

工件形状对镍基高温合金激光再制造应力场分布的影响

王凯 赵剑峰 潘浒 刘云雷

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要 利用 Marc 软件对基于同轴送粉的镍基高温合金 GH4169 零件表面修复过程进行了数值模拟,通过热-机直接耦合分析了不同的修复截面形状对激光熔覆过程中温度场/残余应力场的分布的影响。结果表明,对于单道的激光表面修复,修复截面形状的不同将导致在结合面处的温度场/残余应力场的分布也呈现出不同的特点:直接在平面上修复时,残余应力平行于扫描路径上的分量明显大于其垂直分量;在修复截面为矩形或弧形凹坑时,由于熔覆材料受到凹坑两侧面的约束作用,残余应力垂直于扫描方向的分量相对于平面上直接修复时明显增加,且随着深宽比的增加,垂直分量对平行分量的比值也有进一步增大的趋势,但在同深宽比情况下,弧形凹坑的比值较小。为避免薄壁零件的变形,预处理时宜采用深宽比较小的弧形修复截面。

关键词 激光技术;再制造;残余应力;有限元方法;激光熔覆

中图分类号 TN249; TG174.44

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.041402

Influence of Repair Cross Section on Stress-Field Distribution in the Nickel-Based Superalloy Laser Remanufacturing

Wang Kai Zhao Jianfeng Pan Hu Liu Yunlei

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract A numerical simulation of laser cladding process on the surface of nickel-based superalloy GH4169 with coaxial powder feeding system is carried out by Marc software. The influence of different repair cross sections on the distribution of temperature and residual stress field is studied through a directly coupled thermo-mechanical analysis. The results show that for single-path laser surface reparation, different repair cross sections lead to different distribution characteristics of temperature and residual stress field in the bonding zone. The parallel component of residual stress is evidently larger than vertical component in the direction of the scanning path when it is repairing on a plane. The vertical component of residual stress is relatively increased due to the constraints from two sides of the crater when it is repairing a crater of a long strip with rectangular or arc-shaped cross section. As the aspect ratio of the section increases, the ratio of vertical component of residual stress to parallel component also increases. However, the ratio of vertical component of residual stress to parallel component for arc-shaped cross section is smaller for the same aspect ratio. In order to avoid the deformation of the thin-walled parts, an arc-shaped cross section with small aspect ratio is recommended.

Key words laser technique; remanufacturing; residual stress; finite element method; laser cladding

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.3850

1 引言

目前,镍基高温合金被广泛用于航空发动机涡轮叶片、燃烧室等需要承受高温的环境中。由于工作环境恶劣,其零件容易出现磨损腐蚀和高温氧化等表面失效形式^[1]。利用激光再制造技术对此类失效零件进行

收稿日期: 2013-01-04; **收到修改稿日期:** 2013-01-08; **网络出版日期:** 2013-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(51205198)、中国博士后科学基金面上资助项目(2012M511266)和江苏省博士后科研资助计划(1102052C)资助课题。

作者简介: 王凯(1988—),男,硕士研究生,主要从事激光再制造方面的研究。E-mail: wangkai_1988@yahoo.com.cn

导师简介: 赵剑峰(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事激光快速成型技术和纳米材料制造技术等方面的研究。

E-mail: zhaojf@nuaa.edu.cn

修复是目前国内外研究的热点。

通常在失效零件再制造前,都需要对待修复部位进行预处理,使用机械加工手段去除已经失效的部分,使其形状规整便于修复。针对高温合金一般采用高速铣削来完成处理,其截面形状根据所使用刀具的不同,主要分为矩形和弧形两类。修复截面形状不仅关系到激光熔覆过程中的散热条件,也直接关系到基材对熔覆材料的约束状况,进而影响到熔覆过程中的温度场、最终的残余应力场乃至再制造零件的变形与扭曲情况,甚至会使零件表面产生裂纹^[2]。对于航空发动机涡轮叶片之类薄壁件,影响尤为严重。

目前对于激光再制造这样一个影响区域小、加热与冷却迅速的过程,普通的试验设备与测量手段都具有严重的局限性,而数值仿真却提供了一种有效的研究手段^[3~5]。本文以使用 FGH95 粉末修复 GH4169 材料的航空发动机涡轮叶片为工程背景,采用 Marc 软件模拟不同修复截面下的再制造过程,对单道修复的温度场和残余应力场进行直接耦合分析^[6],找出截面形状对温度场、残余应力场的影响规律,以尽可能减小薄壁零件的变形。

