

Ti-6Al-4V 电弧熔丝增材辊轧复合制造的有限元模拟

鞠洪涛^{1,2}, 徐东生¹, 单飞虎³, 杨锐¹

(1. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016)

(2. 中国科学技术大学, 辽宁 沈阳 110016)

(3. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

摘要: 增材制造过程中在凝固、冷却阶段因骤热骤冷而易于产生较大的残余应力, 进而影响部件的成形和使用。在增材过程中引入辊轧工序, 可望改变局部应力状态并降低宏观残余应力, 进而改善部件宏观变形和微观组织形态。通过建立 Ti-6Al-4V 钛合金电弧熔丝增材与层间辊轧复合成形过程的有限元模型, 研究在圆柱形轧辊条件下, 不同压下量对部件温度、应力、应变及残余应力分布的影响规律。结果表明, 层间辊轧可显著降低沉积层金属中的残余应力; 同时降低对基板的整体应力。采用圆柱形轧辊并增加压下量可显著降低残余应力, 为复合增材工艺的优化指明了方向。

关键词: 增材制造; 辊轧; 残余应力; 有限元模拟

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)03-0878-05

Ti-6Al-4V 是应用最为广泛的双相钛合金, 具有良好的综合力学性能和耐腐蚀性能^[1], 其零件制造过程存在着冷加工难度大、加工成本高等制造瓶颈问题, 限制了该合金的应用范围^[2]。金属增材制造技术的发展在一定程度上减少了零件制造过程中的金属切削量, 免去了开坯锻造过程, 降低了生产成本, 为钛合金零件的制造提供了一个新的途径。随着金属增材制造技术的快速发展, 该技术已由最初的模型制造与原型制造, 走向了航空、航天、以及医疗等领域, 并成为推动我国工业水平进步的一大动力^[3]。

在金属增材制造方法中丝材电弧增材制造(wire arc additive manufacturing, WAAM)借助于钨极氩弧焊(tungsten inert gas welding, TIG)或熔化极气体保护焊(gas metal arc welding, GMAW)等常规堆叠焊接方法作为成形手段进行堆覆成形, 相比激光选区熔化(SLM)等技术具有更高的熔敷效率、更低的设备成本^[4]。电弧熔丝增材制造过程中在凝固、冷却阶段因骤热骤冷而易于产生较大的残余应力, 特别是大尺寸结构的制造, 许多情况下无法进行后续热处理, 使残余应力无法消除, 致使应力累积乃至部件变形甚至开裂, 进而影响部件的成形和使用。钛合金丝材电弧增材制造横向断面组织往往呈现魏氏组织, 纵向原始 β 晶粒粗大、组织和力学性能

存在明显的各向异性^[5]。如何从组织形态、应力控制等方面改善沉积成形中的问题是近年来研究的热点^[6,7]。

电弧熔丝增材辊轧复合制造工艺作为一种低成本、高效的增材制造方法, 近年来逐渐得到了国内外学术界的普遍关注^[8]。华中科技大学张海鸥、中国航空制造技术研究院单飞虎等人提出了一种增材过程同步辊轧复合成形的增材方法, 通过层层辊轧热坯料, 使增材成形的组织得到细化, 内应力弱化, 显著提高其强度^[9-11]。英国 Cranfield 大学的 Colegrove 等人^[12,13]在钛合金增材过程中引入了层层辊轧过程, 改善了沉积金属组织的和力学性能。

本研究针对丝材电弧增材与辊轧复合成形过程进行有限元模拟, 采用 TIG 方法进行沉积, 研究 Ti-6Al-4V 钛合金沉积成形后的温度场特征, 以及残余应力与等效塑性应变等情况。分析了不同轧辊压下量等因素对沉积金属残余应力和等效塑性应变的影响规律。为改善 Ti-6Al-4V 钛合金丝材电弧增材制造工艺提供依据。

