

铝合金压铸试片内部冷料的缺陷分析和对策

李小林¹ 朱宇¹ 余亮¹ 闫锋¹ 万里^{1,2}

(1. 广东鸿图科技股份有限公司, 肇庆 526100; 2. 广东鸿图汽车零部件有限公司, 广州 510700)

摘要 针对铝合金压铸试样在试制过程中出现的内部冷料缺陷, 通过理论分析和试验验证, 分析了其形成原因, 包括模具温度分布不均、浇注系统设计不合理、金属液流动性不足以及压射参数不合理等。基于此, 提出了一系列优化措施, 如改进铝液温度、模具控制温度以及调整压射工艺参数等。结果表明, 这些措施能显著减少铝合金压铸件内部冷料缺陷, 提升试样的质量和数据的准确性。

关键词 铝合金; 压铸; 内部冷料; 缺陷分析; 工艺优化

中图分类号 TG146.21; TG249.2

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250035

Defect Analysis and Countermeasures of Cold Flakes in Aluminum Alloy Die Casting Specimens

LI Xiaolin¹, ZHU Yu¹, YU Liang¹, YAN Feng¹, WAN Li^{1,2}

(1. Guangdong Hongtu Technology Co., Ltd., Zhaoqing 526100; 2. Guangdong Hongtu Auto Parts Co., Ltd., Guangzhou 510700)

Abstract: The forming factor for internal cold flake defects in aluminum alloy die-casting specimens during trial-production process, including uneven mold temperature distribution, unreasonable gating system design, insufficient molten metal fluidity, and improper injection parameters, were investigated through theoretical analysis and experimental verification. On this basis, a series of optimization measures were proposed, such as improving the molten aluminum temperature, controlling the mold temperature, and adjusting the injection process parameters. The results indicate that the measures can significantly reduce internal cold flake defects in aluminum alloy die-castings, improving specimen quality and data accuracy.

Key Words: Aluminum Alloy, Die Casting, Cold Flakes, Defect Analysis, Process Optimization

压铸作为一种高效、经济的金属成形技术, 在汽车、航空航天和电子通信等领域得到广泛应用。铝合金材料的性能是压铸工艺中重要的基础和保障。为了验证铝合金材料性能, 通常会开发试片或试棒专用模具进行打样并进行拉伸等试验。铸造缺陷会对试验结果产生影响, 其中铸造冷料是试片模中最常见的缺陷之一, 严重干扰试验的准确性^[1-4]。本研究旨在系统分析试片内部冷料缺陷的成因, 并探索有效的预防与改善措施, 以提升铝合金压铸试片的整体品质, 旨在为相关研究提供参考。

1 试片模具结构和试验材料

试片尺寸为 300 mm×300 mm, 厚度为 3 mm。试片浇注工艺方案设计及取样位置见图 1, 图 1 中 1~6 为取样位置。制样采用 3 500 kN 东洋卧式冷室压铸机,

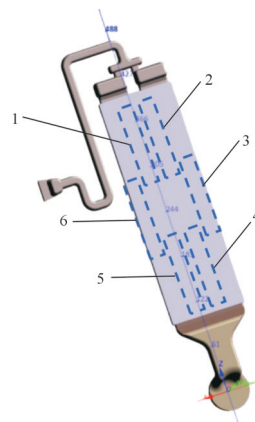


图 1 压铸试片浇注结构及取样位置

Fig.1 Casting structure and sampling position of die-casting specimen

压室直径为 50 mm, 压室有效长度为 370 mm, 设计充满度为 38.5%。为验证效果, 在试片上 6 个不同位置取

收稿日期: 2025-01-20; 修订日期: 2025-04-02

第一作者: 李小林, 男, 1982 年出生, 工程师, E-mail: lam.li@ght-china.com

引用格式: 李小林, 朱宇, 余亮, 等. 铝合金压铸试片内部冷料的缺陷分析和对策[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(4): 619-623.

LI X L, ZHU Y, YU L, et al. Defects analysis and countermeasures of cold flakes in aluminum alloy die casting specimens[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(4): 619-623.

