

3D 打印零件的转折角度对成形温度和应力的影响

王福雨^{1,2}, 刘伟军¹, 赵吉宾¹, 孔源¹, 赵宇辉¹, 来佑彬^{1,2}, 韩文超^{1,2}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

(2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在复杂零件的 3D 打印过程中, 转角附近容易形成加工缺陷, 如宏观裂纹、毛刺、毛边、塌陷等。为减小转角处的缺陷, 通过对有转角零件的 3D 打印过程进行模拟分析, 得到不同零件的温度场和热应力场的分布规律, 以及机床加速度、角度大小、转角处温度、温度梯度和转角处应力变化的关系。模拟结果表明转角处的热应力不仅和温度梯度有关, 而且和转角两边所成的角度密切相关。试验验证了模拟过程温度的正确性及成形角度对成形质量的影响。

关键词: 3D 打印; 转角; TC4; 有限元模拟

中图分类号: TG146.2+3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)02-0515-07

近净致密金属的 3D 打印技术是近年来逐渐成熟的金属加工工艺, 是快速原型制造的新方法, 通过高功率激光熔化同轴输送的各种金属粉末逐道逐层堆积起来各种金属零件。将各种零件按照分层切片理论, 将零件逐层分切, 再逐道逐层用激光将金属粉末熔化堆积, 最终形成致密金属零件。3D 打印制造的金属零件具有优良的质量和强度, 主要用于钛合金、镍基合金等具有优良性能金属材料, 不仅能直接成形金属近净零件^[1,2]、修复金属零件^[3], 还可以进行表面改性^[4,5]。该技术在航空航天、医用及体育器材等领域有广阔的应用前景^[6]。

金属 3D 打印过程中温度梯度极大, 产生的热应力造成零件变形甚至开裂, 影响零件的成形质量及外形精度。为减少热应力、避免变形开裂, 对 3D 打印过程的温度、应力进行数值模拟, 是减少实际试验次数得到满意零件的有效方法^[7], 是得到现有测量设备难以采集的试验数据的有效手段。目前有限元模拟主要是探讨单道多层直线薄壁墙^[8]、单层多道^[9]和多道多层矩形体积模拟加工^[10], 并逐渐向复杂形状的激光快速成形零件模拟^[11]方向发展。

本实验针对单道多层的 3D 打印过程, 对成形过程的温度场、热应力场的模拟及验证, 揭示不同转折角度、机床加速度情况下温度、温度梯度和热应力场的分布规律, 为不同转折角度的 3D 打印技术的工艺优化提供理论支持。

1 基本假设

由于激光直接成形涉及到复杂的金属熔化、汽化以及快速凝固过程, 为了能够实现有限元的模拟和保证模拟结果的准确性, 本研究采用以下假设:

- (1) 成形过程中液相的流动、蒸发及等离子体对温度的影响, 折算到热导率、发射率和吸收率上。
- (2) 成形区域材料为各向同性。

2 数学模型

温度不均匀对结构的应力和变形的影响不仅在于产生热应变和热应力; 而材料机械性能如弹性模量、泊松比、屈服应力、热膨胀系数等往往随温度变化, 也会影响到结构应力分析结果。这种结构的热应力分析称为热弹塑性分析。有限元的求解过程如下所述。

从位移有限元推导出单元应力 \underline{P} 与节点上的等效外应力 $\underline{\sigma}$ 之间的平衡关系为:

$$\int_V B^T \underline{\sigma} dV = \underline{P} \quad (1)$$

式中, B^T 为形函数的转置矩阵, V 为单元体积。

B^T 是建立节点位移 \underline{U} 和单元总应变 $\underline{\epsilon}$ 之间的转换矩阵, 满足:

$$\underline{\epsilon} = B \underline{u} \quad (2)$$

式中, \underline{u} 代表单元位移。

由虎克定律可知:

$$\underline{\sigma} = D \underline{\epsilon} \quad (3)$$

式中, D 表示弹性系数矩阵。

对热弹塑性材料的塑性应变描述采用 J_2 流动理

收稿日期: 2015-01-28

基金项目: 高等数控机床与基础制造装备科技重大专项 (2013ZX04001-041)

作者简介: 王福雨, 男, 1987 年生, 博士生, 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016, 电话: 024-8360117, E-mail: wangfuyu_sia@163.com

论, 可将式(1)写成增量形式:

$$\Delta\sigma = D_{\theta} \Delta\varepsilon - h \Delta\Theta \quad (4)$$

其中, D_{θ} 依赖于温度的弹塑性系数矩阵, 包含弹塑性变形的贡献, h 是热应变对应力贡献大小的张量。

将式(1)带入式(2)和式(4)中整理得:

$$\int_V B^T D_{\theta} B \Delta u dV = \Delta P + \int_V B^T h \Delta \Theta dV \quad (5)$$