1 有限元模型建立

电弧熔丝增材辊轧复合制造不仅有热源的加热作用, 同时还有辊轧过程, 在有限元模拟中主要采用生死单元技术来模拟电弧增材过程。图 1 为所建立的几何模

收稿日期: 2019-03-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0701304)

作者简介: 鞠洪涛, 男, 1985 年生, 博士生, 中国科学院金属研究所, 中国科学技术大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110016, 电话: 024-23971946, E-mail: htju16b@imr.ac.cn

型,由基板、沉积金属层、工作台、轧辊等几部分组成。基板材质为 Ti-6Al-4V 钛合金板,尺寸为: 200 mm×100 mm×4 mm。沉积金属材质为 Ti-6Al-4V 钛合金焊丝,直径为 1.2 mm。模拟中共沉积金属 10 层,每层厚度为 2 mm,且每层网格轮廓为上拱的弧形。工作台的主要作用是在沉积和轧辊辊轧过程中承载和冷却基板,并对基板和沉积金属起到固定作用。工作台材质为 42CrMo4 钢,所有工件初始温度为 20 °C。工作台对基板的散热作用在本模型中也给予了考虑。轧辊的材质选用 42CrMo4 钢,直径 50 mm,宽度 20 mm。当轧辊形状为正圆柱体时,辊轧后沉积层金属顶部变为平面。在模拟过程中不关心轧辊和工作台的变形以及内部应力分布情况,因此将轧辊和工作台简化为带有材料属性的可传热刚体模型,以提高计算速度。而对于基板,则要考虑其变形和应力分布问题,因此基板设置为变形体;而且每层沉积金属都设置为独立的变形体。

本模型模拟了 10 层电弧增材与辊轧复合成形的过程,并在沉积 10 层结束后增加了 800 s 的冷却过程,以模拟成形后的应力分布和变形的演化情况。由于采用钨极氩弧焊方法进行沉积,焊接热源选择双椭球热源模型,热源形状和尺寸定义如图 2 所示^[14-16]。

双椭球热源模型的前后两半椭球采用不同的表达式,前半部分椭球内热源分布的表达式为:

$$q(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3}f_1Q}{\pi a_f b d \sqrt{\pi}} \exp(-3\frac{x^2}{a_f^2}) \exp(-3\frac{y^2}{b^2}) \exp(-3\frac{z^2}{d^2}) \quad (1)$$

后半部分椭球内的热源分布表达式为:

$$q(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3}f_2Q}{\pi a_r b d \sqrt{\pi}} \exp(-3\frac{x^2}{a_r^2}) \exp(-3\frac{y^2}{b^2}) \exp(-3\frac{z^2}{d^2}) \quad (2)$$

式中, $Q=\eta UI$, f_1 和 f_2 为前后椭球热量分布函数,且 $f_1+f_2=2$ 。本模型中热源尺寸为: $a_f=3$ mm, $a_r=5$ mm, $b=2$ mm, $d=5$ mm。

模拟的初始条件和边界条件为:基板初始温度设为 20 °C,即基板不预热,环境温度和轧辊温度同样为 20 °C。电弧沉积速度设为 10 mm/s,热源功率 4000 W,热源效率为 0.8。每层沉积金属均从一端开始施焊,从另一端进行熄弧。在基板的 4 个直角内施加位移约束,以防止基板发生移动,这一约束条件在焊后进行了卸载,以模拟夹具撤除后的最终变形情况。考虑到各个组成部分对周围空间均有对流和辐射散热,因此施加了 face-film 边界条件。表 1 给出了有限元模拟过程中 Ti-6Al-4V 钛合金的物理性能参数。

表 2 为电弧增材过程与辊轧复合成型过程的模拟参数。

表 1 Ti-6Al-4V 钛合金的物理性能参数

Table 1 Physical properties of Ti-6Al-4V

Parameter	Value
Thermal conductivity/W·(m·K) ⁻¹	6.7
Thermal expansion coefficient/K ⁻¹	9.7×10 ⁻⁶
Young's modulus/Pa	1.138×10 ¹¹
Density/kg·m ⁻³	4.43×10 ³
Specific heat/J·(kg·K) ⁻¹	526.3
Poisson's ratio	0.342

