

A356.0 铝合金半固态制浆技术在重力铸造中的应用研究

胡立军, 朱宇晓, 张海潮

(无锡贝尔机械股份有限公司, 江苏无锡 320214)

摘要: 本文主要研究了A356.0铝合金半固态浆料技术在重力浇注工艺中的应用。选取结构复杂的薄壁型铝合金阀体铸件为研究对象, 分别使用通过吹气制浆设备制备一定固相率的铝液进行倾转式重力浇注工艺与常规液态铝液倾转式重力浇注工艺试生产, 制定试验方案并采集多组工艺数据, 对各组试验中半固态、液态间流动性、金相组织及产品性能等多项数据对比分析, 为半固态制浆在铝合金重力铸造的应用奠定了基础。

关键词: 半固态制浆; 流动性; 气纹; 浇不足; 缩松; 晶粒

铝合金重力浇注是常见的铝合金铸造工艺方法, 该方法适用于使用工况恶劣、力学性能要求高的产品, 但由于其成形主要依靠重力作用, 在实际应用中有一定的产品结构限制。对于壁薄(平均壁厚不大于5 mm)、结构复杂、力学性能及承压要求高的产品在使用重力浇注时, 容易出现气孔、缩孔、疏松及成形不良等缺陷, 导致产品良品率低, 制造成本上升, 实现批量生产难度大。半固态制浆技术是通过专业方法使金属在液相线附近获得具有一定非枝晶初生固相的固-液混合浆料。半固态浆料由于其制备方法的特殊性, 其晶粒更细^[1-4], 流动性增加, 且由于一定量的液相存在, 变形阻力减小, 提高了重力浇注复杂零件的成形能力。本研究提出了以A356.0这种常见铝合金浇注材料, 利用半固态浆料技术^[5-7]与常规液态两种金属液状态, 在一定工艺条件下进行倾转式重力浇注, 对两种工艺结果进行对比分析, 从而改善结构复杂的薄壁型铝合金重力浇注件的合格率和质量水平。

与常规铝合金重力浇注工艺相比, 该工艺仅需增加半固态制浆过程, 且产品合格率提升、制造成本低、工艺节拍缩短, 适合大规模生产, 是行业内关注的课题。

1 试验过程

本研究选取典型的结构复杂、壁薄且性能要求高的工件-汽车处理系统增压阀阀体为研究对象, 在同一套重力浇注模具中, 使用相同铝合金铸造材料A356.0进行试验。在使用半固态制浆技术获得的半固态浆料进行倾转式重力浇注与常规液态进行倾转式重力浇注两种生产工艺条件下进行试验, 每种生产工艺分别设计3组工艺参数进行试验, 每组生产10模(20件), 产品按组分别进行对比研究。

1.1 试验产品性能要求和结构分析

试验阀体材质为A356.0铝合金, 其化学成分要求及力学性能要求分别见表1和表2。

该阀体结构复杂, 内腔有气道及镶嵌件, 阀体形状三维见图1。

阀体为不规则形状且有多处厚壁凸台, 管口一侧为菱形法兰, 另一侧为长方形法兰且带有凸台。其外轮廓尺寸为179 mm × 87 mm × 131 mm, 产品平均壁厚4.37 mm,

作者简介:

胡立军(1980-), 男, 总工程师, 主要研究方向为铝合金重力浇注及低压浇注成形工艺。电话: 13951582295, E-mail: 51394018@qq.com

中图分类号: TG146.21;
TG292

文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2025)
04-0515-07

收稿日期:

2024-12-24 收到初稿,
2025-01-11 收到修订稿。

表1 铸件化学成分
Tab. 1 Chemical composition of the castings

Si	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Ti	杂质总和	Al
6.5~7.5	0.25~0.45	≤0.2	≤0.1	≤0.2	≤0.1	≤0.2	0.15	余量

表2 铸件力学性能要求
Tab. 2 Mechanical properties requirements

力学性能 (本体取样)			
抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	硬度 (HB)
≥260	≥180	≥4	≥80