方程式(5)左端项代表材料在当前温度下的切线刚度影响, 右端第 2 项代表热应变所产生的等效热载荷。在热应力分析中, 温度的影响就反应在这 2 项上。

热应变的变化可用结构中温度对无热应力参考温度的变化量来决定, 即:

$$\frac{\partial \varepsilon_{ij}^{th}}{\partial t} = \alpha_{ij}(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (6)$$

式中, $\frac{\partial \varepsilon_{ij}^{th}}{\partial t}$ 代表热应变张量的变化率, $\alpha_{ij}(\Theta)$ 为随温度变化的瞬时热膨胀系数。

3 有限元模型

利用非线性有限元软件 MSC.Marc, 建立有限元数值模型。基板尺寸为 60 mm×45 mm×5 mm, 转角的长边为 25 mm, 短边为 15 mm, 宽为 2.8 mm。建立 30°; 60°; 90°; 120°; 150°和 180°转角情况下有限元模型, 180°时在相应位置停顿后继续前进, 具体如图 1 所示。

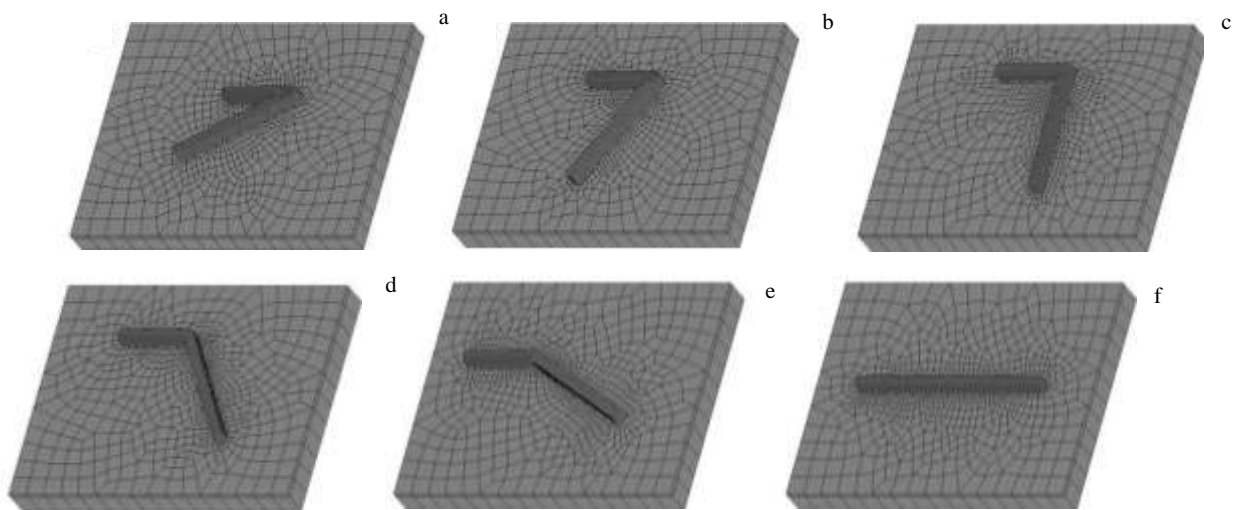


图 1 有限元模型

Fig.1 Finite element models: (a) 30°; (b) 60°; (c) 90°; (d) 120°; (e) 150°; and (f) 180°

在激光直接成形区域采用规则网格, 在热影响区采用自动划分, 在不影响精度的前提下用较大网格以减少计算量, 节约模拟时间。有限元模型的网格数为: 5 344~5 505, 节点数为: 4 875~4 953。模拟和试验采用相同的参数, 如表 1 所示; 采用标准 TC4 (Ti-6Al-4V) 球形粉末, 该材料的基本力学性能列于表 2。

4 结果分析

4.1 整体温度场分析

对有限元模型进行数值计算, 得到模型 3D 打印过程的温度和应力结果文件。提取不同转折角度情况下热源移动到第 3 层转角处时的温度场分布云图, 并列于图 2, 3, 4。

由于惯性的作用, 机床在扫描转角处会出现机械停顿, 这会影响 3D 打印加工质量。这里对机床停顿过程

对成形加工温度场和热应力场的影响进行了数值模拟分析, 取机床的加速度为 0.5 g。对比图 2 和图 3 的熔池温度可以发现机械停顿后的短暂时间内温度明显升高, 而且热影响区增大, 热影响区的带状向圆形变化。与图 4 对比可以发现, 如果机床不停顿, 则热影响区明显变小、温度低, 并且沿着扫描的路径呈带状分布。将热源刚到转角处、刚离开转角和机床不停顿情况下的最高温度作比较, 如图 5 所示。

