[研究・设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.01.004

间隙填充模型增材制造温度场数值模拟

邵海龙,邢彦锋^{*},张 军,张小兵,杨夫勇,曹菊勇

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院,上海 201620)

摘 要:为探究间隙填充模型提高表面质量的热原因,课题组利用 Visual Environment 软件建立电弧增材制造间隙填充 有限元模型,分析了基体与填充体的温度历程,对比间隙填充模型与传统搭接模型中间道温度场变化,探讨填充体增材 方向及冷却时间对温度场的影响,并通过试验验证模拟结果。结果表明:间隙填充体峰值温度相较搭接体温度降低了 176 ℃,基体与填充体运动同向与反向差别较小;随着冷却时间增加,填充体中点峰值温度逐渐减少且幅度变缓。间隙 填充使峰值温度明显降低,基体与填充体同向及适当增加冷却时间可使增材制造温度分布更加均匀,得到更好的表面 质量。

关 键 词:电弧增材制造;间隙填充;温度场;Visual Environment
 中图分类号:TG444;TH164
 文献标志码:A
 文章编号:1005-2895(2023)01-0023-07

Numerical Simulation of Temperature Field for Additive Manufacturing by Gap-Filling Model

SHAO Hailong, XING Yanfeng*, ZHANG Jun, ZHANG Xiaobing, YANG Fuyong, CAO Juyong

(School of Mechanical and Automobile Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: To explore the thermal reasons for the gap-filling model to improve the surface quality, the finite element model of gap-filling in arc additive manufacturing was established by Visual Environment software. The temperature history of the matrix and gap-filling was analyzed. The temperature field changes in the intermediate channel between the gap-filling model and the traditional lap joint model were compared. The influence of filler material direction and cooling time on the temperature field was discussed. The simulation results were verified by experiments. The results show that the peak temperature of the gap-filler is 176 $^{\circ}$ C lower than that of the lap joint, and the difference between the movement of the matrix and the filler in the same direction and the opposite direction is small. As the cooling time increases, the peak temperature at the midpoint of the filler gradually decreases and the amplitude becomes slower. Gap-filling significantly reduces peak temperature, the same orientation of the matrix and gap-filler and the appropriately increased cooling time can make the temperature distribution of additive manufacturing more uniform and obtain better surface quality.

Keywords: wire and arc additive manufacturing; gap-filling; temperature field; Visual Environment

电弧增材制造由于其沉积效率高,制造成本低,适 合大尺寸构件的近净成形,在金属零件直接制造领域 前景广阔^[1-3]。然而,电弧增材制造直接沉积表面仍存 在质量问题,需要经过一定的后处理才能进行实际应 用。为此,国内外学者进行了相关研究。DOS 等^[4]基 于多层多道模型提出交替重叠道模型,研究表明该模 型可用于沉积层预测,但单道沉积截面不恒定易存在 空隙,要考虑接触角。Xu 等^[5]建立多轨道交替重叠模

收稿日期:2022-07-29;修回日期:2022-11-15

基金项目:上海市科委项目(20ZR1422600)。

第一作者简介:邵海龙(1997),男,安徽阜阳人,硕士,主要研究方向为增材制造仿真。通信作者:邢彦锋(1978),男,山东聊城 人,教授,主要研究方向为复杂薄板连接和电弧增材制造。E-mail:smsmsues@163.com

型,研究结果表明利用圆弧面计算截面上重叠面积使 成形表面平整,材料硬度更高。张军等^[6]利用冷金属 过渡技术(cold metal transfer, CMT)建立间隙填充模 型,通过填充所需体积获得更为平整的成形表面,模型 简单,成形效果好。CMT 工艺涉及一个从融化到凝固 的固-液-固过程,而此过程中主要是一个零件成形和 力学性能的温度变化,因此温度场变化是增材制造成 形的关键^[7-8]。目前国内外对增材制造温度场的研究 主要采用数值模拟与试验验证的方法。ZHAO 等^[9]通 讨熔化极气体保护焊(gas metal arc welding, GMAW) 研究不同沉积路径和冷却时间等工艺参数下的温度场 分布及演变规律,研究表明温度循环过程分为加速加 热、准稳态和稳态。陈克选等^[10]通过电弧增材制造技 术(wire arc additive manufacturing, WAAM)研究有、无 水冷对温度场的影响,研究表明在基板水冷条件下增 材高温区域小于无水冷条件下的高温区域,并且温度 梯度大于无水冷条件的温度梯度。赵鹏康等[11]通过 钨极惰性气体保护焊(tuingsten inert gas, TIG)研究基 板预热对温度场的影响,得出在合理温度范围内对基 板预热可使波谷连线趋于平缓,温度分布更为均匀。 Pan 等^[12]通过钨极惰性气体保护焊 TIG 研究在椭圆 形热源模型作用下的熔池温度场,得出熔池温度呈周 期性波动,且熔池形状和速度保持较小的振荡的结论。 目前针对增材制造温度场数值模拟研究进展明显,但 对于间隙填充方法的温度场相关的研究较少。因此, 课题组采用 Visual Environment 软件建立电弧增材制 造间隙填充有限元模型,分析间隙填充热演变规律,探 讨填充方向及冷却时间对温度场的影响。

