

# 基于匀加速料筒孕育半固态压铸制备薄壁复杂空腔手模的研究与实践

龚杰<sup>1</sup>, 刘逸秀<sup>1</sup>, 吴振辉<sup>1</sup>, 龙文元<sup>2</sup>, 马文林<sup>3</sup>

(1. 厦门格耐尔科技有限公司, 福建 厦门 361028; 2. 南昌航空大学航空制造工程学院, 江西 南昌330036;

3. 重庆长征重工有限责任公司, 重庆 400000)

**摘要:** 随着全球节能减排、碳达峰、碳中和的发展需求, 各行业零部件轻量化、绿色化成为必然发展之路。生产医疗用橡胶、丁腈手套所需要的手模一直以来都采用陶瓷型, 虽能满足功能性要求, 但其存在能耗大、易破损、无回收等缺点。改用易回收的金属材料成为研究热点, 铝合金以其质轻成为研究首选。由于手模部件具有薄壁、内腔复杂等特点, 并需要与挤压成型部件进行焊接, 采用铝型材冲压制备成本高, 普通压铸存在复杂内腔难以成形和铸件不能焊接等难题。本研究基于自主开发的匀加速料筒孕育半固态压铸技术, 通过数值模拟分析优化压铸工艺, 采用优选的树脂砂芯, 成功制备出铝合金复杂空腔手模压铸件。开发出的产品满足了项目要求, 也为复杂空腔压铸件研发提供了很好的技术实例和参考。

**关键词:** ADC12合金; 半固态; 压铸; 薄壁空腔; 可焊压铸件; 医疗手套

## 作者简介:

龚杰(1976-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为压铸工艺技术与流程、模具浇道技术、低含气量压铸工艺研究与应用、半固态压铸技术应用。电话: 13696954608, E-mail: xmgenaier@163.com/a.jie6@163.com

中图分类号: TG146.2;  
TG249.2

文献标识码: A  
文章编号: 1001-4977(2024)09-1273-07

## 收稿日期:

2023-08-22 收到初稿,  
2024-01-22 收到修订稿。

随着全球节能减排、碳达峰、碳中和的发展需求, 各行业零部件轻量化、绿色化成为必然之路, 具有良好比强度的轻质铝合金铸件在航空航天、船舶、电力、医疗卫生和汽车等诸多领域得到了迅猛的发展。采用低压铸造、压力铸造、挤压铸造等铸造工艺开发了大批薄壁、结构复杂、近净成形、本体性能优良的框架类、箱体类、壳体类等优质铝合金铸件<sup>[1-3]</sup>。

其中压铸更是以其高效率在我国近年来得到迅猛发展。尽管我国目前已成为铝合金压铸产量世界第一大国, 但遗憾的是我国在高端、高标准压铸件上的制备技术与欧美、日本等发达国家相比还有不小差距, 需要深入开展新型压铸技术研究, 来缩小与世界高端铸件的差距。

本研究涉及的医用手套生产用工装-手模铸件, 其壁厚约为1.8 mm (1.8 mm ± 0.2 mm), 长度397 mm, 材料采用铝硅系合金ADC12。如表1所示, 按此尺寸及材料来分析, 手模铸件适合采用压铸工艺生产, 但其又带有复杂内腔, 加上根据结构要求, 该铸件需具备可焊性、耐热性, 以及采用普通压铸制备铸件缺陷多<sup>[4-6]</sup>, 因此不适合采用普通压铸工艺生产。本研究采用自主开发的匀加速压室孕育半固态成形技术<sup>[7]</sup>, 制备了该产品, 为相关结构类压铸件研究与开发提供了参考实例。

表1 合金化学成分  
Table 1 Alloy chemical compositions

项目	Si	Cu	Mg	Mn	Zn	Fe	Al
标准值	9.6~12	1.5~3.5	≤0.3	≤0.5	≤1	≤1.3	余量
实测值	11.5	2.1	0.21	0.4	0.6	0.9	余量

## 1 铸件结构及技术要求分析

图1为手模三维造型图(及截面图), 轮廓尺寸约为Φ80 mm × 397 mm, 壁



图1 铸件三维图

Fig. 1 3D diagram of the casting

厚约1.8 mm ( $1.8 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ mm}$ ), 铸件外形为小手臂造型, 内腔为等壁厚手型。根据产品功能性要求:

