

# 不同层间停留时间下电弧增材制造 2Cr13 薄壁件热力学行为

韩文涛, 林健, 雷永平, 葛进国  
(北京工业大学, 北京 100124)

**摘要:** 在电弧增材制造过程中, 沉积件内部的热-力演变对成形件质量具有重要影响。文中通过电弧增材制造三维有限元模型的建立, 对层间停留时间分别为 30, 120, 210, 300 s 的 2Cr13 沉积件温度场和应力场进行了模拟, 模拟结果与测量结果基本一致。结果表明, 层间停留时间为 30 s 时构件的纵向残余应力分布显著差异于其它构件。层间停留时间大于 210 s 时, 再延长层间停留时间起不到明显降低应力的效果。电弧增材制造单道 25 层 2Cr13 薄壁件的层间停留时间在 120~210 s 之间较为合适。

**关键词:** 电弧增材制造; 层间停留时间; 有限元模拟

中图分类号: TG 404 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.2019400311

## 0 序 言

电弧丝材增材制造(wire arc additive manufacture, WAAM)技术是以电弧为集中热源, 焊丝为填充材料, 采用逐层堆积的方式按需打印成形。WAAM 技术具有热输入高、焊丝填充速度快、生产效率高、所需设备和原料成本低等优点。打印成形的工件致密度高, 结合强度好, 在航空航天、石化、发电等领域具有重要的应用<sup>[1-2]</sup>。

在 WAAM 过程中, 会对同一点进行周期性加热冷却, 沉积件经历复杂的热过程, 产生复杂的热应力和残余应力演变<sup>[3-4]</sup>。国内外许多学者在电弧增材制造热应力有限元分析方面做了大量的研究工作。Mukherjee 等人<sup>[5-7]</sup>利用三维传热和流体流动模型研究了电弧增材制造过程中熔化区的几何形状、冷却速率和凝固参数对增材成形过程中应力和变形的影响。Zhao 等人<sup>[8-10]</sup>利用有限元法探究了电弧增材制造单道多层薄壁件的热历程和热应力, 研究结果表明, 最后一层的沉积对整个构件的残余应力分布起主导作用; 沉积方向对构件的残余应力和等效塑性应变有显著影响; 层间反向沉积有利于减小残余应力。Lei 等人<sup>[11]</sup>研究了层间停留时间对电弧

增材制造薄壁圆柱件热行为的影响, 探究了不同层间停留时间下沉积件内部温度梯度的变化规律。

相比于传统的 WAAM 方法, 冷金属过渡(cold metal transfer, CMT)电弧增材制造技术具有热输入小、飞溅少、成形质量高等优点, 十分适用于电弧增材制造。杨罗扬<sup>[12]</sup>利用有限元法, 研究了 CMT 电弧增材制造奥氏体不锈钢直壁件的温度场、应力场及成形工艺。曹熙勇<sup>[13]</sup>采用有限元法和有限体积法, 研究了 CMT 电弧增材制造铝合金直壁件的热、力演变及液态金属流动特点。

现有的电弧增材制造数值模拟研究, 对预测沉积件的温度、应力和熔池流动规律做出了贡献, 为减小工件的变形与残余应力, 调整优化工艺参数提供了依据。但是专门针对不同层间停留时间 CMT 电弧增材制造 2Cr13 合金钢的数值模拟研究还有所欠缺。文中基于热弹塑性有限元法和必要的验证试验, 对不同层间停留时间下 2Cr13 合金钢的 WAAM 热历程和应力演变规律进行了研究。

## 1 试验方法

基板材料和填充焊丝均为 2Cr13 合金钢, 焊丝直径 1.2 mm。基板和焊丝的化学成分如表 1 所示<sup>[14]</sup>。沉积前先使用角磨机对基板表面进行打磨以除去表面氧化层。在沉积过程中选用 97.5% 氩气

和 2.5% CO<sub>2</sub> 的混合保护气对熔池进行保护, 保护气流速为 15 L/min. 沉积成形的单道 25 层 2Cr13 薄壁件的形状与尺寸如图 1 所示。采用机器人辅助 CMT 焊接技术沉积成形, 其中 FRONIUS CPS 5000 CMT 焊枪固定在 6 轴 ABB IRB1600 机

器人上, 按照 S 形路径沉积, 即相邻层间反向沉积, 层间停留时间为 30, 120, 210, 300 s. 沉积工艺参数如下: 沉积电压 12.9 V, 沉积电流 96 A, 沉积速度 400 mm/min, 送丝速度 5.2 m/min, 弧长修正系数 -7%, 焊丝尖端与沉积表面间距 4.1 mm.

