

熔模铸造 ZM6 合金夹渣缺陷研究

杜欢欢¹, 丁方政², 杨武强¹, 杨乘飞¹, 苏宏东¹, 杜越¹

(1. 河北钢研德凯科技有限公司, 河北保定 072750; 2. 空装驻北京地区第六军事代表室, 北京 100016)

摘要: 镁合金夹渣是部件发生断裂的重要因素之一。为探究浇注系统中各组元对镁合金夹渣缺陷的影响程度, 以镁-稀土-锆系 ZM6 合金为研究对象, 设计多组对比试验, 利用数值模拟软件对流场进行分析, 预测了夹渣缺陷的形成原因及缺陷程度。经实际投产后对实物进行射线检测, 验证了数值模拟的准确性和改善措施的有效性, 为后续镁合金熔模精密铸造的浇注系统优化设计提供了理论及试验数据支撑。

关键词: ZM6 合金; 浇注系统; 夹渣; 熔模铸造

中图分类号: TG146.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 02-0208-11

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0030

镁合金是目前工业应用中最轻的结构金属, 具有密度低、高比弹性模量和明显的减震特性等优点, 近年来在航空航天、汽车和电子工业等领域中有广泛应用, 并得到快速发展^[1-3]。随着新型发动机对轻量化的要求日益提高^[4], 镁合金向高强度耐热方向发展的需要日益迫切^[5-7]。但镁合金在熔炼浇注时极易产生夹渣缺陷, 严重阻碍其推广应用^[8]。

镁合金在浇注过程中产生夹渣的原因主要有三个: 一是在合金熔炼过程中由于炉料不清洁、操作不当等生成的氧化物造成的一次夹渣; 二是在浇注过程中由于操作不当、与型壳反应、浇注系统设计不合理等, 使得镁液在浇注过程中形成涡流和卷气等, 镁液氧化造成的二次夹渣; 三是如 John Campbell 等提出的双层氧化膜理论, 在铸造过程中由于湍流等流场紊乱造成外层氧化膜发生折叠、卷入等形成的互不湿润氧化膜。夹渣与周围基体的性能差异较大, 且破坏了基体的均匀性和连续性, 在服役过程中易产生应力集中, 导致微裂纹的萌生, 从而降低合金性能, 使其容易断裂^[9-13]。

镁合金的熔炼工序, 目前在工程应用中已非常成熟, 严格按照规定操作一般不会造成一次夹渣。针对与型壳反应所形成的二次夹渣, 人们通过在型壳中加入阻燃剂, 利用阻燃剂氧化或镁液与阻燃剂产生还原性气体的方式来减轻浇注时镁合金的氧化, 如在型壳中加入硼酸, 在接触面形成致密的保护膜^[14-17]。其中, 在型壳中加入硼酸可形成 Mg_3B_2 的致密膜和 $MgO \cdot B_2O_3$ 釉质膜, 两种膜层共同作用保护铸件表面。在浇注过程中, 人们通过在设备和型壳中充入 CO_2 、Ar 和 SF_6 等气体, 将镁液与氧气隔绝开或与镁液发生反应, 形成致密的氧化膜的方式抑制镁合金的氧化^[18-21]。其中, CO_2/SF_6 阻燃时可形成 MgF_2 和 $Mg+C$ (或 Mg_2C+MgO) 的致密膜, 阻止镁合金氧化。但当浇注系统设计不良时, 流场紊乱, 镁液易和氧气结合, 形成二次夹渣。此外, 上述保护措施中形成的致密保护膜也会因折叠、卷入和破裂等形成双层膜夹渣^[9]。因此, 镁合金夹渣最主要的改善措施为设计良好的浇注系统, 使镁液可平稳流动, 尽量减少因飞溅、紊流等造成的二次夹渣和双层膜。但完全避免夹渣难度较高, 因此, 在浇注系统设计时, 还需考虑设置过滤网等进行滤渣, 防止夹渣进入铸件。

为改善流场, 人们对浇注系统的设计提出了优化方案, 如阻流式浇口杯、槽形竖浇道和锥度的竖浇道等, 并对各个组元的改善原理进行说明^[22-23]。阻流式浇口杯可将浇注初期金属液形成的夹渣保留在浇口杯中, 并对金属液起到缓冲作用, 使金属液可平稳充入直浇道。槽型浇道可增加金属液与型壳的接触面积, 两者的摩擦效应

作者简介:

杜欢欢 (1991-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事铝镁合金熔模铸造技术研究工作。E-mail: 695714676@qq.com

收稿日期:

2025-07-31 收到初稿,
2025-09-19 收到修订稿。

引用格式:

杜欢欢, 丁方政, 杨武强, 等. 熔模精密铸造 ZM6 合金夹渣缺陷研究 [J]. 铸造, 2026, 75(2): 208-218.

DU Huanhuan, DING Fangzheng, YANG Wuqiang, et al. Research on slag inclusion defects of ZM6 alloy in investment casting [J]. Foundry, 2026, 75(2): 208-218.

可减缓金属液流速。金属液在直浇道中的实际流场为抛物线状,当直浇道无斜度时,金属液与直浇道未完全接触,有空隙,呈负压流动,金属液吸气,产生气孔、卷气等缺陷。而当直浇道斜度过大时,金属液在直浇道中呈正压流动,流速加快。

在过滤网方面,人们最开始使用钢丝绒过滤网,现在已逐步被陶瓷过滤网代替,并取得良好的过滤效果^[24]。近年来,人们制备出适用于镁合金的氧化镁过滤网,不与镁液反应,且与镁液有更好的润湿性,可更好的吸附镁液中的夹渣^[25-26]。

镁合金结晶温度范围宽,且结晶潜热小,流动性较差^[27]。上述提出的使流场趋于平稳的措施,及设置过滤网的措施,将进一步降低镁液的流动性,严重时造成浇不足和冷隔缺陷。因此,设计浇注系统时,应同时满足流场平稳和良好的流动性。

近年来,人们发现通过在镁基体中添加稀土元素,可细化合金组织,形成镁-稀土高熔点、热稳定性好的金属间化合物,与有害杂质形成的金属间化合物净化熔体,促进合金表面氧化膜由疏松变为致密,降低合金在液态和固态下的氧化倾向等诸多优点,从而提高传统镁合金的强度、塑性、耐腐蚀性和耐磨性等性能,实现高强耐蚀镁合金的发展应用^[28-30]。

熔模精密铸造因可实现复杂构件的精准成形,且保证良好的尺寸精度和表面粗糙度等优点,是先进航

空航天武器装备等领域产品长寿命、低成本、轻量化和精密化成形发展的技术基础支撑^[31]。如上所述,针对镁合金熔模精密铸造中镁液与型壳的界面反应问题以及镁液在熔炼浇注过程中的易氧化问题,均已有的优化措施研究,且前期已对浇注系统中各组元对夹渣的形成机理提出优化措施,但对各组元的影响程度及耦合作用仍需进一步研究。