分析图 5 可知, 在机床有停顿情况下会使转角处的温度升高。转折角度为 60°时温度变化最小, 其它转折角度的温度升高明显; 转折角度为 90°时温度升高幅度最大。机床不停顿时, 转角处的温度较有停顿情况下热源刚到转角时还低, 说明机床不停顿时热量不易在转角处积累, 加工温度升高少。实际加工受机床加速度限制, 提高机床在转折角度处加速度, 可有效减小机械停顿对成形温度的影响。

表 1 实验参数表

Table 1 Experiment parameters

Laser power/W	Scanning speed/mm s ⁻¹	Powder feeding speed/g min ⁻¹	Machine tool acceleration	Angle change/(°)
1 700	3	10	Infinity, 0.5 g	30, 60, 90, 120, 150, 180

表 2 TC4 粉末部分热物性参数

Table 2 Parts of thermophysical parameters of TC4 powder

Θ/°C	λ /W (K m) ⁻¹	C _p /J (kg K) ⁻¹	E/GPa	α ₁ /×10 ⁻⁵ K ⁻¹	ν	ρ /kg m ⁻³
20	17.0	500	120.0	0.900	0.300	4 420
200	15.0	580	110.0	0.965	0.310	4 420
400	15.0	595	88.0	1.107	0.325	4 420
600	16.0	615	70.0	1.004	0.342	4 420
1 530	20.0	760	3.5	1.005	0.38	4 420
1 650	20.5	840	3.0	1.006	0.384	4 420
2 000	21.0	730	0.1	1.008	0.390	4 420

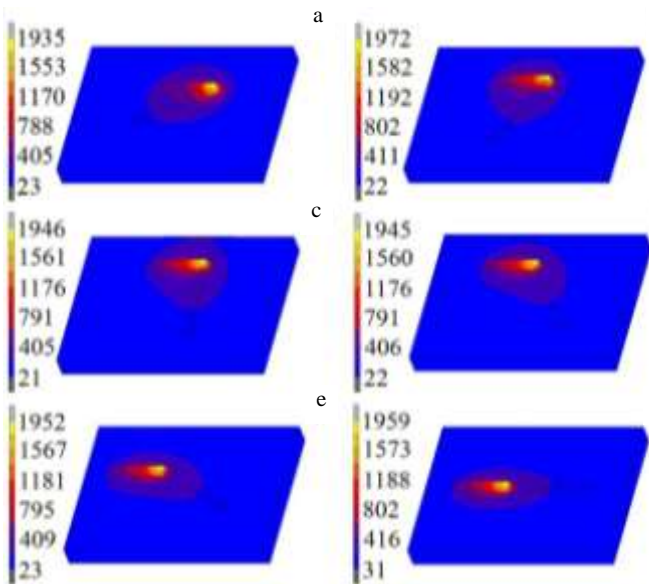


图 2 热源刚到扫描转角处时的温度场云图 (°C)

Fig.2 Temperature field cloud pictures when the heat just arrives the corner: (a) 30° (b) 60° (c) 90° (d) 120° (e) 150° and (f) 180°

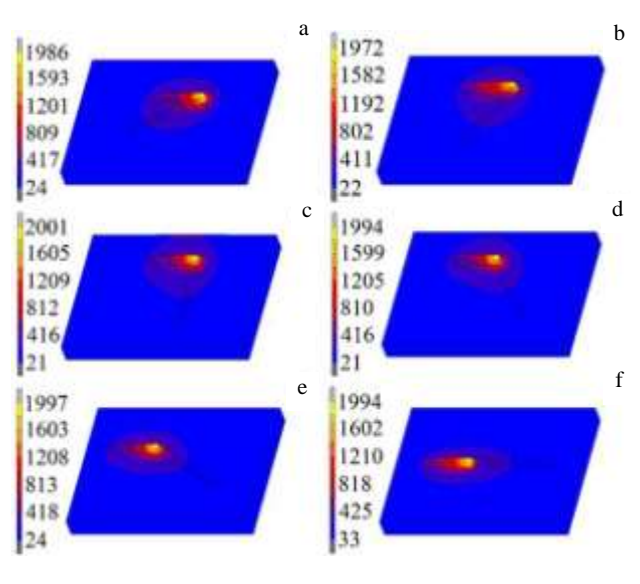


图 3 热源刚离开扫描转角时的温度场分布云图 (°C)

Fig.3 Temperature field cloud pictures when the heat just leaves the corner: (a) 30° (b) 60° (c) 90° (d) 120° (e) 150° and (f) 180°