(1) 铸件整个外表面必须光滑、无凹坑和无凸起, 整个造型流畅, 满足橡胶手套脱模不引起手套局部小缺陷、粘模等需求; (2) 内部必须空腔才能保证铸件重量, 达到减重要求, 且内壁要比较光滑, 防止有杂物在表面处理中脱落并进入处理液中。

目前, 针对该产品制备与开发, 已有多种技术方案, 但都存在问题, 如:

(1) 重力倾转铸造, 成型及内腔要求可以满足, 但表面粗糙度不能满足要求, 打磨抛光量巨大且指缝处不好打磨, 成本高(平均厚度比压铸要厚至少2倍以上)。

(2) 普通压铸, 必须分开两半成型, 成型后拼焊, 但拼焊缝上存在太多气孔, 不能满足使用要求, 且焊后拼焊缝打磨轨迹复杂, 难以保证良好的外型轮廓, 且打磨量巨大, 不经济。

基于上述工艺存在的问题, 以及借鉴前期开发的已用于可焊WIFI壳体、高致密高铁车门薄壁扣手等铸件生产的匀加速料筒孕育半固态压铸技术<sup>[8-9]</sup>, 同时对手模铸件进行结构分析, 发现该铸件难以整体压铸成形, 但由于后半段结构简单(图1中绿色段), 因此手掌段(图1中蓝色区域)采用匀加速料筒孕育半固态压铸技术进行制备, 绿色段型材采用冲压成形进行制备, 压铸后进行拼焊成型(图2铸件实物焊接)。



(a) 焊接前



(b) 焊接后

图2 手模实物图

Fig. 2 Real product photos of the glove model

## 2 压铸工艺设计

### 2.1 设备选型

手模投影面积约 $380 \text{ cm}^2$ , 此零件平均厚度为2 mm ( $\pm 0.2 \text{ mm}$ ), 需要焊接及承受高温热处理, 所以需要选择较高的压实压力。根据胀型力计算公式<sup>[10]</sup>, 胀型力 $=380 \text{ cm}^2 \times 80 \text{ MPa}$  (压实压力)  $\times 1.2$  (胀型安全系数)  $=364.8 \text{ t}$ , 故选用东洋350V4-T的压铸机。此压铸机低速为0.03~0.7 m/s, 且在该范围内多段可调, 可以实现匀加速等多种压射功能, 满足从薄壁件到高强度耐压件的生产需求。

### 2.2 浇注系统设计

(1) 内浇道大小的设计。为减轻金属液高速充型卷砂及高速冲击砂芯, 且又要保证让金属液尽可能均匀地流经内浇口的整个厚度, 故采用环形进浇的方式。当内浇口厚度过小时, 液流中的微小杂质, 如偏析、杂质、氧化物都会导致内浇口局部堵塞, 缩小

了内浇口的有效流动截面积, 带来难以预料的流动干扰, 因此, 本研究采用的内浇口厚度是该产品平均厚度的3/4。当内浇口的大小一定时, 改变作用在金属液上的压力和冲头速度, 可以明显地改变金属液流入内浇口的速度。为了尽量避免高速带来的缺陷, 在充填时间允许的范围内, 尽量降低浇口速度以保证金属液不会冲击砂芯及卷砂。

(2) 流道设计。为了避免出现金属液涡蚀现象损坏模具, 且因流道设计的不合理而带来凝固时间长、金属液流入时的阻力大、充填过程的热量损失及产生夹杂、金属液流动不稳定、金属液流动过程中不断卷入气体, 因此本研究选用“临界节流系统”, 如图3所示, 尽可能避免扩张系统以防止产生上述问题。

(3) 溢流槽及排气槽的计算及置放。对于压铸模具的设计, 绝大部分对流道或溢流槽都能设计恰当, 但对排气槽的计算从不注重, 只是象征性的做一小条沟槽, 因而经常造成喷模、气孔、生产不稳定的



图3 浇注排溢系统

Fig. 3 Gating and overflow system

情形，却不知道原因。因此本研究选用排气槽宽度不能过大，才不致影响模具锁模面积，且排气槽长度也不能太短，否则铝料缓冲距离不够还是会产生喷料情况。将排气道转90°排放，增加缓冲距离。