表 1 焊丝和基板的化学成分 (质量分数, %)  
Table 1 Chemical composition of welding wire and substrate

材料	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Fe
焊丝	0.180	0.870	0.650	0.014	0.015	0.450	13.16	余量
基板	0.170	0.650	0.480	0.010	0.020	0.380	13.40	余量

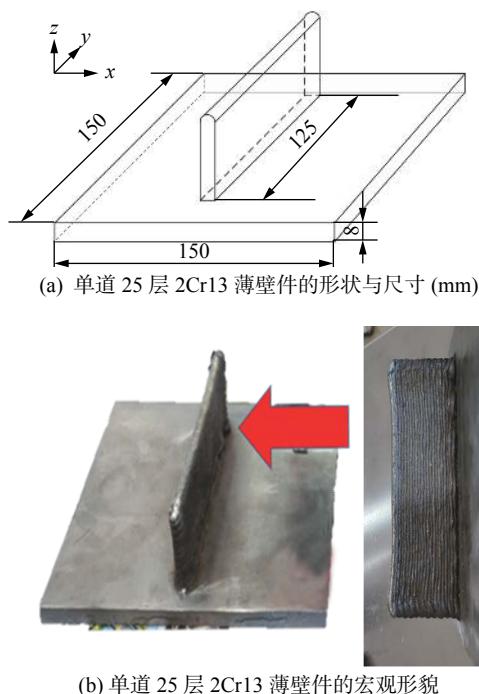


图 1 单道 25 层 2Cr13 薄壁件的形状尺寸和宏观形貌  
Fig. 1 Schematic graph and macro-morphology of 25-layer thin-walled 2Cr13 parts

使用 IMPACIPE 140-3 红外测温仪对图 2 中红点所示的第 15 层中间位置的热循环温度进行实时采集。在层间停留 120 s 成形的单道多层薄壁件基板的中心线上选取 6 个测量点, 使用 BM800D-C 型线切割机, 沿中心线 EF 位置对试样进行切割, 将试样切割成 8 mm × 8 mm × 8 mm 的立方体, 并使用 XL2101C 型静态电阻应变仪测量试样切割前后释放的应变大小。根据切割法的测量原理可知, 基板测点的表面残余应力可以通过由切割引起的释放应变来计算得到。表面残余应力的弹性力学计算公式<sup>[15]</sup>为

$$\sigma_x = -\frac{E}{1-\nu^2} (\Delta \varepsilon_x + \nu \Delta \varepsilon_y) \quad (1)$$

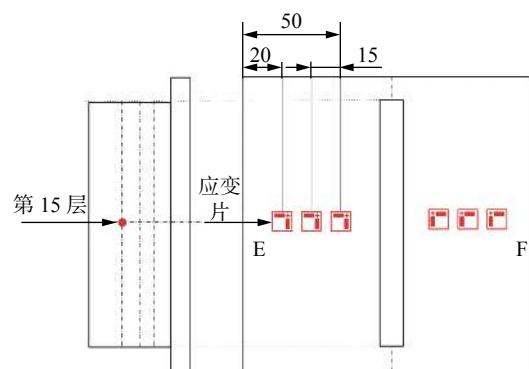


图 2 单道 25 层 2Cr13 薄壁件温度和残余应力测量点  
Fig. 2 Temperature and residual stress measuring point location of 25-layer thin-walled 2Cr13 parts

$$\sigma_y = -\frac{E}{1-\nu^2} (\Delta \varepsilon_y + \nu \Delta \varepsilon_x) \quad (2)$$

式中:  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  分别为横向和纵向上的残余应力;  $\Delta \varepsilon_x$ ,  $\Delta \varepsilon_y$  分别为试验测得的  $x$  和  $y$  方向上沉积前后释放的弹性应变;  $E$ ,  $\nu$  分别为材料的弹性模量和泊松比, 分别取 210 GPa 和 0.29.