2 仿真模型建立基础

2.1 相关理论与假设

激光再制造是一个多场耦合的过程,其中包含了温度场、流场和应力场,但受到相关学科及有限元技术本身的限制,目前数值仿真一般难以完成三场耦合模型的分析,而只能做到温度场与流场或应力场之间的两场耦合^[7,8]。本文采用随温度变化的屈服应力来模拟实际熔覆过程中材料的软化过程,以减小因为忽略流场的作用而引起的误差^[9],温度场与应力场采用直接耦合方式进行模拟,可以将应力场对温度场的作用也考虑进去,结构分析中产生的包括因非弹性功耗散产生的热、经历大变形后热边界条件发生变化等都会用于温度场的求解,相比于弱耦合的模拟可以取得更准确的结果。由于激光熔覆过程中会发生弹塑性变形,在基于增量理论的有限元解法中需给定材料的一些设置。本文中材料为典型的金属,故采用 Von Mises 准则作为是否有塑性应变发生的判定标准;由于熔覆过程中会出现大的塑形流动,故采用等向强化模型来模拟熔覆过程中材料的强化^[10]。

因为只考虑温度场和应力场之间的耦合而忽略了流场的作用,所以本文的模拟是建立在以下假设的基础之上的:

- 1) 忽略熔池中液体的流动和液体的表面张力,将流体看成是屈服应力很低的固体;
- 2) 忽略熔化过程中元素的扩散导致的物理化学性质的改变;
- 3) 不考虑物体各个表面之间的辐射影响。

2.2 初始条件和边界条件的设定

激光熔覆过程中涉及到温度和力两类条件,分别对应温度场与应力场。

在进行温度场分析时,除了熔覆开始时工件温度的初始条件需要给定外,尚需施加热边界条件。考虑到对流边界条件的系数只与温度的一次幂相关,而辐射边界条件的系数与温度的三次幂相关,在激光熔覆的局部区域内,温度高达上千度,此时物体与周围的热交换主要以辐射的方式进行,将辐射效应折合成随温度变化的对流换热系数和对流换热条件一同加载在模型上,同时考虑对流和辐射效应对温度场的影响,以更准确地模拟实际情况中的传热现象。

在进行应力场分析时,相关的约束条件只包括位移条件,其主要作用是为了防止在模拟过程中工件出现刚体位移。

3 有限元模型的建立

3.1 几何模型建立和网格划分

共建立了四个模型,其中基体都是 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 的方板,只是待修复部位的截面形状不同。模型 1 对应在平面上直接熔覆,作为一般参考;其余 3 个模型分别针对典型的铣刀处理后的工件截面,模型 2 对应球头立铣刀铣削后所得到的截面,而模型 3 和 4 则对应平头立铣刀在不同加工深度下所得到的截面。

其具体截面尺寸如表 1 所示。

表 1 修复截面形状和尺寸

Table 1 Cross-section shape and size of the repaired parts

Number	Cross section	X dimension /mm	Y dimension /mm	Radius /mm
1	Trapezoid	2 lower base, 1.75 upper base	0.5	—
2	Semicircle	—	—	1
3	Rectangle	2	1	—
4	Rectangle	2	0.6	—

本文中模型的修复是以单道熔覆的方式进行的,将重点针对各模型熔覆材料与基体接合面上的温度和两条路径上的应力分布情况进行分析,其中结合面与两条应力分析路径(以模型 2 为例)如图 1(b)所示。此外,为了平衡计算时间和精度之间的矛盾,采取由密到疏过渡的网格划分方案。不同修复截面形状的有限元模型如图 1(c)所示。模型关于 Y-Z 平面对称的,故建模时只需建一半模型并施加对应的对称约束条件。

