

4Cr5MoSiV1模具钢的表面复合处理对压铸过程和制成品的影响评估

徐文涛¹, 何吉²

¹台州科技职业学院机电与模具工程学院, 浙江 台州

²台州法奥塑模股份有限公司, 浙江 台州

收稿日期: 2022年1月12日; 录用日期: 2022年2月16日; 发布日期: 2022年2月24日

摘要

对4Cr5MoSiV1模具钢, 进行了渗氮和喷丸相结合的表面处理, 并对压铸过程的影响和制成品的抗拉强度进行了评估。对于3种模具: 未经处理的模具、SB-N处理模具和SB-N-SB处理模具(Shot Blasting抛丸; Nitriding渗氮), 考察了其压铸过程和制成品。通过在模具的3个挤压销上安装应变片, 以捕捉注射过程中的应变值。通过考察应变曲线中压力上升的时间差、最大应变值和压力持续时间, 明确了不同表面处理方法对熔融金属的流入和凝固过程有较大影响。对应变曲线的分析表明: 经过表面处理的模具其流动性、压力传播特性和热保持性均得到了改善。通过X射线CT观察了3种模具的ADC12铝合金压铸试样, 并测试了抗拉强度, 结果表明: 经过SB-N-SB表面处理的模具其制成品缺陷的大小和数量更小, 抗拉强度平均提高约10%, 可有效提高模具的耐用性和铸件的质量。

关键词

4Cr5MoSiV1模具钢, 表面处理, 压铸过程, 铸件质量

Assessment of the Effect of Surface Compound Treatment of 4Cr5MoSiV1 Die Steel on the Die Casting Process and the Finished Product

Wentao Xu¹, Ji He²

¹School of Mechatronics and Mould Engineering, Taizhou Vocational College of Science & Technology, Taizhou Zhejiang

²Taizhou Faw Plastic Mould Mould Co., Ltd., Taizhou Zhejiang

Received: Jan. 12th, 2022; accepted: Feb. 16th, 2022; published: Feb. 24th, 2022

文章引用: 徐文涛, 何吉. 4Cr5MoSiV1 模具钢的表面复合处理对压铸过程和制成品的影响评估[J]. 机械工程与技术, 2022, 11(1): 59-67. DOI: 10.12677/met.2022.111008

Abstract

For 4Cr5MoSiV1 die steel, a combination of nitriding and shot blasting surface treatment was performed, and the effects of the die casting process and the tensile strength of the manufactured products were evaluated. For three types of dies: untreated dies, SB-N treated dies and SB-N-SB treated dies (Shot Blasting; Nitriding), the die casting process and manufactured products were examined. Strain gauges were installed on the three extrusion pins of the die to capture the strain values during the injection process. By examining the time difference of pressure rise, maximum strain value and pressure duration in the strain curve, it was clear that different surface treatment methods have a large effect on the inflow and solidification process of molten metal. The analysis of the strain curves showed that the flow, pressure propagation characteristics and heat retention of the surface-treated molds were improved. The ADC12 aluminum alloy die-casting specimens of three molds were observed by X-ray CT and tested for tensile strength. The results showed that the molds with SB-N-SB surface treatment had smaller size and number of defects in their manufactured products, and the tensile strength was increased by about 10% on average, which could effectively improve the durability of the molds and the quality of the castings.

Keywords

4Cr5MoSiV1 Die Steel, Surface Treatment, Die-Casting Process, Casting Quality

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

铝合金由于其密度低、强度高和导热性好的特点,被广泛应用于航空、汽车、高铁等现代工业[1]。压铸是指将高温熔融金属以高速、高压充入型腔,然后迅速冷却凝固,在短时间内生产出产品的工艺过程,是一种接近净成形的热加工制造工艺[2]。压铸模具可以在短时间内大量生产形状复杂的铝合金制品,由于其高生产效率,对于成本竞争激烈的铝合金零部件生产来说是必不可少的[3] [4]。

长时间工作后,压铸模具会出现各种不同程度的损坏,例如:与高温熔融金属接触,因高速、高压的流体流动而造成的熔化损坏;因反复加热和冷却而产生的热疲劳导致的热裂损坏等。受到熔体损伤的模具需要定期拆卸和维护,这会导致生产效率下降。降低维修频率可有效提高生产效率并降低成本,如何延长压铸模具的寿命并提高产品质量引起了各国研究人员的关注[5] [6] [7]。