### 2.3 压铸工艺参数设计

压铸工艺是将压铸机、压铸模、铸造合金三大要素有机结合，并加以综合运用过程。首先根据压铸机提供的压射能力得出东洋350V4-T  $\Phi 70$ 的冲头铸造压力有87.4 MPa，铸造投影面积为392 cm<sup>2</sup>，由此选用 $\Phi 70$ 的冲头。其次需要镶嵌覆膜砂芯，浇口速度不易过快，防止冲砂缺陷，设定速度为：15~20 m/s，即通过充填厚度得出充填时间为0.022~0.045 s<sup>[11]</sup>。低速设定为0.05~0.54 m/s匀加速低速九段，如图4所示，高速设定为2.5 m/s；浇口面积为6.5 cm<sup>2</sup>。ACC压力设定：高速压力设定12 MPa，增压压力设定11 MPa。低速行程214 mm，高速行程90 mm，浇注温度680 °C，增压计时5 s，料饼厚度20 mm，涂料为脱模剂（水基），冲头润滑剂为油基（不含石墨），以保持铸件表面光洁。

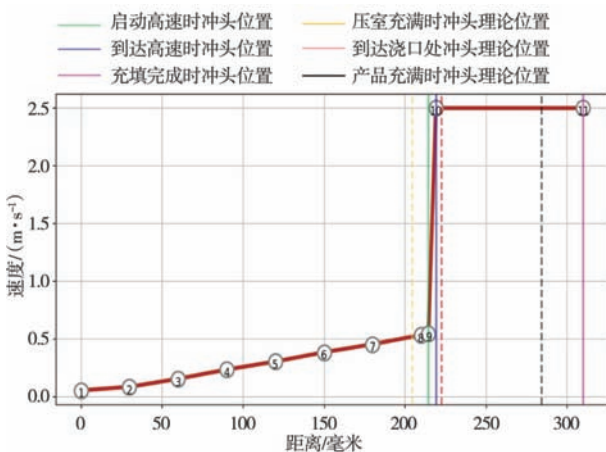


图4 匀加速压室多段工艺

Fig. 4 Uniform acceleration multi-step process in shot sleeve

### 2.4 型芯（砂芯）设计

从文献报道<sup>[12]</sup>及商业实例看，目前对于压铸，内芯较为成熟的是采用盐芯成型空腔部分，但盐芯存在盐料配比调整和成型工艺复杂，水洗去除也存在一定的难度和时间，加上回收使用困难，因此从技术性、效率及经济性等方面均有一定局限性。尤其对于本项目手模产品，如图5所示，该产品难点在于手指部位，尤其小手指部位，直径不到10 mm，长度约55 mm，由于流动性差，盐芯难以成型。

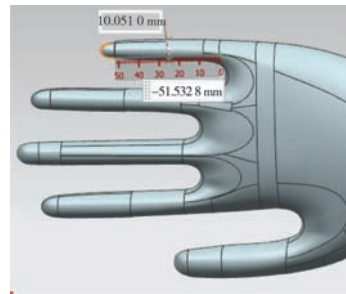


图5 内芯三维尺寸示意图

Fig. 5 Schematic diagram of 3D sizes of the core

正是基于上述局限性，国内外已有报道开展砂芯成型压铸件内腔的研究，并取得了一定的进展。本研究也在此基础上尝试采用砂芯进行手模内腔成型研发。图6为砂芯设计方案图，底部采用方台定位，不仅定位精准而且可抗浇注、增压的冲击力，其实物如图7所示。