取热源刚到、离开转角时刻，以及不停顿情况下的最大温度梯度，汇总于图 6。图中，机床有停顿的情况下，对比热源刚到时和热源刚离开时两条温度梯度曲线，表明热源刚到时温度梯度大于热源离开时。说明热源在转角处有停顿时，会将转角处整体温度提高，因此温度梯度会下降。比较机床不停顿与机床停顿情况的 2 条曲线，发现不停顿情况下与停顿时热源刚到转角时的温度梯度基本相同。

4.2 整体热应力场分析

通过对温度场的分析求解，根据热弹性模型得到热源移动每个增量步的整体热应力分布云图。将不同转折角度的第 3 层热应力场分布云图列于图 7~图 9。

由图 7~图 9 可知，激光热源刚到转角处时，热应力峰值区域出现在基板上激光热源的前端方向，当激光热源刚离开扫描转角时，成形区与基板交界区域热应力增大，影响范围也增大。机床不停顿时热影响区小，所以热应力主要分布在成形区上。相关试验表明，交界区的热应力集中对成形质量影响较大^[12]，因此应

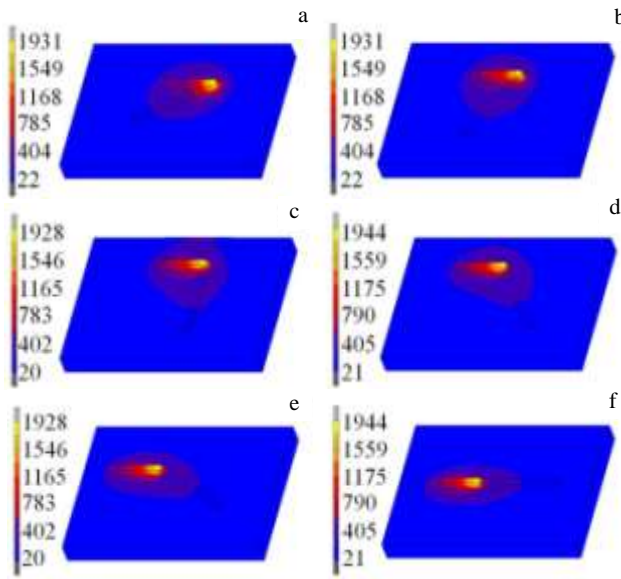


图 4 机床不停顿时的温度场分布云图 (°C)

Fig.4 Temperature field cloud pictures of the machine tool nonstop: (a) 30°, (b) 60°, (c) 90°, (d) 120°, (e) 150°, and (f) 180°

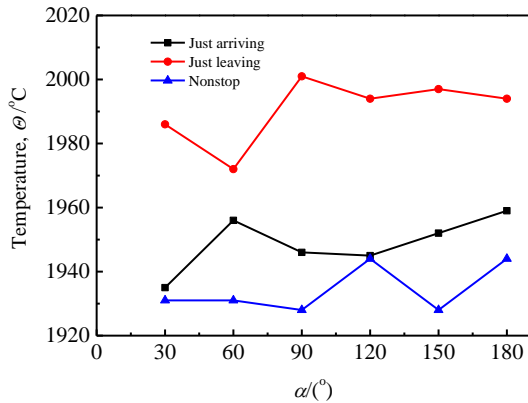


图 5 温度对比曲线

Fig.5 Temperature contrast curves

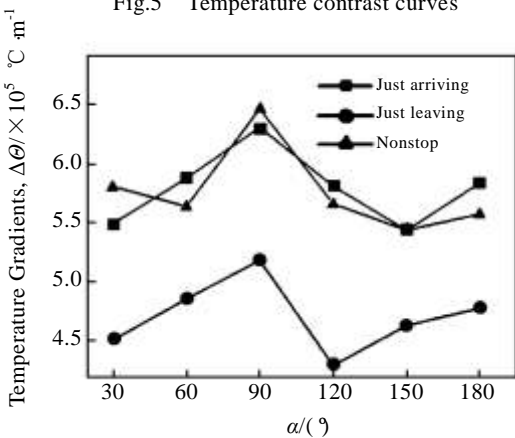


图 6 最大温度梯度对比曲线

Fig.6 Curves of maximum temperature gradients

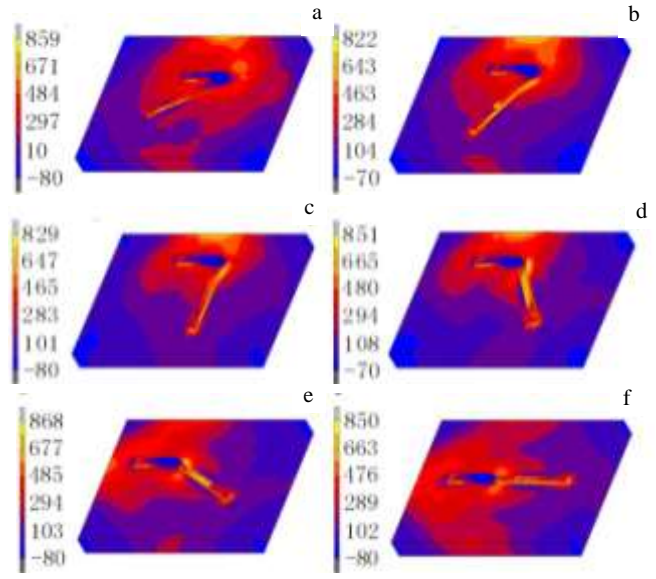


图 7 热源刚到扫描转角处时的热应力云图 (MPa)

