现递减态势。



图 8 xz 方向的应力云图

图 9 所示为 yz 方向的应力云图即垂直于焊道的应力云图,呈现出比较规整形态,基本上是左右对称。最大的应力区域在该云图的上方,中下方为环状的应力带。其应力梯度呈现中间较小,周边比较大的整体趋势。



图 9 yz 方向的应力云图

3 结语

利用 Sysweld 软件和 X 射线衍射测定法对激光熔覆后的 In718 合金试件的残余应力进行数值分析与测,得到的主要结论如下:

1) 单道激光应力场数值分析表明:最大应力为 770 MPa,且顶面与垂直面应力分布对称,底面分布呈带状分布。

2) 多道激光熔覆 X 射线衍射残余应力测试,上下表面 x/y 方向平均残余应力值分别为 16.06 MPa/12.15 MPa 和 118.50 MPa/125.10 MPa。其余 4 个侧面的主应力分别为 34.78 MPa, 67.58 MPa, 34.09 MPa, 74.57 MPa。

3) 多道激光熔覆应力数值结果与残余应力测试比较得出:数值模拟最大值为 266 MPa,实际测量值的最大应力为 281.01 MPa,且所有应力值皆 >0 。其中在 xy 面会出现环状应力区域,而实际测量时也会出现距离中心几乎等距离的环状应力区域。 xz 面形成不规则环形应力区。 yz 方向呈现中间小周边大的整体趋势。

参考文献:

- [1] 林鑫,黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造[J]. 中国科学, 2015(45): 1111-1126.
- [2] 戴晟,左敦稳,方淳,等. 激光熔覆 Ni/Ti 复合涂层组织与性能[J]. 机械制造与自动化, 2014, 43(3): 63-65.
- [3] G A Webstreret, A N Ezeilo. Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes [J]. International J Fatigue, 2001, 23(S1): 378-383.
- [4] 许三明,戴腾运,江吉彬,等. 不锈钢基体激光熔覆 Ni60A 残余应力研究[J]. 福建工程学院学报, 2016(14): 557-562.
- [5] 许鹏云,刘衍聪,范常峰,等. 层间激光扫描对激光多层熔覆的温度场应力场影响机制分析[J]. 热加工工艺, 2013, 42: 167-170.
- [6] 胡木林,谢长生,黄开金. 多道搭接激光熔覆层残余应力测试方法研究[J]. 激光技术, 2006(3): 262-264.
- [7] 董晓菲,张冠伟. 基于计算机技术 45 钢激光熔覆工艺的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2014, 43(2): 139-141.
- [8] 章海峰,黄舒,盛杰,等. 激光喷丸 In718 镍基合金残余应力高温松弛及晶粒演变特征[J]. 中国激光, 2016, 43: 1-9.

收稿日期:2018-03-16