

某深孔深槽薄壁结构件近净成形技术研究

李 飞 孔佑顺 何 欢 吕三雷 王朝斌 邢培培

(河南平原光电科技有限公司, 焦作 454003)

摘 要 针对某深孔深槽薄壁铸件的结构特点,对其组合工艺、型壳制造、浇注温度、型壳清理等环节的工艺参数进行了分析,发现通过石膏与硅溶胶的复合工艺,可有效解决深孔深槽结构件的型壳制造与清理问题,配合铝合金真空浇注、增压凝固工艺可有效改善铸件成形和合金净化质量。铸件经X光检测满足GB9438-2013-II类要求,力学性能超过GB1173-2013要求。

关键词 复合型壳;精密铸造;硅溶胶;石膏型

中图分类号 TG249.5;TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20240464

Near Net Forming Technology for a Thin-walled Component with Deep Hole and Groove

LI Fei, KONG Youshun, HE Huan, LV Sanlei, WANG Chaobin, XING Peipei

(Henan Pingyuan Optoelectronic Technology Co., Ltd., Jiaozuo 454003)

Abstract: In view of structural characteristics of a thin-walled casting with deep hole and groove, the process parameters were analyzed including combination process, shell-making, pouring temperature, and shell cleaning. The results indicate that the composite process combined with gypsum and silica sol can effectively solve the shell manufacturing and cleaning of structural components with deep hole and groove. The casting formation and alloy purification quality are effectively improved coordinated with vacuum casting of aluminum alloy and pressure solidification process. X-ray detection verifies that the casting meets the requirements of GB9438-2013-II, and the mechanical properties exceed the requirements of GB1173-2013.

Key Words: Composite Shell, Investment Casting, Silica Sol, Gypsum Casting

20世纪末,“近净形铸造”(Near-net-shape casting)的新工艺逐渐引起了研究者的重视,铸件逐渐开始向“精确”(Close tolerances)、“柔性”(A high degree of flexibility)和“快捷”(Just in time delivery)方向发展^[1-4]。硅溶胶熔模铸造工艺具有原材料广泛、成本低、周期短、复制性好以及尺寸精度高等特点,能够广泛适应市

场需求^[5-9]。硅溶胶熔模铸造工艺的局限性主要体现在对具有深孔深槽特征的零件进行涂壳时,孔或槽内的涂料干燥较慢,不易干透,导致浇注时产生气孔、跑火等问题。同时,由于硅溶胶型壳透气性好、散热快,在浇注壁厚小于2 mm的薄壁铸件时极易产生冷隔和浇不足等缺陷。因此,开展深孔深槽薄壁结构件的熔模

收稿日期:2024-11-12;修订日期:2025-02-02

第一作者简介:李飞,男,1983年出生,工艺师,E-mail:14529448@qq.com

引用格式:李飞,孔佑顺,何欢,等. 某深孔深槽薄壁结构件近净成形技术研究[J]. 特种铸造及有色合金,2025,45(11):1 756-1 760.

LI F, KONG Y S, HE H, et al. Near net forming technology for a thin-walled component with deep hole and groove[J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2025, 45(11): 1 756-1 760.

5 结 论

(1)定模采用碟簧推出机构,克服了定模包紧力实现铸件定模推出。本设计使用的碟簧组合为2片并联6组串联,推出力为单片2倍,推出距离为单片6倍。该结构简单运行可靠,提升了产品品质。

(2)针对大型压铸模具,动模推出机构采用一体式动模座板,压盖式限位块结构,简化模具的装配及拆卸,减少了模具维修维护时间,提高了生产效率。

参 考 文 献

- [1] 林林,张小岩,钱楚楚,等. 中国压铸模具发展的现状与展望[J]. 特种铸造及有色合金,2019,39(1):45-48.
- [2] 江昌勇. 压铸成型工艺与模具设计[M]. 北京:北京大学出版社,2019.
- [3] 胡心平,王富宾,吕惠生. 卧式压力铸造中压铸模定模推出机构设计[J]. 模具工业,2001(2):41-43.
- [4] 潘宪曾. 压铸模设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,2006.

