

金属桁架结构成形工艺分析

王天琪, 张宏宇, 耿冬寒, 李亮玉, 杨壮

(天津工业大学, 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津, 300387)

摘要: 针对电弧增材制造过程中桁架结构难以制造的问题, 提出一种基于冷金属过渡(CMT)点焊工艺的逐点添加空间桁架结构增材制造技术. 通过工艺成形试验获得最优的工艺参数, 并对桁架结构焊接过程进行受力分析, 建立桁架结构制造过程受力数学模型, 有效地解决了成型过程中立柱的下塌、熔滴在立柱上的下滴以及焊枪轮廓与构件的碰撞问题. 通过受力分析数学模型得出, 焊枪以垂直于基板的方向对桁架结构进行堆积时, 桁架立柱出现下塌现象的临界角为 50° . 将数学模型与桁架结构成型路径策略相结合, 可以对复杂立体特征桁架构件进行增材制造. 最后通过改变单个立柱弯曲角度的桁架结构增材试验, 得到满足成型精度要求的桁架结构件, 验证了数学模型的正确性及桁架焊成形方法的可行性.

关键词: 电弧增材制造; 桁架焊; 桁架成型; 碰撞; 路径规划

中图分类号: TG 455

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20200225001

0 序言

增材制造技术是通过计算机辅助设计制造(CAM/CAD), 对熔融金属进行逐层堆积、固化成为整体结构的近净成形技术. 与传统精密铸造和大型锻压相比, 增材制造技术具有制造复杂构件成本低和尺寸精度高等优点, 在机械制造、航空航天以及生物医药等领域具有广阔的应用前景^[1-3].

在增材制造复杂的成形件时, 工件会存在悬垂结构, 如果没有铸型和模具的支撑和约束, 通常会在成形过程中出现下塌、挂渣等缺陷, 导致预制件表面产生严重变形甚至中断成形, 因此需要支撑结构对预制件进行限制. 桁架结构不仅可以对零件的成形进行约束, 还可以对零部件结构进行简化. 为了减轻零部件重量, 通常采用桁架结构替代实体零部件. Mueller 等人^[4]针对增材制造效率较低的问题, 提出了熔覆材料桁架结构用于快速制作原型的方法来提高零件的成形速度. 李修峰等人^[5]针对卫星结构轻量化设计需求, 提出一种面向增材制造的桁架式支架结构设计方法, 并应用于卫星传感器支

架结构设计, 与传统构型支架相比, 新型支架重量减轻 35.4%. 王旭葆等人^[6]利用有限元分析方法对航空铝合金支架进行结构上的重新设计. 该设计结合了激光选区熔化的成形技术, 使支架重量减轻 24.5%. 桁架点阵结构兼具承载和功能特性, 然而其可制造性是制约其发展的关键, 增材制造成形的提出为解决这一瓶颈提供了全新的技术途径^[7].

目前, 桁架结构金属增材制造的成形方法和成形工艺研究较少. 采用机器人电弧增材制造技术对桁架结构的成形工艺进行研究. 采用逐点堆积的成形方法进行桁架的制造; 然后针对构件出现的成形缺陷, 建立受力分析的数学模型, 基于此模型, 计算不同角度的桁架结构对应的焊枪姿态, 用以解决焊枪与构件的碰撞问题和优化构件的成形路径; 最终通过成形试验验证数学模型的准确性和有效性.

1 试验方法

1.1 试验系统

试验采用 ABB 公司生产的 6 自由度 IRB1410 型工业机器人作为焊枪的载体. 电焊机接选择 Fronius TPS4000 Advanced 交直流 MIG/MAG 焊机, 通过 DeviceNet 数据线与机器人通讯. 焊接类型选择冷金属过渡技术(CMT), 该技术是将熔滴过渡与

收稿日期: 2020-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51975410); 国家自然科学基金资助项目(51875408); 天津市自然科学基金项目(18JCYB-JC18700).

焊丝抽送技术相结合, 熔滴过渡时电弧熄灭, 焊接电流降至几乎为零, 从而大大降低焊接热输入^[8]. 增材制造系统如图 1 所示. 焊丝型号为 ER70S-6, 其直径为 1.2 mm, 基板为厚度 8 mm 的 Q235 碳钢板, 焊枪喷嘴的直径为 24 mm, 保护气体为 CO₂ (82%) + Ar(18%), 保护气流量为 15 L/min.