本课题采用熔模精密铸造方法,以目前应用最广的高强耐蚀耐热商用铸造镁合金ZM6合金为研究对象,通过设计不同浇注系统进行对比试验,经X光射线检测,对氧化夹渣的形成机理及改善措施有效性进行研究,最终得出适用于镁合金的避渣措施,为后续镁合金熔模精密铸造浇注系统的设计提供理论支持及数据支撑。

1 试验材料及过程

1.1 原材料

采用熔模精密铸造方法制备试件,中温蜡和聚苯乙烯作为蜡模原材料,莫来石砂作为制壳原材料,符合HB7780-2005的化学成分要求的ZM6合金锭作为金属原材料,具体成分见表1。过滤网选用氧化镁陶瓷过滤网。

表1 ZM6合金化学成分
Tab. 1 Chemical composition of ZM6 alloy

Nd	Zn	溶解Zr	总Zr量	Mg	Al	Si	Fe	Ni	Cu	Be	单个	总和
2.0~2.8	0.1~0.7	≥0.4	0.4~1.0	余量	≤0.02	≤0.01	≤0.02	≤0.005	≤0.03	≤0.001	≤0.05	≤0.2

1.2 试验方法

1.2.1 铸造工艺设计

本课题重点研究浇口杯、直浇道和过滤网等对夹渣的影响,模组分为浇注系统部分和铸件部分。

共设计了六种浇注系统方案,如图1所示,分别命名为方案一—方案六。方案一作为对照组,浇口杯采用底部直径为75 mm、拔模斜度为10°和高度为160 mm规格的漏斗形浇口杯,直浇道采用40 mm×40 mm的方形浇道,模组高度400 mm;方案二采用与方案一相同的浇口杯,将直浇道改为槽形浇道,规格40 mm×20 mm;方案三在方案二的基础上,直浇道增加5°锥度;方案四在方案三的基础上,将漏斗形浇口杯改为阻流式浇口杯,并在底部增加一圈高度约30 mm、Φ140 mm的阻流缓冲部分(凹切),镁液由高于浇口杯底部约40 mm的横浇道进入直浇道;方案五在方案一基础上,在横浇

道设置氧化镁陶瓷过滤网;方案六在方案四基础上,在横浇道设置氧化镁陶瓷过滤网。在直浇道和竖浇道之间有两根连接浇道,底部浇道为横浇道,作为底注充型浇道,规格随各方案直浇道。上方的连接浇道采用30 mm×30 mm浇道,中间用陶瓷片物理隔开,以加固模组并防止镁液从浇口杯直接进入铸件部分。上述结构中连接位置均为圆滑过渡,设置R5~R15的过渡圆角。

铸件部分,六种方案采用统一组合方式,如图2所示。选用8 mm×120 mm×210 mm的试片(棕色所示)作为研究对象,3个试片与40 mm×40 mm规格竖浇道(绿色所示)连接,分别命名为试片1、试片2和试片3。其中,试片1和试片2与内浇道直接相连,与竖浇道间距50 mm,上方采用Φ10 mm蜡棍(粉色所示)作为排渣通道与竖浇道相连;试片3与竖浇道和内浇道均直

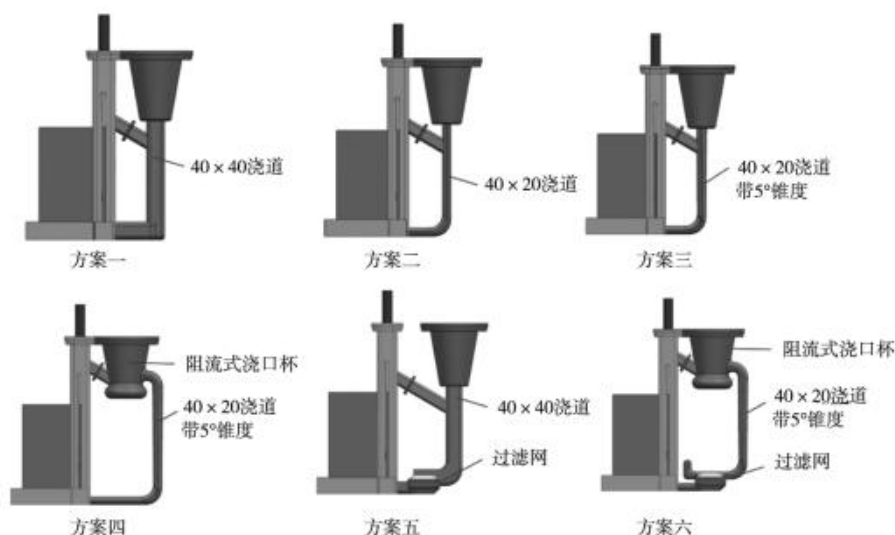


图1 浇注系统部分示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of the gating system parts

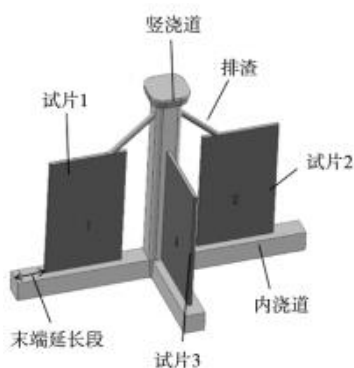


图2 铸件部分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the casting part

接相连,以对比不同方位和不同排渣方式对夹渣的影响。此外,底部横浇道多出试片30 mm作为末端延长段,以缓冲最先进入横浇道的镁液。

1.2.2 数值模拟前处理

利用三维几何造型软件构建计算域内几何模型,并导入Procast软件,按上述六种工艺方案显示三维数模,设置计算条件对浇注系统和铸件充型过程的流场进行数值模拟,通过对流场的分析,预测夹渣产生的时机及机理,并预测各方案对应的铸件夹渣程度。利用Procast软件中的Visual-Mesh模块进行网格划分,设置面网格大小为3 mm,随后生成体网格和型壳网格;利用Visual-Cast模块设置浇注过程中的相关边界条件和

工艺参数并进行计算,结合其他件的生产经验,设置的边界条件和工艺参数如表2所示;数值模拟计算完成后,利用Visual-Viewer模块,查看和分析计算结果。

1.2.3 制备过程

按上述方案进行模组的制备,其中部分浇口杯、浇道和试片由中温蜡压制而成,阻流式浇口杯和带锥度的浇道等由聚苯乙烯烧制而成。

制壳层数为6层,厚度约7 mm左右。通过在型壳材料中添加0.5%的硼酸的方法抑制型壳与镁液反应。

在浇口杯底部放置一层铁丝过滤网,以防有大块杂质进入模组。

熔炼浇注时,使用150 kg中频熔炼镁浇注炉,熔炼时炉门敞开,使用溶剂保护法熔炼镁液。浇注时,关闭炉门,先将炉体抽真空至 -0.08 MPa,然后在炉体内充 CO_2+SF_6 至 -0.02 MPa,采用重力浇注。此时,炉体内的气体环境为空气+ CO_2+SF_6 的混合气体。控制镁液在浇口杯上方约300 mm位置浇注。浇注后开炉门,模组采用空冷的冷却方式。