Gavariev R.等[8],分析了熔化工艺的结晶速率,以及模具成型表面的周期性重复温度和冲击载荷等因素导致的模具缺陷。Shahane S.等[9],通过机器学习和三维数值模拟的结合,基于有限体积的数值求解器用于确定温度-时间的历史,并将输入与输出相关联以实现低压铸件的多目标优化。Fiorentini F.等[10],通过确定压铸模具中主要承受高温和高热梯度的区域,并通过增材制造,使用共形通道来设计和分析更有效的冷却系统。Kanyo J.等[11],通过在模具中引入陶瓷成分以实现更多的化学惰性结构,以减轻与模具的反应,以减少化学诱导的缺陷。Paiva J.等[12],对两种不同结构的纳米复合 AlTiN 和 AlCrN 涂层的磨损性能进行了评价,并得出结果:AlCrN/Si₃N₄ 纳米复合涂层具有最佳性能,该涂层具有硬度、附着力、焊接行为、抗氧化性和应力状态的最佳组合。

通过对主要文献的分析可见：部分学者采用了工艺分析、数值模拟、机器学习、冷却系统优化等手段来进行压铸工艺和模具的优化；部分学者通过引入新材料、纳米涂层等方法来强化模具性能。以上方法，由于各种原因目前还较难在工业中实际应用。

本文研究了工业中更容易实施的抛丸、渗氮法在压铸模具表面处理中的应用。在本研究中，制备了经过 SB (Shot Blasting 抛丸)、N (Nitriding 渗氮)组合处理的压铸模具，并进行了压铸实验。研究了模具表面处理对金属融流过程以及制成品的影响。结果表明：模具经过 SB-N-SB 表面处理，可有效提高模具的耐用性和制成品的质量。

2. 实验方法

如图 1(a)所示，压铸模具是采用 4Cr5MoSiV1 模具钢制成的，压铸成品为 ADC12 铝合金材料的 L170 × W60 × H3 mm 平板状铝件。为评估喷丸(SB)和气体渗氮(N)工艺对压铸模具性能的影响，我们准备了 3 套模具：1) 未经处理的模具；2) 经过喷丸→渗氮工艺处理，以下简称 SB-N 模具；3) 经过喷丸→渗氮→喷丸工艺处理，以下简称 SB-N-SB 模具。使用这 3 套模具，在合模力 70 吨的压铸机上，在表 1 所示的条件下进行压铸实验。

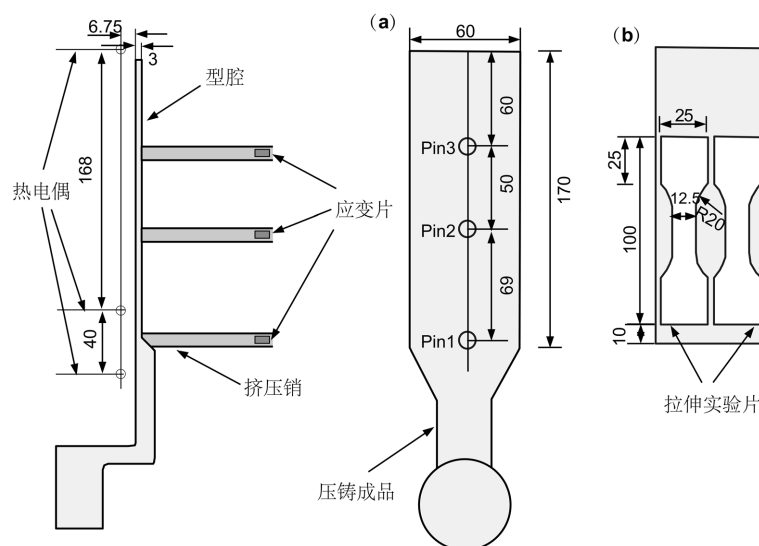


Figure 1. (a) Cavity, extrusion pin and strain gauge of die casting mold; (b) Shape and sampling position of tensile test piece
图 1. (a) 压铸模具的型腔、挤压销与应变片；(b) 拉伸试验片的形状和取样位置