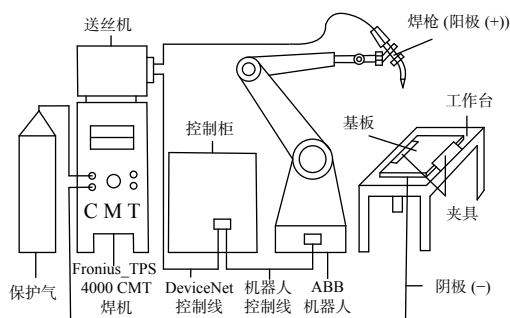


图 1 桁架结构增材制造系统

Fig. 1 Truss structure additive manufacturing system

1.2 试验成形方法

桁架结构的成形是利用 ABB 机器人搭配 CMT 焊枪采用逐点堆积方法进行桁架的成形^[9]. 复杂结构的不同分支是通过一系列连续的金属点构造的, 而不是逐层添加的, 这种增材制造成形方法符合机器人的空间运动.

在桁架结构成形过程中主要通过改变对送丝速度 v_{wfs} 、焊接速度 v_{ls} 和焊枪的移动高度 δ 3 个工艺参数进行控制. 桁架结构的成形过程如图 2 所示, 焊丝底端距离基板无限接近的点为堆积的起始点, 随着增材过程的逐点堆积, 每一次焊枪沿 z 轴的提升的高度为 δ . 经过 i 个沉积点的沉积, 得到成形良好的立柱 (桁架结构的分支).

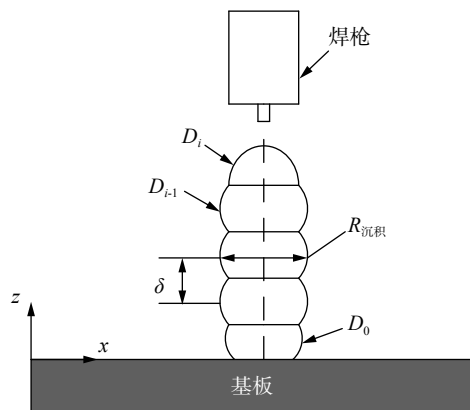


图 2 桁架结构的成型过程示意图

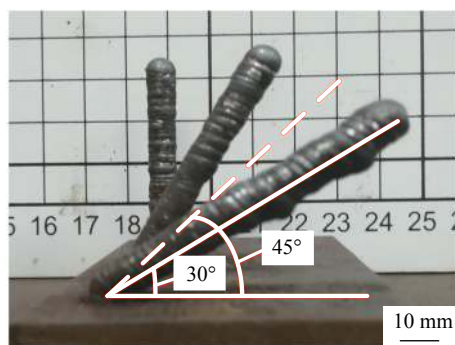
Fig. 2 Truss structure welding forming process diagram

2 工艺参数对成形立柱的影响

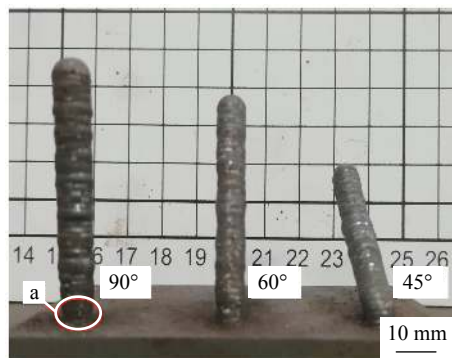
2.1 不同倾斜角度的立柱成形试验

采用送丝速度 9.4 m/min 和焊接速度 4 mm/s 的焊接工艺参数, 对不同倾斜角度的立柱进行分析. 焊接电流采用机器人接口的特殊两步模式, 起弧电流占比 60%, 收弧电流占比 110%, 起弧电流时间 0.1 s, 收弧电流时间 0.3 s, 起弧到正常焊接渐变时间 0.4 s, 收弧到正常焊接渐变时间 0.3 s.