将外层型壳去除后,切取可得试片及下方内浇道。

1.2.4 试片检测

对切取后的试片,进行DR(Digital Radiography,数字化射线照相)检测。DR检测过程选用规格型号为Xlcube Compact 320 kv的设备进行透照。

表2 初始方案工艺参数
Tab. 2 Process parameters of the initial scheme

型壳厚度/mm	界面换热系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	浇注速度/($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	型壳温度/ $^{\circ}\text{C}$	浇注温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷却方式
7	400	1	400 ± 25	750 ± 5	空冷

2 数值模拟结果及讨论

对上述六种方案进行数值模拟，并分析充型过程。

充型0.4 s时，如图3所示，对比分析浇口杯部分：方案一、方案二、方案三和方案五，即漏斗形浇口杯方案，前端镁液与浇口杯接触初期产生的飞溅镁液随后续镁液，直接充型至直浇道；方案四和方案六，即阻流式浇口杯方案，可将前端飞溅镁液缓存至凹切部分。对比分析直浇道部分：方案一、方案二、方案三和方案五已流入直浇道，其中，方案一和方案五，即40 mm × 40 mm规格方案，镁液流入浇道部分仅占约1/4，其余3/4空隙部分镁液易发生涡流或飞溅，加大了镁液的氧化倾向，且前期形成的氧化膜，在此过程中易发生折叠和破损，形成双层膜夹渣。方案二和方案三，槽型浇道方案，镁液占浇道约1/2~2/3，空隙明显减小，夹渣倾向减小。方案四和方案六，镁液尚未充型至直浇道。

充型1.2 s时，如图4所示，对比分析浇注系统部分：方案一和方案五的浇口杯、直浇道和底部横浇道均未充满；方案二和方案三的浇口杯底部、直浇道和底部横浇道均已充满；方案四和方案六浇口杯底部已充满，直浇道和底部横浇道均未充满。即，漏斗形浇口杯方案，镁液经浇口杯直接进入浇道，当直浇道充满时，浇口杯底部才开始充满，浇口杯无法起到减缓镁液流速的作用。而阻流式浇口杯，镁液进入浇口

杯，有凹切部分缓冲，当镁液充型至一定高度后方可平稳流入直浇道中，对初期镁液的缓流作用明显。但漏斗形浇口杯方案，镁液可快速进入直浇道，当减小直浇道尺寸时，镁液可快速充满直浇道，降低了在浇道内充型时氧气或保护气等形成夹渣的风险。而阻流式浇口杯的缓冲作用使镁液无法完全充满直浇道，浇道中的夹渣风险依然存在。

对比分析铸件部分：方案一、方案二和方案三中，镁液已充型至试片3，且液面斜度较大，应为镁液流速过快；快速充型至试片3远直浇道一侧后，末端延长段未起到缓冲作用，回流至试片及竖浇道部分，此过程紊流严重，易产生氧化夹渣且夹渣易折叠形成双膜缺陷。其中，方案三充型最快，应为镁液在带锥度的浇道中呈正压流动，使得流速加快。方案四和方案六中，因阻流式浇口杯的阻流效果，镁液流速减缓，仅充型至底部横浇道，尚未充型至铸件部分。方案五，因设置过滤网，和方案一相比，镁液流速有明显减缓，平稳充型至试片3的内浇道。

充型1.6 s时，如图5所示，浇注系统部分与充型1.2 s时相差不大。对比分析铸件部分：方案一、方案二和方案三中试片3的充型趋于平稳，液面基本呈现平面状态，但试片中镁液高度仍高于横浇道，说明镁液流速仍较高，试片1和试片2尚未开始充型。方案四中，镁液已充型至试片3的内浇道，试片1和试片2的内浇道几乎无镁液。方案五，因过滤网的缓冲作用，镁液在试片3中充型较为平缓，液面较平，但仍有一定斜度。

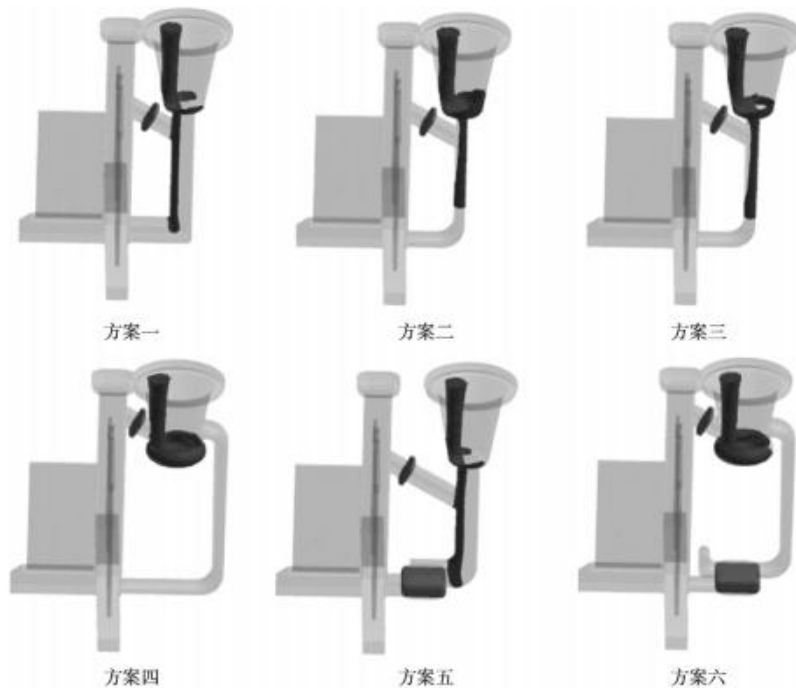


图3 充型过程0.4 s时的流场示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of the flow fields during mold filling processes at 0.4 s

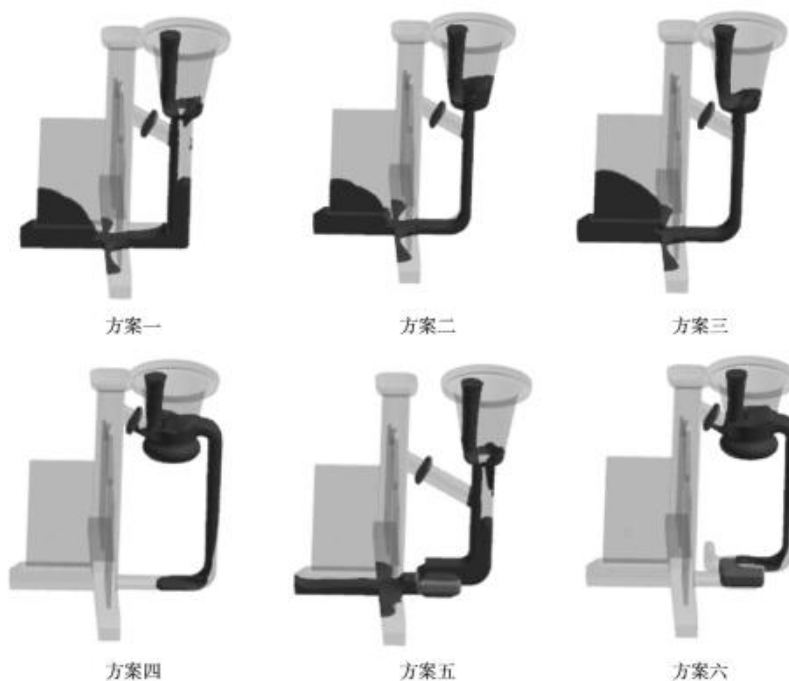


图4 充型过程1.2 s时的流场示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of the flow fields during mold filling processes at 1.2 s