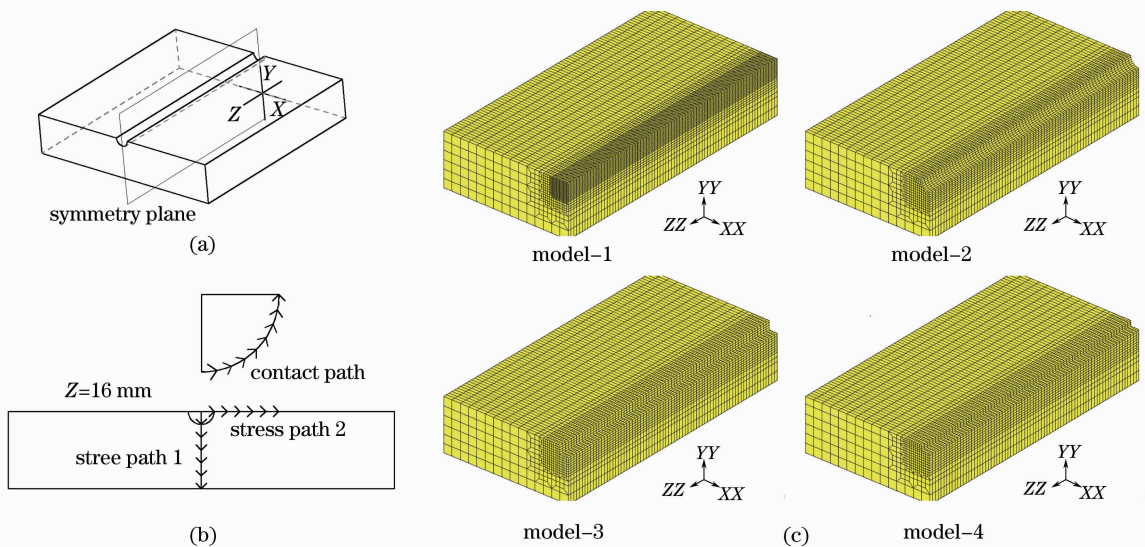


图 1 (a)所建立模型,(b)分析路径和(c)模型有限元网格划分

Fig. 1 (a) solid model, (b) analysis path and (c) meshing of finite element model

3.2 材料性能参数和其他设置

在使用 Marc 进行有限元数值模拟时,需给定材料的热学和力学参数。本文中基体材料为 GH4169 高温合金,熔覆材料为 FGH95 粉末。模型中分别定义了两种材料的 8 种材料属性,包括随温度变化的热导率、比热容、线膨胀系数、屈服强度、弹性模量和不随温度变化的密度、泊松比^[11]。此外,两种材料的熔化潜热^[12]对温度场的影响也被考虑在内,模拟中设产生潜热的两相温度间热量是均匀释放或吸收的。两种材料的热导率、线膨胀系数、比热容和弹性模量随温度变化的情况如图 2 所示,其余的参数可参考文献[11,12],不在此一一列出,超出材料手册温度范围内的高温数据,采用三次外推插值获得。

3.3 热源形式与加载方式

考虑到是基于同轴送粉方式的激光熔覆,金属粉末在到达基体上时已经处于熔融状态,所以选择以体积生热的方式来模拟激光能量的输入。考虑到采用的是大功率 CO₂ 激光器及材料本身性质,取激光能量的吸收率为 0.5。考虑到一定功率下修复相同的零件,随着扫描速度的加快,送粉量必然增加,但送粉量过大时则激光不能将之完全熔化,而且熔覆材料需要融化一部分基体才能与之形成冶金结合,实际修复中功率需以保证接触面上基体能够部分熔化为前提并与送粉量相匹配。本文中统一取扫描速度为 10 mm/s,计算所得的送粉率(设粉末利用率为 100%)、模拟所采用功率取值如表 2 所示。