样进行拉伸试验。试样满足 GB/T13822-2017 所规定的有色金属压铸 B 型拉伸试样要求,见图 2。

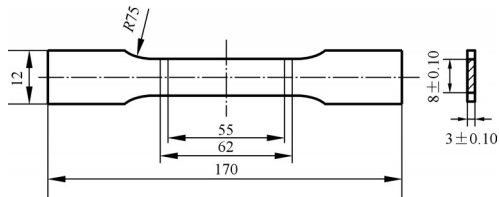


图 2 GB/T13822-2017 B 型拉伸试样尺寸示意图

Fig.2 Schematic diagram of dimension of GB/T13822-2017 type B tensile specimen

试验采用结构件常用材质 AlSi10MnMg (AC-43500, EN 1706),其主要成分和力学性能要求见表 1 和表 2。

表 1 AlSi10MnMg 合金的主要化学成分

Tab.1 Main chemical composition of AlSi10MnMg alloy %

w_B								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Sr	Al
9.0~11.5	0.15	0.03	0.55~0.65	0.40~0.45	0.07	0.05~0.10	0.015~0.020	余量

表 2 铸态 AlSi10MnMg 合金的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of AlSi10MnMg alloy

抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
250	120	5

2 试验结果与分析

2.1 T₁试作试验工艺

根据试片壁厚、压室充满度以及模拟结果,T₁试作采用工艺参数见表 3。

表 3 T₁试作参数

Tab.3 Parameter for T₁ trial run

压射比压 p /MPa	快压射速度 v_1 /($m \cdot s^{-1}$)	快压射转换位置 S_1 /mm	增压位置 S_2 /mm
90~100	2.5	240	320
慢压射速度 v_2 /($m \cdot s^{-1}$)	铝料温度 T_1 /°C	定模温度 T_2 /°C	动模温度 T_3 /°C
0.1~0.2	665~670	115~120	115~120

2.2 T₁试作试验结果

采用上述工艺生产的试片外观和内部质量合格,见图 3 和图 4。取其中 3 个试片按图 1 位置切割拉伸试片,拉伸试验结果见表 4。从图 4 可以看出,试片断口显示存在异物,且比例高达 61%。

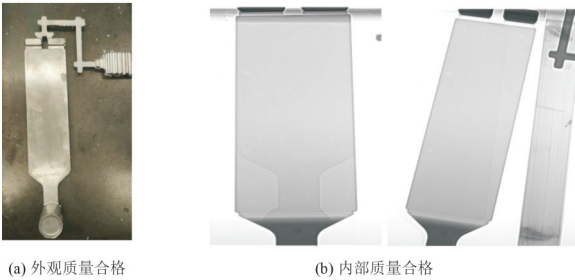


图 3 试片质量合格

Fig.3 Qualified specimens

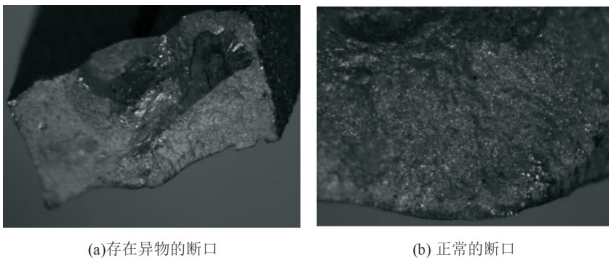


图 4 断口外观对比

Fig.4 Comparison of fracture morphologies

表 4 试样的力学性能

Tab.4 Mechanical properties of specimens

取样位置	1号试样				2号试样				3号试样			
	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断口状态	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断口状态	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断口状态
1	252.64	126.99	4.35	异物	227.34	129.57	2.52	异物	274.00	137.06	6.05	
2	227.56	130.14	2.60	异物	257.48	127.57	5.22		242.12	138.42	2.78	
3	248.31	135.43	3.39	异物	269.24	135.71	6.07		237.70	133.05	2.80	异物
4	266.23	135.16	5.65		240.08	133.88	2.93	异物	266.29	133.79	5.19	
5	257.23	133.29	4.61	异物	237.31	133.11	2.78	异物	251.26	137.90	3.22	异物
6	222.35	130.74	2.29	异物	241.35	131.06	2.92	异物	248.42	134.58	3.34	
平均	245.70	132.00	3.80		245.50	131.80	3.70		253.30	135.80	3.34	