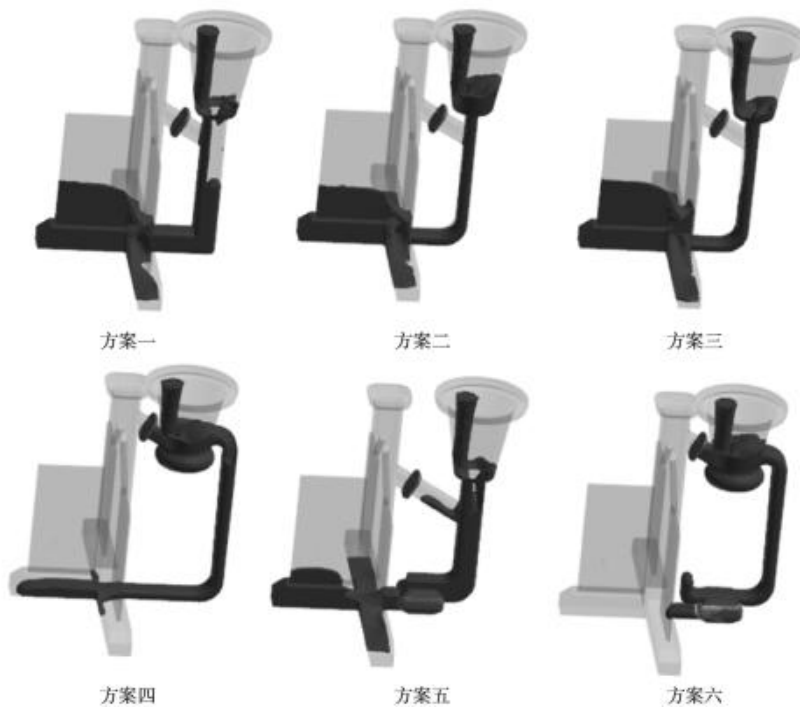


图5 充型过程1.6 s时的流场示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of the flow fields during mold filling processes at 1.6 s

方案六中，镁液经浇口杯的第一次缓冲和过滤网的第二次缓冲，流速明显变慢，尚未充型至铸件部分。

充型至2.5 s时，如图6所示，从图6(a)浇注系统和试片3部分可以看出，浇注系统部分仅方案一尚未充满，其余五种方案均已充满。对比分析铸件部分：方案一至方案四中的试片3充型均趋于平稳，已充型约

1/2。方案五和方案六中试片3镁液几乎无斜度，为底部顺序平稳充型，已充型约1/4。如图6(b)试片1和试片2部分所示，试片1和试片2开始充型。其中，方案三已至试片部分，方案四和方案六仅充型至内浇道。即，方案三充型速度最快，方案六充型速度最慢。试片3充型速度较试片1和试片2快，试片1和试片2开始充

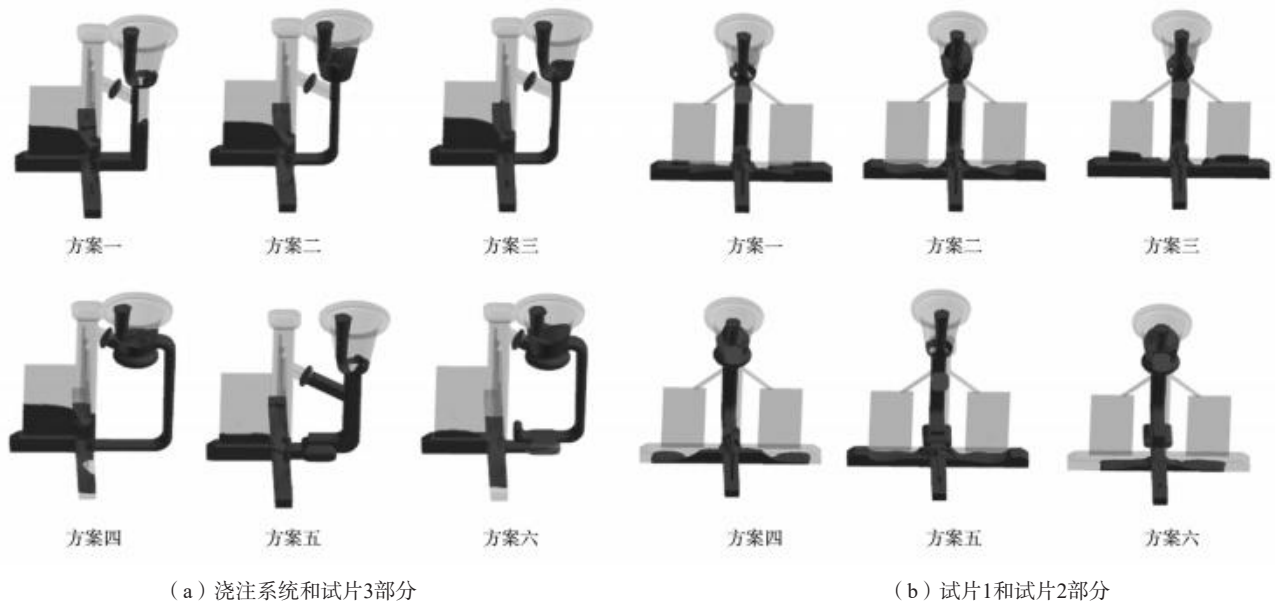


图6 充型过程2.5 s时的流场示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of the flow fields during mold filling processes at 2.5 s

型时，镁液流速已趋于平缓，液面几乎由底部平缓升起。

充型至3.2 s时，如图7所示，图7（a）浇注系统和试片3部分中方案一的直浇道部分仍未充满。方案一至方案五中的试片3均已平稳充型。方案一和方案二充型约2/3，方案三充型约3/4，方案四和方案五充型约1/2，方案六刚开始充型。如图7（b）试片1和试片2部分所示，方案一、方案二、方案三和方案五中的试片1和试片2平稳充型；方案四和六中镁液仅至内浇道，尚未充型至试片部分。对比试片1、试片2和试片3的充型情