Fig.7 Thermal stress field cloud picture when the heat just arrives the corner: (a) 30°, (b) 60°, (c) 90°, (d) 120°, (e) 150°, and (f) 180°

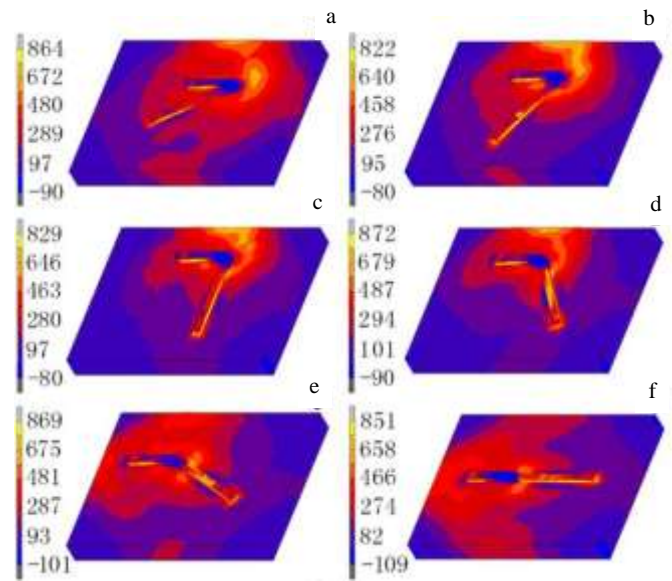


图 8 热源刚离开扫描转角的热应力分布云图 (MPa)

Fig.8 Thermal stress field cloud pictures when the heat just leaves the corner: (a) 30°, (b) 60°, (c) 90°, (d) 120°, (e) 150°, and (f) 180°

增大机床加速度, 避免热应力影响区域扩大和向交界区蔓延。

将不同扫描转角情况下的最大应力进行了汇总, 如图 10 所示。机床有停顿时: 60°扫描转角情况下热

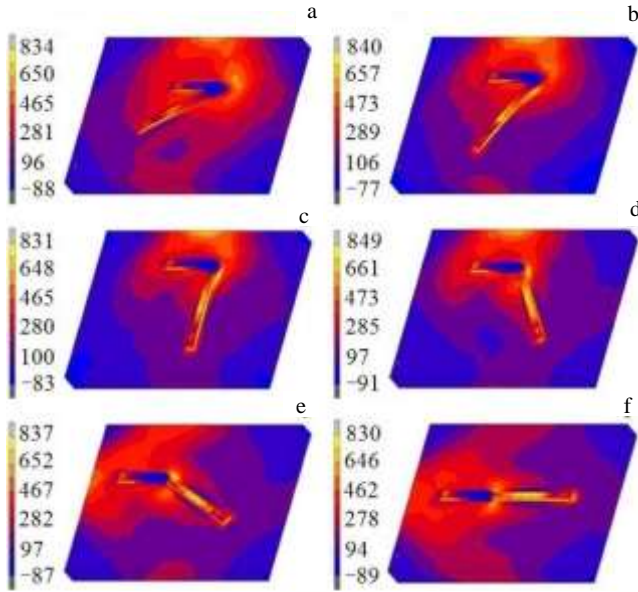


图 9 机床不停顿时转角的热应力场分布云图 (MPa)

Fig.9 Thermal stress field cloud pictures of the machine tool nonstop: (a) 30°; (b) 60°; (c) 90°; (d) 120°; (e) 150°; and (f) 180°

应力变化幅度最小，扫描转角大于 60°时，热应力值随扫描转角的增加而增大，当扫描转角增大到 120°时，热应力值增大趋势逐渐变缓。机床不停顿时：热应力总体偏小，只有 60°和 90°情况下热应力值略高于机床有停顿情况。

对比图 6 和图 10 知道 90°时，机床不停顿的温度梯度大，则应力大；但是机床不停顿时 60°的温度梯度比有停顿情况下小，可是热应力却略高，这说明转角大小对热应力变化有影响。对比机床停顿情况下热源刚到转角与机床不停顿情况下的温度梯度和热应力曲线，在 90°及小于 90°时成形过程温度梯度大的热应力小，大于 90°时温度梯度大则热应力大。