在立柱堆积过程中, 焊枪始终与基板垂直, 立柱倾斜角度 θ 的理论角度分别为 90°, 60°和 45°. 当立柱倾斜角度为 90°和 60°时, 实际角度与理论角度基本一致. 而当 θ 角为 45°时, 实际角度比理论角度减小 15°, 出现了较为明显的下塌现象, 如图 3a 所示. 在增材制造过程中, 一方面由于金属熔化需要大量热输入, 如果焊枪进行连续的堆积, 会出现未得到冷却的熔融金属沿着已经沉积的立柱向下流淌, 导致构件无法成形; 另一方面熔滴在受到多种力的综合作用下, 不能按照原有轨迹进行沉积, 沉积金属会沿着立柱流淌. 因此在桁架结构成形过



(a) 成型效果侧视图



(b) 成型效果正视图

图 3 不同角度立柱的成型效果

Fig. 3 The molding effect of the column at different angles. (a) side view; (b) front view

程中, 在控制沉积温度的基础上, 更重要的是控制立柱的受力. 在多次成形试验过程中, 通过红外热像仪对沉积后的立柱温度进行监测, 当沉积温度冷却至 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 再进行下一个点的堆积, 焊缝的边缘不会出现下塌现象. 当完成立柱的堆积时, 堆积的第一个点 D_0 相比于其它点, 其沉积半径 R 比较小 (图 3b). 这是由于 D_0 处与基板接触散热速度快, 熔池温度迅速降低, 表面张力增加, 铺展性下降, 熔覆金属与基板结合能力较低, 熔池金属液态下停留时间较短, 未充分与基板结合.

2.2 焊接速度对立柱成形的影响

研究不同焊接速度对立柱几何尺寸的影响. 采用送丝速度 9.4 m/min , 焊枪移动高度 1 mm , 焊丝伸出长度 15 mm , 共逐点添加 $i = 40$ 层, a, b, c 和 d 组的焊接速度分别为 $4, 6, 8$ 和 10 mm/s , 获得的立柱高度如表 1 所示.

表 1 不同焊接速度下立柱的高度
Table 1 Column height at different welding speeds

样品	焊接速度 $v_{\text{ls}}/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	立柱高度 H/mm
a	4	42
b	6	40
c	8	39
d	10	38

由表 1 可知, 在相同堆积层数下, 立柱高度随着焊接速度的增大而减小. 这是由于在增材制造过程中, 焊接速度对单道焊缝的宏观尺寸有很大的影响. 在相同焊枪提升高度和送丝速度的情况下, 焊接速度增大, 金属的熔敷量减少, 导致立柱高度减小.

2.3 焊丝伸出长度对立柱成形的影响

研究不同焊丝伸出长度对立柱成形的影响. 采用送丝速度 9.4 m/min , 焊接速度 4 mm/s , 焊枪的移动高度 1 mm , 逐点添加 $i = 40$ 层, a, b, c 和 d 组的焊丝伸出长度分别为 $10, 15, 20$ 和 25 mm , 获得的立柱高度如表 2 所示.

表 2 焊丝伸出长度对立柱高度的影响
Table 2 Column height at different wire dry elongation

样品	焊丝伸出长度 l/mm	立柱高度 H/mm
a	10	39
b	15	42
c	20	45
d	25	48

由表 2 可知, 在相同堆积层数下, 立柱的沉积高度随着焊丝伸出长度的增加而逐渐增加. 这是由于随着焊丝熔化增加, 金属熔覆量增加, 导致立柱的堆积高度增加. 同时, 随着焊丝伸出长度的增加, 保护气保护效果越来越弱, 电弧抖动也随之增大, 不稳定的电弧逐渐导致立柱底部成型较小, 表面的粗糙度越来越差. 因此在试验中需要选择合适的焊丝伸出长度, 一般选择 $10 \sim 20\text{ mm}$.

3 受力分析及数学模型

由于桁架结构比较复杂, 在进行逐点堆积成形时, 焊枪轮廓与构件会发生碰撞和构件下塌等现象. 针对这些成形问题, 对桁架成形过程中立柱受力情况和焊枪倾斜角度进行分析^[10]. 为了便于计算, 对立柱的受力进行简化, 即熔滴在焊接过程中受到电弧压力 F_{arc} 、熔滴在氩气作用下的表面张力 F_{σ} 和熔滴的重力 F_G , 如图 4 所示.