况，方案一至方案五中，试片3的镁液高度均高于试片1和试片2；方案六中，3个试片高度差最小。

充型至3.8 s时，如图8所示。方案一和方案二充型约80%，试片1和试片2较试片3稍差；方案三中3个试片均已充型完毕；方案四试片3充型约1/2，试片1和试片2刚开始充型；方案五充型约2/3，试片1和试片2较试片3稍差；方案六试片1、试片2和试片3均刚开始充型。

充型6 s时，如图9所示。方案一、方案二、方案三和方案五均已充型完毕；方案四充型约80%，试片1和试片2较试片3稍差；方案六充型约25%，试片1和试片2

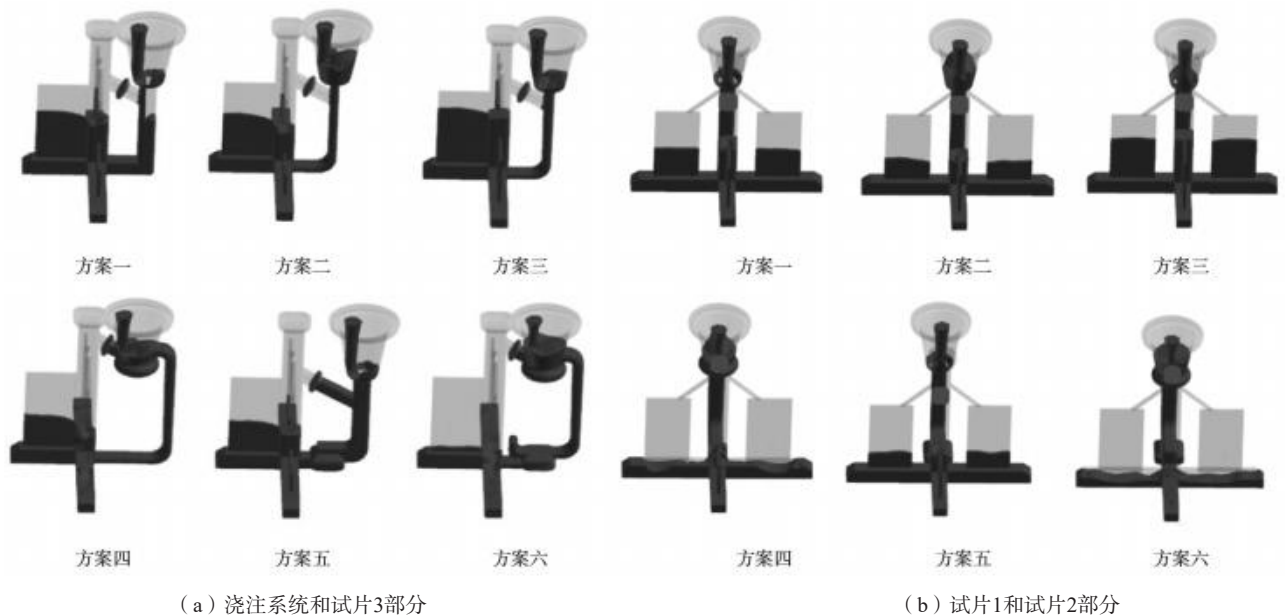


图7 充型过程3.2 s时的流场示意图

Fig. 7 Schematic diagrams of the flow fields during mold filling processes at 3.2 s

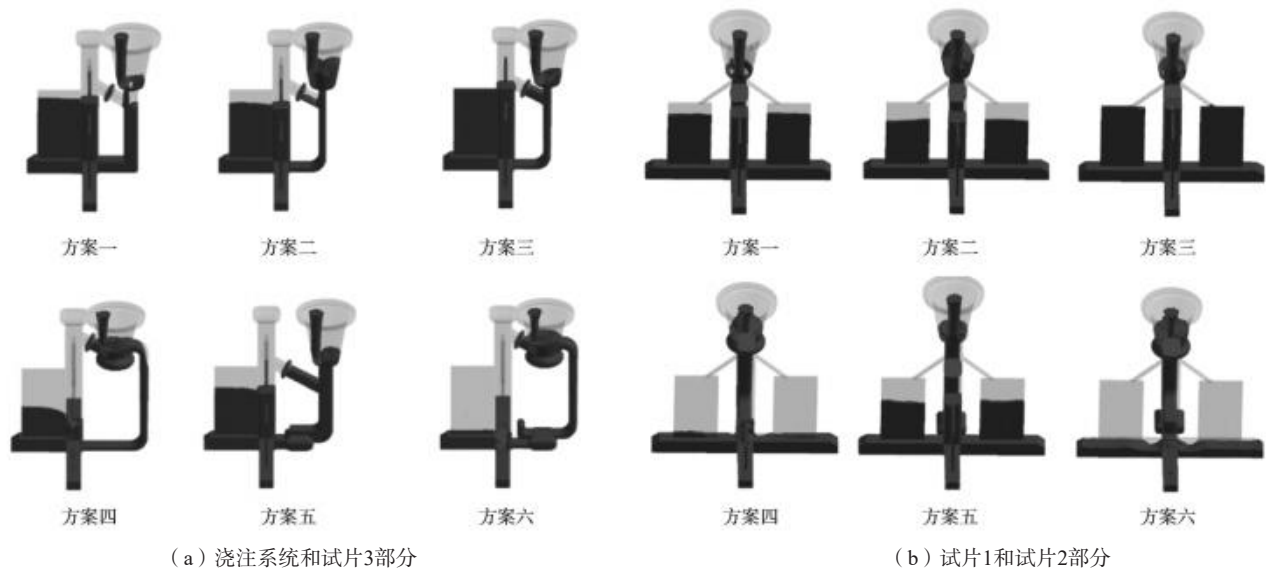


图8 充型过程3.8 s时的流场示意图

Fig. 8 Schematic diagrams of flow fields during mold filling processes at 3.8 s

较试片3稍差。

各方案充型时间如图10所示，方案四和六充型时间约7.5 s。

(1) 对比分析方案一、方案二、方案三、方案五所用的漏斗形浇口杯和方案四、方案六所用的阻流式浇口杯。采用漏斗形浇口杯时，与浇口杯侧壁最先接触时镁液飞溅所产生的夹渣，可随漏斗形浇口杯直接流入直浇道，而在阻流式浇口杯的凹切部位浇注镁液得到缓冲，并留存至凹切部分；镁液在阻流式浇口杯中充型至一定高度时，方可流入直浇道，即阻流式浇口杯对镁液流速有明显的减缓作用，并可将前端镁液

产生的夹渣留存在浇口杯中。

(2) 对比分析方案一、方案二和方案三的直浇道。方案一的40 mm × 40 mm规格的直浇道，规格过大，导致如图8所示模组充型约80%时，直浇道仍未充满，镁液在直浇道部分一直与炉内气体直接接触，易与混合气体中的氧气形成夹渣，且镁液在浇道中易产生涡流和飞溅，镁液与保护气体形成的保护膜层，也会发生折叠、破损，形成二次夹渣。方案二和方案三减小尺寸规格后，浇道可快速充满，镁液在浇道中形成夹渣的风险减小。方案三增加锥度后，镁液流速明显加快，证明所加5° 锥度较大，镁液在浇道中呈正压