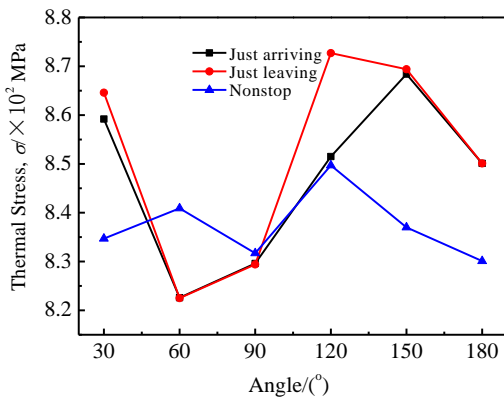


图 10 热应力对比曲线

Fig.10 Thermal stress contrast curves

4.3 模拟熔池温度结果分析

为了探讨扫描转角处的温度变化趋势，这里分别提取第 1 层熔池温度随时间变化曲线。采用单个增量步的时间为 0.08333 s，机床停顿时间为图中竖线所在的第 71 增量步，时间约为 5.9 s，具体如图 11 所示。

图 11 显示的是扫描路径上成形温度随时间变化曲线，转角处成形温度出现了升高的趋势。温度升高的主要原因是在扫描转角处机床存在停止和启动动作，所以激光热源会在转角处存在停顿，能量的积累使温度升高。因此，每次激光热循环，在转角处温度影响范围比其他部分要大，即转角处的成形温度较高。对比图 11a、11b 发现，在 90°之前，温度虽然在转角处温度波动，转折角度为 90°处的熔池温度升高最多，因为 90°之前转角处的两个边干涉区域较多而形成尖角，热量传递少，容易积累形成高温也容易散失，60°的温度升高最少。90°之后，2 个边基本上没有干涉，温升不明显只是集中在转角附近，120°的温度升高最少。即在 90°扫描转角情况下，成形温度升高幅度最大。

4.4 实测熔池温度结果分析

对不同扫描转角的情况进行加工试验，验证不同扫描转角对 3D 打印温度场的影响及验证数值模拟分

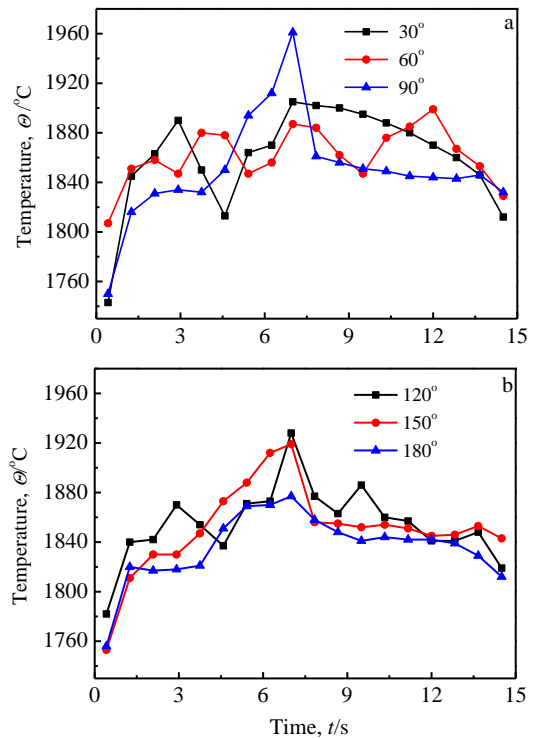


图 11 第 1 层熔池温度随时间变化曲线

Fig.11 Curves of the temperature with time of first layers: (a) 30°; 60°; 90°; and (b) 120°; 150°; 180°

析的准确性。采用 CO₂ 激光器作为光源，在实验前将基板表面打磨抛光并用无水乙醇擦净后放入真空箱内，经过抽真空和充氩气后进行加工试验。试验使用表 1 所列参数，机床加速度为 0.5 g，利用高温热像仪实时监测第一层的成形温度。将不同扫描转角情况下的熔池温度实测结果及图 11 中的模拟结果，按角度分别放在对应的时间处，竖线为机床停顿时刻，具体如图 12 所示。

因为金属粉末与激光作用时有飞溅、和激光接触

的不均匀情况，造成红外热像仪的温度抖动，但是通过图 11 可以发现，模拟的温度比实测的温度高，但是整体的趋势基本相同。采用的是单点测温仪，当分层高度变化时热像仪的温度将大幅下降。实测的温度波动幅度不大，说明分层厚度 0.7 mm 符合加工要求。实测的平均温度为 1750 °C，略高于 TC4 的熔化温度，能够满足其 3D 打印成形时对温度的要求，模拟的平均温度是 1916 °C，则两者相差 8.7%。