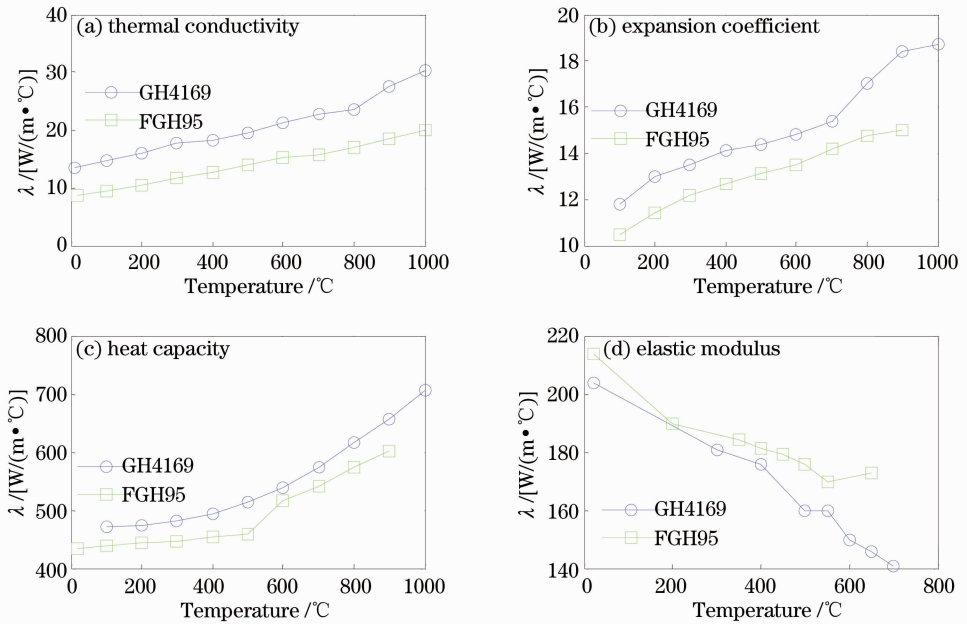


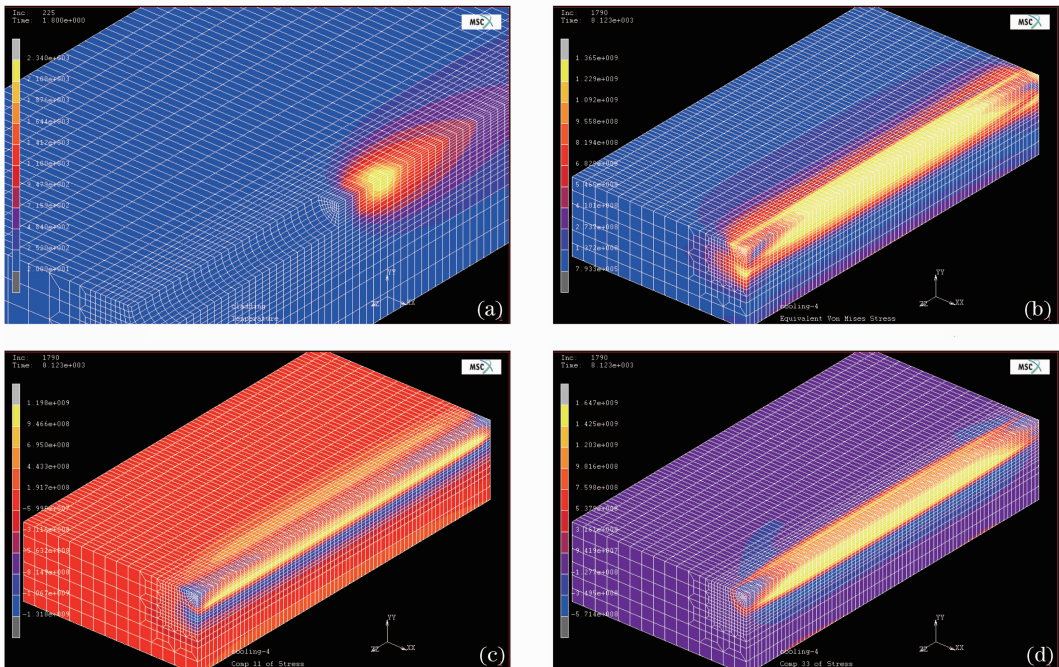
图 2 模型中的材料参数

Fig. 2 Material parameters in the model

表 2 激光熔覆工艺参数

Table 2 Processing parameters of laser cladding

Number	1	2	3	4
Scanning speed / (mm/s)	10	10	10	10
Powder feeding rate / (mm ³ /s)	9.375	15.7	20	12
Laser power / W	780	990	1380	960

图 3 温度场、应力场云图。(a)温度场；(b)等效应力场；(c) σ_{xx} 应力场；(d) σ_{zz} 应力场Fig. 3 Temperature and stress fields. (a) Temperature field; (b) Von Mises stress field; (c) stress field of σ_{xx} ; (d) stress field of σ_{zz}

为了模拟材料的增加和移动方式的热源,需利用 Marc 软件中的子程序。通过在 uactive 子程序中激活相应位置的单元来模拟熔覆过程中材料的增加,利用 flux 子程序控制热载荷的加载位置来模拟热源的移动,需激活单元或热载荷的位置是根据载荷步的时间计算得出的。熔覆过程中的温度场和结束后的应力场云图如图 3 所示。

4 熔覆过程温度场及应力场结果分析

4.1 温度场

1) 随时间变化情况。

在结合表面 $X=0$ 的线上从 $Z=4$ mm 开始每隔 4 mm 取一点,共取 6 点,靠近终点 $Z=29.2$ mm 处再取一点,在 7 个节点上采集温度随时间变化的数据。

4 个模型沿着上述扫描路径上的 7 个节点其温度随时间的变化曲线形状大体一致,而峰值温度略有差别,这里只给出模型 2 中的数据,峰值温度可参见下一小节。模型 2 中路径上的 7 个节点温度随时间的变化如图 4 所示。

可以看出当激光作用于熔覆表面一段时间后即进入稳定的状态,所取每一节点的温度峰值基本一致,而时间上相差两节点激光扫描所需的时间。初始时基体温度较低,未了时基体温度已相对升高,基体的吸热作用相对减弱,故在刚开始时温度峰值稍低,在结束时温度峰值则相对较高。