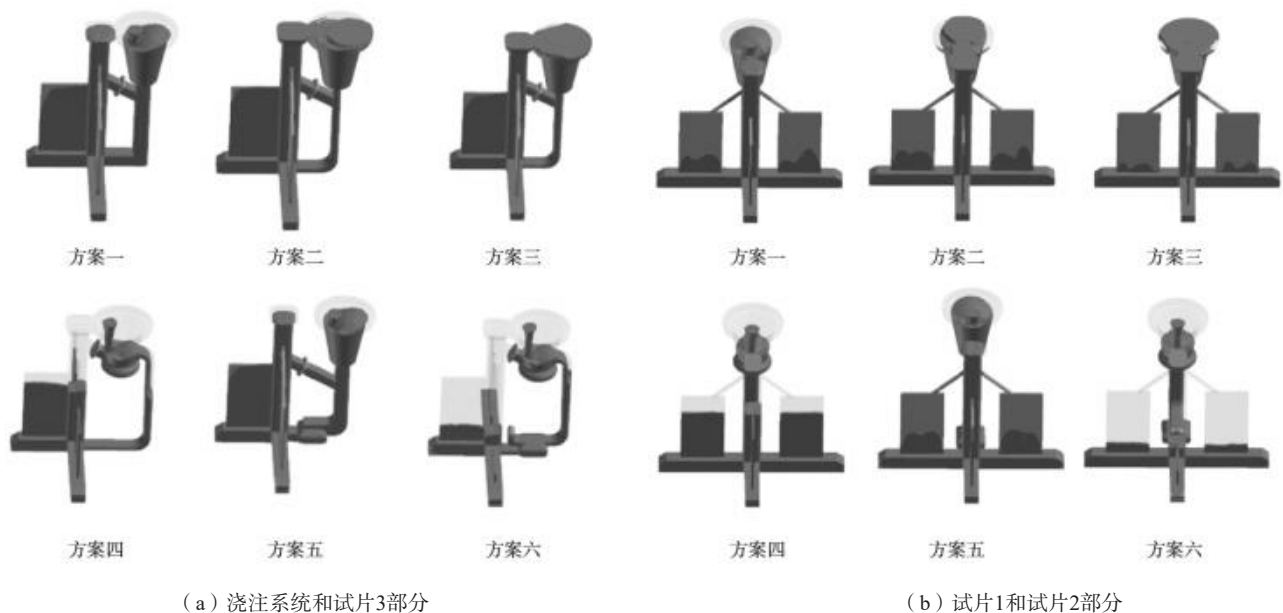


图9 充型过程6 s时的流场示意图

Fig. 9 Schematic diagrams of flow fields during mold filling processes at 6 s

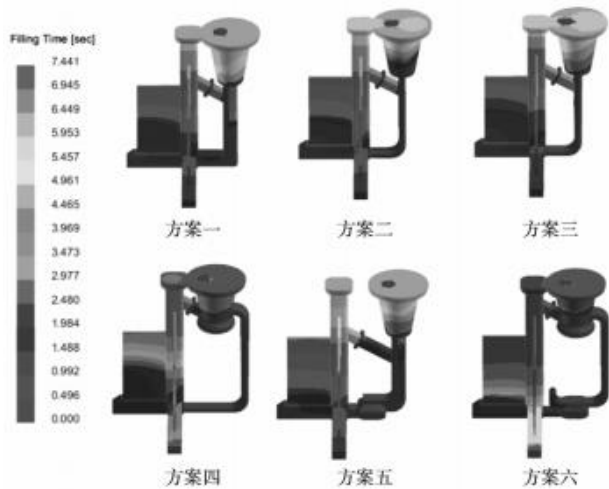


图10 各方案充型时间场示意图
Fig. 10 Schematic diagrams of the mold filling time fields for each scheme

流动，流速加快，镁液进入铸件部分时流速最快，充型最快，在铸件部分易出现夹渣缺陷。

(3) 对比分析方案一、方案五和方案四、方案六的过滤网设置效果。设置过滤网后，镁液在过滤网后的流速有明显减慢，铸件部分的充型速度明显降低。

(4) 对比分析试片1、试片2和试片3。试片3正对浇口杯、直浇道和横浇道的浇注系统，当镁液流速较快时，如方案一至方案五，镁液最先充型至试片3中。速度过快时，如方案一、方案二和方案三，在试片3中紊流严重，先流至内浇道末端一侧后回流至试片部分，形成较高的斜面。但试片3与浇道直接连接，回流部分可通过浇道部分排出，而试片1和试片2虽充型平稳，但前期在浇口杯和直浇道部分充填的镁液无法排出，可能会保留在试片中。当镁液流速缓慢时，如方案六所示，试片1、试片2和试片3充型速度相近，同时

充型。

按照上述分析，预测夹渣程度：方案一>方案三>方案二>方案五>方案四>方案六，试片1=试片2>试片3。

3 试验验证

3.1 组焊过程

按上述方案进行试验验证。组焊后的模组如图11所示，仅示意组合较复杂的方案四、方案五和方案六。

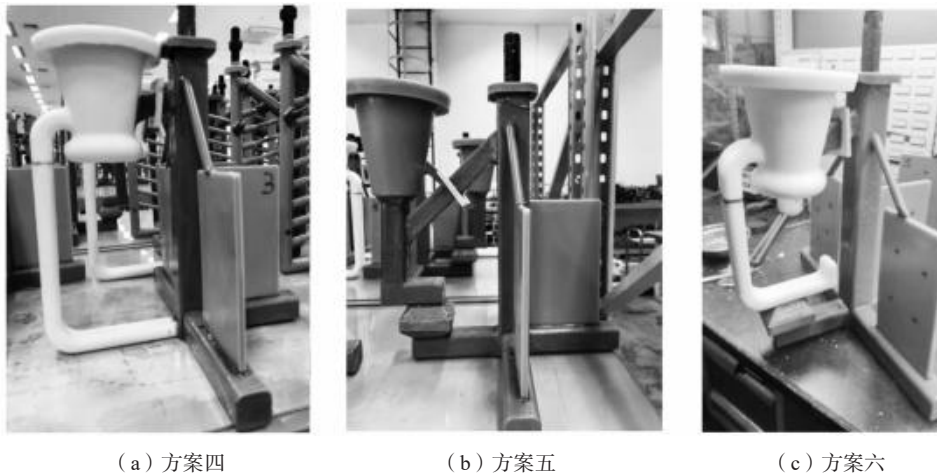
3.2 浇注过程

经制壳工序得到型壳，按表2中所示参数进行浇注，统计实际浇注时间如表3所示。

如表3所示，方案一、方案二、方案三和方案五充型时间一致，且与数值模拟结果中的时间一致。方案四充型时间较数值模拟结果的7.5 s加长至11 s。方案六充型时间加长至40 s，远远高于数值模拟结果显示的7.5 s。分析原因为，由数值模拟结果可知，方案六中的浇口杯及过滤网对镁液均有明显的缓冲作用，镁液在过滤网前的浇注系统中充型速度缓慢。在实际浇注过程中，当镁液充型至过滤网部分时，镁液在浇口杯及浇道中发生堆积，由坩埚充至浇口杯的充型速度随之下降，即镁液的由坩埚至浇口杯的速度，为先快后慢，与模拟时所设置的同一个充型速度参数不符；