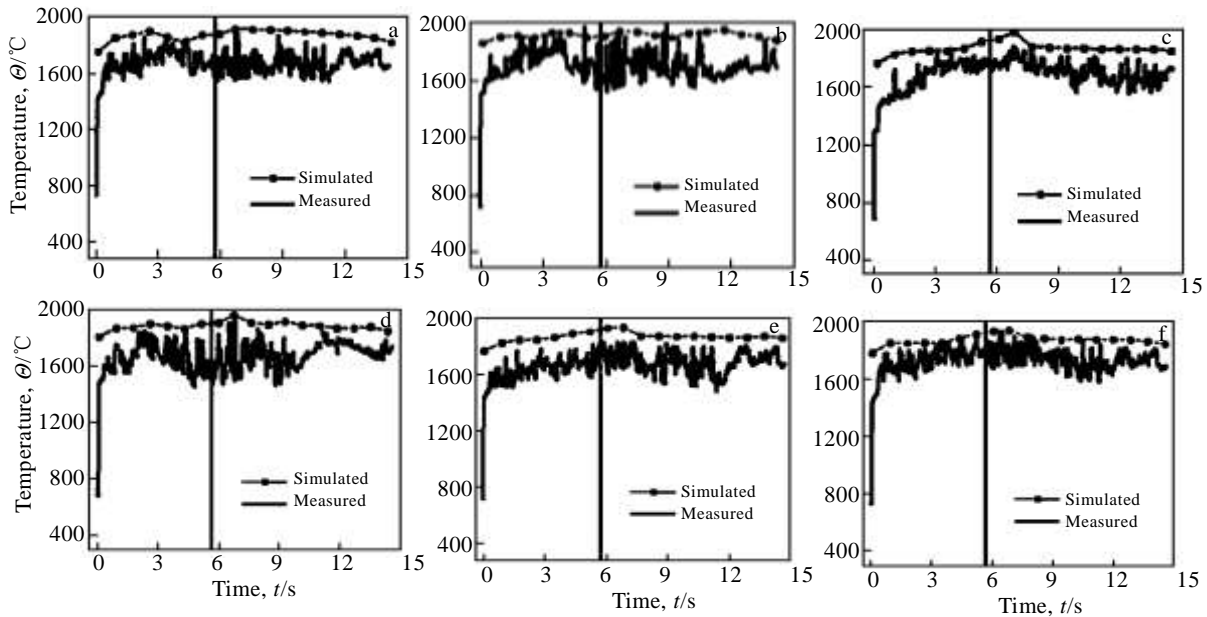


图 12 不同扫描转角成形过程温度检测结果

Fig.12 Curves of the temperature with time of first layers: (a) 30°; (b) 60°; (c) 90°; (d) 120°; (e) 150°; and (f) 180°

为分析转折角度处的温度变化幅度与转折角度的关系，提取模拟和试验不同转角处的温度值，将该值与平均温度做差，即得到扫描转角处温度变化幅度，示于图 13。可知试验中 90° 转折角度情况下，成形温度变化幅度最大，小于 90° 和大于 90° 时温度变化趋势变缓；试验的温度变化较模拟值剧烈，但趋势基本相同。

目前在线的检测手段主要是测温，而应力的变化是由于温度的变化产生的，温度的结果正确，为热应力的准确计算提供了保证。试件成形加工后去毛刺，去除粘连金属粉末后如图 14 所示。

从图 14 中可以发现 30° 和 60° 转角处的成形质量不好：转角处成形不尖锐，因转角处存在搭接，使得转角区域表面形成中间高两边低的斜坡，加快了边缘塌陷的产生，致使成形区外形有残缺。从 90° 以后成形质量明显变好，120° 的成形质量最好。成形件白亮没有氧化的痕迹，因为转角度数的增大，角度不尖锐，转角处