在拉伸试验中,试样断口出现异物,表现为光亮的片状区域,与正常断口的粗糙亚光形态不符。断口存在异物的抗拉强度、屈服强度和伸长率均低于正常水平,表明异物对试片的力学性能产生了显著影响。

2.3 断口异物成因分析

(1)断口外观对比 异物的断口都发现有不同程度的片状光亮断面,与正常的断口的不规则形状的粗糙的亚光断面存在明显差异,见图 4。

(2)扫描电镜结果对比 对异常断口、正常断口以及含杂质断口进行扫描电镜对比分析,见图5。可以看出,异物断口的光亮断面(图5a)与正常断口(图5b)的主要合金元素都是Al、Si和Mg,与一般杂质造成的断

口(图5c)存在含C、O的化合物不同,可以判断异常断口光亮断面为非杂质造成。另外,光亮区域的Si含量明显高于材料标注成分,该区域富含Si元素,可以判断为凝固过程不平衡产生偏析导致的。

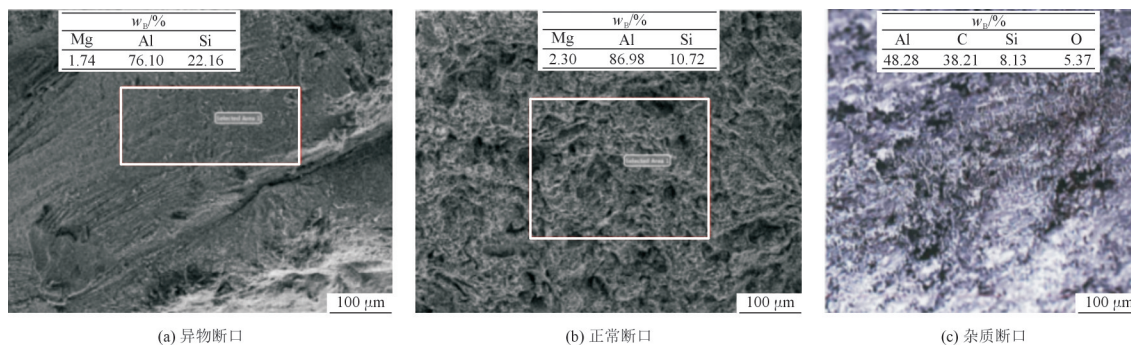


图5 断口扫描电镜分析

Fig.5 SEM images of fracture

(3)金相对比分析 异物断口的金相组织^[1]主要分为4个区域,见图6,区域1位置为正常的初生Al相和Al-Si共晶组织;区域2位置面积小,属于区域1和区域3之间过渡区域,Al-Si共晶组织开始分解,出现Si颗粒;区域3位置面积大,Al-Si共晶组织消失,只剩Al相和Si相,Al相还保持枝晶状,是冷料的典型特征;区域4位置Al相不再呈现枝晶态,并均匀、密集地分布着细小硅颗粒。金相分析显示异常断口位置符合冷料典型特征,可以判断为由于铸造过程卷入了提前凝固的铝料所致。

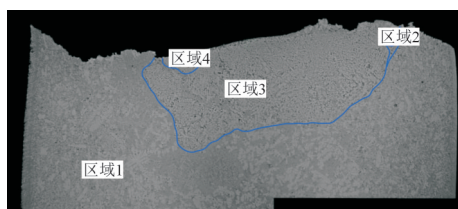


图6 异物断口金相组织及分区示意图

Fig.6 Metallographic structure of foreign object fracture as well as partition

正常拉伸断口的金相组织显示Al-Si共晶分布则相对均匀平整,见图7。

通过对异物断口的外观、材料及金相分析,明确力学试验数据异常的原因为:试片内部存在冷料缺陷。在拉伸过程中,试片于冷料端面发生断裂,导致断口呈

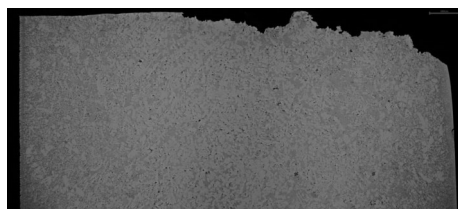


图7 正常断口金相组织

Fig.7 Metallographic distribution of normal fracture surface

现光滑的块状外观。冷料缺陷的主要成因是充填过程中卷入了前端冷料,且排渣不足。金属液在凝固过程中把前端冷料进行包裹并未能完全熔合,其主要表现包括压铸件内部存在未熔化的金属颗粒、夹杂物或冷隔(未完全连接的接缝)。前端冷料成因涉及铝液温度低、模具冷却或浇注系统设计不合理、生产过程温度(模具、保温炉、压室等)过低、压射周期过长等因素。