表 2 Ti-6Al-4V 钛合金复合成形工艺有限元模拟参数

Table 2 Finite element simulation parameters for hybrid forming process of Ti-6Al-4V alloy

Parameter	Value
Heat source power/W	4000
Rolling reduction per layer/mm	0~0.844
Energy efficiency	0.8
Deposition speed/mm·s ⁻¹	10
Wire feed speed/m·min ⁻¹	1.6
Distance between roll and heat source/mm	80
Height of each layer/mm	2
Roller shape	Cylindrical roller
Diameter of the rollers/nm	50
Coefficient of friction	0.2 ^[16]
Dewell time between 2 layers/s	20

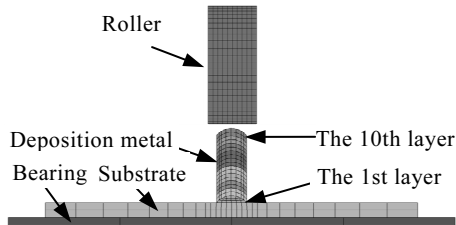


图 1 增材辊轧复合模拟的有限元模型

Fig.1 Finite element model of the hybrid manufacturing

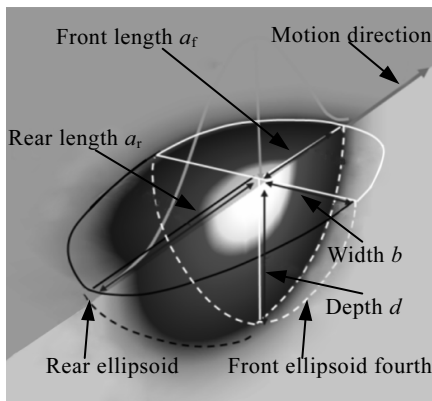


图 2 双椭球热源模型尺寸定义

Fig.2 Size definition of double ellipsoid heat source model^[14]

在有限元模拟中本构关系的准确性关系到模拟结果的可靠性，而 Arrhenius 方程是一种广泛应用的本构方程，适用于绝大多数金属材料。通过对 Simufact 材料数据库中的流变曲线进行分析和计算，证明 TC4 钛合金本构关系符合 Arrhenius 方程形式，所计算出的本构方程各项系数如表 3 所示。

所求出的本构方程为：

$$\dot{\epsilon} = 7.19 \times 10^{22} [\sinh 0.011356\sigma]^{3.12} \exp\left(\frac{-540.84 \times 10^3}{RT}\right) \quad (3)$$

2 模拟结果与分析

2.1 温度场模拟

在电弧增材过程中，温度场的形状在已形成的沉积层上呈现长椭圆形，轧辊附近的沉积金属温度为 950~1000 °C，如图 3 所示。在电弧增材过程中，温度场等温面形状在已形成的沉积层上也呈现出长椭圆形，且此时的轧辊温度为 718 °C。

2.2 不同轧辊压下量的影响

圆柱形轧辊是指轧辊的轧辊面为圆柱形，如图 4a 所示。在 Ti-6Al-4V 钛合金电弧增材过程中使用圆柱形轧辊进行轧制会在沉积金属上形成平面的变形表面，如图 4b 所示。圆柱形轧辊是目前研究中应用较为广泛的轧辊形状，Fu 等人对贝氏体钢的电弧沉积与轧辊轧复合成形过程进行研究，发现圆柱形轧辊复合成形过程可以有效地减少沉积金属力学性能的各向异性，并显著地提高贝氏体钢的冲击韧性和延伸率^[17]。

轧制过程中轧辊与沉积层金属接触变形为非均匀变形，如图 4b 所示。在圆弧形沉积层顶部的变形量最大，沿着沉积层中心线两侧塑性应变对称分布，且在同一高度上沉积层中心线上的等效塑性应变最大。