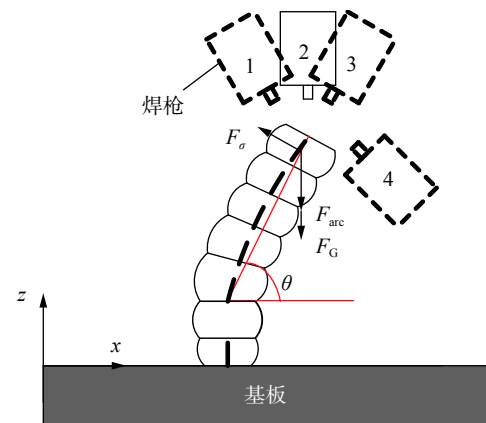


图 4 桁架结构成形过程中分支的受力分析

Fig. 4 Force analysis of the branches in the forming process of truss structure

在成形过程中, 桁架结构可以分为两种: 第一种, 成形的构件方向是垂直于基板方向 (图 2); 第二种, 成形的构件出现两个或两个以上的分支 (图 4). 从图中可知, 当桁架结构出现分支时, 根据不同的立柱倾斜角度, 桁架结构有 4 种成形方式, 即焊枪的倾斜角度不同. 根据立柱的受力情况, 每种成形方式的焊枪可以在一定的范围内进行调整. 为了更直观的描述立柱的受力情况, 选择第二种成形方式进行受力分析. 经过试验对比, 在最优的工艺参数下 (送丝速度 9.4 m/min , 焊接速度 4 mm/s 和焊枪移动高度 1 mm) 进行增材制造桁架, 可获得较好的形状, 得到的沉积熔滴半径 $R=3\text{ mm}$, 高度 $h=1\text{ mm}$.

受力分析为

$$F_{\sigma} = (F_{arc} + F_G) \cos \theta \quad (1)$$

$$F_{arc} = \frac{\mu_m I^2 \eta}{4\pi} \left(\ln \frac{r_D \sin \theta_d}{r_w} - \frac{1}{4} - \frac{1}{1 - \cos \theta_d} + \frac{2}{(1 - \cos \theta_d)^2} \ln \frac{2}{1 + \cos \theta_d} \right) \quad (2)$$

式中: μ_m 为自由空间的磁导率, I 为焊接电流, r_D 为熔滴半径, r_w 为焊丝半径, η 为电弧压力修正系数, θ_d 为电弧半锥角. 当电弧半锥角大于 60° 时, 对电

磁力的计算结果影响并不大, 为了使模型计算简化, 在计算过程中将电弧的半锥角 θ_d 取为 150° ^[11], 即

$$F_G = \frac{4}{3} \pi r_D^3 \rho g \quad (3)$$

式中: r_D 为熔滴半径, ρ 为液态熔滴的密度, g 为重力加速度.

$$F_{\sigma} = 2\pi R_c \gamma \quad (4)$$

式中: γ 为表面张力系数, R_c 为是熔滴与熔池接触的半径. 式 (1)-式 (3) 中的参数及数值见表 3.

表 3 受力分析公式参数

Table 3 Force analysis formula parameter value

自由空间磁导率 $\mu_m/(\text{N} \cdot \text{A}^{-2})$	熔滴密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	表面张力系数 $\gamma/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	熔滴半径 r_D/mm	焊丝半径 r_w/mm	重力加速度 $g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	接触半径 R_c/mm	电弧压力修正 系数 η
$4\pi \times 10^{-7}$	7800	1.22	2.5	0.6	9.8	2.5	11

在桁架结构成形过程中, 焊枪与成形立柱的相对位置关系只有两种. 第一种, 焊枪与立柱共线 (如图 4 焊枪 3 位置所示). 在这种情况下, 立柱的下塌与电弧压力无关, 只与熔滴重力和熔滴表面张力有关. 式 (1) 可以简化为 $F_{\sigma} = F_G \cos \theta$, 只要满足 $F_{\sigma} \geq F_G \cos \theta$, 立柱就不会出现塌陷. 第二种, 除图 4 中焊枪 3 位置外的其它 3 种位置. 在此受力情况下, 由式 (1) 可知, 只有当 $F_{\sigma} \geq (F_{arc} + F_G) \cos \theta$ 时, 立柱才可以按照理论值 θ 成形, 并且不会出现下塌现象, 保证零件的成形质量.