最大壁厚23.21 mm, 最小壁厚2.8 mm, 壁厚分析见图2。

该阀体要求经过密封性测试, 测试介质为水, 测试压力为0.3 MPa, 且该产品外观不允许有裂纹、气孔及贯穿性缩孔和疏松。

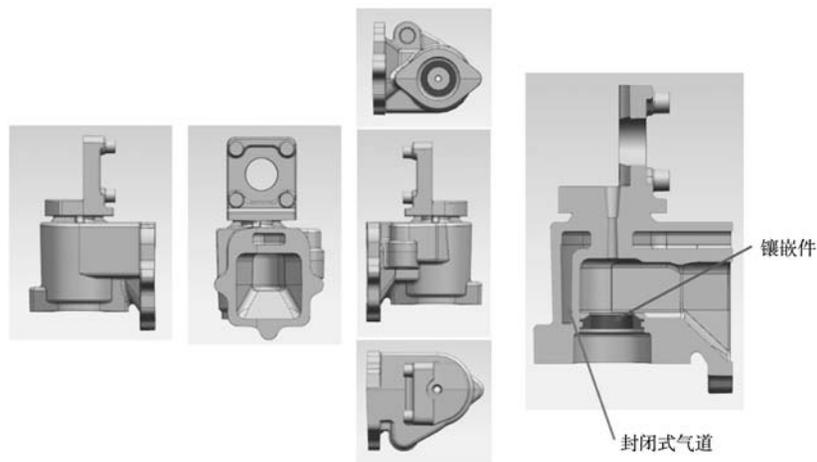
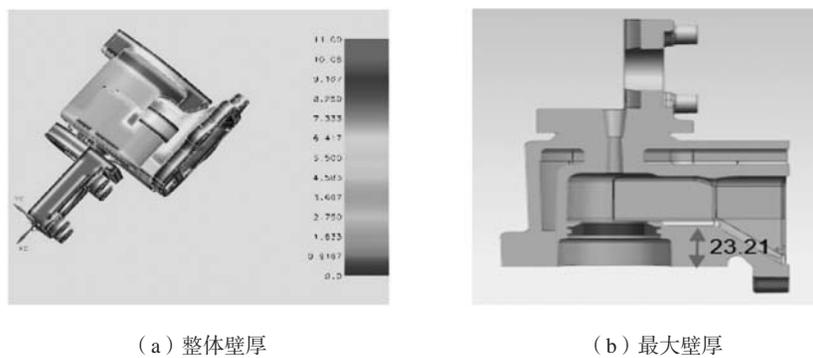


图1 阀体结构三维图

Fig. 1 3D model of the valve body



(a) 整体壁厚

(b) 最大壁厚

图2 零件壁厚分析

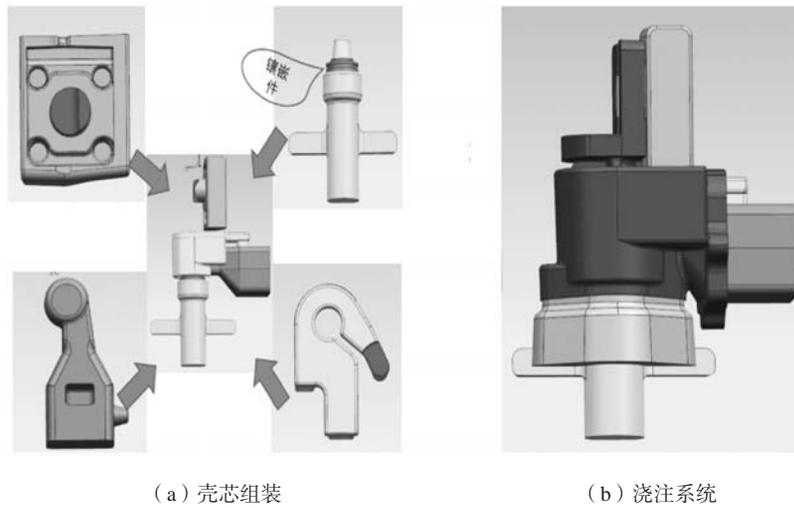
Fig. 2 Analysis of wall thickness of the product

1.2 产品铸造工艺及模具设计

根据产品技术要求及结构特点, 选择倾转式重力铸造工艺。在进行浇注系统设计时, 综合分析形状因素和壁厚因素结合顺序凝固的原则, 考虑热节补缩效果, 选择在铸件壁厚最厚处进料, 气道、内腔及菱形法兰处使用壳芯辅助成形。由于产品较小, 为保证模具温度, 设置一模两腔结构。铸造工艺设计方案见图3, 模具结构设计见图4。

1.3 CAE 模拟分析

CAE基于液态重力浇注工艺进行分析, 分析结果见图5。从充型分析、卷气分析、凝固分析及孔隙率分析四个维度进行, 可以看出, 充型过程相对平稳, 无明显卷气现象, 凝固过程中内腔气道存在孤立液相及气压升高现象, 最薄处气道壁由于孤立液相及困气因素存在气缩孔的风险概率在2%左右。模拟结果表明, 铸造工艺需着重考虑困气及凝固温度场的管控。