表3 实际浇注时间统计表
Tab. 3 Statistical table of actual pouring times

方案	一	二	三	四	五	六
充型时间/s	6	6	6	11	6	40



(a) 方案四 (b) 方案五 (c) 方案六

图11 方案四、方案五和方案六的模组示意图

Fig. 11 Schematic diagrams of modules for the scheme 4, scheme 5, and scheme 6

且在此过程中，镁液热量有大量流失，充型能力下降。

3.3 试片实物及 DR 检测结果

如图12所示，方案一的试片1和试片2实物表面光亮，呈现金属光泽，无型壳界面反应所形成的其他反应物杂质。

如图13所示，方案一、方案二和方案三中，除有明显的大面积夹渣缺陷外，还有明显的卷气缺陷；方案四中夹渣缺陷尺寸变小，卷气尺寸也减小；方案五中夹渣缺陷尺寸进一步减小，无卷气缺陷；方案六无夹渣和卷气缺陷，对夹渣的优化作用明显，但试片1、2冷隔严重，中间完全断开。结合上述对流场的模拟结果及文献研究结果，夹渣应为氧化夹渣及各类保护膜的混合物。

各方案中，对比试片1、试片2和试片3，试片1和试片2中缺陷程度相当，试片3缺陷明显减少。

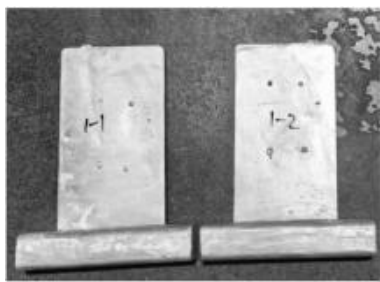


图12 方案一试片1和试片2的实物图

Fig. 12 Physical photos of the test piece 1 and test piece 2 for the scheme 1

3.4 结果讨论分析

方案一作为对照组，有明显的夹渣及卷气缺陷。

方案二中槽型浇道截面积减半，数值模拟结果显示，充型时可降低在浇道中因涡流、与气体反应等形成夹渣的风险。但实际夹渣缺陷无明显改善。

方案三在方案二的基础上，竖浇道增加锥度，以期更符合金属液在实际降落过程中的曲线形状，减小或消除与直浇道侧壁的间隙。数值模拟结果显示，方案三充型过程最先完成，即设置的锥度过大，导致金属液在浇道中加速。DR结果显示，方案三的夹渣情况与方案一和方案二相当。

对比方案一、方案二和方案三的结果说明，仅优化直浇道对夹渣的改善作用不大。

方案四在方案三的基础上，使用了阻流式浇口杯，阻流式浇口杯对金属液的缓流作用明显，充型时间明显增长。从DR结果中可以看出，方案四对比前三个方案中的夹渣有所改善，整体夹渣面积及单个夹渣大小均有改善，说明阻流式浇口杯对夹渣的改善作用明显。

方案五在方案一的基础上，增加了过滤网，但实际充型时间几乎无变化。即过滤网对铸件部分的镁液缓流作用明显，但又不影响铸件的整体充型时间。从DR结果中可以看出，方案五的夹渣较方案四中的整体面积和大小有进一步改善，说明过滤网对夹渣的改善效果较浇口杯的作用更明显。

方案六将上述优化措施集于一体，充型过程较数值模拟结果有明显的增长，在实际浇注过程中，镁液

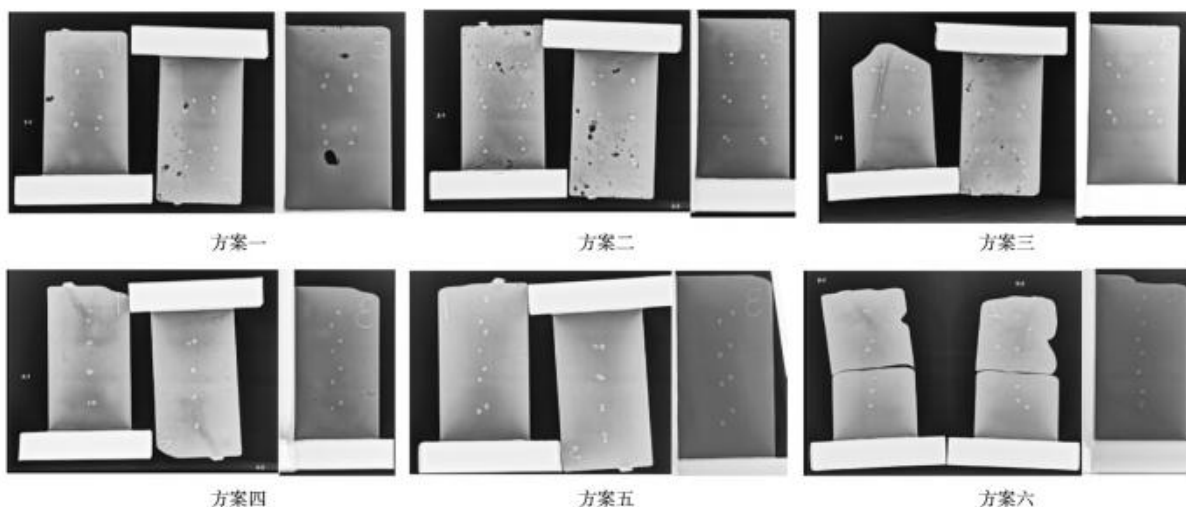


图13 各方案DR结果示意图

Fig. 13 Schematic diagrams of DR results for each scheme

在浇口杯处缓流明显, 流入模组速度过慢, 镁液和壳温在此过程中降温较快, 导致镁液流速进一步减慢, 经过滤网的再次缓流, 充型能力再次减弱。试片1和试片2有明显的断层, 下半部分应由内浇道向上充型, 上半部分由与竖浇道连接的排气蜡棍流入, 但前端镁液均已凝固, 无法融合, 导致实际流场紊乱。

上述六种方案中, 试片3的充型普遍快于试片1和试片2, 且流速高于试片1和试片2, 但夹渣却最轻, 这是因为试片3与竖浇道直接相连, 前期产生的夹渣部分可经浇道排出。

4 结论

(1) 阻流式浇口杯对镁液的缓冲作用明显, 对前端镁液形成的夹渣有明显的改善作用, 但在实际应用中, 可能造成流速过慢, 冷隔和浇不足风险较大, 且阻流式浇口杯增加了镁液的金属用量, 成本增加。