(编辑:张正贺)

铸造工艺研究具有积极意义^[10-15]。

本研究采用石膏与硅溶胶复合工艺,对某深孔深槽薄壁铸件的型壳制造、浇注温度和型壳清理等进行了分析,旨在优化铝合金真空浇注和增压凝固的工艺参数,提高铸件成形和凝固组织的质量,为相似产品的生产提供参考。

1 试验与计算方法

1.1 试验方法

1.1.1 铸造工艺方案

所研究的铸件结构见图1,其轮廓尺寸为150 mm×131.5 mm×52.5 mm。总体来看,该铸件具有曲面多、壁厚薄的形态特征,其平均壁厚约为1.8 mm,最薄处仅为1 mm,局部厚大区域可达8~

10 mm。A区域为直径 $\phi 11$ mm、深65 mm的细深盲孔,B区域为宽4.3 mm、深27.5 mm的深槽,C和D区域分别为远端2 mm厚扣状细薄结构。铸件外表面有凝固成形字母,厚度为0.5 mm。

铸件采用顶注式重力浇注工艺,通过重力作用实现金属液充型,同时兼具补缩功能,可有效减少铸造缺陷的产生。浇注系统蜡模见图1c,其设计充分考虑了铸件结构特征和凝固顺序。为优化铸件凝固过程中的温度场分布,在铸型相对厚大的手柄部位设置了2处7 mm厚内浇道,以确保厚大部位获得充分的补缩。同时,在侧边薄壁区域正对位置设置了一处4 mm内浇道,该尺寸选择基于流体力学模拟结果,旨在实现薄壁区域的平稳充型,避免湍流和卷气现象的发生。这种差异化内浇道设计不仅满足了铸件不同部位的凝固需求,还显著提升了铸件内部品质,为后续热处理和机械加工奠定良好的基础。

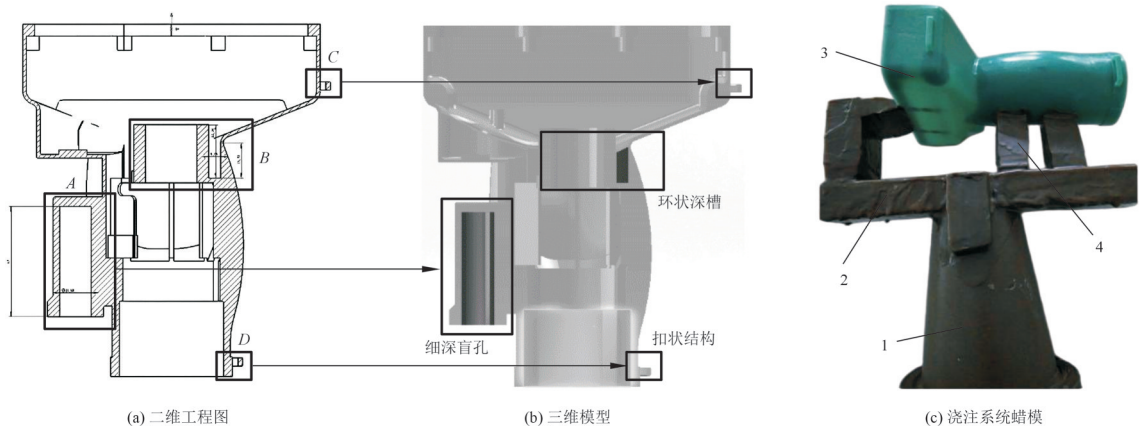


图1 选取的薄壁铸件

Fig.1 Selected thin-walled casting

1.主浇道 2.横浇道 3.蜡模 4.内浇道

1.1.2 硅溶胶复合型壳

型壳制造采用了硅溶胶-石膏复合造型工艺,即在铸件的深孔和深槽等复杂区域采用石膏型灌浆,并在石膏凝固后采用硅溶胶制壳工艺进行外层加固。结果表明,石膏材料凭借其优异的流动性能和自流平特性可有效确保型腔表面的高精度复制性和良好的表面完整性。同时,硅溶胶工艺以其独特的胶体凝胶机制显著提升了型壳的力学性能和高温稳定性。这种复合工艺在优化铸件表面质量的同时,实现了型壳整体强度的显著提升。型壳制备过程中,选用 α 型半水石膏为基体材料以保证型壳的强度和表面光洁度,采用莫来石为耐火材料以提升型壳的高温性能,而硅溶胶黏结剂则确保了型壳的尺寸稳定性和抗热震性。具体的制壳工艺参数见表1和表2。

这种复合制型工艺不仅可以有效克服深孔、深槽

表1 硅溶胶制壳材料及工艺

Tab.1 Shell material and production process of silica sol

规范	涂料粉名称	涂料粒度/目	砂粒度/目	硬化温度/℃	环境湿度/%	风干时间/h	涂覆层数	詹氏流体黏度/s
面层	莫来石	325	60~80	24±2	50~60	≥6	1	45~50
过渡层	莫来石	270	30~60	24±2	40~60	≥8	1	30~35
加强层	莫来石	270	16~30	24±2	40~60	≥8	2.5	25~30