表 3 TC4 钛合金 Arrhenius 本构方程中的各参数值

Table 3 Parameters in Arrhenius type constitutive equation of

TC4 Titanium Alloy				
n	α/MPa^{-1}	β/MPa^{-1}	$Q/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	A/s^{-1}
3.12	0.011356	0.059166	540.84	7.19×10^{22}

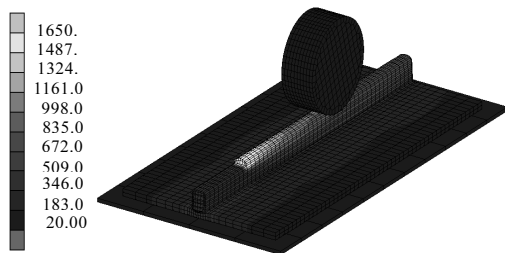


图 3 电弧增材与轧制复合成形过程中的温度场

Fig.3 Temperature field in the WAAM +Rolling Process

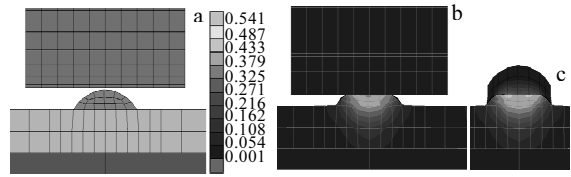


图 4 第 1 层沉积金属采用圆柱形轧辊轧制时的变形效果

Fig.4 Deformation of the first layer of deposited metal under cylindrical rollers: (a) the shape of the first layer as deposited; (b) equivalent plastic strain during rolling; (c) after the first layer is rolled and the second layer just has formed

Martina 等人对 Ti-6Al-4V 熔丝电弧增材与轧制过程进行了实验，分别采用 50 和 75 kN 轧制力时在高度方向产生的应变为 7.9%和 18.2%^[18]，为研究更大范围压下量对等效塑性应变的影响规律，本研究应变选择 0%~42.2%，由于层高为 2 mm，则压下量分别为 0~0.844 mm。图 5 为圆柱形轧辊采用不同压下量时最终成形后的等效塑性应变对比结果。图 6 为圆柱形轧辊采用不同压下量时横截面上的等效塑性应变曲线。从图 5 和图 6 中可以看出，随着轧辊压下量的增加，等效塑性应变显著增加，等效塑性应变的最大值出现在沉积层金属的中心部位。

图 7 为采用圆柱形轧辊时沉积金属中心横截面上的纵向应力分布（沿筋条方向）。从中可以看出，0 mm 压下量时沉积层顶部纵向压应力数值较小，而随着压下量的增加，顶部的纵向压应力都有所升高，这对提高沉积金属的疲劳强度有一定的积极作用^[19,20]。

图 8 为采用圆柱形轧辊并冷却 800 s 后基板底面中心线两端在高度方向的翘曲位移情况。图 8 中左右两端的翘曲位移包含了夹具卸载并冷却后的零件移动变形。

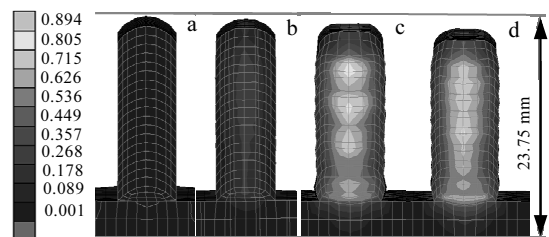


图 5 圆柱形轧辊采用不同压下量时最终成形后的等效塑性应变

Fig.5 Equivalent plastic strain after final forming with different reductions by cylindrical roller: (a) 0 mm, (b) 0.344 mm, (c) 0.546 mm, and (d) 0.844 mm