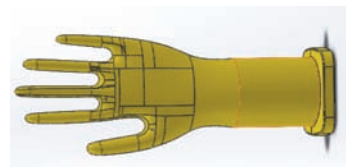


图6 砂芯设计方案图

Fig. 6 Diagram of the sand core design scheme



图7 覆膜砂砂芯实物图

Fig. 7 Physical image of the coated sand core

## 3 数值模拟

基于SupreCast智铸超云软件<sup>[13]</sup>平台开展了铸造工艺数值模拟分析研究，按上述分析计算并经多次流道浇排设计修正，结果如下。

如图8所示为手模铸件的匀加速料筒孕育半固态压

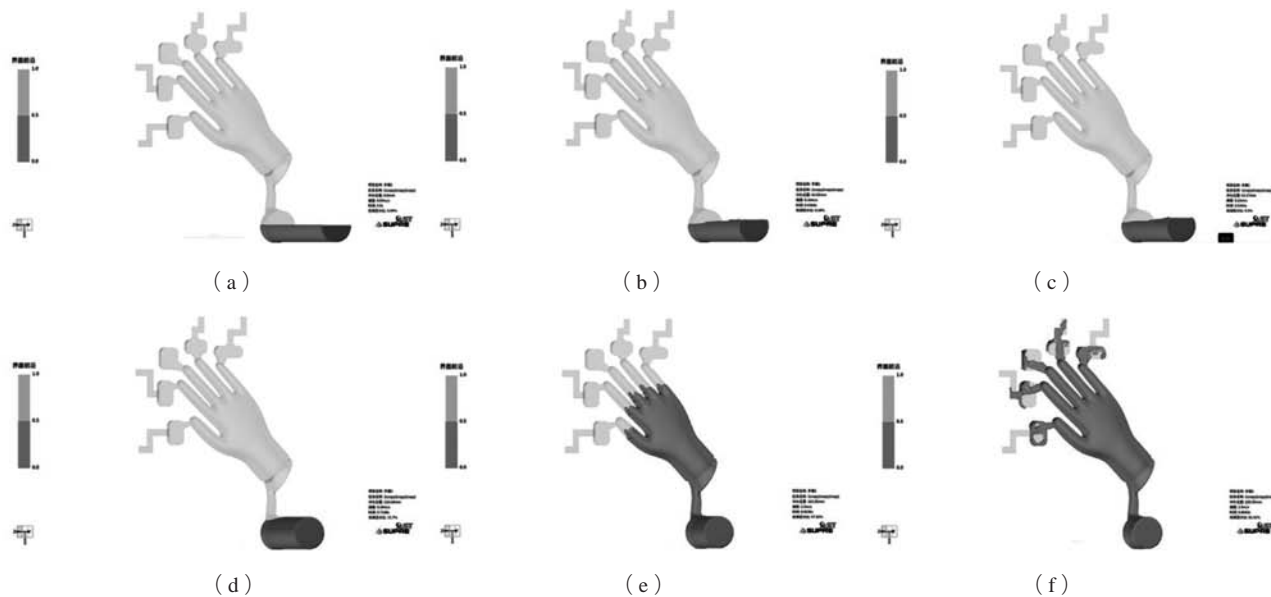


图8 匀加速低速充型数值模拟结果

Fig. 8 Numerical simulation results of uniform acceleration and low speed mold filling processes

铸充型过程的数值模拟结果，从图中可以看出，首先压室内铝液在匀加速锤头作用下由倒料后半料管平地堆积成满料管，避免了压室内气体卷入到铝液中，如图8a和d所示。并且随后能逐步平稳充填手模型腔，最终气体全部进入渣包中，如图8e-f所示。

图9为普通压铸充型过程的数值模拟结果。从图中

可以看出，在锤头压射的运动过程中铝液的运动前沿存在翻滚现象，容易造成气体的卷入行为，如图9a所示。另外，锤头断续往前运动铝液到达末端时又会产生回流现象，提前把浇道封闭，使压室的空气无法顺利排出，导致无法排出的气体融入铝液中，最终会进入到压铸件中形成气孔，如图9b-c所示。

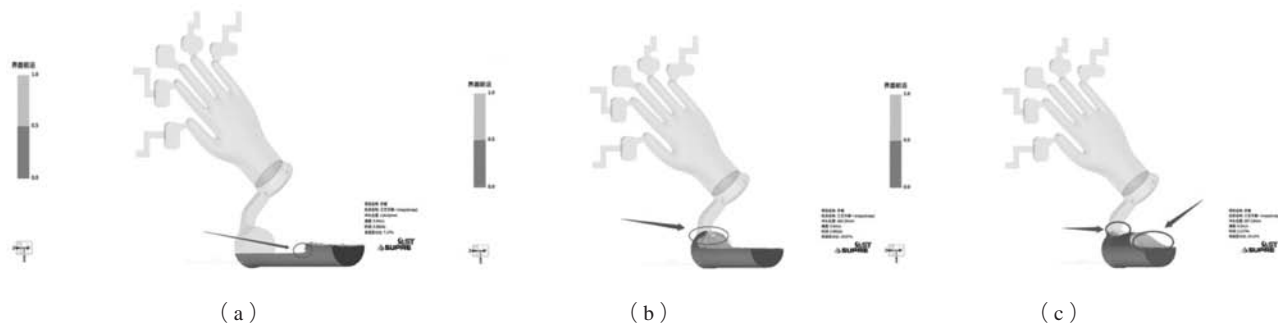


图9 普通压铸低速充型数值模拟结果

Fig. 9 Numerical simulation results of low speed mold filling processes for general HPDC