表2 石膏浆料制壳材料及工艺

Tab.2 Shell-making materials and processing parameters of gypsum slurry

石膏浆料	石膏用量/kg	水胶液/%	搅拌时间/min	放置时间/h
α 石膏混料	—	32~35	0.5~1	≥0.5

区域的成形问题,还显著提高了铸件的尺寸精度和表面质量。在制备型壳过程中,石膏浆料采用手工搅拌。当搅拌均匀后,将深孔和深槽分别灌满石膏浆料,并在其凝固前插入U形金属丝作为芯骨。石膏型芯外侧留

有芯头,以便与后续硅溶胶型壳连接,并兼具型芯的加强作用。在石膏固化 0.5~1.0 h 后,按照硅溶胶制壳工艺进行后续型壳制造。该工艺的难点主要在于硅溶胶型壳和石膏型在焙烧过程中的热力学参数存在显著差异。其中石膏型焙烧温度相对较低,通常低于 800 ℃,而硅溶胶型壳的焙烧温度通常高于 1 000 ℃。同时,为确保石膏铸型中结晶水的完全脱除,相比硅溶胶制壳工艺也需要更长的保温时间。考虑到用于填补型腔中深孔、深槽区域石膏的体积较小,可对铸型的焙烧曲线予以适当调整,以最大限度地适配硅溶胶型壳的焙烧工艺。经验证,硅溶胶-石膏复合造型工艺的焙烧温度为 850 ℃,保温时间为 2.5 h。复合型壳的脱蜡和焙烧过程的具体参数见表 3,温度-时间曲线见图 2。

表 3 复合型壳的脱蜡工艺
Tab.3 Dewaxing process of composite shell

型壳类别	脱蜡方式	脱蜡压力/MPa	脱蜡时间/min	放置时间/h
硅溶胶型壳	蒸气脱蜡	0.5~0.6	6~8	0.5~1

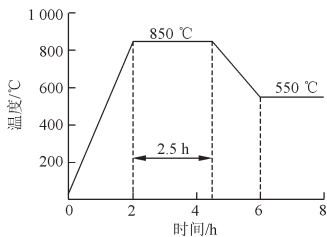


图 2 硅溶胶型壳焙烧工艺
Fig.2 Shell-baking process for silicate sol shell

表 4 为铝合金熔炼与浇注的工艺参数。可知,试验采用多阶段精炼工艺以保证铸件的冶金质量。在铝液的熔炼过程中,先添加(质量分数,下同)0.5%的 C₂Cl₆ 进行除气除渣,将铝液的密度当量控制在 0.3% 以下。再加入 0.02%~0.04% 的 Na 盐进行变质处理,以实现 Si 相的细化。浇注过程中,先抽真空使浇注系统处于 0.03 MPa 下并完成铝液重力浇注。在充型结束后反充气体至压力为 0.5 MPa,使铸件在压力条件下完成凝固过程。最终,铸件致密度达到 98.6% 以上,关键部位的孔隙率低于 0.3% (体积分数)。铸件金相试样在抛光后,用 0.5 mol/mL 的 NaOH 溶液腐蚀 10~15 s,用 BXM-95E 光学显微镜对铸件微观组织进行观测。

表 4 铸件浇注工艺参数

Tab.4 Pouring process parameters for casting					
精炼温度/℃	变质温度/℃	铸型温度/℃	浇注温度/℃	浇注真空度/MPa	加压凝固压力/MPa
720	725	550	745	0.03	0.5

1.2 数值模拟条件

浇注系统设计完成后,采用 ProCAST 软件对液态合金的浇注充型和凝固过程进行数值模拟计算,初始

边界条件见表 5。模拟过程中,基于 Navier-Stokes 方程和能量守恒方程,采用 VOF 模型追踪合金熔体液流动前沿,并耦合傅里叶热传导方程预测凝固过程。

表 5 模拟初始条件设置
Tab.5 Initial condition setting for simulation

铸型材料	合金材料	铸型温度/℃	浇注温度/℃	传热系数/(W·K ⁻¹ ·m ⁻²)	冷却方式	凝固压力
莫来石	ZL101A	550	745	750	空冷	常压