Table 1. Die casting conditions

表 1. 压铸条件

熔融温度	650℃	高速射出速度	1.0 m/s
材料	ADC12	高速行程	20 mm
制品重量	250 g	低速射出速度	0.1 m/s
铸造压力	50 MPa	低速行程	190 mm
死区时间	8 s		

如图 1(a)所示，在三个挤压销的根部安装应变片，将热电偶插入动模侧至距型腔面 6.75 mm 的位置。当金属被熔化时，通过应变片感测、捕捉熔融金属的流入过程。另外，实际生产时一般会使用稀释的水

溶性脱模剂对模具进行喷涂, 以利于脱模。本实验中为了控制变量, 每种模具的 5 次压铸实验, 均是在不使用脱模剂的情况下进行的。对于得到的压铸成型品, 使用工业 X 射线 CT 装置(TOSCANER-32 300 μ FD)进行断面的组织观察。此外, 如图 1(b)所示, 每个成型产品通过线切割切出两个拉伸试验片, 并通过万能材料测试机测量拉伸强度。

3. 结果和讨论

3.1. 应变曲线分析

图 2 显示了在压铸实验过程中, 从 3 个挤压销底部的应变片得到的应变曲线。在图中箭头所示的液态熔融金属的注入时间点, 3 套模具对应曲线的畸变都会瞬间增加, 说明熔融金属的流入过程均能被捕捉到。另外, 在所有模具中, 随着注射时间的推移, 最靠近浇口的 Pin1 的应变曲线恢复较慢, 而 Pin2 和 Pin3 远离浇口, 在短时间内即恢复正常。因为 Pin2 和 Pin3 离浇口较远, 金属熔流至此速度较为缓慢, 注射压力较小。