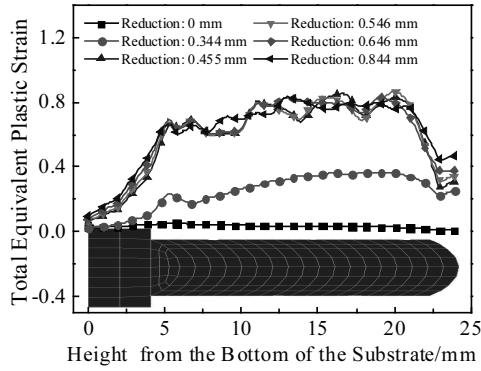


图 6 采用圆柱形轧辊获得的沉积金属横截面上的等效塑性应变

Fig.6 Equivalent plastic strain on the cross section of the deposited metal by cylindrical roller

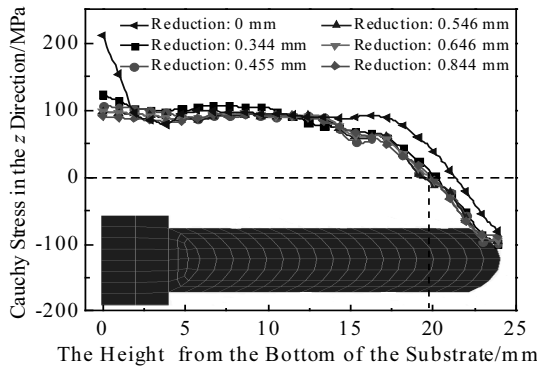


图 7 圆柱形轧辊时沉积金属中心截面上的纵向应力 (沿筋条方向)

Fig.7 Cauchy stress on the cross section of the deposited metal after rolling on the mid-line

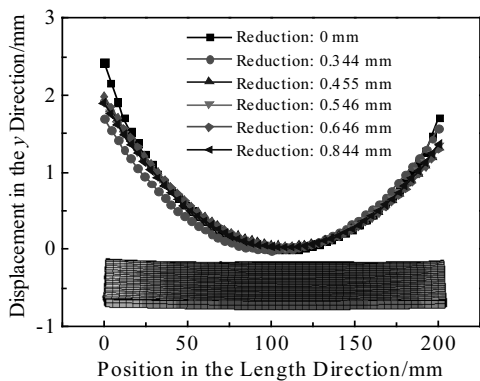


图 8 采用圆柱形轧辊时基板在高度方向的变形 (y 方向位移)
Fig.8 Deformation of the substrate in height direction with different reductions (cylindrical roller, the displacement in y direction)

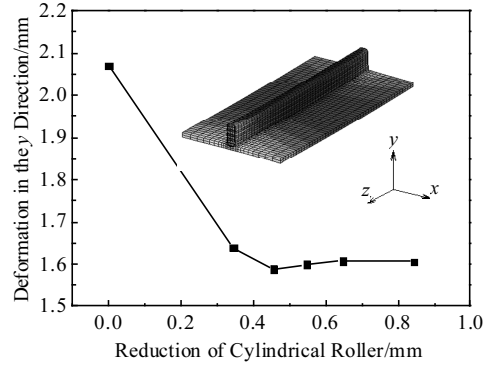


图 9 采用圆柱形轧辊时基板在高度方向的变形 (两端位移平均值)

Fig.9 Deformation of the substrate in height direction with different reductions (cylindrical roller, average displacement of the both ends)

为了直观对比变形结果, 将基板左右两端最大高度方向位移求平均数, 并以轧辊压下量为横坐标绘制曲线, 如图 9 所示。可见, 随着轧辊的压下量的增加, 基板和沉积金属的翘曲变形变小, 产生这一现象的原因与辊压过程降低沉积金属的纵向收缩有关。增加轧辊压下量后沉积金属沿纵向的塑性变形量加大, 抵消了由于沉积金属冷却收缩造成的翘曲变形。但轧辊压下量增大到一定程度后这种沿纵向的塑性变形增加程度有限, 因此对沉积金属的纵向收缩作用就不再提高, 使得翘曲变形量趋于稳定。

3 结 论

1) 电弧增材与辊轧复合成形过程中轧辊与沉积金属接触变形并非均匀, 沉积层顶部变形最大; 同一高度上沉积层中心线上的等效塑性应变最大, 随着轧辊压下量的增加, 等效塑性应变显著增加, 其最大值出现在沉积层的中心部位。