成形

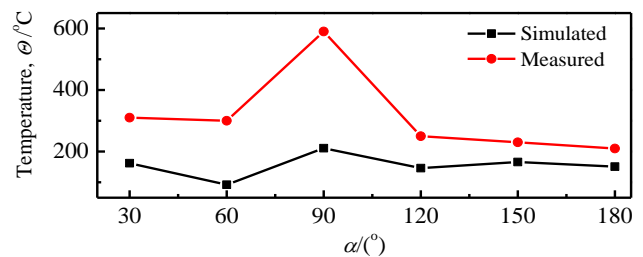


图 13 不同扫描转角处温度变化幅度

Fig.13 Temperature change rangeabilities in different scanning corners

质量好，搭接部分少，表面较平滑。但是 180° 的转角两边成直线，但由于机床停顿，存在局部隆起，使应力增高，成形轮廓质量下降。由此可见，转折角度和机床

停顿是影响转角处成形质量的主要因素。

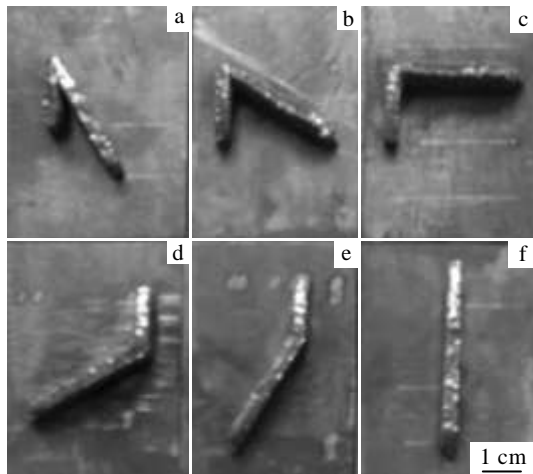


图 14 加工实物图

Fig.14 Photos of objects after processing: (a) 30°; (b) 60°; (c) 90°; (d) 120°; (e) 150°; and (f) 180°

5 结论

1) 数值模拟分析和实验监测结果显示, 扫描转角处成形温度比较高, 其中扫描转角为 90° 情况下温度升高幅度最大。

2) 试验加工过程的熔池温度监测数据验证了模拟过程熔池温度的正确性, 误差为 8.7%。

3) 3D 打印加工过程中, 温度梯度最高的转折角度并不是热应力最大的情况, 表明热应力大小除和温度梯度有关外, 还和成形处几何形状有关: 在 90° 及小于 90° 时成形过程温度梯度大的热应力小, 大于 90° 时温度梯度大则热应力大。

4) 成形过程中的机械停顿使 3D 打印过程温度、热应力升高; 实际加工中小角度转角容易出现表面倾斜、塌边等缺陷, 大角度时容易出现堆积情况; 即使在直线扫描的情况下, 也要保持扫描过程的连续性, 避免出现机械停顿。可采用提高机床的加速度获得较好成形质量。

参考文献 References

- [1] Wang Huaming(王华明). *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*(航空学报)[J], 2002, 23(5): 473
- [2] Lai Youbin(来佑彬), Liu Weijun(刘伟军), Kong Yuan(孔源) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(7): 1526
- [3] Lu Penghui(卢鹏辉), Liu Jianrui(刘建睿), Huang Weidong(黄卫东) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(2): 315
- [4] Zhang Kemin, Zou Jianxin, Li Jun et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2012, 22: 1817
- [5] Liu Shasha(刘莎莎), Wang Yuhang(王宇航), Zhang Weiping(张维平). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(5): 1041
- [6] Song Jianli(宋建丽), Li Yongtang(李永堂), Deng Qilin(邓琦林) et al. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报) [J], 2010, 46(14): 29
- [7] Li Peng, Yang Taiping, Li Sheng et al. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*[J], 2005, 45: 1288
- [8] Zhao Huihui, Zhang Guangjun, Yin Ziqiang et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 212: 276
- [9] Zhao H H, Li H C, Zhang G J et al. *Adv Mater*[J], 2013, 33: 402
- [10] Shuai Cijun, Feng Pei, Gao Chengde et al. *Mathematical And Computer Modelling of Dynamical Systems*[J], 2013, 19(1): 1
- [11] Jia Wenpeng(贾文鹏), Lin Xin(林鑫), Huang Weidong(黄卫东) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程) [J], 2007, 36(7): 1193
- [12] Di Qiuyue(狄秋月). *Material & Heat Treatment*(材料热处理技术)[J], 2011, 40(6): 123

Influence of the Corner Angle of 3D Printing Parts on Temperature and Thermal Stress

Wang Fuyu^{1,2}, Liu Weijun¹, Zhao Jibin¹, Kong Yuan¹, Zhao Yuhui¹, Lai Youbin^{1,2}, Han Wencho^{1,2}

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

(2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: During 3D printing processing of complex parts, many processing defects, such as cracks, burr, and collapse appear easily in the scanning around the corner. To reduce the scanning defects of different angle corners, the thermo-mechanical coupling field of different parts were simulated and the thermal and stress cloud pictures were analyzed. The relationship among the machine tool's acceleration, the size of angle, the temperature of the corner, temperature gradient and thermal stress were gained. The simulation results show that the thermal stress of corners depends on the machine tool's acceleration and the angle of corners with both sides. The temperature results of simulation and the forming quality of the different angles of corners are verified by the experiment.

Key words: 3D printing; corner; Ti-6Al-4V; finite element

Corresponding author: Wang Fuyu, Candidate for Ph. D., Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, P. R. China, Tel: 0086-24-8360117, E-mail: wangfuyu_sia@163.com