

镁合金筒形件低压铸造工艺研究

潘 龙 余国康 邹文兵 崔恩强 张旭亮 费维卿
(上海航天精密机械研究所)

摘 要 针对一种材质为 GW63K 的复杂薄壁镁合金筒形件的结构特点和工艺难点,开展复合铸型铸造工艺研究。根据铸件结构,设计了基于不同型砂的复合铸型铸造工艺,利用 ProCAST 软件进行数值模拟仿真,并根据模拟结果进行凝固顺序调整,优化铸造工艺,最终达到顺序凝固的目的。结果表明,复合铸型铸造工艺条件下的铸件内部品质达到了 HB7780-2005 中 I 类铸件要求,T6 态力学性能满足抗拉强度 ≥ 280 MPa,伸长率 $\geq 3\%$ 的要求。

关键词 镁合金;筒形件;复合铸型;铸造工艺;顺序凝固

中图分类号 TG249.22; TG249 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.04.026

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Magnesium Alloy Cylindrical Parts Based on Low Pressure Casting

Pan Long, Yu Guokang, Zou Wenbing, Cui Enqiang, Zhang Xuliang, Fei Weiqing
(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute)

Abstract: Based on the analysis of the structural characteristics and technical difficulties of a kind of complex thin-walled GW63K magnesium alloy cylindrical casting, the casting technology of composite casting mold was analyzed. According to the part structure, the casting technology with composite casting mold based on different sand molds was designed, and ProCAST software was used for simulation analysis. According to the simulated results, the casting technology was optimized to finally achieve sequential solidification. The results show that the internal quality of the castings under composite casting mold casting technology meets the requirements of class I in HB7780-2005, and the mechanical properties of the castings at T6 state reach more than 280 MPa and 3%.

Key Words: Magnesium Alloy, Cylindrical Casting, Composite Casting Mold, Casting Process, Sequential Solidification

收稿日期:2020-08-16;修改稿收到日期:2020-12-11

第一作者简介:潘龙,男,1993 年出生,助理工程师,上海(201600),E-mail:809108080@qq.com

引用格式:潘龙,余国康,邹文兵,等. 镁合金筒形件低压铸造工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(4):512-517.

PAN L, YU G K, ZOU W B, et al. Magnesium alloy cylindrical parts based on low pressure casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(4):512-517.

量降低浇注温度,因此选取浇注温度为 800 ℃。而保压时间只是为了进一步提高浸渗效果,且时间较短,因此选取保压时间为 20 s。

3 结 论

(1)液态浸渗工艺参数对 C_{sf}/Mg 复合材料的致密度有重要影响,预制体预热温度对材料致密度影响最为显著,浸渗压力次之,且材料致密度随预制体预热温度和浸渗压力的增加而增加。

(2)真空吸渗挤压 C_{sf}/Mg 复合材料最优的工艺参数:预制体预热温度为 600 ℃,浸渗压力为 0.6 MPa,浇注温度为 800 ℃,保压时间为 20 s。

参 考 文 献

[1] 杨程,齐乐华,周计明,等. 碳纤维增强镁基复合材料制备技术与新进展[J]. 复合材料学报,2004,39(20): 6 153-6 171.
[2] YANG Z, XU H Y, WANG Y, et al. Microstructures and mechanical properties of C_{sf}/AZ31B composites fabricated by multi-

times hot-extrusion[J]. Results in Physics, 2019, 12: 888-895.
[3] 常海,黄勇,胡小石. 搅拌铸造法制备短碳纤维/AZ91 复合材料的组织与性能[J]. 复合材料学报,2019,36(1): 159-166.
[4] 黄勇. 搅拌铸造 C_{sf}/AZ91 镁基复合材料的组织与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2007.
[5] RUSSELL-STEVENSON M, PLANE D C, SUMMERSCALES J, et al. Effect of elevated temperature on ultimate tensile strength and failure modes of short carbon fibre reinforced magnesium composite [J]. Materials Science and Technology, 2002, 18(5): 501-506.
[6] YAMAUCHI T, NISHIDA Y. Pressurized infiltration of aluminum melt into aluminum borate whisker preform[J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 1995, 59(5): 564-570.
[7] 李贺军,齐乐华,周计明. 液固高压成形技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社,2013.
[8] 关俊涛,齐乐华,刘健,等. 挤压温度对真空吸渗挤压 C_{sf}/Mg 复合材料制备工艺的影响[J]. 机械工程学报,2012,48(14): 25-31.
[9] OUYANG H B, LI H J, QI L H, et al. Fabrication of short carbon fiber preforms coated with pyrocarbon/SiC for liquid metal infiltration[J]. Journal of Materials Science, 2008, 43(13): 4 618-4 624.