根据表 3 给定的数值计算得出, 熔滴的表面张力为 $0.019\ 054\ \text{N}$ 、电弧压力 $0.023\ 64\ \text{N}$ 和熔滴的重力 $0.006\ \text{N}$. 根据式 (1), 当焊枪处于竖直向下的位置时, 立柱的角度 $\theta = 50^\circ$ 是立柱出现下塌的临界角, 所以当立柱的弯角 $\theta < 50^\circ$ 时, 焊枪的位置需要向焊枪 3 的位置旋转. 在桁架结构成型过程中, 只需选择合适的焊枪角度和准确的控制堆积温度就可以完成复杂构件的成形. 在进行复杂形状制造时, 由于存在多种成型方式, 选择最优的焊枪角度进行添加制造, 既可以优化成型路径又可以避免焊枪与零件的碰撞. θ 越小, 构件的成型方式越少. 当角度 θ 接近于水平方向时, 采用的堆积方式是焊枪与成形立柱处于同一条直线上或者采用第 4 种成形方式.

4 成形试验

为了验证桁架结构受力分析及数学模型的正

确性, 选择桁架成形过程中常用到的分支弯曲角度进行验证, 并采用成形策略避免焊枪与成形构件发生碰撞, 以得到良好形状的桁架结构.

4.1 金字塔型桁架

试验对弯曲角度 θ 为 60° 的模型进行堆积. 如图 5 所示, 此模型垂直高度为 L_1 , L_2 , 尖部弯曲角度为 60° . 根据公式 $F_{\sigma} = (F_{arc} + F_G) \cos \theta$ 计算得出, $(F_{arc} + F_G) \cos 60^\circ = 0.015\ \text{N}$, 其数值小于 F_{σ} , 满足受力分析模型. 因此, 焊枪的姿态只需垂直于基板方向即可完成桁架的堆积. 金字塔型桁架的成形如图 6 所示, 实际成形尺寸为 $L_1 = 20\ \text{mm}$, $L_2 = 62\ \text{mm}$, 立柱的弯曲角度 $\theta = 60^\circ$. 成形构件与模型比较得出, 形状尺寸相差很小, 尺寸误差在允许的范围内.

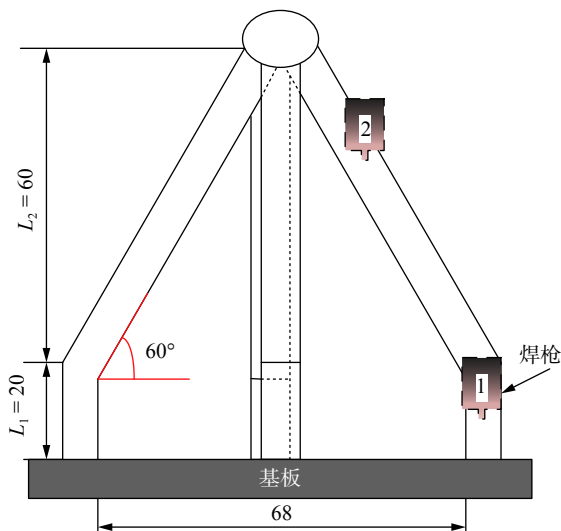


图 5 金字塔模型 (mm)

Fig. 5 Pyramid model

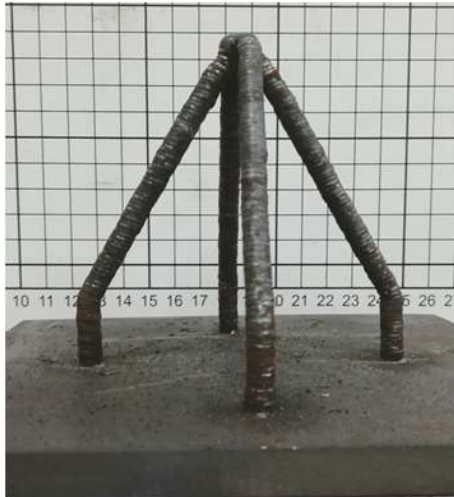


图 6 金字塔型桁架构件

Fig. 6 Pyramid truss members

因此, 该桁架结构验证了受力分析及数学模型的正确性.