浇注过程在常压环境下进行,用以对比基础工艺参数对铸件质量的影响。型壳预热温度控制在(550±10) ℃,以确保熔体充型过程中型壳与熔体之间的温度梯度最小化,从而减少冷隔和浇不足等缺陷的产生,熔体过热度为 126 ℃。

2 试验结果与讨论

2.1 铸件成形过程

2.1.1 成分分析

铸件合金材质为 ZL101A 合金,依据 GB/T1173-2013,选取的原材料化学成分符合标准要求,合金的化学成分见表 6。可以看出,ZL101A 合金中主要成分为 Al 和 Si,其他元素如 Mg、Fe 和 Ti 等总含量仅约为 0.6%,因此对于该合金凝固过程的解读可以参考 Al-Si 二元相图。Al-7.1Si 合金的液相线温度为 619 ℃,固相线温度为 577 ℃。考虑到多组元化产生的合金化效应,合金浇注时的过热度为 120~130 ℃。图 3 为不同工艺下铸件的显微组织。可以看出,随着合金凝固过程结束,合金凝固组织主要由初生 α-Al 枝晶和 α-Al+Si 共晶组织构成,真空浇注-增压凝固工艺与常压重力浇注工艺铸件的显微组织均符合 GB/T 1173-2013 标准的技术要求,但两者在晶粒尺寸和分布均匀性方面存在显著差异。

表 6 ZL101A 化学成分
Tab.6 Chemical compositions of ZL101A %

成分	w _B			
	Si	Mg	Fe	Ti
标准	6.5~7.5	0.25~0.45	<0.2	0.08~0.20
实测	7.10	0.32	0.15	0.13

对于真空浇注-增压凝固合金试样,初生 α-Al 枝晶的平均尺寸约为 130 μm,共晶 Si 相呈细小的纤维状或颗粒状。这种组织细化现象主要归因于真空环境下熔体含气量的降低和增压凝固过程中外场压力对晶粒生长的抑制。相比之下,常压重力浇注铸件中初生 α-Al 枝晶的平均尺寸约为 190 μm,共晶 Si 相部分区域呈现粗大的板片状。分析表明,采用真空浇注-增压凝固浇

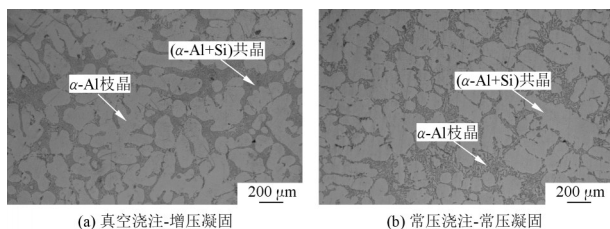


图3 不同工艺下铸件显微组织

Fig.3 Microstructure of castings under different processes

注方法可以有效降低铝合金熔体的黏度,以提高铝液的充型能力。黏度对压力的指数依赖关系可表述为:

$$\eta_p = \eta_0 e^a (p - p_0)$$

式中, η_p 为在压力 p 时的动力黏度; η_0 为标准大气压时的动力黏度; a 为黏度-压力系数; p_0 为初始压力。可知,铝液的黏度随压力的降低而减小。在真空环境下,熔体内氢原子的溶解度下降导致大量析出,有效提高了精炼质量。在浇注过程中,液态合金先通过陶瓷过滤器进一步净化并稳流,在充型结束后10 s内迅速切换至加压模式,在压力场下结晶凝固。在顺序凝固前提下,压力可以为铸件提供补缩动力,显著提高铸件组织的致密度,优化铸件内部质量。值得一提的是,这种多物理场协同控制的工艺也可以使铸件的力学性

能获得显著提升。

2.1.2 凝固过程

图4为型腔充型过程的速度场和铸件凝固过程的温度场演变。模拟结果表明,该浇注系统设计方案能够实现完全型腔充填,充型时间为8.2 s,且铸件内部未出现明显的缩孔、缩松等凝固缺陷。通过追踪熔体流动前沿,发现充型过程中熔体流速分布均匀,最大流速为0.45 m/s,且未出现明显的湍流和卷气现象。进一步分析可知,铸件各部位的冷却速率梯度分布合理,冷却速率范围为2.5~5.0 °C/s,且凝固过程符合顺序凝固。型腔最大热节区域位于手柄厚大部位,该区域的冷却速率较低(2.5~3.0 °C/s),但受益于内浇口的有效补缩,铸件内部未形成明显的宏观缺陷。由热节区域的温度场分布可知,凝固过程中温度梯度控制在15~20 °C/mm范围内,补缩通道畅通。