2) 修复截面形状对温度场分布的影响。

在 Z 轴的横截面上($Z=16$ mm)沿基材与熔覆材料的结合区取一路径。四条路径如图 5 中温度曲线右上角所示。在激光中心离开当前位置向前继续扫描 0.02s 时,基体与熔覆材料温度已经进入准稳态,其路径上的温度分布情况如图 5 所示,在接合面处的最低温度约为 1400 °C,已经超过两种材料的熔点(GH4169 与

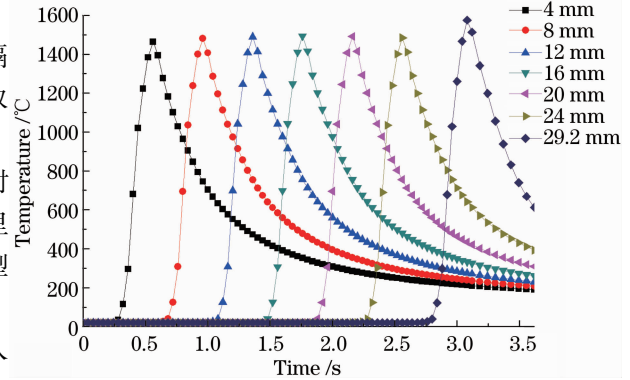


图 4 温度-时间变化曲线

Fig. 4 Temperature-time history curves

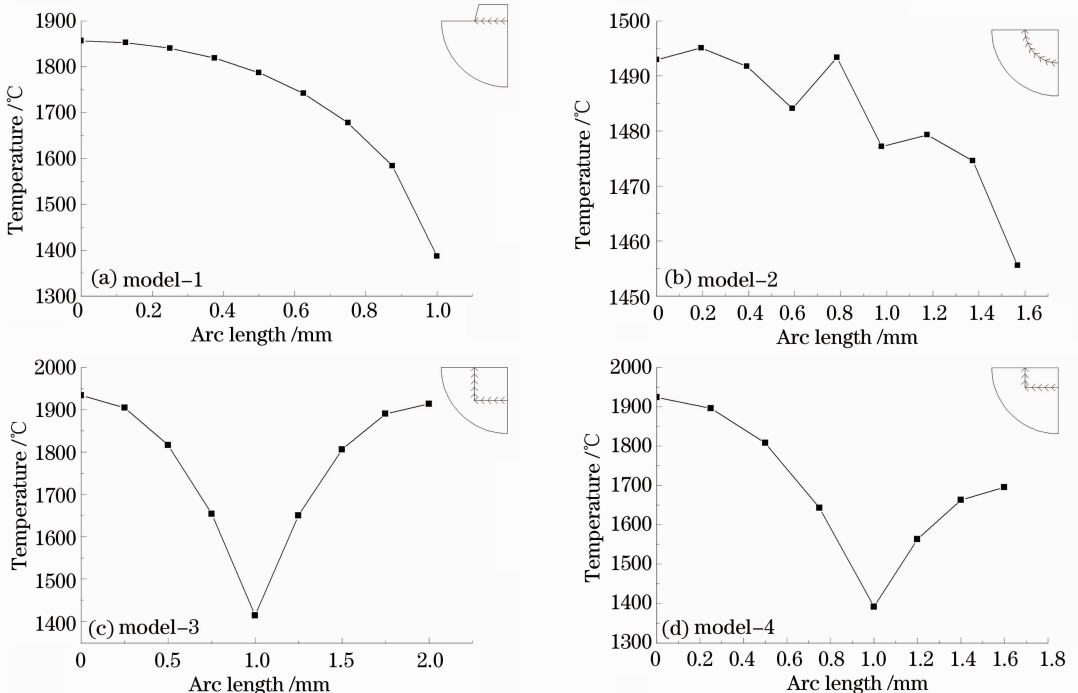


图 5 温度-路径变化曲线

Fig. 5 Temperature-path curves

FGH95 的熔点相近,根据材料规格不同在 1300 °C 上下浮动),与实际情况较为符合。

对于 4 个模型,熔池所吸收热量都是一部分传给基体,一部分通过熔覆材料表面的辐射和对流换热作用被转移到了环境中。不同的是对于模型 1,由于熔覆材料与基体的结合面是平面,随着基体与熔覆材料相接触部分的温度升高,热量在结合面上从中部向外部扩散,同时基体材料表面的散热作用增加了这一扩散的趋势,结合面路径上的温度从 $X=0$ 向两侧逐渐递减,且递减速率不断增大。对于模型 2,由于熔覆材料与基体的结合面是半个圆柱面,熔覆材料的热量在结合面上均匀地向基体材料四周传递,而熔覆材料与空气接触面是一个平面,熔覆材料表面的散热作用也是相对均匀的,结合面上的温度分布基本一致,温差不超过 50 °C。对于模型 3、4,熔覆材料与基体的结合面由 3 个平面组成,两个侧面和底面的交界面处散热条件最好,此处的温度最低。