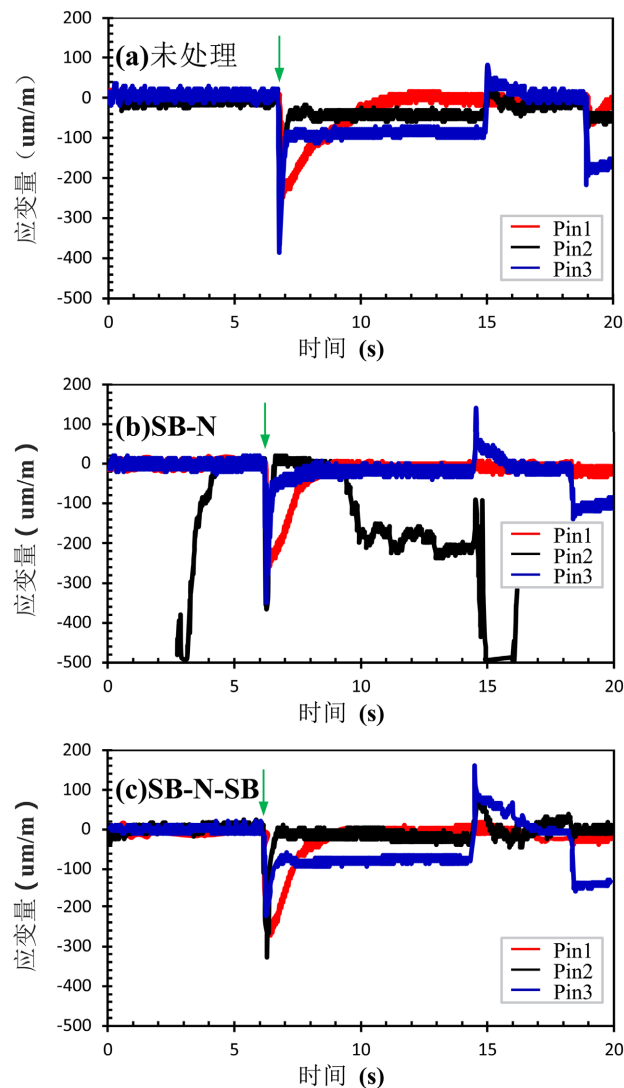


Figure 2. Strain curve of the strain gauge at the bottom of the extrusion pin

图 2. 挤压销底部应变片的应变曲线

图3给出了未经处理的模具在注射过程中, Pin1、Pin2、Pin3的应变曲线(为观察清楚, 取6.6~7.1 s时间段进行放大操作)。可以看出, 离浇口最近的 Pin3 应变曲线首先发生变化, 然后是中间的 Pin2, 最后是 Pin1。其中 Pin1 曲线发生了失真, 因为熔融金属被填充并且注射压力被充分施加, 销被挤压变形。在压铸中, 液态熔融金属从浇口的远侧填充, 因此压力从 Pin3 开始依次施加。如图3所示, 在每个销的位置, 峰值变化的时间差值定义为: Pin3 和 Pin2 之间的差值为 t_1 ; 而 Pin2 和 Pin1 之间的差值为 t_2 。对于3种模具, 汇总在一起的图如图4所示。未经处理的模具 t_1 和 t_2 都较长, 而 SB-N 模具和 SB-N-SB 模具依次变短。从该结果发现, 与未经处理的模具相比, 通过应用复合表面处理, 注射过程中熔融金属的流动性得到了有效提高。

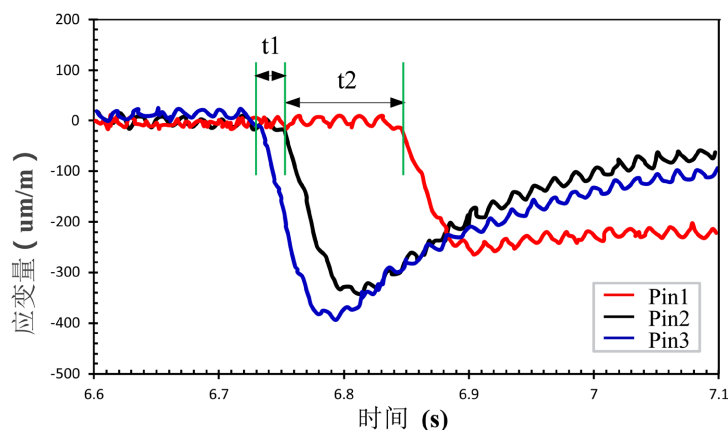


Figure 3. Time difference of strain peaks during injection in untreated mold
图3. 未经处理的模具中注射过程中应变峰的时间差

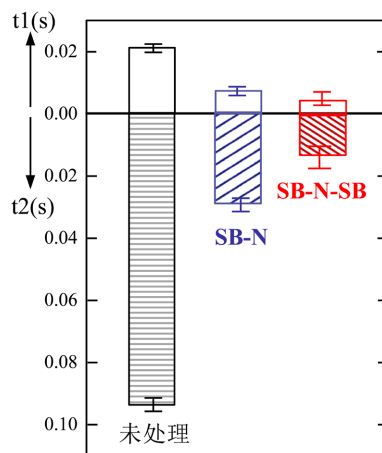


Figure 4. Time difference comparison of strain peaks
图4. 应变峰的时间差比较

图5显示了注射过程中, 在每个挤压销位置的最大应变值的比较结果。对于远离浇口的 Pin2 和 Pin3 位置, 3种模具几乎没有区别, 说明压力传播性能较好。但是对于未经处理的模具, 在 Pin1 处应变值明显较小, 说明压力传播性能较差。

此外, 由于应变峰的宽度可以表示施加压力的时间, 如图6所示。可以看出, 相较而言, 经过复合表面处理的模具压力持续时间更长, 尤其是在距离浇口最近的 Pin3 处更明显。相反, 在浇口侧的 Pin1 处, 经过表面处理的模具压力持续时间略短。说明经过表面处理后, 保压性能也有所提升。