此外,通过模拟结果优化了内浇口设计,厚大部位设置的两处7 mm厚内浇道显著改善了补缩效果,而侧边薄壁区域的4 mm内浇道则有效优化了熔体的湍流和卷气现象。最终,模拟结果显示铸件内部质量应能够满足GB/T 9438-2013-II类铸件的验收标准,为实际生产提供了理论依据。

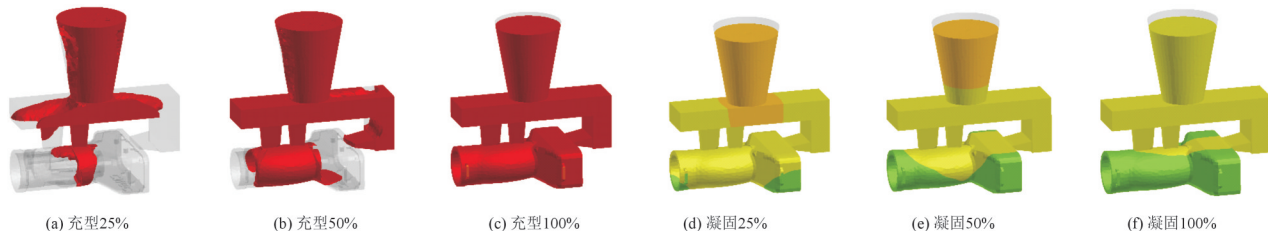


图4 型腔充型过程的速度场和铸件凝固过程的温度场数值模拟结果

Fig.4 Simulation results of velocity field during filling and temperature field during solidification

2.2 成形效果

铸件实物见图5。可以看出,采用硅溶胶-石膏复合型壳工艺制备的铸件具有优异的成形质量。其中,深孔和深槽区域经超声波清洗和化学抛光后,内表面粗糙度

低于3.2 μm,且未发现明显的粘砂和氧化特征;薄壁区域的壁厚均匀性良好,平均壁厚偏差约为±0.15 mm,具备较高的精度;铸件棱角区域轮廓清晰,过渡圆角半径均匀,表面粗糙度达到 $Ra=1.6 \mu\text{m}$;铸件表面未出现冷隔和裂纹等缺陷,表明该工艺在复杂结构铸件制造中的高可靠性和稳定性。

2.2.1 铸件质量

经过系统的无损检测评估,铸件的X射线探伤和荧光渗透检测结果均达到GB/T9438-2013-II类铸件的验收标准,满足图纸技术条件要求。其中,X射线探伤采用数字成像技术,管电压为160 kV,管电流为5 mA。铸件的关键部位全方位扫描结果显示,铸件内部未发现明显气孔、缩松和夹杂缺陷。荧光渗透检测按照ASTM E1417标准执行,采用高灵敏度荧光渗透剂并在紫外光照射下进行观测,铸件表面及近表面区



图5 硅溶胶铸件实物

Fig.5 Products of silica sol castings

域未发现裂纹和冷隔等缺陷。进一步的金相分析表明,铸件微观组织均匀,晶粒度达到ASTM 7-8级。

2.2.2 力学性能

对铸件取并进行了拉伸测试。拉伸试样严格按照GB/T 1173-2013标准中的规定进行加工,其几何尺寸和公差要求见图6。试样采用线切割加工制备,加工过程中表面粗糙度 $Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$,试样轴线与铸件主应力方向一致。采用UTM5105型万能力学试验机对试样进行拉伸试验,拉伸速率为2 mm/min,试验数据采样频率为50 Hz,每组试样重复测试3次。

同炉试样性能对比见表7。可以看出,铸件同炉浇注试棒经过T6热处理后,其力学性能显著优于GB/T 1173-2013标准的技术要求。其中,试棒的抗拉强度达到326 MPa,较标准要求的275 MPa提升了18.5%;伸长率为5.5%,是标准规定值2%的2.75倍;布氏硬度(HBW)为103,较标准要求的80提高了28.8%。性能的提升主要归因于低压浇注和增压凝固工艺的协同作用,即低压环境有效减少了熔体中的气体含量,而增压凝固过程则显著优化了补缩能力。以上结果表明,硅溶胶-石膏复合型壳工艺在提升铝合金铸件综合性能方面具有显著优势。