4.2 应力场

在 Z 轴的横截面上($Z=16$ mm)从 $X=0, Y=6$ mm 处分别沿着深度方向(Y 负方向)和宽度方向(X 方向)取两条长度为 6 mm 的路径作为应力分析路径[如图 1(b)中的路径 1 和路径 2 所示]。由于残余应力在 Y 方向上的应力分量 σ_{YY} 通常相对较小,故不在文中进行讨论。在 $t=8120$ s 时,工件的修复过程已完成并得到充分的冷却,取得在两条路径上的残余应力分量(σ_{ZZ} 和 σ_{XX})。4 个模型残余应力平行于扫描路径的分量 σ_{ZZ} 和垂直于扫描路径的分量 σ_{XX} 沿着两条路径变化的规律分别如图 6 和图 7 所示。图中 11 应力分量和 33 应力分量分别指代 X 方向和 Z 方向的正应力 σ_{xx} 和 σ_{zz} 。

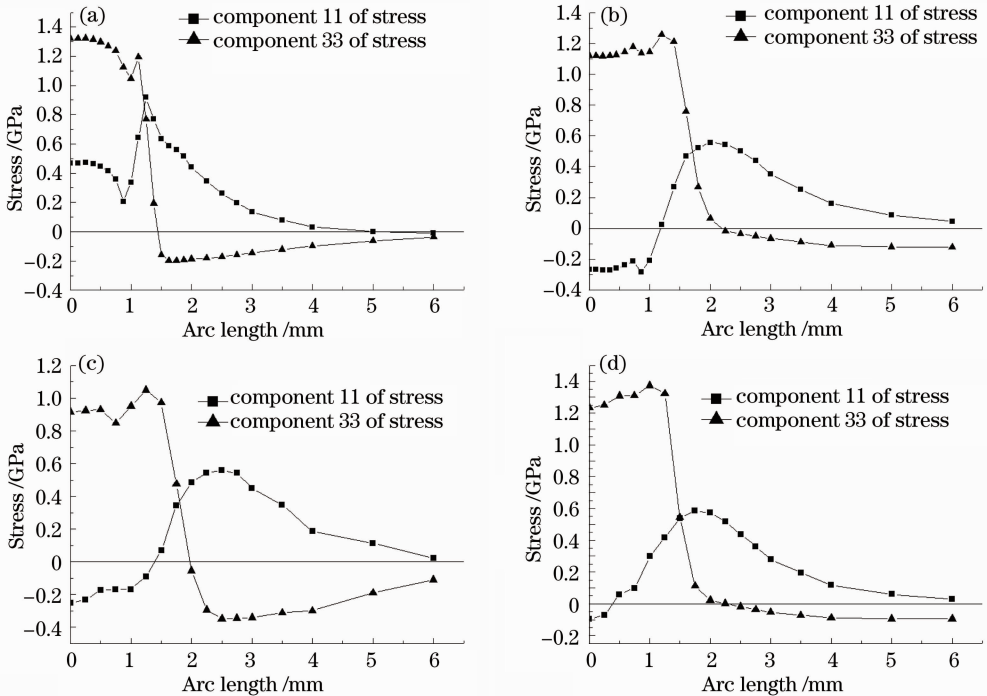


图 6 X 路径方向应力分量变化曲线

Fig. 6 Stress component curves along X-path

考虑到实际薄壁零件的修复中,工件最主要的变形是沿着扫描方向发生的,而残余应力垂直于扫描路径的分量 σ_{XX} 正是导致弯曲的最根本原因,因此针对此应力分量做详细讨论。各模型中残余应力具有如下特点:

1) 沿着路径的变化趋势。

从应力图中可以看出,无论是什么方向的应力分量(σ_{XX} 和 σ_{ZZ})都是随着距离快速减小的(包括宽度和深度方向),激光熔覆的热影响区范围小,具有局部性的特点。激光熔覆区内的最大等效残余应力[以模型 2 为例,其 Von Mises 等效应力如图 3(b)所示,局部最大值为 1365 MPa]接近熔覆材料常温下的屈服应力(由于无明显屈服阶段,以发生 0.2% 的塑性变形作为其屈服强度, $\sigma_{p0.2} = 1310$ MPa),这与激光熔覆过程中材料发生屈服进入塑性变形的实际情况相符合。