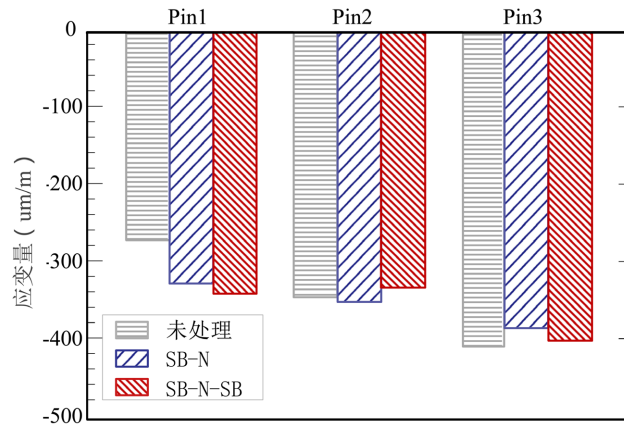


Figure 5. Maximum strain
图 5. 最大应变量

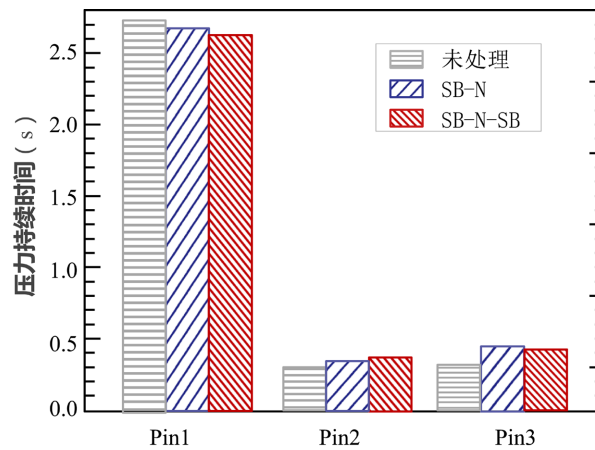


Figure 6. Pressure duration
图 6. 压力持续时间

当填充的铝熔融金属凝固时, 不会传递来自柱塞的压力, 因此可以推测, 由于经过表面处理使得在 Pin3 处凝固延迟, 压力传播和可持续性得到改善。原因是, 喷丸使表面变粗糙, 模具与熔融金属的接触面积减少, 热阻增加, 另外渗氮对也对热导率有影响。

模具表面径向的传热系数 h , 可由公式(1)表示[13]:

$$h = \frac{q}{T_C - T_M} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

对于模具材料和铸件材料的固相和液相条件, 通过传热方程, 可以得到随时间变化的温度分布, 如式(2):

$$\rho c' \frac{dT}{dt} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) \quad (2)$$

在公式(2)中, 如果 k 与温度无关, 可以将该方程的右侧写成式(3)。

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = r \frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{dT}{dr} \quad (3)$$

模具经过表面处理, 熔融金属的保温性和流动性得到改善, 较高温度的熔融金属充满型腔, 凝固时间较长(延迟), 改善了压力传播。

3.2. 缺陷与抗拉强度检测

图 7 为压铸成型品经过 X 射线 CT 观察的缺陷分析结果。在各图中, 下侧为浇口侧, 大的缺陷(铸腔)聚集在上排气口侧。此外, 一些缺陷聚集在浇口附近, 小缺陷聚集在中间部分。排气口侧出现较大的缺陷, 是出现了一定程度的欠铸现象, 因为铸件壁较薄, 型腔内气压较高且排气不畅。改进措施为提高熔融金属的流动性, 改进浇注设计, 并改善排气条件。

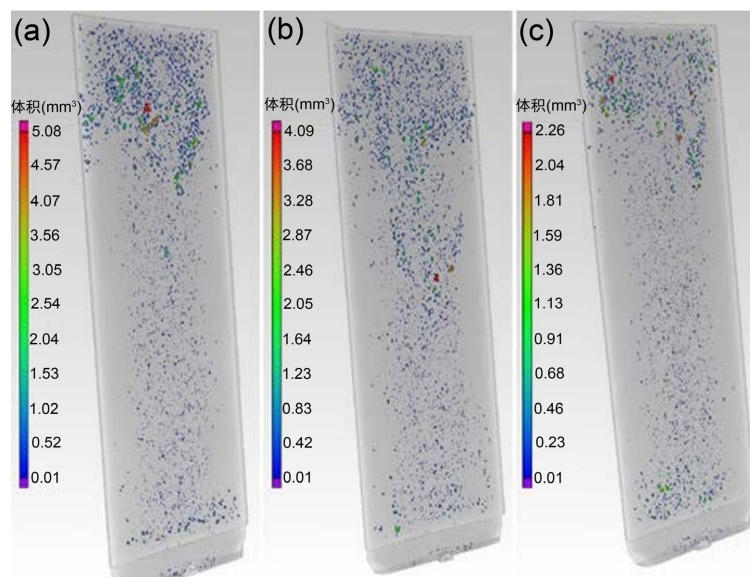


Figure 7. Defect detection results observed by X-ray CT. (a) Untreated mold; (b) SB-N mold; (c) SB-N-SB mold
图 7. X 射线 CT 观察到的缺陷检测结果。(a) 未经处理的模具; (b) SB-N 模具; (c) SB-N-SB 模具