1 间隙填充温度场模型及试验验证

1.1 间隙填充模型

间隙填充模型的沉积策略是在增材过程中先沉积 两侧位置,再填充中间体。该轨迹规划可使填充体两 侧结构对称,增材时温度分布更加均匀,相较于传统的 连续搭接可获得更好的表面质量。间隙填充模型如图 1 所示,电弧增材制造试验设备采用 Fronius 公司生产 的 TPS4000-CMT 焊机,并使用 KUKA KR5 R1400 机器 人控制焊枪运动。试验基板尺寸为 200 mm × 200 mm × 10 mm 的 7075 铝合金板,沉积材料为 ER4043 铝合金 焊丝,焊丝和基板化学成分如表 1 所示。送丝速度为 6 m/min,焊接速度为 0.6 m/min。



图 1 间隙填充模型 Figure 1 Gap-filling model

表1	7075 和	ER4043	焊丝化学成分
----	--------	--------	--------

Table 1	Chemical	composition	of 7075	aluminum	alloy and	ER4043	welding wire	
		1					0	

材料	Zn	Mg	Cr	Ti	Si	Cu	Mn	Fe	Al
7075 铝合金基板	5.67	2.48	0.2	0.03	0.04	1.56	0.02	0.13	余量
ER4043 铝合金焊丝	0.10	0.05	-	0.20	5.00	0.30	0.05	0.80	余量

1.2 网格划分

根据间隙填充模型,利用几何对称性建立三维有 限元分析模型如图2所示。网格采用8节点六面体单 元,为了提升计算效率,在沉积层附近采用加密型网 格,在距离填充层远处网格较为稀疏,网格单元总数为 43725,节点总数为50460。该模型能够如实反映增 材过程中温度场的分布及变化情况。

1.3 材料参数及边界条件

增材制造过程较为复杂,涉及到热力耦合等多方 面问题,且金属材料热物理性能随温度变化发生改变, 进行温度场分析时需确定导热系数、比热容和密度等 参数。此次温度场模拟涉及到的焊丝及基板的热物理 参数通过将 ER4043 与 7075 的化学成分输入至 JmtPro 软件中得到,相关参数结果如表 2 和 3 所示。在

%

[研究・设计]



图 2 有限元模型 Figure 2 Finite element model

Visual Environment 软件中的可以通过 Database 按键 查询并修改材料的参数。在增材制造过程中,材料温 度变化大,温度场边界条件采用 Newton 定律描述增材 件表面与环境的热对流,用 Stefan-Boltaman 定律描述 增材件表面的热辐射^[13]:

$$q_{\rm c} = h_{\rm c} (T - T_0);$$
 (1)

$$q_{\rm r} = \varepsilon_{\rm r} \cdot \sigma (T^4 - T_0^4)_{\circ} \qquad (2)$$

式中: q_c 为对流散热功率; h_c 为材料表面散热系数;T为 增材过程中的瞬间温度; T_0 为室温,且 $T_0 = 20 \ C$; q_r 为 辐射散热功率; ε_r 为材料黑度系数,且 $\varepsilon_r = 0.8$; σ 为 Stefan-Boltzman 常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(mm^2 \cdot C)_o$

表2 ER4043 焊丝热物理参数

Table 2 Thermal physical parameters of ER4043 welding wire

温度	导热系数 λ/	比热容 c/	密度 / ∕
$T/(\ ^{\circ}\mathbb{C})$	$(W\boldsymbol{\cdot}m^{-1}\boldsymbol{\cdot}K^{-1})$	$(\mathbf{J} \cdot \mathbf{kg}^{-1} \cdot \mathbf{K}^{-1})$	$(g \cdot cm^{-3})$
25	203	891	2.707
200	201	980	2.674
400	190	1 117	2.632
600	115	1 345	2.528
800	90	1 157	2.381
1 000	97	1 158	2.311