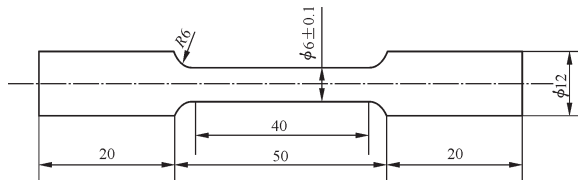


图6 拉伸试样尺寸示意图

Fig.6 Schematic diagram of dimensions of tensile specimen

表7 同炉试样性能对比

Tab.7 Mechanical property comparison for specimens in the same furnace

性能指标	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %	布氏硬度 (HBW)
真空浇注增压凝固试样	326	5.5	103
GB/T1173-2013	275	2	80

3 结 论

(1)采用硅溶胶-石膏复合型壳工艺,通过石膏浆料的高流动性与硅溶胶型壳的高温稳定性协同作用,显著改善了深孔、深槽及薄壁区域的成形质量。同时,对复合型壳的焙烧工艺参数进行了优化。

(2)结合铝合金真空浇注-增压凝固工艺,有效降低了铸件内部气孔、缩松和夹杂等缺陷的产生。结果显示,真空浇注-增压凝固铸件凝固组织中初生 α -Al枝晶尺寸显著细化,共晶Si相呈纤维状分布。铸件致密

度达98.6%,抗拉强度和伸长率分别较GB/T 1173-2013标准提升了18.5%和175%。

(3)结合数值模拟和试验验证,采用差异化内浇道设计实现了熔体平稳充型和铸件顺序凝固。铸型厚大部位补缩通道畅通,冷却速率梯度合理,铸件内部无缩孔、缩松等宏观缺陷,X射线探伤满足GB/T 9438-2013-II类标准。

(4)硅溶胶-石膏复合工艺简化了深孔深槽型壳制造流程,型壳制备周期缩短了30%~40%。经无损检测和金相分析,铸件表面及近表面无裂纹、冷隔缺陷,晶粒度达ASTM 7-8级。该工艺兼具高精度、高效率与低成本特性,为复杂薄壁结构件近净成形提供了可靠解决方案。

参 考 文 献

- [1] 曹腊梅,汤鑫,张勇,等.先进高温合金近净形熔模精密铸造技术进展[J].航空材料学报,2006,26(3):238-243.
- [2] 梁作俭,许庆产,李俊涛,等. γ -TiAl增压涡轮近净形铸造过程实验研究[J].稀有金属材料与工程,2002,31(5):353-357.
- [3] 李凤霄,陈冰.熔模铸件的近净形化技术及快速制模技术[J].特种铸造及有色合金,1995(3):31-35.
- [4] 邢书明,李楠,郭文龙.近净形高品质铸件流变成形技术进展[J].特种铸造及有色合金,2008(S1):22-24.
- [5] 刘松良.熔模铸造硅溶胶型壳清理问题分析[J].铸造工程,2023,47(1):54-57.
- [6] 李倩,刘智鹏,赵巍,等.精密铸造陶瓷型壳用硅溶胶研究进展[J].铸造技术,2022,43(11):989-995.
- [7] 林波,陈云祥.熔模精密铸造型壳制备工艺研究进展[J].铸造技术,2021,42(10):925-927.
- [8] KAILA V N, DAVE I B. The influence of coating sand materials on shell mold properties of investment casting process[J]. Materials Today Proceedings, 2021, 43: 800-804.
- [9] QIN Y, PAN W. Effect of silica sol on the properties of alumina-based ceramic core composites[J]. Materials Science and Engineering, 2009, A508: 71-75.
- [10] PATTNAIK S, KARUNAKAR D B, JHA P K. Developments in investment casting process-A review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(11): 2332-2348.
- [11] MCLEAN M. Investment casting-developments in microstructural control and mechanical performance [J]. Metal Science Journal, 2014, 4(3): 205-217.
- [12] 李宗学,王东辉,乔冠,等.熔模铸造用的含短切碳纤维硅溶胶涂料流变性研究[J].热加工工艺,2023(3):39-43.
- [13] 高沛莹,王狂飞,刘阳,等.ZL114A铝合金预置石膏型芯熔模精铸工艺探索[J].铸造,2024,73(5):637-643.
- [14] 万红,熊博文,徐志锋.石膏型熔模精铸水性硅溶胶制壳工艺研究[J].铸造技术,2010(12):1658-1659.
- [15] 王新节,岳畅.增材制造PS模样石膏型熔模铸造铝合金气缸盖[J].特种铸造及有色合金,2019,49(5):530-533.

(编辑:张正贺)