图10为匀加速料筒孕育半固态压铸充型压力的数值模拟结果。从图中可以看出，采用匀加速压室半固态压铸情况下，整个砂芯在充型过程中压力平稳，使得接触到铝液的砂芯部分受力均匀一致，砂芯受力各方平衡，因此不会导致砂芯错位、断裂。

图11为普通压铸充型压力数值模拟结果。可以看出，普通压铸下充型过程中砂型受到压力变换复杂，尤其如图11c中，在小手指部位出现局部压力集中，必然造成砂芯受力不均衡，造成砂芯断裂、错位。

图12为匀加速料筒孕育半固态压铸浇口流量曲线数值模拟结果。从图中可以看出，采用匀加速压室半

固态情况下，整个充型过程中流量及速度平稳。符合铸造原理中的“充填平稳，补缩有序”。

图13为普通压铸浇口流量曲线数值模拟结果。可以看出，普通压铸下浇口充型过程中速度及流量反复波动，造成充型过程不稳定，易产生卷入性气体及冲刷浇口。

## 4 铸件生产实践及产品检验

基于上述技术，开发的手模铸件外观质量优异，无凹坑、凸起、鼓泡等缺陷；内腔清理干净、无残

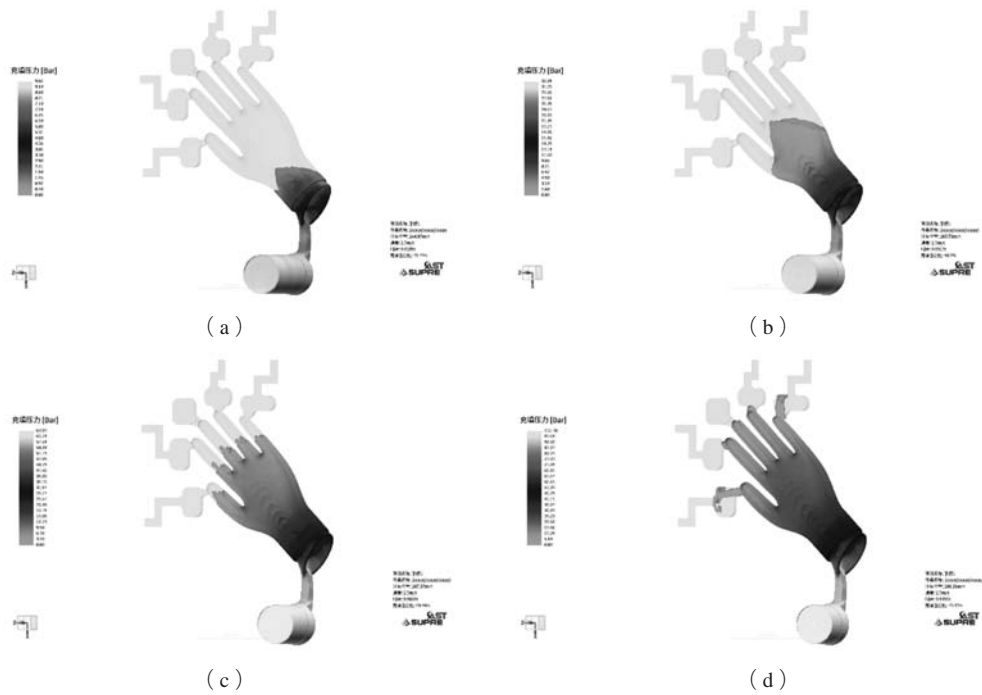


图10 匀加速充型数值模拟-充型压力分布

Fig. 10 Mold filling pressure distributions obtained from numerical simulation of uniform acceleration mold filling