表3	7075	铝合金热物理参数
•		

 Table 3
 Thermal physical parameters of

7075	aluminum	alloy
------	----------	-------

温度	导热系数 λ/	比热容 c/	密度 ρ ∕
$T/(\ ^{\circ}\mathbb{C})$	$(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$(\mathbf{J} \boldsymbol{\cdot} \mathbf{kg}^{-1} \boldsymbol{\cdot} \mathbf{K}^{-1})$	$(g \cdot cm^{-3})$
25	129	864	2.799
200	149	947	2.764
400	160	1 367	2.718
600	140	1 741	2.625
800	92	1 127	2.431
1 000	99	1 127	2.357

1.4 热源加载

文中增材制造热量来源是电弧,课题组采用了 Goldak 提出的移动热源模型^[14]。双椭球热源模型示 意图如图 3 所示,充分考虑了能量在熔池中的分布,符 合于熔池前部短、尾部长的特点,满足实际增材过程要 求。为了使计算过程具有更好的收敛性,在 Visual Environment 软件中将双椭球热源进行了归一化处理, 使热流密度分布更均匀,亦可较好地实现增材制造温 度场的数值模拟。其前、后 1/4 椭球的热流密度为:

$$q_{\rm f}(x,y,z) = Q_{\rm f} \exp\left[-\left(\frac{x^2}{a_{\rm f}^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)\right]; \quad (3)$$

$$q_{\rm r}(x,y,z) = Q_{\rm r} \exp \left[-\left(\frac{x^2}{a_{\rm r}^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right) \right]_{\circ} \qquad (4)$$

式中: q_{f} , q_{r} 分别为前、后 1/4 椭球的热流密度; Q_{f} , Q_{r} 分 别为前后 1/4 椭球进行归一化处理后的电弧热输入, 默认 $Q_{f}/Q_{r} = 1.2$; a_{f} , a_{r} ,b 和 c 分别为椭球的形状参 数,取值分别为 2,4,5 和 4。





1.5 试验验证

由于实际空气环境原因,课题组将初始温度和空 气环境温度设为30℃。增材制造过程中用K型热电 偶测量并记录试验基板上表面点A(如图4所示)的瞬 时温度。图4中Ⅰ,Ⅱ为基体,Ⅲ为填充体,试验验证 时其增材顺序为Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ。模拟仿真和试验测量的热 循环结果如图5所示,可以看出2条曲线变化趋势基 本一致,误差小于15%,说明该模型较准确,可以反映 增材制造温度场变化情况。造成误差的主要原因是模 拟中没有考虑试验台的散热及温度测量设备自身精度 限制。



图4 试验测量点示意图







2 结果和讨论

2.1 基体温度场模拟

基体和填充体温度场云图如图 6 所示。由图 6 可 知:基体与填充体温度场会在起弧一段时间后进入稳 定状态,稳定状态表现为等温线各处曲率保持稳定,各 等温线距中心点距离稳定,峰值温度稳定。温度场整 体呈椭圆形,前端等温线稠密,后端等温线稀疏,这是 由于在熔池两侧金属液总体向后流动,回流金属将大 部分热带至后部,使得后部等温线较前部稀疏。而在 熔池前部只有温度较低的空气,温度梯度较大使得等 温线稠密。这与柏久阳^[15]得出的不同层对应位置温 度场具有相似性的结论类似,同层温度场对应位置也 具有一定的相似性。比较图 6(a)和图 6(b)发现填充 体温度云图的基板温度较基体温度云图的基板温度 高,这是由于在填充体沉积时基板内的热量尚未完全 释放到环境中。





图 7 所示为基体中点热循环曲线,从单点的变化 来看,其总体趋势是温度先急剧攀升至最高温度,达到 880 ℃,超过材料熔点形成熔池,而后迅速降低至 300 ℃左右,材料凝固成沉积层,之后随时间变化温度 缓慢降低,这体现了电弧增材的急热急冷的过程。第 2 次温度升高是由于填充体沉积,此次峰值温度并未 达到材料熔点,说明重熔现象未达到基体中点。