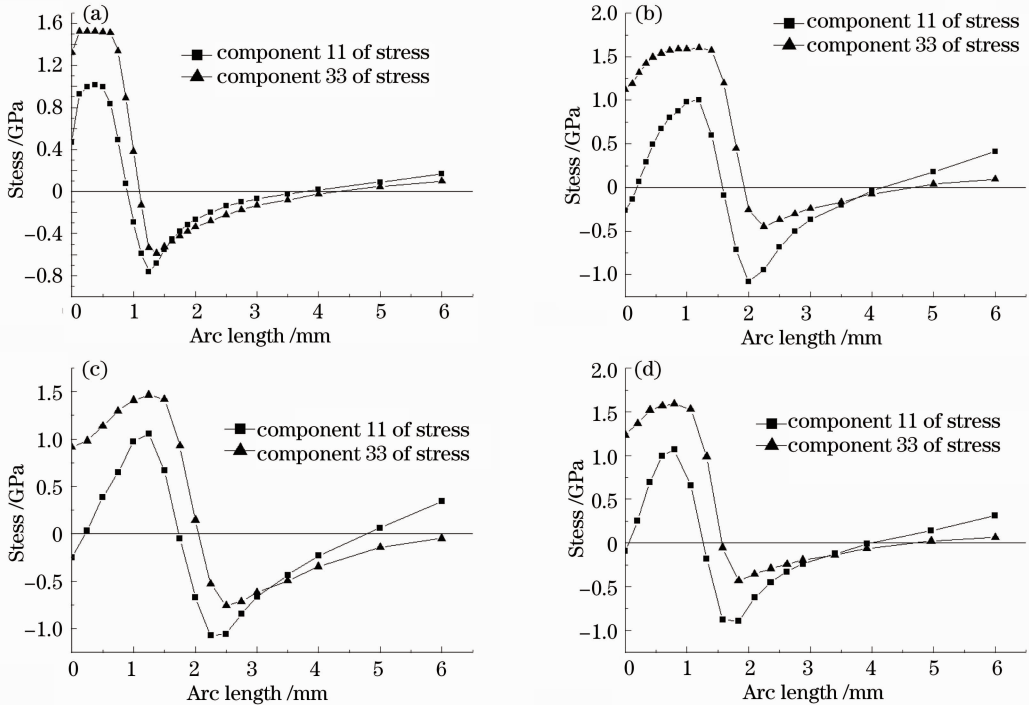


图7 Y路径方向应力分量变化曲线

Fig.7 Stress component curves along Y-path

2) 不同修复截面形状对应力场的影响。

模型1中熔覆材料与基体接触面为一平面,熔覆材料冷却时只受到与之相接处的平面的约束,扫描线在长度方向的收缩相较宽度方向更为明显,从而导致平面单道熔覆残余应力沿着扫描线方向为主(即 $\sigma_{xx} < \sigma_{zz}$),如图6中模型1的应力分布曲线所示,其平行于扫描方向的应力分量 σ_{zz} 远大于垂直分量 σ_{xx} ,在接触中心($X=0, Y=5\text{ mm}$ 处)附近,两应力分量 σ_{xx} 和 σ_{zz} 分别约为470 MPa和1320 MPa,其比值 $\sigma_{xx}/\sigma_{zz}=0.353$ 。

模型2中,接触面为半个圆柱面,考虑到其几何特点,基体对熔覆材料在X方向的约束力受圆弧角度的影响较大, σ_{xx} 在圆弧最低处($X=0, Y=5\text{ mm}$ 处)附近达到峰值(约为1000 MPa),此时两分量的比值 $\sigma_{xx}/\sigma_{zz}=0.625$ 。虽然比平面情况大,但相对于同深宽比的矩形修复截面仍然较小。

模型3和模型4中,由于熔覆材料和基体接触面包括基体上凹坑的底面和两侧面,材料冷却时更多地受到来自两侧面的限制,导致残余应力垂直于扫描路径分量 σ_{xx} 的峰值相对于平行分量 σ_{zz} 的峰值有明显的增加,具体分析见下文。

3) 矩形截面修复形状的具体尺寸对应力场的影响。

比较模型3和4,其待修复截面的深宽比分别为0.5和0.3,路径上平行应力分量峰值 σ_{zz} 与垂直应力分量 σ_{xx} 峰值都出现在基体与熔覆材料接触面中心($X=0, Y=5\text{ mm}$ 和 $Y=5.4\text{ mm}$ 处)附近,两应力分量之比分别为0.72和0.67,可以看出深宽比不同的两个矩形修复截面中,残余应力垂直于扫描路径的分量相对于平行分量的比值 σ_{xx}/σ_{zz} 也发生变化。深宽比越大,修复区两侧面对熔覆材料的约束作用也越大,两应力分量的比值 σ_{xx}/σ_{zz} 也就越大,而残余应力垂直分量 σ_{xx} 正是引起工件沿着扫描线方向发生弯曲变形的原因。由此推知,在一定范围内,如果零件待修复截面的深宽比越大,修复后越容易产生沿着扫描线方向的弯曲变形。