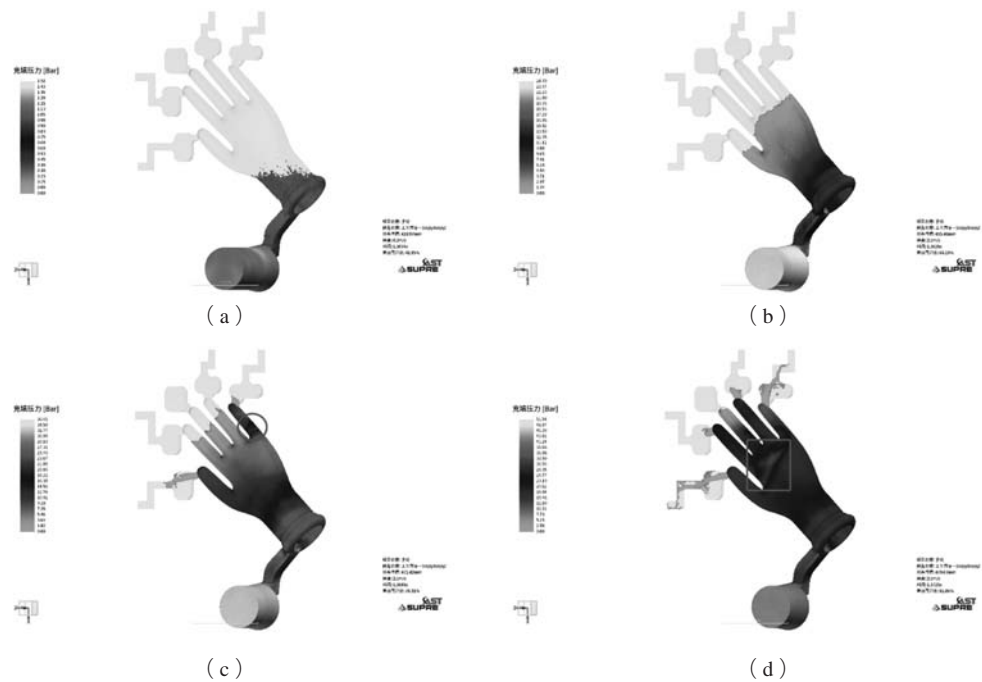


图11 普通压铸充型数值模拟-充型压力分布

Fig. 11 Mold filling pressure distributions obtained from numerical simulation of mold filling for general HPDC

留，如图12所示。采用普通氩弧焊对本研究压铸手模件与型材件拼焊后，焊道成型无气孔、针孔缺陷，焊道打磨抛光后光滑平整，如图2所示，满足橡胶手套脱模使用要求。

根据文献[14-16]，铝合金压铸件一般不可高温

热处理、不可氩弧焊接，会产生严重的鼓泡、变形缺陷，由于手模铸件一方面需要进行焊接，另一方面需要采用覆膜砂芯形成其复杂内腔，而且产品轻薄且外观质量要求较高，不适宜振动脱芯，需通过高温510 °C并保温30 min使覆膜砂中的树脂受热软化后方可清砂，

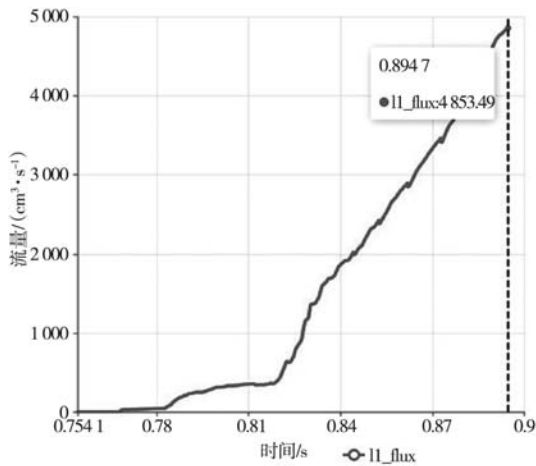


图12 匀加速浇口流量曲线数值模拟结果

Fig. 12 Numerical simulation result of the gate flux curve under the condition of uniform acceleration