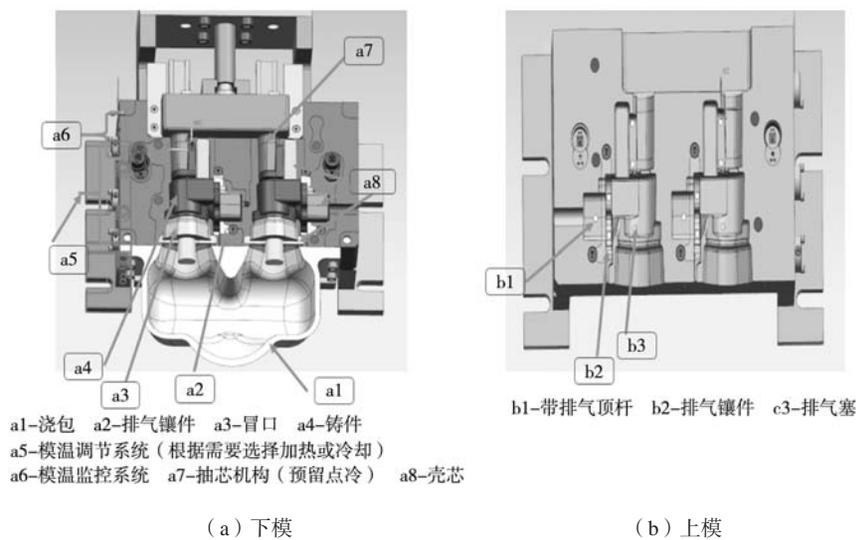


(a) 壳芯组装

(b) 浇注系统

图3 铸造工艺设计方案

Fig.3 Design scheme of the casting process



a1-浇包 a2-排气镶件 a3-冒口 a4-铸件
 a5-模温调节系统 (根据需要选择加热或冷却)
 a6-模温监控系统 a7-抽芯机构 (预留点冷) a8-壳芯

(a) 下模

(b) 上模

图4 下模及上模的结构设计方案

Fig. 4 Design scheme of the mold structure of bottom mold and upper mold

1.4 阀体重力浇注工艺验证

阀体在进行重力浇注工艺验证时,采用同一台倾转式重力浇注机和同一套模具进行两种浇注工艺的验证。两种方案按照相同的工序流程进行:倾转浇注→震砂→去浇注系统→去飞边→热处理→抛丸,其中热处理工艺按照工艺参数为固溶(535 ± 5) $^{\circ}\text{C} \times 6 \text{ h}$ 时效(170 ± 5) $^{\circ}\text{C} \times 6 \text{ h}$ 的热处理进行。两种方案所生产的样件以相同的摆放方式放入同一工位装备同时进入同一台热处理炉进行热处理。

方案一使用常规液态铝液进行倾转式重力浇注,方案二使用半固态制浆机对液态铝液进行半固态制浆后进行倾转式重力浇注。

1.4.1 方案一:常规液态铝液倾转式重力浇注

常规液态铝液倾转式浇注基于CAE仿真时设定的参数条件,结合模拟结果,按照表3三组工艺参数进行工艺验证,验证时每组参数各生产10模(20件),分别使用针式打标机在指定位置做好组别编号,按工序流程进行生产,生产工序结束后进行外观检验、X光探伤及加工气密验证,并对结果进行统计分析,统计结果见表4。