当热源移动至中点时,基板表面垂直热源运动方

向温度分布如图 8 所示。从图中可以看出,沉积区中 点处温度最高,为 639 ℃,在沉积区温度下降较快,但 仍在固相线(477 ℃)以上。从沉积边界到 9 mm 处温 度快速下降至 166 ℃。温度从 166 ℃至 30 ℃区间下 降速度较为缓慢。这是由于基板较大,在距离热源较 远的基板远端,温度基本接近室温,为 30 ℃左右。





2.2 填充与搭接中间道温度分析

间隙填充模型与传统搭接模型最大的区别在于增 材的顺序。间隙填充模型的方法不是传统的多道连续 沉积,而是计算过距离位置后间隙式沉积。以3道式 沉积为例,传统搭接方法采取连续沉积方式,而间隙填 充模型则是将两侧先沉积后再填充中间体。为了说明 间隙填充模型与传统搭接模型热演变过程,课题组选 取中间道中点热循环曲线作为研究对象。图9所示为 间隙填充模型与传统搭接模型的中间道热循环对比 图。传统搭接方法中间道为第2道,其热循环曲线有 2个峰值,第2个峰值是由于第3道增材热量传导所 致,为了避免第2个峰值影响对比效果,这里将不显示 搭接方法的90s后的热循环曲线。由于2种方法第1 道增材并无差别,增材时间同为15s,冷却时间同为 30 s,所以课题组选取温度发生变化起始时间为第45 s。间隙填充方法的中间道填充体,为第3道,其温度 变化起始时间为第90s。由图9可以看出2种方法的 中间道其热循环历程整体相似,但间隙填充模型的中 间道最高温度774 ℃较传统搭接模型的连续沉积方法 的中间道最高温度950℃有较大幅度降低。这是由于 间隙填充在填充体两侧存在基体,而基体为先前增材 的金属,金属的导热系数远大于空气的导热系数,相同 条件下,热量更容易传播出去,减小了增材件温度差, 使得增材产品温度分布更加均匀,提高了增材产品表 面质量。并且由于两侧先沉积基体阻止了填充体向两 侧扩散,使填充体上表面更为平整,也提高了增材产品 表面质量。



图 9 搭接与填充中间道热循环曲线对比 Figure 9 Contrast of thermal cycle curves of lap joint and filled intermediate paths

2.3 增材方向对温度场的影响

增材方向对增材成形件尺寸精度具有重要影响^[16],基体与填充体运动同向时起弧端凸起及收弧端 塌陷现象在多层增材成形后更加显著。该现象归因于 起弧停留和熄弧延迟作用引起的缺陷遗传累积效应, 最终严重影响成形件表面质量。

基体与填充体运动同向与反向时的填充体热源中 心轨迹线上的峰值温度如图 10 所示。由图 10 可以看 出,基体与填充体运动同向时,在增材制造过程中的峰 值温度经过 1 次振荡后达到稳定状态,类似欠阻尼系 统的响应曲线,这说明在起弧阶段热源不太稳定;在收 弧端,峰值温度有较大幅度增加,这是由于同向增材热 积累和电弧停留较长时间导致的。

由图 10 可以看出,基体与填充体运动同向与反向 的填充体热源中心轨迹线上的峰值温度变化趋势基本 一致,但反向填充体起始峰值温度较同向填充体起始 峰值温度高了 10 ℃,这是由于反向填充体起始端为上 次沉积的末端,温度降低时间比同向填充体温度降低 时间稍短。但反向填充体稳定峰值温度较同向填充体 稳定峰值温度低 10 ℃左右,且其稳定峰值温度有缓慢 降低的趋势,这是由于反向填充体两侧基体冷却时间 随反向填充运动方向不断增大,其温度梯度更大,传播 热量更快。由于起弧端与收弧端成形缺陷的存在,在 同层制造中反向填充使2种缺陷交替存在,这就降低 了起弧与收弧两端成形件表面质量,在层数增加后,这 种现象累积更严重。因此同层增材过程中应使用同向 增材方式。



图 10 基体与填充体运动同向与 反向时峰值温度变化



2.4 冷却时间对温度场的影响

冷却时间是电弧增材制造中成形质量的重要影响因素^[17]。在持续增材过程中,为保证每一道增材的稳定性,需要一定的冷却时间将增材内部集中的热量在整个金属材料上得到充分的传导,从而使增材件上温度分布更加均匀,得到更好的增材产品。