3 成因分析与对策实施

3.1 熔炼过程

熔炼不充分会导致固态金属颗粒残留。由于本研究采用外部直供铝液的模式,并对到厂铝液的温度、精炼及检测流程有严格要求,排除了熔炼不充分的问题。铝液质量管控具体措施如下:①温度控制,要求AlSi10MnMg铝液到厂温度控制在710~730℃。②精炼工艺,铝液到厂后需进行通氩气精炼,时间不少于15 min。③检测流程,精炼完成后,铝液需进行100%的K模检测和密度检测确认质量合格。④温度检测,倒料前须再次检测温度,确保符合要求。⑤保温炉温度,机边保温炉温度控制在665~670℃。

3.2 模具冷却及浇注系统设计

模具冷却水道及浇注系统的设计对合金液的流动和温度分布具有直接影响。本试片为结构简单的平板产品,壁厚均匀,因此模具冷却水道采用均匀分布设计,见图8,并配备模温机进行精准的温度控制。图9为充填过程模拟。浇注系统经过模拟分析验证,铝液在整个填充过程中平稳且顺序填充型腔,表明浇注系统设计合理。

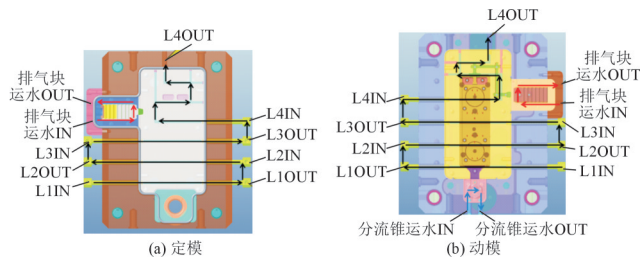


图 8 模具运水管道分布

Fig.8 Distribution of water channel on the mold

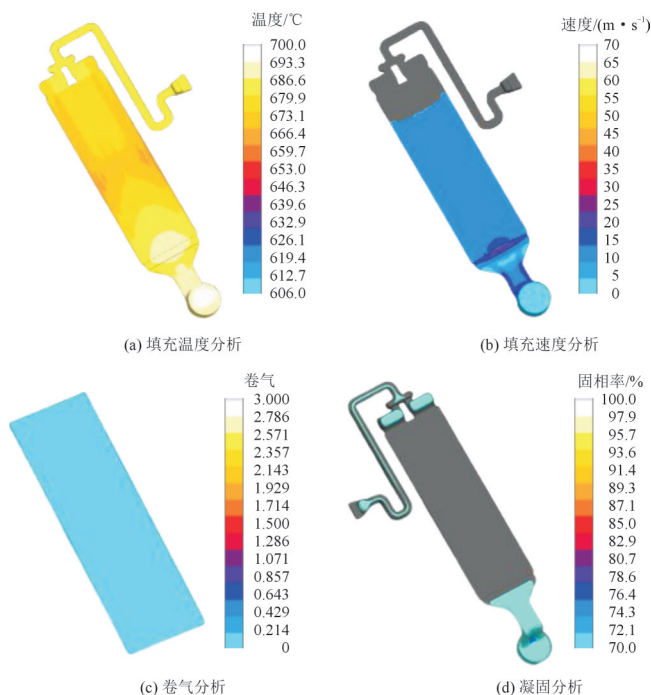


图 9 填充模拟分析

Fig.9 Filling simulation analysis

3.3 压铸过程温度

压铸过程温度过低是导致冷料缺陷的主要原因之一。具体包括铝液浇注温度过低、模具温度过低和料筒温度过低。

(1) 铝液浇注温度过低 对于压铸铝合金, Si 含量在 5%~18% 范围内时, Si 含量越高, 铝液流动性越好; 而 Mg 含量越高, 流动性越差^[2]。本试验所用的 AlSi10MnMg 合金, 其 Si 含量为 9.0%~11.5%, Mg 含量为 0.40%~0.45%。图 10 为合金元素对压铸合金液流动性的影响。可见该材料的流动性相对较差, 容易在填充过程中卷入冷料, 这种流动性特性是由材料中元素的特性决定的。为降低冷料风险, 可通过适当提高浇注铝液温度, 确保铝液在充填型腔时保持足够的流动性。试验把保温炉温度由 $(670 \pm 5)^\circ\text{C}$ 分别提升至 $(690 \pm 5)^\circ\text{C}$ 和 $(710 \pm 5)^\circ\text{C}$ ^[3] 进行生产试验, 试片拉伸数据显示 $(690 \pm 5)^\circ\text{C}$ 条件下冷料特征的断口比例为 55%, 改善不明显; $(710 \pm 5)^\circ\text{C}$ 条件下冷料特征断口比

例为 19%, 改善明显。

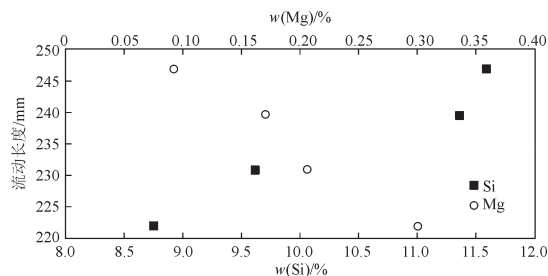


图 10 合金元素对压铸合金液流动性影响^[2]