(编辑:刘卫)

随着航空航天和汽车领域的发展,对结构件的轻量化要求越来越高^[1~3]。镁合金由于密度小、比强度高、比弹性模量大、散热性好、耐有机物和碱的腐蚀性能好等特点^[4,5],被广泛应用于航空航天、汽车领域的结构件制造^[6]。但镁合金由于化学性质活泼,在熔炼及充型过程中非常容易氧化、燃烧,铸造工艺难度大^[7,8]。近年来,对镁合金复杂薄壁类铸件(曲线型面、多筋多凸台、结构大)的内部品质、表面品质、尺寸精度及质量等提出的要求越来越高,因而制造难度也明显增大^[9~14]。且此类铸件一般都需经过 100% X 射线检测和荧光检测,不允许存在超标的缩松、气孔、裂纹、夹渣、表面裂纹等缺陷,进一步增加了铸造工艺难度。

传统的砂型铸造、金属型铸造、熔模铸造等^[15],都存在各自的优势与不足。随着客户对铸件要求不断提高,单一铸型已无法满足要求,因此提出基于多种铸型的复合铸型思想,来实现高品质铸件的生产。本课题针对某材质为 GW63K 镁合金的复杂结构薄壁筒形件,运用复合铸型,通过不同种类型砂的激冷能力的不同来调控铸件凝固过程的整体温度场,从而调整铸件各部位的凝固顺序,实现顺序凝固,提高铸件的内部和表面品质,达到生产合格铸件的目的。

1 零件特点和工艺性分析

零件为圆柱状筒形件,轮廓尺寸为 $\phi 340\text{ mm}\times 410\text{ mm}$,最薄壁厚仅为 4 mm,见图 1。舱体需 100% 进行 X 射线检测及荧光检测并按 HB7780-2005 的 I 类铸件要求验收。铸件内腔结构复杂,内壁上凸台较多,凸台位置壁厚尺寸较大,达到 22 mm,舱体壁厚极不均匀,壁厚差大。铸件材质为 GW63K 镁合金,其凝固温度区间较宽,主要呈糊状凝固,铸件易产生缩松、缩孔、裂纹、偏析等铸造缺陷。

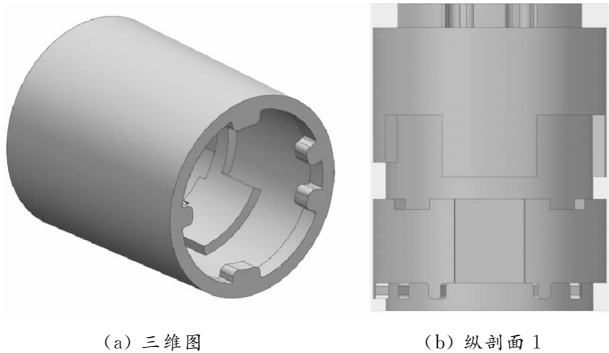


图 1 筒形件三维模型图

对于此类铸件,传统采用砂型铸造,浇注系统由直浇道、“十”字形横浇道及立筒缝隙内浇道组成,采用差压浇注。其不足之处在于砂芯中需要放置大量的冷铁

以及激冷砂,造型工序比较繁琐,铸件内腔表面品质差、尺寸精度低、打磨工作量大,难以满足复杂内腔结构件的高尺寸精度和表面品质的要求,且铸件品质不稳定,工艺出品率低。实践证明,单一铸型已难以满足客户对高品质铸件的要求,必须设计复合铸型铸造工艺,充分发挥各种型砂的性能优势,以实现高品质铸件的铸造成形。

2 铸造工艺设计

2.1 浇注系统设计

为了保证铸件的内部品质,采用低压铸造成形,合金液自下而上平稳充型,以减少氧化。铸件在一定的压力下进行凝固,组织致密度优于重力铸造的。设计筒形件的浇注系统见图 2,整个浇注系统为底注雨淋式,由直浇道、环形横浇道和扁平内浇道组成。底注雨淋式的优点为铸件的工艺出品率高,切割、粗加工等后处理工序简单。环形横浇道与直浇道的连接采用“十”字形浇道,有利于合金液的流量分配更加均匀合理,各个内浇道进入型腔的合金液的温度也更加均匀。



图 2 浇注系统设计
Fig.2 Design of gating system

由于镁合金非常容易氧化,8 个直浇道在筒形件下端框处均匀分布,合金液自下而上平稳充型,减少了飞溅、卷气等,降低氧化倾向从而减轻合金液的气孔、氧化夹渣缺陷倾向。铸件上方的 8 个冒口具有排气和集渣作用,进一步减轻了合金液的气孔、氧化夹渣缺陷倾向。同时型腔上方的合金液先进入型腔,整个浇注和凝固过程中上方的合金液温度低于下方的合金液温度,有利于实现自上而下的凝固顺序,充分发挥内浇道的补缩作用,减轻铸件的缩松倾向,提高铸件的致密度。