图 11 所示为稳定峰值温度随冷却时间变化曲线, 图中变化大致可分为 3 段,冷却时间为 5 s 时,稳定峰 值温度为 828 ℃,至冷却时间为 5 ~ 30 s 时稳定峰值 温度有较大幅度降低,降至 775 ℃。这是由于第 1 道 增材热量还未充分传导至空气中,短时间内热量累积 使得此区间内峰值温度较高,峰值温度随时间变化幅 度较大。冷却时间为 30 ~ 60 s 时,稳定峰值温度变化 较为缓慢,冷却时间每增加 5 s,峰值温度约降低 3 ℃, 冷却时间为 60 s 时降至 761 ℃。而后冷却时间每增 加 10 s 稳定峰值温度降低约 3 ℃,至冷却时间为 90 s 时稳定峰值温度降至 753 ℃。这是由于先前沉积热量 已传导相当大一部分至空气中,热累积效应减弱,稳定 峰值温度相对稳定。进一步分析可知,当冷却时间进 一步增加,使增材件稳定峰值温度冷却至室温 20 ℃ 时,再延长冷却时间不会再降低稳定峰值温度。研究 间隙填充体稳定峰值温度随冷却时间变化曲线可以发 现适当增加冷却时间可以降低稳定峰值温度。因此, 在保持其他参数不变的情况下,通过增加冷却时间来 降低增材件整体温度差,使得增材制造零件温度分布 更加均匀,由此提高增材制造零件表面质量。考虑到 实际生产过程条件,增材制造是一个连续制造的过程, 其道间冷却时间过长将延长整个零件的制造周期。根 据课题组的模拟计算结果可知冷却时间选为 30 ~60 s 较为合适,既降低了稳定峰值温度,又减少了整个零 件增材制造时间。



Figure 11 Peak temperature variation at different cooling times

3 结论

课题组为探究间隙填充模型提升表面质量的热原 因研究了增材制造间隙填充模型的温度场演化、热循 环特性、增材制造方向及冷却时间对间隙填充体峰值 温度的影响,为进一步研究多道多层间隙填充温度场 与提升多道多层成形性能,及2者之间关系提供了参 考。课题组研究的主要结论如下:

 1)对比传统搭接,间隙填充方法可有效减少填充 体峰值温度,避免热量累积;

 2)使用间隙填充法在同层增材制造过程中填充体与基体运动方向相同和相反时峰值温度差别较小, 考虑到起弧与收弧端成形缺陷的存在,同层增材制造中应使填充体与基体运动方向相同;

3)随着冷却时间增加间隙填充体峰值温度先快速下降后趋于平缓,适当增加冷却时间可使增材制造零件温度分布更加均匀。

参考文献:

- [1] 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(23/24):80-85.
- [2] 王迪,邓国威,杨永强,等.金属异质材料增材制造研究进展[J]. 机械工程学报,2021,57(1):186-198.
- [3] 胡彪,邓劲莲,蔡高参,等. 冷金属过渡电弧增材制造技术研究进展[J]. 机电工程,2022,39(3):375-381.
- [4] PAES L E D S, FERREIRA H S, PEREIRA M, et al. Modeling layer geometry in directed energy deposition with laser for additive manufacturing[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 409:1 – 9.
- [5] XU P H, ZHU L D, XUE P S, et al. Multi-track alternated overlapping model suitable for variable laser cladding process parameters [J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 425:1 -11.
- [6] 张军,邢彦锋,曹菊勇.间隙填充电弧增材制造对表面质量的影响
 [J]. 兵器材料科学与工程,2022,45(1):70-76.
- [7] 赵文勇,曹熙勇,杜心伟,等. CMT 电弧增材制造过程传热传质数 值模拟[J].机械工程学报,2022,58(1):267-276.
- [8] 刘一搏,张鸿名,孙清洁,等.磁场作用下铝/钢 CMT 焊接温度场 及熔池流动行为[J].机械工程学报,2018,54(2):48-54.
- [9] ZHAO H H,ZHANG G J,YIN Z Q, 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

(上接第22页)