Fig.10 Effect of alloying elements on fluidity of HPDC alloys^[2]

(2) 模具温度过低 当模具温度过低时, 合金液进入型腔后会迅速凝固, 形成冷料, 并卷入铸件内部。根据试制实测数据, 模具型腔表面温度为 $115 \sim 120^\circ\text{C}$ 时明显过低。在实际生产中, 模具型腔表面温度通常应控制在 $150 \sim 230^\circ\text{C}$ 之间。因此, 需要调整模温机, 将模具型腔表面温度提升至 150°C 以上, 以确保生产过程的稳定性。

(3) 料筒温度过低 当金属液倒入料筒后, 与料筒接触的前端铝液会在套筒底部迅速凝固, 形成一层铝皮。随着冲头向前移动, 铝皮被切碎成小块 (片状冷料), 并被推入流道和铸件中。由于这些提前凝固的铝皮碎片会接触到润滑剂 (如冲头油、脱模剂等), 其接触端面会形成光亮、平滑的表面。这种表面不会与其他铝料粘合, 反而会形成裂缝, 可能导致泄漏或成为断裂的起始点^[4], 而料筒与铝液之间存在温度差不可避免, 因此前端冷料碎片无法完全消除, 但通过工艺管理措施, 可以将这种影响降至最低。针对该试片模, 采取了以下措施。

措施 1 调整模温机参数, 把料筒温度从 150°C 提高至 180°C 。在压铸过程中, 压室内温度理论应在 350°C 以上。由于本试验中无法直接测量压室料膛内的实际温度, 此处温度是通过红外线测温仪测量料筒前端外侧某固定点得出的。

措施 2 采用绝热毯对料筒进行包裹, 减少料筒温度散失, 保证压铸过程中料筒温度稳定, 见图 11。

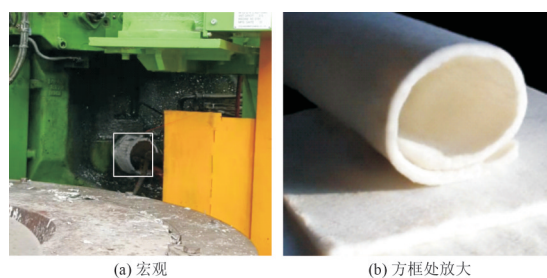


图 11 料筒外包裹绝热毯

Fig.11 Injection chamber wrapped with insulating blanket

3.4 压射参数

压射参数不合理可能导致铝液在料筒内停留时间过长,形成表面凝固层。通过调整压射参数,提高充填速度并缩短铝液停留时间可有效减少冷料缺陷,优化后的参数见表5。

表5 优化后的参数
Tab.5 Optimized parameters

压射比压 p/MPa	快压射速度 $v_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	快压射转换位置 S_1/mm	增压位置 S_2/mm
90~100	2.8	240	340
慢压射速度 $v_2/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	铝料温度 $T_1/^\circ\text{C}$	定模温度 $T_2/^\circ\text{C}$	动模温度 $T_3/^\circ\text{C}$
0.3~0.5	700~710	150	150