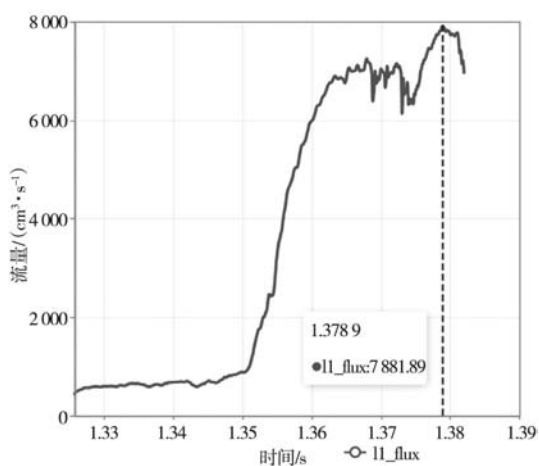


图13 普通压铸浇口流量曲线数值模拟结果

Fig. 13 Numerical simulation result of the gate flux curve for general HPDC

因此,采用普通压铸无法满足其要求。有研究表明<sup>[17]</sup>ADC12压铸件在固溶热处理温度至490℃就会出现鼓泡现象。而去砂芯的温度达到510℃,氩弧焊接温度更是在600℃左右,一旦铸件存在气孔、夹杂等铸件缺陷,就容易产生炸焊或鼓泡。本研究基于匀加速料筒孕育半固态压铸技术所生产手模压铸件,成功地减少了压铸件出现气孔、夹杂等缺陷的风险,实现在高温脱芯不鼓泡,与型材拼焊后也无鼓泡及炸焊现象。

匀加速料筒孕育半固态压铸技术是通过在低速压射过程进行分段加速,实现压射锤头的匀加速运动,使铝液在压室运动平稳,并通过控制料筒温度,实现半固态浆料的形成,从而提升铝液的充型性能,使其

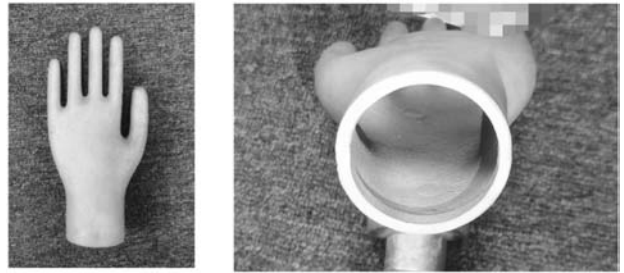


图14 与型材拼焊前后实物图

Fig. 14 Real product photos before and after welding with profile

在流道及型腔内速度低且流动平稳,最后顺序充填型腔,将压室空气排至溢流排气道,而且整个砂芯在充型过程中压力平稳,使接触到铝液的砂芯部分受力均匀一致。采用普通压铸,首先压室内气体不能平稳前推造成半个压室内气体被卷入熔体中,其后熔体在流道和型腔内不仅速度高且反复波动,在大流量及反复波动的充型条件下,砂芯受到压力变换复杂影响,不断高速冲刷砂芯,造成砂芯断、错位或者严重粘砂,如图15所示。

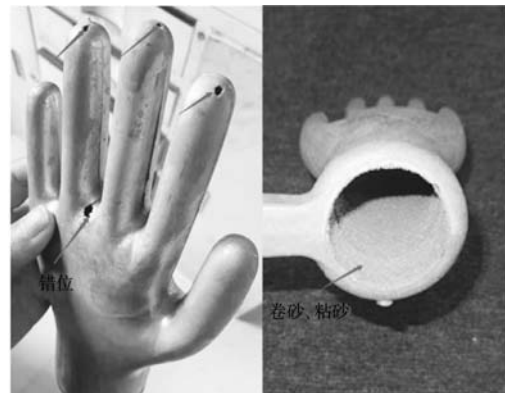


图15 普通压铸手模实物照片

Fig. 15 Real product photos of the glove model manufactured by general HPDC

## 5 结论

采用自主开发的匀加速料筒孕育半固态压铸技术,在普通覆膜砂芯基础上,开发成功了可高温热处理、可氩弧焊的手模空腔铸件,用实例证明了采用压铸方法成形复杂空腔铸件的可行性,可一定程度上解决盐芯制造工艺复杂、成本高的局限性,为优质、高效、低成本空腔压铸件大批量生产打下了坚实的基础,具有良好应用发展前景。