2) 采用圆柱形轧辊可降低沉积金属纵向拉应力, 且随着压下量的增加, 顶部的纵向压应力有所上升。

3) 增加轧辊压下量有利于降低基板和沉积金属的翘曲变形; 轧辊压下量增大到一定程度后翘曲变形量趋于稳定。

参考文献 References

[1] Li Fuquan(李福泉), Gao Zhenzeng(高振增), Li Liqun(李俐群) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(1): 177

[2] Wu B T, Pan Z X, Ding D H *et al. Journal of Manufacturing*

- Processes*[J], 2018, 35: 127
- [3] Bai J Y, Fan C L, Lin S B *et al.* *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2017, 26(4): 1808
- [4] Li R, Xiong J, Lei Y Y. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2019, 40: 59
- [5] Baufeld B, Biest O. *Science and Technology of Materials*[J], 2009, 100: 1536
- [6] Wang Z, Xiao Z Y, Huang C S *et al.* *Materials*[J], 2017, 10(10): 1
- [7] Donoghue J, Antonysamy A A, Martina F *et al.* *Materials Characterization* [J], 2016, 114: 103
- [8] Cunningham C R, Flynn J M, Shokrani A *et al.* *Additive Manufacturing* [J], 2018, 22: 672
- [9] Zhang H, Wang X, Wang G *et al.* *Rapid Prototyping Journal*[J], 2013, 19(6): 387
- [10] Fu Y, Zhang H, Wang G *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2017, 250: 220
- [11] Shan Feihu(单飞虎), Gong Shuili(巩水利), Liu Qi(刘琦) *et al.* *China Patent*(中国专利), CN108384938B9090[P]. 2020
- [12] Colegrove P A, Martina F, Roy M J *et al.* *Advanced Materials Research* [J], 2014, 996: 694
- [13] Coules H E, Colegrove P A, Cozzolino L D *et al.* *Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2012, 17(5): 394
- [14] Fachinotti V D, Anca A A, Cardona A. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*[J], 2011, 27(4): 595
- [15] Wu B, Ding D, Pan Z *et al.* *Journal of Materials Processing Technology* [J], 2017, 250: 304
- [16] Liu J, Tan M J, Aue-u-lan Y *et al.* *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2014, 69: 1097
- [17] Fu Y, Zhang H, Wang G *et al.* *Journal of Materials Processing Technology* [J], 2017, 250: 220
- [18] Martina F, Colegrove P A, Williams S W *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2015, 46: 6103
- [19] Hönnige J R, Colegrove P A, Ganguly S *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2018, 22: 775
- [20] Hönnige J R, Colegrove P A, Ahmad B *et al.* *Materials and Design*[J], 2018, 150: 193

Finite Element Simulation of Hybrid Manufacturing of Ti-6Al-4V by Wire Arc Additive Manufacturing and Rolling

Ju Hongtao^{1,2}, Xu Dongsheng¹, Shan Feihu³, Yang Rui¹

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

(2. University of Science and Technology of China, Shenyang 110016, China)

(3. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: In wire arc additive manufacturing (WAAM), residual stress is easily generated during solidification and subsequent cooling, which affects the formation and use of the components. In this paper, finite element simulations were carried out to investigate the influence of roller reductions on the temperature, stress, strain and residual stress distribution in components during the hybrid forming of Ti-6Al-4V alloy by WAAM and interlayer rolling. The results show that interlayer rolling reduces the residual macroscopic stress significantly in the deposited metal, and at the same time reduces the overall stress on the substrate. Increasing reduction can reduce significantly the macroscopic residual stresses and distortion of the components. The residual stress can be significantly reduced by profiled roller and increasing rolling reduction, which leads to a new route for the optimization of process in wire arc additive manufacturing.

Key words: additive manufacture; rolling; residual stress; finite element simulation

Corresponding author: Xu Dongsheng, Ph. D., Professor, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, P. R. China, Tel: 0086-24-23971946, E-mail: dsxu@imr.ac.cn