为进行拉伸试验, 对于每种模具的产品, 均制备了如图 1(b)所示的拉伸试验片。试验结果示于图 8。在未经处理的模具产品中, 样品的拉伸强度值接近 ADC12 的标准强度为 310 MPa。SB-N 模具产品因样品而异, 但平均最大强度比未处理模具大。而 SB-N-SB 模具的产品中, 所有样品的拉伸强度都超过了未处理模具的产品, 最高提升 17%, 平均提升约 10%, 说明产品质量得到明显提升。

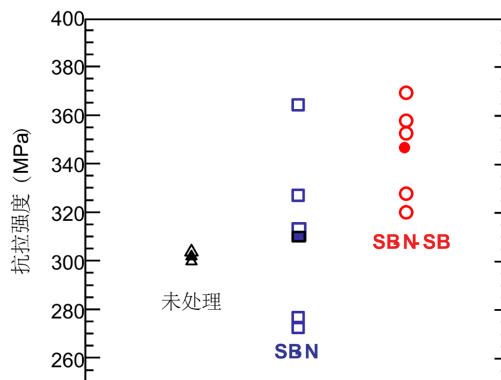


Figure 8. Tensile strength of die-casting test pieces
图 8. 压铸试验片的抗拉强度

3.3. 微观结构观察

这些试件在浇口附近的显微组织如图 9 所示, 截面取厚度中心。可以看到, 初生 α 枝晶的尺寸和间距以及它们之间的 Al-Si 共晶结构的尺寸没有显著差异, 微观结构并无明显不同。因此, 图 8 中抗拉强度的差异, 主要受图 7 中缺陷的大小和数量影响。并且在图 7 中, 表示缺陷大小的色条的比例不同, (a)最大, 其次是(b)和(c)。在表面处理模具中, 图 6 中的压力持续时间被均衡, 并且如图 5 所示, 即使在 Pin1 中也稳定地施加压力, 从而减少了缺陷(压碎)。

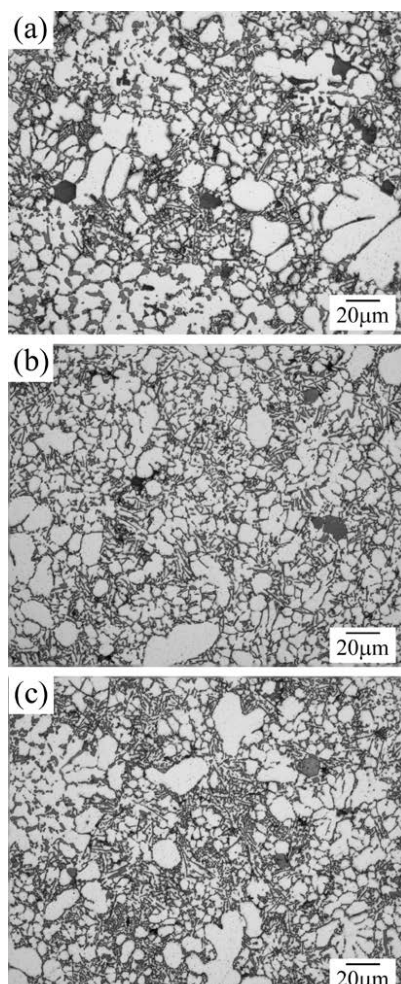


Figure 9. Microstructure of die-cast specimens. (a) Untreated mold; (b) SB-N mold; (c) SB-N-SB mold
图 9. 压铸试样的微观结构。(a) 未经处理的模具; (b) SB-N 模具; (c) SB-N-SB 模具

4. 结论

制备了未经处理的模具、SB-N 模具和 SB-N-SB 模具, 并进行了 ADC12 铝件压铸实验, 以评估渗氮和喷丸处理相结合的表面处理方法对压铸过程和制成品的影响。通过分析安装在三个挤压销上的应变计得到的应变曲线, 研究了对熔融金属流入和凝固过程的影响。并且, 对得到的压铸成型品进行了 X 射线衍射检测、拉伸强度试验和微观结构观察, 得到以下结论:

1) 通过在挤压销的底部安装应变片并压铸, 可以检测注射时的应变峰值, 并检测各销位置处峰值上升的时间差和压力持续时间。

2) 在复合表面处理模具中, 观察到应变峰值的时间差较小, 可见熔融金属的流动性得到改善。并且排气侧的压力持续时间变长、凝结被延迟, 因为复合表面处理模具的保温性提高, 并改善了压力传播特性。