5 结 论

激光再制造是一项具有广泛应用前景的先进绿色制造技术,再制造零件的最终质量不仅仅取决于熔覆材料的性质和激光熔覆的参数,待修复零件的预处理也十分关键,预处理后零件待修复部位的形状对熔覆材料与基材的结合、热影响区的残余应力分布都有着十分明显的影响。对于矩形修复截面,其残余应力垂直于扫描路径的分量与平行分量的比值 σ_{xx}/σ_{zz} 随着深宽比的增加而增加,在相同深宽比的情况下圆弧形的比值

更小。在实际情况中,如果 σ_{xx}/σ_{zz} 比值过大,且工件结构受到开槽的削弱,则在再制造过程中容易出现沿着扫描方向的弯曲变形,对再制造质量产生严重的影响。因此,在对如航空发动机涡轮叶片之类薄壁件进行修复时,预处理宜采用小深宽比的圆弧形截面形状以避免产生大的变形。必要时亦可在修复前采取预热、边修复边喷丸或者在后处理中进行热处理等措施消除热影响区的拉应力。

参 考 文 献

- 1 Song Zhaohong. Aero-Engine Reliability and Fault Control Engineering [M]. Beijing: BUAA Press, 2002. 10~13
宋兆泓. 航空发动机可靠性与故障抑制工程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002. 10~13
- 2 Zhang Xiaodong, Dong Shiyun, Xu Binshi *et al.*. Control measure for metal cracks of laser cladding remanufacturing [C]. The 4th World Congress on Maintenance, 2008
张晓东,董世运,徐宾士等. 激光熔覆再制造成形金属裂纹的控制措施[C]. 第四届世界维修大会,2008
- 3 E. Brtlcker, D. Lepski, E. Beyer. Modeling the influence of process parameters and additional heat sources on residual stresses in laser cladding [J]. *J. Thermal Spray Technol.*, 2007, **16**(3): 355~373
- 4 G. Palumbo, S. Pinto, L. Tricarico. Numerical finite element investigation on laser cladding treatment of ring geometries [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2004, **155-156**: 1443~1450
- 5 Li Shouwei, Shen Yifu, Gu Dongdong *et al.*. Thermal-mechanical coupling finite element analysis of stress field in selective laser sintering of multi-component metal powder [J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, **18**(6): 751~755
李守卫,沈以赴,顾冬冬等. 多组元金属粉末激光选区烧结热力耦合有限元应力场分析[J]. 中国机械工程,2007, **18**(6): 751~755
- 6 Cheng Guangping, Li Mingxi, He Yizhu *et al.*. Numerical simulation of temperature field and stress field in laser clad coating [J]. *Heat Treatment*, 2009, **24**(4): 49~53
程广萍,李明喜,何宜柱等. 激光熔覆层温度场和应力场的数值模拟[J]. 热处理,2009, **24**(4): 49~53
- 7 Li Liqun, Zhang Liang, Dai Jingming. Numerical simulation of temperature and stress fields in wire filling laser multilayer welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1003002
李俐群,张亮,戴景明. 激光填丝多层焊温度场和应力场的数值模拟[J]. 中国激光,2011, **38**(10): 1003002
- 8 Zhan Huanxiao, Wang Yong, Han Tao *et al.*. Residual stress analysis of the remelting zone on 42CrMo steel plate in single-pass laser wide-band treatment [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 625~630
占焕校,王勇,韩涛等. 42CrMo 钢表面单道激光宽带处理后熔凝层的残余应力[J]. 中国激光,2008, **35**(4): 625~630
- 9 Gu Jianqiang, Luo Fang, Yao Jianhua. Numerical simulation of residual stress during laser cladding [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(10): 101401
顾建强,骆芳,姚建华. 激光熔覆过程残余应力的数值模拟[J]. 激光与光电子学进展,2010, **47**(10): 101401
- 10 Cheng Mingxiang. Elasticity and Plasticity [M]. Beijing: Science Press, 2010. 123~131
陈明祥. 弹塑性力学[M]. 北京:科学出版社,2010. 123~131
- 11 China Aeronautical Materials Handbook Editorial Committee. China Aeronautical Materials Handbook (2nd ed.) [M]. Beijing: China Standard Press, 2002
中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册(第2版)[M]. 北京:中国标准出版社,2002
- 12 Y. S. Touloukian. Thermophysical Properties of Matter [M]. New York: IFI/Plenum,1970. 263