2.2 激冷系统设计

由于铸件内部存在凸台结构,易形成热节,造成收缩类缺陷,因此需要在工艺设计时采用相应的冷铁来调整局部冷却速度,设置合理的温度场以避免铸件出现缺

陷。设计的内部冷铁结构见图 3。在舱体砂芯上下端框等厚大部位和所有凸台处都放置专用冷铁,材质为铸铁,提高厚大部位、凸台处的冷却速度,避免这些部位在凝固后期形成孤立液相区,使铸件实现顺序凝固,减少缩松等缺陷的产生,提高组织致密度和内部品质。

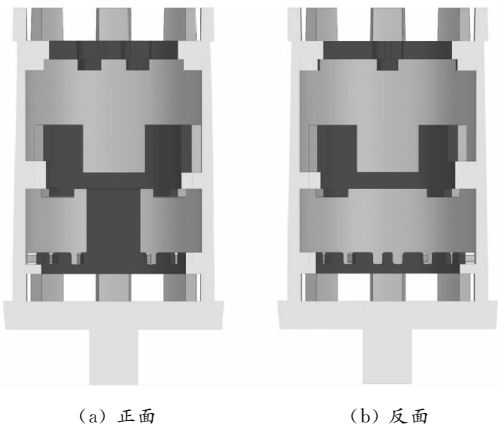


图 3 冷铁结构及分布示意图

2.3 复合铸型设计

为最大限度地实现浇注系统对铸件的补缩,发挥低压铸造的优势,结合型砂的激冷能力设计由上而下的凝固顺序,设计的铸型结构见图 4,采用无模切砂的方式制备各部分砂块,外部砂型共分为 7 层,最上面第 1 层是硅砂,第 2 层是铁砂,第 3 层为铬铁矿砂,第 4 层是宝珠砂,第 5~7 层是陶粒砂。砂芯由上而下分为 4 层,第 1 层为铁砂,第 2 层为铬铁矿砂,第 3 层为宝珠砂,第 4 层为陶粒砂。

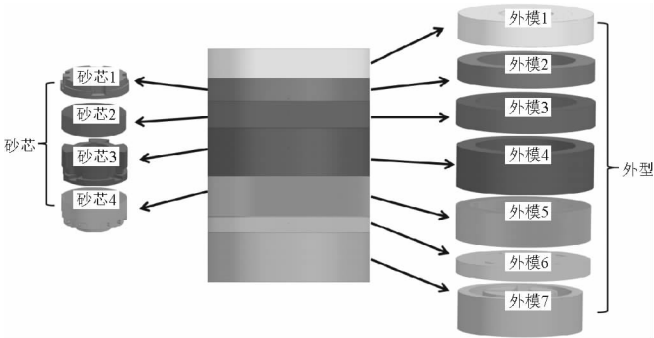


图 4 铸型结构示意图

2.4 数值模拟分析

利用 ProCAST 软件对筒形件的铸造过程进行数值模拟,包括对铸件的充型过程、凝固过程,并对铸件进行缺陷预测分析。低压铸造工艺参数如下:升液速率为 1.05 kPa/s、充型速率为 0.8 kPa/s、结壳速率为 1.1 kPa/s、结壳增压值为 10 kPa、结壳时间为 10 s、保压速