## 2 有限元分析

利用 ABAQUS 有限元分析软件对不同层间停留时间下 2Cr13 薄壁件的沉积过程进行热-弹-塑性有限元分析(图 3)。在沉积过程中热源具有瞬时性

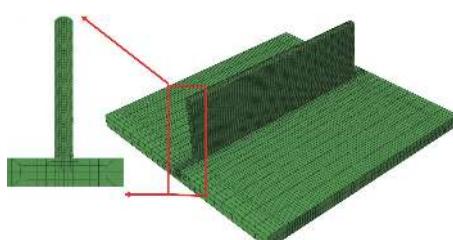


图 3 单道 25 层 2Cr13 薄壁件有限元模型网格划分  
Fig. 3 Diagram of finite element analysis model meshing of 25-layer thin-walled 2Cr13 parts

和集中性, 沉积层及热影响区存在较高的温度和应力梯度, 因此在沉积层及其附近采用加密网格。在沉积层附近网格的最小尺寸为 0.7 mm, 整个模型单元总数为 37 854, 节点总数为 44 154。有限元模型的网格划分情况如图 3 所示。计算中分别采用

DC3D8 线性传热单元和 C3D8R 线性连续应力体单元进行温度场和应力场模拟。对 2Cr13 薄壁件模型基板底部三点进行位移约束。考虑材料非线性, 2Cr13 合金钢的热物理性能参数随温度变化的曲线如图 4 所示<sup>[16]</sup>。

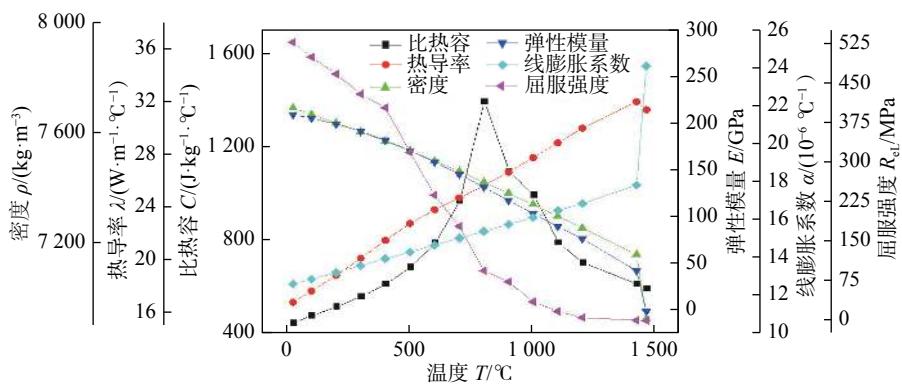


图 4 2Cr13 合金钢热物理性能参数

Fig. 4 Thermal-physical properties of 2Cr13 steel

### 3 结果与分析

#### 3.1 模拟结果与试验结果的对比

图 5 为 2Cr13 薄壁件第 15 层中间点沉积过程中温度值测量和计算结果曲线。图 5a, 5b, 5c 和

5d 分别为层间停留 30, 120, 210, 300 s 的温度曲线。由于层间停留 30 s 的时间短, 热量来不及散失, 所以图 5a 中该点的热积累效应明显, 温度曲线有显著上升的趋势。随着层间停留时间的延长, 散失的热量增多, 热积累效应减弱, 温度上升趋势减