根据产品检验结果,外观缺陷主要为浇不足和气纹,X光探伤结果显示主要缺陷为气道与内腔间壁厚组织疏松贯穿,气密主要缺陷为内腔泄漏,泄漏位置与X光探伤缺陷位置一致。

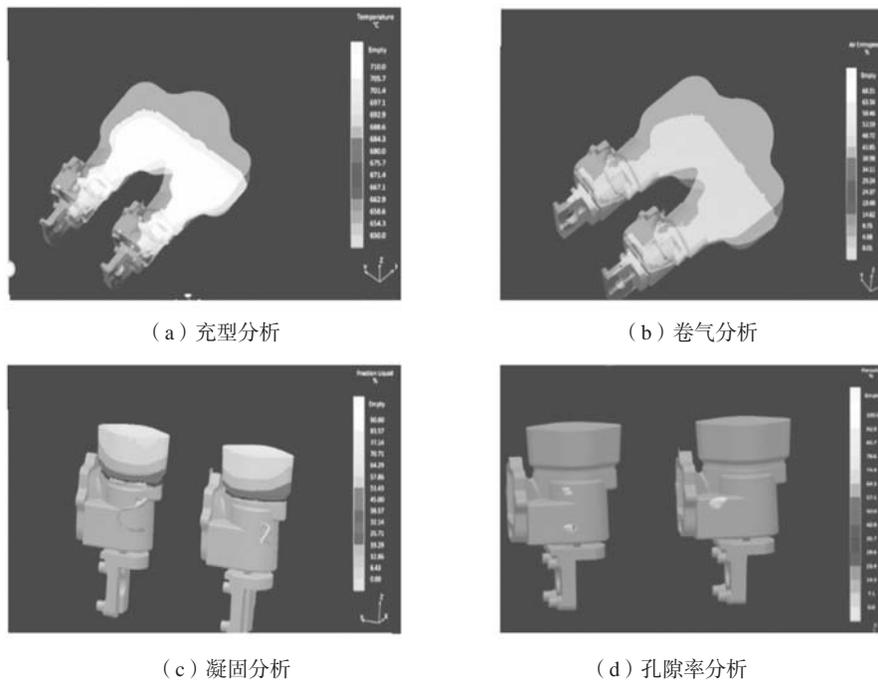


图5 CAE模拟

Fig. 5 The CAE analysis

表3 常规液态铝液倾转式重力浇注工艺参数

Tab. 3 Process parameters of conventional aluminum alloy liquid tilting gravity casting

组别	铝液浇注温度/℃	倾转时间/s	凝固时间/s	模具温度/℃	模具涂层厚度/ μm
No.1	700~710	4	150	350~370	150~250
No.2	710~720	4	150	350~370	150~250
No.3	715~725	5	150	350~370	150~250

表4 常规液态铝液倾转式重力浇注工艺验证数据

Tab. 4 Verification data of conventional aluminum alloy tilting gravity casting process

组别	外观检验/件		X光探伤/件		气密/件		综合合格率/%
	检验数	合格数	检验数	合格数	检验数	合格数	
No.1	20	15	15	10	10	8	40
No.2	20	17	17	12	12	11	55
No.3	20	19	19	16	16	15	75

1.4.2 方案二：半固态制浆料倾转式重力浇注

对液态铝液使用GISS半固态制浆机进行半固态制浆后进行倾转式重力浇注，试验分三组进行，按照表5试验参数进行，验证时每组参数各生产10模（20件），分别使用针式打标机在指定位置做好组别编号，按工序流程进行生产，生产工序结束后进行外观检验、X光探伤及加工气密验证，并对结果进行统计分析，统计结果见表6。

根据检验结果，产品外观成形良好，极少数产品X光探伤显示气道与内腔间壁厚组织有轻微缩松。

1.5 阀体力学性能验证

随机选取第3组和第6组加工后气密合格的零件各3件，在样件本体指定位置进行取样，取样区域位置见图6，每个样件取1根并加工至规定尺寸要求，试棒尺寸见图7。试验采用WD-P4104电子万能试验机进行，试验机系统测量误差 $\pm 0.5\%$ 。拉伸试验结果见表7。