3.5 其他因素

采用普通开放式电保温炉,炉中铝液表面长期暴露于空气中,容易形成氧化铝膜并在料勺取料中带入^[4]。一方面通过优化料勺结构,见图12,另一方面要求熔炼工人定期观察铝液表面并清理浮渣,避免将表面铝膜带入料筒,以减少冷料缺陷。

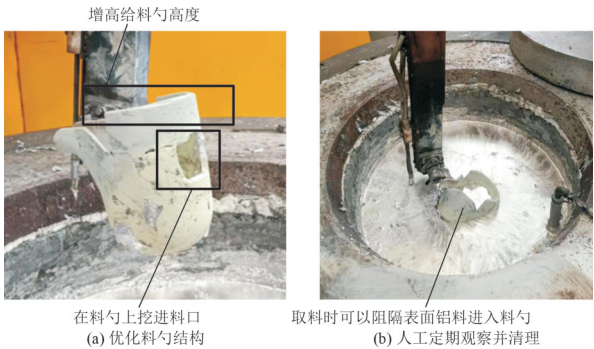


图12 优化料勺结构
Fig.12 Optimized structure of ladle

4 效果验证

实施上述优化措施,并采用优化后的工艺参数。对试片进行切样和拉伸试验,结果见表6。观察显示,铝合金压铸试片内部的冷料缺陷显著减少,异常断口的比例从61%降至11%,试片的力学性能显著提升,满足材料性能要求。

表6 优化后的试样拉伸数据
Tab.6 Tensile results of specimens after optimization

取样位置	1号试样				2号试样				3号试样			
	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %	断口状态	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %	断口状态	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %	断口状态
1	290.95	148.66	6.96	冷料	287.65	148.39	6.09	冷料	293.79	148.49	7.34	
2	294.27	148.15	7.84		278.70	147.46	4.73		284.23	147.87	5.29	
3	248.60	145.47	2.41		279.45	144.8	5.53		289.00	147.84	6.27	
4	281.08	149.67	4.99		281.28	146.56	5.19		286.59	147.83	6.02	
5	280.63	144.18	6.09	冷料	269.17	139.33	4.65	冷料	273.80	142.94	5.09	
6	275.33	139.64	5.82		272.94	138.89	5.57		266.17	141.78	4.74	
平均	278.73	145.96	5.69		278.20	144.24	5.30		282.63	146.12	5.79	

对比分析断口及其金相组织发现,冷料区域的面积也明显减小,见图13。

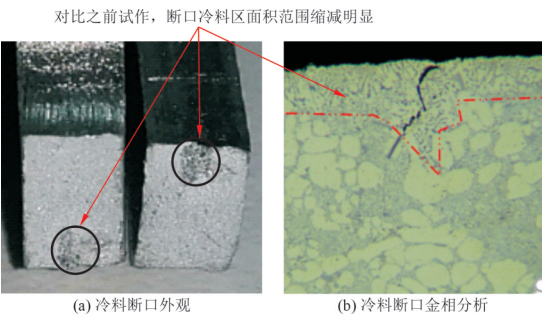


图13 冷料断口外观及金相分析

Fig.13 Appearance and metallographic structure of cold flake fracture

片内部冷料缺陷的形成机理,并提出了一系列优化措施。通过提高压铸过程的温度,特别是铝液温度后对材料试片的冷料缺陷改善效果明显,但不良率仍接近20%,同时综合采取以上措施后可有效降低冷料缺陷率,提升试片质量。

参 考 文 献

[1] 姚巍. 铸造铝合金及其金相分析[J]. 资源再生, 2022(8):30-33.
[2] TIMELLI G, BONOLLO F. Fluidity of aluminium die castings alloy[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2007, 20: 304-311.
[3] 朱必武. AlSi10MnMg 薄壁铝合金件压铸流动行为及其组织力学性能[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
[4] 杨刚. 压铸铝合金冷凝片缺陷改善浅谈[C]//2024 重庆市铸造年会论文集, 重庆, 2024.

5 结 语

(编辑:张正贺)

通过系统的试验分析,深入探讨了铝合金压铸试