3) 所得 ADC12 铝压铸成型品的抗拉强度在复合表面处理模具中较高, 但微观结构无显著差异。X 射线 CT 观察显示, 经复合表面处理的模具, 其压铸成型品缺陷尺寸小, 数量少, 强度有所提高。这主要是由于压力传播的改善, 减少了破碎缺陷。

4) 压铸模具经 SB-N-SB 复合表面处理效果最好, 压铸件抗拉强度平均提高约 10%, 不仅可以提高模具的耐用性, 还能有效提高制成品的质量。

基金项目

浙江省教育厅校企合作“访问工程师”项目(FG2020314); 台州市科技局科研项目(2003gy38)。

参考文献

- [1] Udoye, N.E., Inegbenebor, A.O. and Fayomi, O.S.I. (2019) The Study on Improvement of Aluminium Alloy for Engineering Application: A Review. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, **10**, 380-385.
- [2] Wolff, N., Zimmermann, G., Vroomen, U., *et al.* (2020) A Statistical Evaluation of the Influence of Different Material and Process Parameters on the Heat Transfer Coefficient in Gravity Die Casting. *Metals*, **10**, 1367. <https://doi.org/10.3390/met10101367>
- [3] Góral, M. and Mrówka-Nowotnik, G. (2020) Protective Coatings for Aluminium Die Casting Moulds and Continuous Casting Moulds: A Review. *Ochrona przed Korozją*, **7**, 216-219. <https://doi.org/10.15199/40.2020.7.1>
- [4] Ahirrao, M.R.D. and Marlapalle, B.G. (2019) A Review Paper on Analysis and Optimization of Aluminium Casting Parameters. *International Research Journal of Engineering and Technology*, **6**, 1129-1132.
- [5] Brezina, J., Viňáš, J., Sabadka, D., *et al.* (2020) High Pressure Die Casting Mould Renovation by Cladding. *Machines Technologies Materials*, **14**, 114-116.
- [6] Salem, M., Le Roux, S., Dour, G., *et al.* (2019) Effect of Aluminizing and Oxidation on the Thermal Fatigue Damage of Hot Work Tool Steels for High Pressure Die Casting Applications. *International Journal of Fatigue*, **119**, 126-138. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.09.018>
- [7] Abid, D., Ktari, A., Mellouli, D., Gafsia, N., *et al.* (2019) Failure Analysis of Shot-Sleeves Used in Brass High Pressure Die-Casting Process. *Engineering Failure Analysis*, **104**, 177-188. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.05.038>
- [8] Gavariyev, R.V., Savin, I.A. and Soldatkina, E.N. (2020) Choice of Protective Coating of Metal Molds for Casting Non-Ferrous Alloys. *Solid State Phenomena*, **299**, 867-871. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.867>
- [9] Shahane, S., Aluru, N., Ferreira, P., *et al.* (2020) Optimization of Solidification in Die Casting Using Numerical Simulations and Machine Learning. *Journal of Manufacturing Processes*, **51**, 130-141. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.016>
- [10] Fiorentini, F., Curcio, P., Armentani, E., *et al.* (2019) Study of Two Alternative Cooling Systems of a Mold Insert Used in Die Casting Process of Light Alloy Components. *Procedia Structural Integrity*, **24**, 569-582. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.02.050>
- [11] Kanyo, J.E., Schafföner, S., Uwanyuze, R.S., *et al.* (2020) An Overview of Ceramic Molds for Investment Casting of Nickel Superalloys. *Journal of the European Ceramic Society*, **40**, 4955-4973. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.07.013>
- [12] Paiva, J.M., Fox-Rabinovich, G., Locks Junior, E., *et al.* (2018) Tribological and Wear Performance of Nanocomposite PVD Hard Coatings Deposited on Aluminum Die casting Tool. *Materials*, **11**, 358. <https://doi.org/10.3390/ma11030358>
- [13] Koru, M. and Serçe, O. (2016) Experimental and Numerical Determination of Casting-Mold Interfacial Heat Transfer Coefficient in the High Pressure Die Casting of A-360 Aluminum Alloy. *Acta Physica Polonica A*, **130**, 453-458. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.130.453>