4.2 方型桁架

试验采用正方形桁架验证受力分析及数学模型, 如图 7 所示. 此正方形桁架边长为 L , 弯曲角度 θ 为 45° . 由于 $\theta < 50^\circ$, 焊枪沿垂直于基板方向堆积无法成形, 因此对焊枪进行偏移. 为保证桁架结构的成形质量, 使焊枪偏移 45° , 使焊枪与立柱位于同一条直线. 根据公式 $F_\sigma = F_G \cos \theta$ 计算得到, $F_G \cos 45^\circ = 0.00425 \text{ N}$, 其数值小于 F_σ , 满足受力分析模型. 因此, 堆积此结构焊枪的姿态可选择图 7 中的焊枪 1 和 2, 它们与水平方向的夹角为 45° , 即焊枪与成形立柱共线. 方型桁架的成形路径分为 3 段, 分别为路径 1, 2 和 3. 构件成型过程见图 8. 首先按照

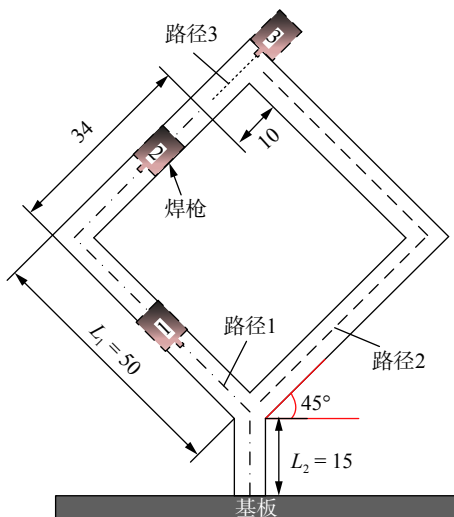


图 7 方型模型 (mm)

Fig. 7 Square model

路径 1 进行逐点添加堆积, 堆积第二段时焊枪只堆积到 34 mm, 如图 8d 所示. 然后依次按照路径 2、路径 3 的顺序继续堆积材料, 得到图 8e 完整的方型桁架构件. 通过成形策略可以避免焊枪与构件发生碰撞. 假设构件按照路径 1 堆积 50 mm, 然后再按照路径 2 进行堆积, 此时会发现焊枪会与构件产生碰撞.

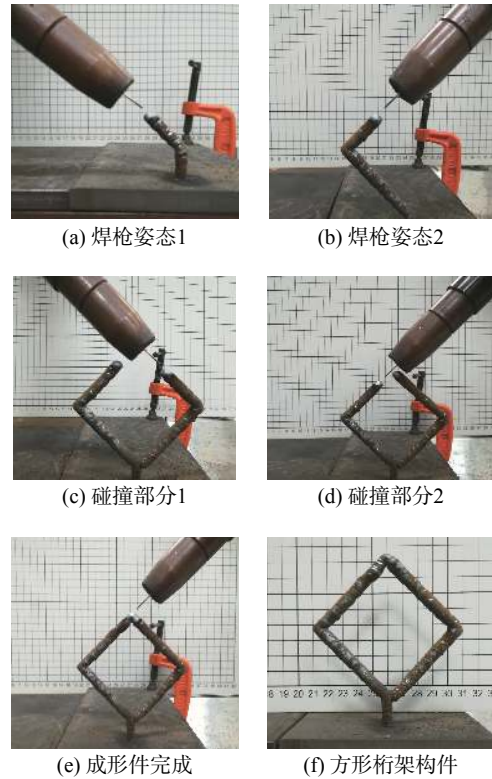


图 8 方型构件成形过程

Fig. 8 Square component forming process. (a) welding torch attitude 1; (b) welding torch attitude 2; (c) collision part 1; (d) collision part 2; (e) formed part finished; (f) square component

运用桁架结构的受力分析数学模型规划焊枪姿态, 并利用成形策略避免焊枪与成形构件发生碰撞. 成型构件如图 8f 所示, 实际成形尺寸 $L_1 = 52 \text{ mm}$, $L_2 = 17 \text{ mm}$, 立柱的弯曲角度 $\theta = 45^\circ$. 成型构件实际成形尺寸与理论值相差 2 mm, 误差在允许的范围内, 从而进一步验证了数学模型的有效性.