2 结果和讨论

2.1 工艺数据对比分析

对比表4-表6，分析两种方案的工艺参数及产品检



图8 外观表面对比

Fig. 8 Comparison of flow trace

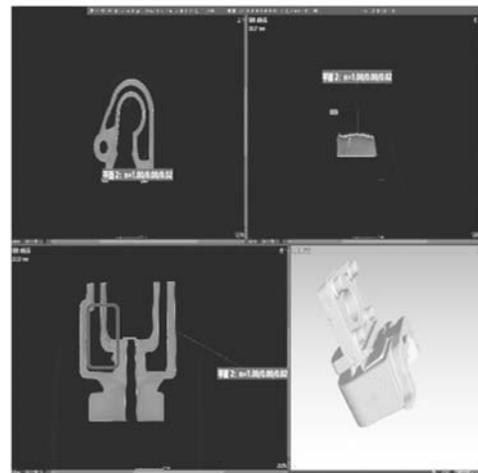


图9 成形性对比

Fig. 9 Comparison of formability



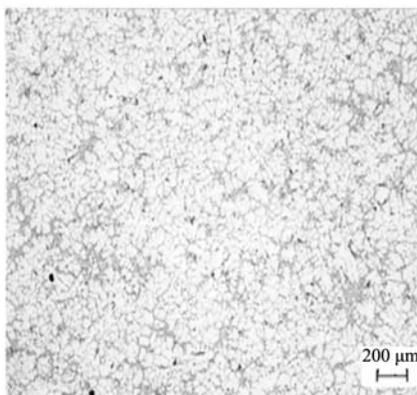
(a) 半固态制浆浇注样件



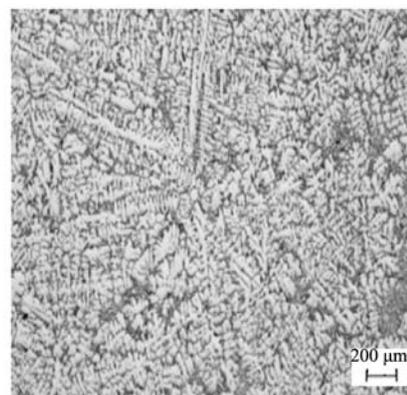
(b) 常规液态浇注样件

图10 半固态制浆浇注样件和常规液态浇注样件的内部质量CT扫描结果

Fig. 10 The Internal quality results of CT scan: semi-solid slurry tilting gravity casting process and conventional aluminum alloy liquid tilting gravity casting process



(a) 半固态制浆浇注样件



(b) 常规液态浇注样件

图11 半固态制浆浇注样件和常规液态浇注样件的微观组织

Fig. 11 Metallographic microstructure comparison: semi-solid slurry tilting gravity casting process and conventional aluminum alloy liquid tilting gravity casting process

从图8-图9可以发现,与常规液态铝液重力浇注件相比,半固态制浆重力浇注件表面流纹和浇不足明显减少。

从图10 CT扫描结果可以发现,与常规液态铝液重力浇注件相比,半固态制浆重力浇注件在壁厚区的微观收缩较小。

从图11金相结果可以发现,与常规液态铝液重力浇注件相比,半固态制浆重力浇注件的晶粒尺寸更小,晶粒更细。

3 结论

(1) 半固态重力浇注件更易于成形,可有效解决浇不足等铸造缺陷。并可有效解决因困气而产生的浇不足和气纹等铸造缺陷。

(2) 半固态重力浇注工艺凝固过程中收缩率更低,内部组织更致密。

(3) 半固态重力浇注工艺力学性能更优。

(4) 半固态重力浇注工艺熔化及保温温度更低,吨金属液能耗更低,可大幅降低制造成本。而重力浇注工艺浇注温度更低,凝固时间缩短,可有效降低工艺节拍,提高生产效率。

致谢: 特别感谢GISS 公司对本项目半固态制浆工艺过程的技术指导; 特别感谢贝尔机械公司董事长夏以蔚女士对于本项目于研究给予经费与资源支持。

参考文献:

- [1] 李元东, 杨建, 马颖. 自孕育半固态制浆技术的研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30 (3): 227-230.
- [2] 谭建波, 邢书明, 李立新, 等. 半固态A356合金微观组织特征对充型能力的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2006 (4): 612-617.
- [3] 许明. 浇注工艺对半固态A356铝合金金相组织影响的研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2017.
- [4] 王扬虎. A356合金半固态流变挤压过程中组织分析 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
- [5] 陈振华. Al-Si合金固液混合铸造 [J]. 中国有色金属学报, 2000, 10 (3): 349-352.
- [6] 冯鹏发, 唐靖林, 李双寿, 等. A356.2 合金半固态浆料的在线制备技术 [J]. 中国有色金属学报, 2006 (1): 13-21.
- [7] 赵祖德, 罗守靖. 轻合金半固态成形技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.

Research on the Application of A356.0 Aluminum Alloy Semi Solid Slurry Technology in Gravity Casting

HU Li-jun, ZHU Yu-xiao, ZHANG Hai-chao
(Wuxi Beier Machinery Co., Ltd., Wuxi 320214, Jiangsu, China)

Abstract:

This article mainly studied the application of A356.0 aluminum alloy semi-solid slurry in gravity casting process. The process selected thin-walled aluminum alloy valve body castings with complex structures as the research object. Trial production was carried out using two processes, the process of using aluminum liquid with a certain solid phase ratio prepared by semi-solid slurry to tilting gravity casting and the other process of conventional liquid tilting gravity casting. Conducting multiple rounds of experiments and collecting data from multiple sets of experiments. Comparative analysis of multiple data such as semi-solid and liquid interfacial fluidity, metallographic structure, and product properties were conducted, which laid a theoretical and practical foundation for the application of the semi-solid slurry in aluminum alloy gravity casting.

Key words:

semi-solid slurry; fluidity; flow trace; misrun; dispersed shrinkage; grain