## 参考文献:

- [1] 刘付曙, 廖仲杰, 陈国恩, 等. 高真空压铸减震塔铸件力学性能的研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (2): 246-248.
- [2] 李建宇, 管胜敏, 吴树森, 等. 大型复杂离合器壳体高致密化压铸 [J]. 铸造, 2020, 69 (11): 1198-1202.
- [3] 安肇勇, 黄志垣, 陆淳佳. 缸盖罩高真空压铸工艺与普通排气块压铸工艺分析 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (12): 1312-1315.
- [4] 余柳平, 张群超, 付满. 半固态压铸铝合金悬置支架的应用研究 [J]. 铸造工程, 2022, 46 (1): 76-81.
- [5] 王菊清, 陈正周, 宋朝辉. 水冷紊流通道制备半固态A356铝合金浆料及流变压铸 [J]. 铸造, 2019, 68 (1): 38-41.
- [6] 冯德政. 铝合金铸件气孔缺陷形成机理及其防止 [J]. 现代铸造, 1982 (4): 39-43.
- [7] 龚杰, 龙文元, 宋国金. 一种匀加速压室孕育半固态流变的压铸方法: CN113399642A [P]. 2021-06-24.
- [8] 龙文元, 龚杰, 宋国金. 基于云计算的路由器盒盖半固态压铸工艺设计及优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (5): 638-640.
- [9] 龙文元, 龚杰, 宋国金. 中小型铝合金铸件半固态流变压铸技术研究 [J]. 铸造, 2021, 70 (6): 651-656.
- [10] 潘理. 压力下凝固对真实压铸胀型力的影响 [J]. 铸造技术, 1996, 17 (2): 29-33.
- [11] 吴春苗, 等. 压铸技术手册 [M]. 2版. 广州: 广东科技出版社, 2007.
- [12] 刘烜宇, 刘伟华, 李英民. 一种压铸用高强度复合水溶性盐芯的研究 [J]. 铸造, 2018, 67 (2): 118-121.
- [13] 张伟, 李志林, 张子珂, 等. 基于高性能计算的云原生超大规模压铸模拟技术 [J]. 铸造, 2023, 72 (4): 451-454.
- [14] HU Ruizhang, GUO Chun, MA Mingliang. A study on high strength, high plasticity, non-heat treated die-cast aluminum alloy [J]. Materials, 2021, 15 (1): 295.
- [15] DONG Xixi, YANG Hailin, ZHU Xiangzhen. High strength and ductility aluminium alloy processed by high pressure die casting [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 773: 86-96.
- [16] CAO Hanxue, HAO Mengyao, SHEN Chao. The influence of different vacuum degree on the porosity and mechanical properties of aluminum die casting [J]. Vacuum, 2017, 146: 278-281.
- [17] 赵嵩郢, 史一凡. 不同热处理对ADC12压铸铝合金组织和力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (6): 230-233.

## Research and Practice of Producing Thin-Walled Complex Cavity Glove Mold Based on Semi-Solid Die Casting with Uniformly Accelerated Charging Barrel Inoculation

GONG Jie<sup>1</sup>, LIU Yi-xiu<sup>1</sup>, WU Zhen-hui<sup>1</sup>, LONG Wen-yuan<sup>2</sup>, MA Wen-lin<sup>3</sup>

(1. Xiamen Genaier Technology Co., Ltd., Xiamen 361028, Fujian, China; 2. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330036, Jiangxi, China; 3. Chongqing Changzheng Heavy Industry Co., Ltd., Chongqing 400000, China)

### Abstract:

With the global demand for energy conservation and emission reduction, carbon peaking, carbon neutrality, the lightening and greening of components in all industries has become an inevitable development path. The glove molds required for producing medical rubber and nitrile gloves have always been made of ceramic materials. Although they can meet functional requirements, but have disadvantages such as high energy consumption, easy damage, and no recycling. Switching to easily recyclable metal materials has become a research hotspot, and aluminum alloys have become the preferred choice for the research due to their lightweight. Due to the characteristics of thin-walled and complex inner cavities of the hand mold components, and being necessary to weld with the extrusion forming parts, and the cost of using aluminum profiles for stamping preparation is high. Ordinary die-casting has difficulties in forming complex inner cavities and the casting cannot be welded. In this study, based on the self-developed uniformly accelerated charging barrel inoculation semi-solid die-casting technology, through numerical simulation analysis optimizing the die-casting process, and applying the optimized resin-bonded sand core, the aluminum alloy glove model die castings with complex cavity have been successfully prepared. The developed products meet the project requirements and provide excellent technical examples and references for the research and development of complex cavity die-casting parts.

### Key words:

ADC12 alloy; semi-solid; HPDC; thin wall hollow; weldable die casting part; medical glove