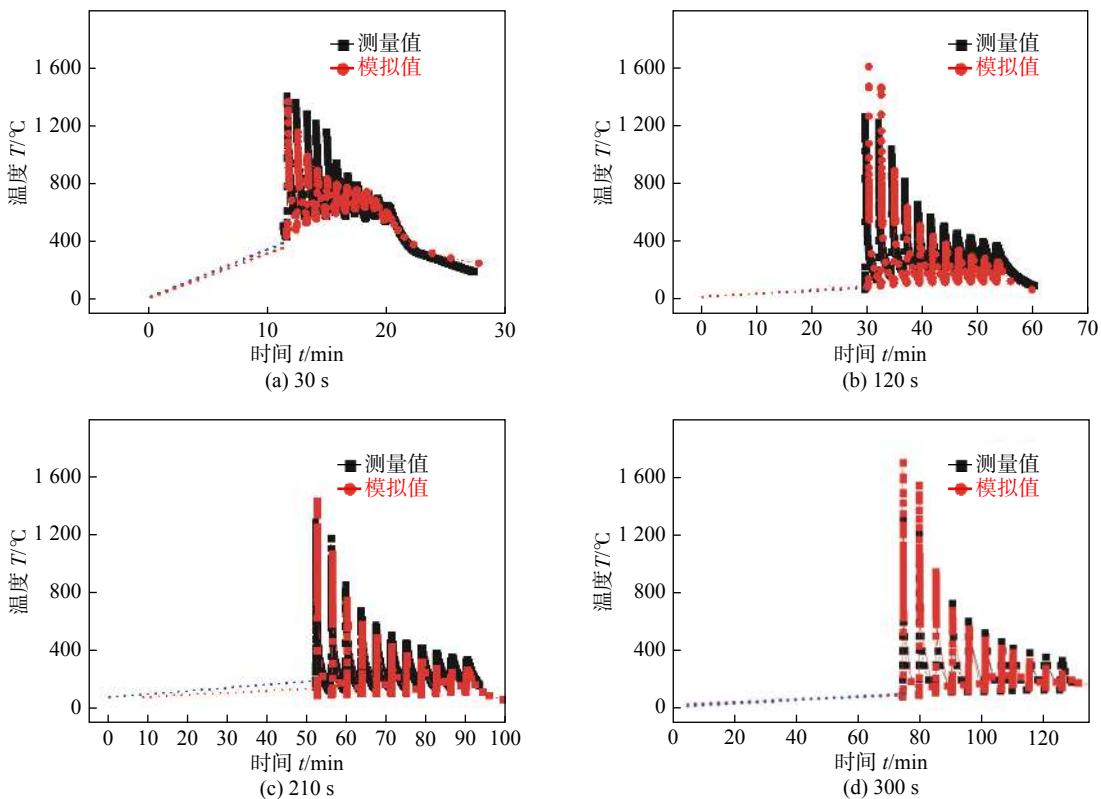
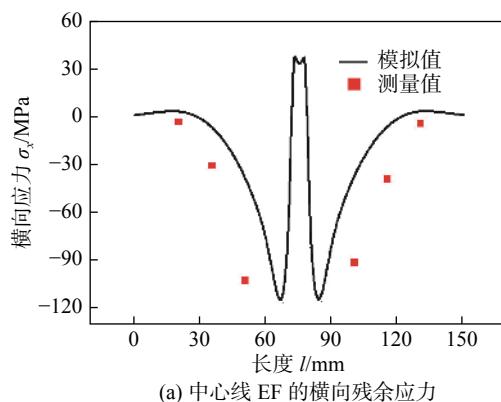


图 5 不同层间停留时间第 15 层中间位置温度测量结果和模拟结果的对比

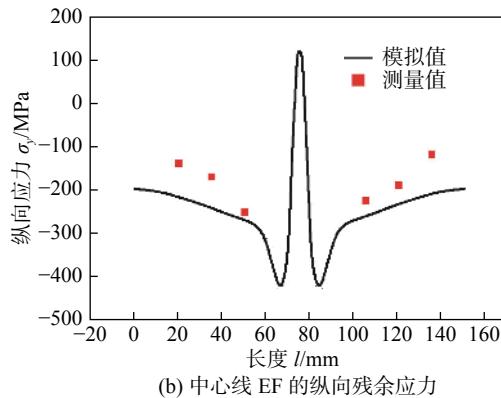
Fig. 5 Comparison between numerically simulated and experimentally measured thermal cycles in different interlayer idle time