(2) 槽型浇道和浇道锥度对夹渣的改善作用不明显, 且无斜度浇道负压流动时容易产生卷气缺陷, 5°斜度过大使镁液充型速度加速, 需对斜度进一步研究。

(3) 镁液在充型过程中, 需考虑充型方向, 尽量避开镁液前端的充型方向;

(4) 浇注系统的排渣结构设置对前期镁液形成的夹渣可快速引出, 对铸件部分的夹渣改善效果良好;

(5) 氧化镁过滤网对镁液的缓冲作用明显, 且对最终充型时间无明显改变, 对夹渣和卷气的过滤作用明显, 但无法完全过滤夹渣。

(6) 数值模拟结果与实际结果相近, 其应用必要性和有效性得到验证。

(7) 综合考虑经济性, 可采用漏斗形浇口杯和带锥度的槽型直浇道配合陶瓷过滤网的浇注系统方案, 但在浇口杯底部和直浇道位置仍需设置相应避渣措施, 相应措施有待进一步验证。

参考文献:

- [1] 蔡森, 王晓巍, 卢影峰. ZM5航空用大型复杂镁合金壳体铸造工艺模拟[J]. 铸造, 2022, 71(1): 77-83.
- [2] 吴海龙, 莫雪妍, 郑宗文, 等. 镁合金熔模铸造技术发展现状[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(2): 236-240.
- [3] 吴国华, 陈玉狮, 丁文江. 镁合金在航空航天领域研究应用现状与展望[J]. 载人航天, 2016, 22(3): 281-292.
- [4] 张国庆, 滕超逸. 航空航天先进结构材料技术现状及发展趋势[J]. 航空材料学报, 2024, 44(2): 1-12.
- [5] 郑宗文, 吴海龙, 张志坤, 等. 镁合金铸造技术及其应用[J]. 中国金属通报, 2022(3): 76-79.
- [6] 孙博闻. 高强稀土镁合金的研究与发展现状[J]. 石化技术, 2017, 24(12): 211-212.
- [7] 郑开云. Mg-Gd-Nd-Zr系高强耐热镁合金组织与性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [8] 程鲁. 复杂薄壁镁合金石膏型精密成形工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [9] 宋和谦. 铸造过程中的双层氧化膜缺陷形成与演化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [10] 李继强, 樊自田, 张大付, 等. 镁合金真空低压消失模铸造常见缺陷分析[J]. 现代机械, 2006(5): 98-100.
- [11] 周建川, 李红俊, 李静, 等. 夹杂物对高强度冲击性能影响级优化分析[J]. 四川冶金, 2022, 44(2): 52-55.
- [12] 陶延夏, 吕刚, 朱新亚. WE43镁合金中夹杂物演变的仿真分析及实验研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(5): 18-22.
- [13] 梁敏杰, 吴国华, 丁文江, 等. 夹杂物对GW103K镁合金服役性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(2): 717-724.
- [14] 林志坝. 镁合金熔模铸造成型工艺与组织性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [15] 张绍兴, 周善民, 王薇薇. 镁合金石膏型熔模铸造防燃机理[J]. 中国铸造装备与技术, 1998(5): 19-22.
- [16] 贾先军, 李居文, 傅建国, 等. 一种镁合金熔模铸造型壳制造技术: CN101024239[P]. 2007-08-29.
- [17] 赵鹏, 洪润洲, 周永江, 等. 镁合金熔模铸造技术及其应用[J]. 铸造, 2023, 72(12): 1542-1547.
- [18] PETERSEN G, VRELID E, TRANELL G, et al. Characterisation of the surface films formed on molten magnesium in different protective atmospheres[J]. Materials Science & Engineering A, 2002, 332(1-2): 285-294.
- [19] CASHION S.P, RICKETTS N.J, HAYES P.C. Characterisation of protective surface films formed on molten magnesium protected by air/SF6 atmospheres[J]. Journal of Light Metals, 2002, 2(1): 37-42.
- [20] CASHION S P, RICKETTS N J, HAYES P C. The mechanism of protection of molten magnesium by cover gas mixtures containing sulphur hexafluoride[J]. Journal of Light Metals, 2002, 2(1): 43-47.
- [21] 占亮, 冯志军, 闫卫平, 等. 镁合金熔模铸造阻燃技术研究现状[J]. 铸造, 2010, 59(5): 450-453.
- [22] 中国铸造协会编. 熔模铸造手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [23] 叶荣茂. 铸造工艺设计简明手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [24] 标准过滤网在镁合金铸造上的应用[J]. 航空工艺技术, 1980(5): 44-45.
- [25] 邵冲, 吴海龙, 郑宗文, 等. 一种用于镁合金铸造的过滤装置和浇铸装置: CN115780738B[P]. 2023-06-06.
- [26] 毛萍莉, 刘正, 张文政, 等. 一种镁合金熔体净化用氧化镁陶瓷过滤器: CN102121071A[P]. 2011-07-13.
- [27] 中国机械工程学会铸造专业学会. 铸造手册: 第3卷 铸造非铁合金[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [28] ALI Y, QIU D, JIANG B, et al. Current research progress in grain refinement of cast magnesium alloys: a review article[J]. Journal of

Alloys and Compounds, 2015, 619: 639–651.

- [29] STANFORD N. The effect of rare earth elements on the behaviour of magnesium-based alloys: part 2-recrystallisation and texture development [J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 565: 469–475.
- [30] 李华成, 冯志军, 占亮, 等. 稀土元素在铸造镁合金中的应用及研究进展 [J]. 铸造, 2023, 72 (4): 359–364.
- [31] 樊振中. 熔模精密铸造在航空航天领域的应用现状与发展趋势 [J]. 航空制造技术, 2019, 62 (9): 38–52.

Research on Slag Inclusion Defects of ZM6 Alloy in Investment Casting

DU Huan-huan¹, DING Fang-zheng², YANG Wu-qiang¹, YANG Cheng-fei¹, SU Hong-dong¹, DU Yue¹

(1. Hebei Steel Research Dekai Technology Co., Ltd., Baoding 072750, Hebei China; 2. The 6th Military Representative Office of Air Force Equipment Department in Beijing, Beijing 100016, China)

Abstract:

Slag inclusion in magnesium alloy is one of important factors leading to component fracture. To investigate the influence of each component of the gating system on the slag inclusion defect in ZM6 alloy, taking the magnesium-rare earth-zirconium ZM6 alloy as object, designing a series of comparative experiments, and carrying out the analysis of the flow fields by using of numerical simulation software, the causes and severities of slag inclusion defects have been predicted. After actual production, radiographic tests were performed on the physical components, which verified the accuracy of the numerical simulations and the effectiveness of the improvement measures, and provided theoretical and test data supports for the optimum designs of gating systems in subsequent investment casting magnesium alloys.

Key words:

ZM6 alloy; gating system; slag inclusion; investment casting