- [7] KUTHALAM E S, SENTHILKUMAR P. Optimization of spinning parameters influencing the hairiness properties of polyester/cotton vortex yarn[J]. The Journal of The Textile Institute, 2017, 108(3): 459.
- [8] SENTHILKUMAR P, KUTHALAM E S. Optimization of spinning parameters influencing the tensile properties of polyester /cotton vortex yarn[J]. Indian Journal of Fiber & Textile Research, 2015, 40(3): 266.
- [9] BASAL G, OXENHAM W. Effects of some process parameters on the structure and properties of vortex spun yarn [J]. Textile Research Journal, 2006, 76(6):499.
- [10] ORTLEK H G, ULKU S. Effect of some variables on propertities of 100% cotton vortex spun yarn[J]. Textile Research Journal, 2005, 75(6):458-461.
- [11] 陈彩红,陈洪立.喷气涡流纺喷孔数量对喷嘴内气流场的影响
 [J]. 轻工机械,2017,35(1):64-66.
- [12] 任玉斌.喷气涡流纺喷嘴喷孔参数的分析[J].现代纺织技术, 2020,28(1):94-96.
- [13] 邹专勇,俞建勇,薛文良,等.喷气涡流纺工艺参数对气流场影响的数值计算[J].纺织学报,2008,29(4):32-36.
- [14] SUN L L, PEI Z G. Effects of structural parameters on the tangentially injected swirling flow in concentric tubes with different

(3):488-495.

- [10] 陈克选,王向余,李宜炤,等.水冷条件下 WAAM 温度场的数值 模拟研究[J].材料导报,2021,35(4):165-169.
- [11] 赵鹏康,唐成,杨明顺,等. TIG 增材成形 5356 铝合金温度场数 值模拟分析[J]. 兵器材料科学与工程,2021,44(2):71-77.
- [12] PAN J J, HU S S, YANG L J, et al. Investigation of molten pool behavior and weld bead formation in VP-GTAW by numerical modelling[J]. Materials and Design, 2016, 111:607.
- [13] 张月来,彭章祝,常茂椿,等.复杂铝合金焊接结构的残余应力数 值模拟分析[J].焊接学报,2021,42(3):92.
- [14] OWUNNA I, IKPE A E, ACHEBO J I. Temperature and time dependent analysis of tungsten inert gas welding of low carbon steel plate using goldak model heat source [J]. Journal of Applied Sciences and Environmental Management, 2019, 22 (11): 1719 – 1725.
- [15] 柏久阳.2219 铝合金 GTA 增材制造及其热处理过程的组织演变
 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017:57-63.
- [16] 刘文洁.电弧增材制造温度场与应力场的数值模拟及成形路径 策略评估[D].武汉:华中科技大学,2017:45-53.
- [17] ZHAO H H, ZHANG G J, YIN Z Q, et al. Three-dimensional finite element analysis of thermal stress in single-pass multi-layer weldbased rapid prototyping [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(1):276 - 285.

lengths as a model of the vortex spinning nozzle[J]. Textile Research
Journal,2016,86(12):1241 - 1258.

- [15] PEI Z G, YU C W. Investigation on the dynamic behavior of the fiber in the vortex spinning nozzle and effects of some nozzle structure parameters[J]. Textile Research Journal, 2011, 6(2):16-29.
- [16] 邹专勇,俞建勇,薛文良,等.喷气涡流纺喷嘴内部三维流场的数 值研究[J].纺织学报,2008,29(2):86-89.
- LI M L, YU C W, SHANG S S. Effect of the distance between guided needle and cone body on properties of vortex spun yarn [J]. Advanced Materials Research, 2014, 1048:578.
- [18] 尚珊珊,郁崇文,杨建平,等.喷气涡流纺纺纱过程中的气流场数 值模拟[J].纺织学报,2019,40(3):160-167.
- [19] 尚珊珊,余子开,郁崇文,等.喷气涡流纺旋转气流场及纱体运动的数值模拟[J].东华大学学报(自然科学版),2019,45(5): 665-675.
- [20] 韩晨晨,程隆棣,高卫东,等.基于有限元模型的喷气涡流纺纤维运动轨迹模拟[J].纺织学报,2018,39(2):32-37.
- [21] 韩晨晨,程隆棣,高卫东,等.传统型与自捻型喷气涡流纺的对比
 [J].纺织学报,2018,39(1):25-31.
- [22] 郭臻,李新荣,卜兆宁,等.喷气涡流纺中纤维运动的三维数值模拟[J].纺织学报,2019,40(5):131-135.
- [23] 袁龙超,李新荣,郭臻,等.喷气涡流纺喷嘴结构对流场影响的研究进展[J].纺织学报,2018,39(1):169-178.