慢。当层间停留超过 210 s 后, 随着沉积过程的进行, 该点的热积累温度趋于稳定。

图 6a 为层间停留 120 s 时, 沿基板表面中心线 EF 分布的横向残余应力, 即垂直于沉积方向的残余应力; 图 6b 为层间停留 120 s 时, 沿基板表面中心线 EF 分布的纵向残余应力, 即平行于沉积方向的残余应力。沉积件的结构对称, 所以应力曲线呈对称分布。沉积层区域在冷却收缩过程中受到相邻区域的阻碍, 所以沉积层区域表现为拉应力, 并在远离沉积层区域出现平衡的压应力。由于基板边缘发生变形, 应力得到部分释放, 所以基板边缘的应力显著降低。由图 6 可见, 基板中心线残余应力的模拟结果和试验结果基本吻合。



(a) 中心线 EF 的横向残余应力



(b) 中心线 EF 的纵向残余应力

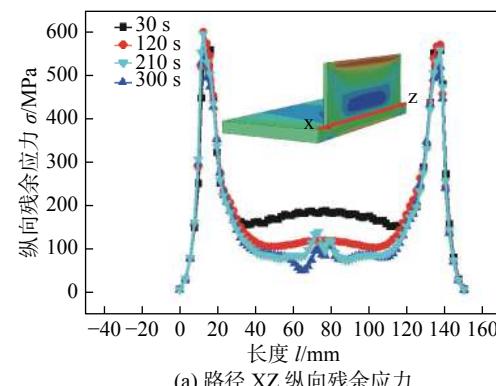
图 6 基板中心线 EF 残余应力测量结果和模拟结果的对比  
Fig. 6 Comparison between numerically simulated and experimentally measured residual stress in the central line of substrate

### 3.2 模拟结果分析

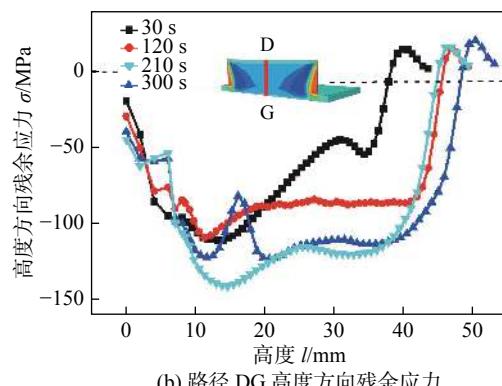
图 7 为不同层间停留时间下, 沿路径 XZ 分布的纵向残余应力和沿路径 DG 分布的高度方向残余应力。

图 7a 中, 沿路径 XZ 分布的纵向残余应力均为拉应力且应力峰值变化不大, 层间停留时间为 30, 120, 210, 300 s 的应力峰值大小分别为 550, 586,

577, 539 MPa。路径 XZ 中间区域的纵向残余应力随层间停留时间的延长而减小。层间停留时间超过 210 s 后, 再延长层间停留时间, 该区域的纵向残余应力趋于稳定。



(a) 路径 XZ 纵向残余应力



(b) 路径 DG 高度方向残余应力

图 7 不同层间停留时间单道 25 层薄壁件残余应力沿不同路径分布的曲线  
Fig. 7 Curves of residual stress along different paths for 25-layer thin-walled 2Cr13 parts with different interlayer idle time

图 7b 中, 沿路径 DG 分布的高度方向残余应力存在着较大波动, 最大应力出现在沉积件顶部表面附近, 为拉应力, 其余均为压应力, 压应力峰值出现在基板与沉积层界面结合区域。沉积件内部高度方向压应力随层间停留时间的延长而增大。层间停留超过 210 s 后, 再延长层间停留时间, 该区域高度方向残余应力趋于稳定。