5 结论

(1) 建立桁架结构成形过程中的受力分析及数学模型. 根据该模型计算出, 当焊枪以竖直向下的姿态堆积时, 立柱倾斜角度 50° 为出现下榻的临界角, 随着倾斜角度的减小, 焊枪也随之偏转.

(2) 采用成形策略对金字塔和方形桁架结构成形路径规划,可以避免焊枪与立柱发生碰撞,保证了构件的成形质量,同时也验证了成形方法和成形工艺的有效性和实用性。

参考文献

- [1] 刘一搏, 孙清洁, 姜云禄, 等. 基于冷金属过渡技术快速成形工艺[J]. 焊接学报, 2014, 35(7): 1-4.
Liu Yibo, Sun Qingjie, Jiang Yunlu, *et al.* Rapid prototyping process based on cold metal transfer arc welding technology[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(7): 1-4.
- [2] 王天琪, 李天旭, 李亮玉, 等. 复杂结构薄壁件电弧增材制造离线编程技术[J]. 焊接学报, 2019, 40(5): 42-47.
Wang Tianqi, Li Tianxu, Li Liangyu, *et al.* Off-line programming technology for arc additive manufacturing of thin-walled components with complex structures[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(5): 42-47.
- [3] 孙清洁, 桑海波, 刘一搏, 等. 基于电弧增材制造的截面扫描轨迹规划[J]. 焊接学报, 2017, 38(10): 21-24.
Sun Qingjie, Sang Haibo, Liu Yibo, *et al.* Research on deposited layer scanning trace skanning based on rapid-prototyping using CMT technology[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(10): 21-24.
- [4] Mueller S, Im S, Gurevich S, *et al.* WirePrint: 3D printed previews for fast prototyping[C]//Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology. ACM, 2014: 273-280.
- [5] 李修峰, 高令飞, 王伟, 等. 一种面向增材制造技术的桁架式支架结构设计方法[J]. 宇航学报, 2017, 38(7): 751-757.
Li Xiufeng, Gao Lingfei, Wang Wei, *et al.* An additive manufacturing oriented structural design method for trussed bracket[J]. Journal of Astronautics, 2017, 38(7): 751-757.
- [6] 王旭葆, 曲波. 基于 SLM 工艺的航空铝合金支架的轻量化设计[J]. 机械设计, 2018, 35(10): 50-53.
Wang Xubao, Qu Bo. Lightweight design of aluminum-alloy aero support based on SLM[J]. Journal of Machine Design, 2018, 35(10): 50-53.
- [7] 王向明, 苏亚东, 吴斌, 等. 微桁架点阵结构在飞机结构/功能一体化中的应用[J]. 航空制造技术, 2018, 61(10): 16-25.
Wang Xiangming, Su Yadong, Wu Bin, *et al.* Application for additive manufacturing of lattice materials on integrated aircraft structures and functions[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(10): 16-25.
- [8] 张栋, 陈茂爱, 武传松, 等. 高速 CMT 焊送丝速度和焊接电流波形参数的优化[J]. 焊接学报, 2018, 39(1): 119-122.
Zhang Dong, Chen Maoai, Wu Chuansong, *et al.* Optimization of waveform parameters for high speed CMT welding of steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(1): 119-122.
- [9] Radel S, Diourte A, Soulié F, *et al.* Skeleton arc additive manufacturing with closed loop control[J]. Additive Manufacturing, 2019, 26: 106-116.
- [10] Pan Jiajing, He Xixin, Zhao Pengcheng, *et al.* Numerical analysis of typical droplets transfer mode in wire and arc additive manufacture process[J]. China Welding, 2020, 29(3): 44-53.
- [11] 武传松. 焊接热过程与熔池形态[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
Wu Chuansong. Welding thermal process and weld pool behaviour[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.

第一作者简介: 王天琪, 1981 年出生, 博士, 讲师. 主要从事焊接自动化, 电弧增材制造方面研究; Email: wtq0622@163.com.

通信作者简介: 李亮玉, 博士, 教授, 博士研究生导师; Email: 1014183463@qq.com.

(编辑: 张宏强)