图 8 为不同层间停留时间下, H 点纵向应力随沉积层数的变化曲线和 Z 点纵向应力随沉积层数的变化曲线。

图 8a 中, 不同层间停留时间下, H 点纵向应力随沉积层数的增加而变化的趋势基本一致, 均是先增大后减小最后又增大, 且均为纵向拉应力。产生这种现象有两方面的原因。第一, 随着沉积过程的进行, 沉积层高度逐渐增加, 顶层的应力对 H 点有应力集中的影响, 使该点处的应力不断增大; 第二,

由于热积累效应, 热量来不及充分散失, 沉积层和基板的温度逐渐升高, H 点受热膨胀和冷却收缩的不均匀程度逐渐缩小, 不均匀受热膨胀和冷却收缩而使该点产生应力的影响逐渐降低, 该点处的应力不断减小。第五层之后, 热积累效应对应力的影响逐渐大于应力集中的影响, H 点的应力随沉积层数的增加由增大转变为减小。在 25 层沉积完成时, 热积累效应消失, 冷却过程中温度变化不均匀, 又使 H 点的应力增大。

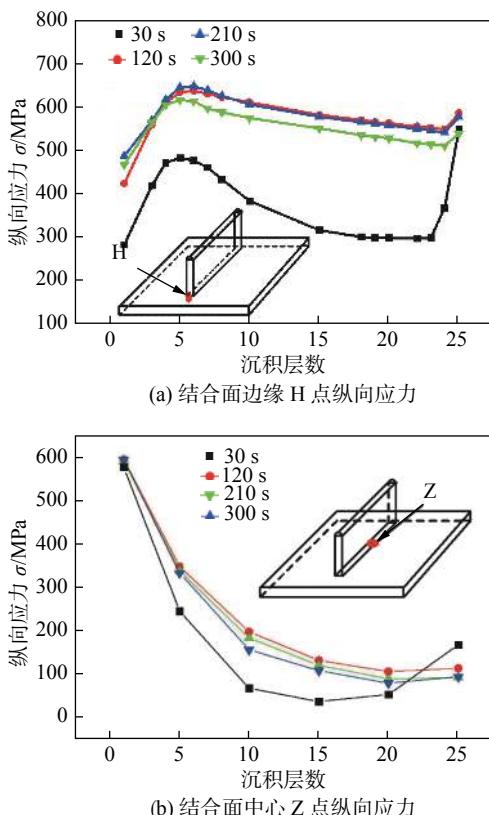


图 8 不同层间停留时间单道 25 层薄壁件界面结合处纵向应力随沉积层数的变化曲线

Fig. 8 Curve of longitudinal stress of 25-layer thin-walled 2Cr13 parts with different interlayer idle time and deposition layers

图 8b 中, 由于 Z 点在沉积层与基板结合面中心位置, 没有应力集中的影响, 所以随着沉积层数的增加, Z 点的纵向残余应力不断减小。由于层间停留时间短, 热积累温度高, 沉积过程中 Z 点受热不均匀程度降低的快, 所以层间停留 30 s 时, Z 点的纵向应力随层数增加而降低的效果最明显。由于在 25 层沉积完成时, 热积累效应消失, 层间停留 30 s 的热积累温度最高, 冷却过程中温度变化不均匀程度最大, 所以最终 Z 点的纵向残余应力最大。因此, 适当延长层间停留时间可降低沉积层内部的残

余拉应力。层间停留时间大于 210 s 时, 再延长层间停留时间起不到明显降低应力的效果。

## 4 结 论

(1) WAAM 单道多层薄壁件, 热循环温度曲线的模拟结果和测量结果基本吻合, 通过切割法对层间停留 120 s 成形薄壁件特定点的残余应力进行测量, 表明在温度曲线吻合的基础上, 所建立的有限元模型可以比较准确地模拟 WAAM 单道多层薄壁件的残余应力分布。

(2) 层间停留 30 s 时热积累温度高, 热量散失速度大, 层间停留时间从 30 s 延长到 120 s 时, 散失的热量多, 热积累温度下降速度快。因此层间停留 30 s 时的纵向残余应力曲线显著差异于其它层间停留时间的沉积件。

(3) 适当延长层间停留时间可降低沉积层内部最终的残余拉应力, 层间停留时间大于 210 s 时, 再延长层间停留时间起不到明显降低应力的效果。综合考虑成形效率和沉积层内部残余应力, 电弧增材制造单道 25 层 2Cr13 薄壁件, 存在一个相对比较合适的层间停留时间, 此次试验比较合适的层间停留时间在 120~210 s 之间。

## 参考文献:

- [1] 李雷, 于治水, 张培磊, 等. TC4 钛合金电弧增材制造叠层组织特征 [J]. 焊接学报, 2018, 39(12): 37–43.  
Li Lei, Yu Zhishui, Zhang Peilei, et al. Microstructural characteristics of wire and arc additive layer manufacturing of TC4 components[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(12): 37–43.
- [2] 熊江涛, 耿海滨, 林鑫, 等. 电弧增材制造研究现状及在航空制造中应用前景 [J]. 航空制造技术, 2015, 24(23): 80–85.  
Xiong Jiangtao, Geng Haibin, Lin Xin, et al. Research status of wire and arc additive manufacture and its application in aeronautical manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 24(23): 80–85.
- [3] Li C, Liu Z Y, Fang X Y, et al. Residual stress in metal additive manufacturing[J]. Procedia CIRP, 2018, 71(6): 35–37.
- [4] Fang J X, Dong S Y, Wang Y J. Residual stress modeling of thin wall by laser cladding forming[J]. China Welding, 2017, 26(3): 34–38.
- [5] Mukherjee T, Zhang W, Debroy T. An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing[J]. Com-

- putational Materials Science, 2017, 126: 360 – 372.
- [6] Mukherjee T, Wei H L, De A, et al. Heat and fluid flow in additive manufacturing-part II: powder bed fusion of stainless steel, and titanium, nickel and aluminum base alloys[J]. Computational Materials Science, 2018, 150: 369 – 380.
- [7] Mukherjee T, Wei H L, De A, et al. Heat and fluid flow in additive manufacturing-part I: modeling of powder bed fusion[J]. Computational Materials Science, 2018, 150: 304 – 313.
- [8] Zhao H. Effects of interpass idle time on thermal stresses in multi-pass multilayer weld-based rapid prototyping[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2013, 135: 1 – 6.
- [9] Zhao H, Zhang G, Yin Z, et al. A 3D dynamic analysis of thermal behavior during single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(3): 488 – 495.
- [10] Zhao H, Zhang G, Yin Z, et al. Three-dimensional finite element analysis of thermal stress in single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(1): 276 – 285.
- [11] Lei Y, Xiong J, Li R, et al. Effect of inter layer idle time on thermal behavior for multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018(96): 1355 – 1365.
- [12] 杨罗扬. 基于 CMT 的不锈钢电弧增材制造温度场、应力场及成型工艺研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [13] 曹熙勇. 铝合金 CMT 电弧增材制造温度场、应力场及流场数值模拟 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [14] Ge J, Lin J, Fu H, et al. A spatial periodicity of microstructural evolution and anti-indentation properties of wire-arc additive manufacturing 2Cr13 thin-wall part[J]. Materials & Design, 2018, 160: 218 – 228.
- [15] 朱瑞栋, 董文超, 林化强, 等. CRH2A 型动车组缓冲梁结构焊接残余应力的有限元模拟 [J]. 金属学报, 2014, 50(8): 944 – 954. Zhu Ruidong, Dong Wenchao, Lin Huaqiang, et al. Finite element simulation of welding residual stress for buffer beam of CRH2A high speed train[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(8): 944 – 954.
- [16] 李金阁. Q345/2Cr13 钢异种材料焊接过程有限元分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.

第一作者简介: 韩文涛, 男, 1995 年出生, 硕士。主要研究方向为电弧增材制造。Email: [wuyuezhiqian@163.com](mailto:wuyuezhiqian@163.com)

通信作者简介: 雷永平, 男, 教授。Email: [yplei@bjut.edu.cn](mailto:yplei@bjut.edu.cn)