率为 1.1 kPa/s、保压增压值为 25 kPa、保压时间为 240 s。铸件、冷铁和各部分铸型之间的界面传热系数见图 5。

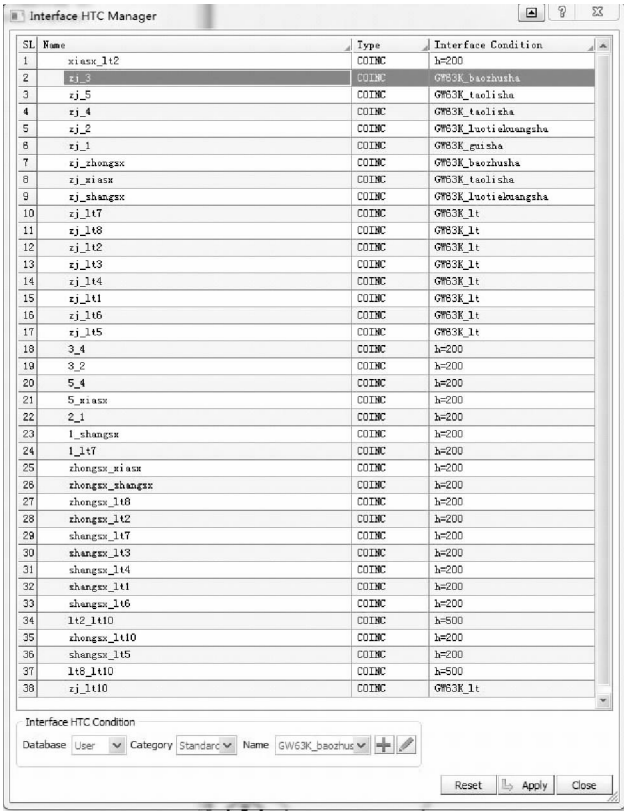


图 5 铸件、冷铁和各部分铸型之间的界面传热系数
Fig.5 Interfacial transferring coefficient of castings, cold iron and different part of the casting mold

铸件充型过程见图 6。合金液通过内浇道进入铸件型腔后,首先进入下端框厚壁区域,随后流经舱体中部区域,之后流到上端框厚壁区域,最终由下而上逐步充满铸型型腔。铸件整体呈现自下而上依次充型,整个过程中,充型比较平稳,直至全部充满型腔。在充型过程中,合金液平稳,不易发生卷气现象,气孔和氧化夹渣等铸造缺陷产生的倾向小。

图 7 为合金液充型结束后凝固过程中铸件的温度分布。可以看出,合金液充型结束后,铸件降温最快区域为铸件顶部的上端框处,因为该区域合金液最先进入型腔,再加上上端框处放置冷铁,冷却速度较快,温度最低;冒口相对上端框部位的凝固温度更高,凝固时间更长,冒口对上端框区域具有一定的补缩作用。整个铸件自上而下温度逐渐升高,符合自上而下逐层顺序凝固的设想。随着时间延长,铸件整体的温度逐渐下降,但整个降温过程中铸件一直保持着自下而上温度逐渐升高的正温度梯度,这能最大限度地发挥冒口的补缩作用,降低铸件内部缩松类缺陷的倾向。但在铸件的局部区域存在一些热节,这些位置相对于周围在同一时间温度更高,凝固时间更长,在后期凝固过程中得不到周围合

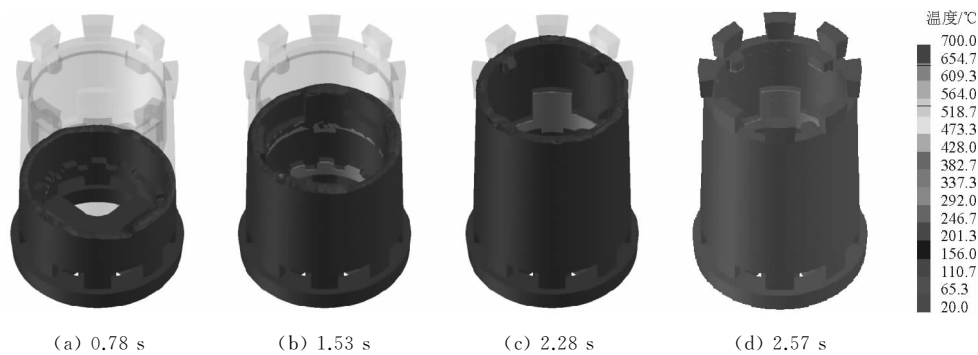


图 6 铸件充型过程温度场

Fig.6 Temperature field of filling process of the castings

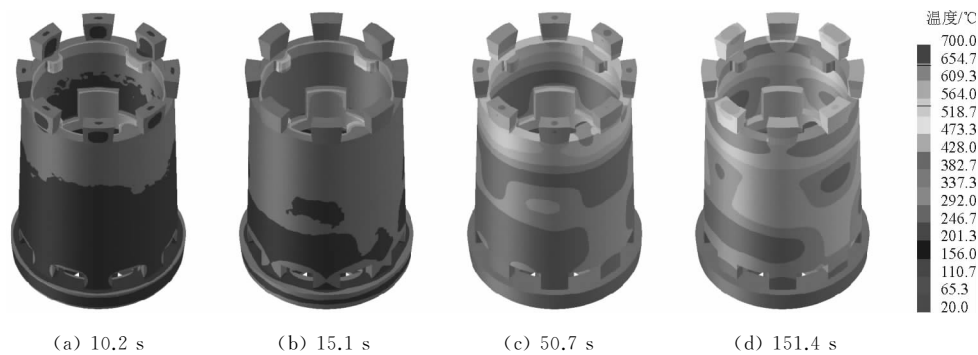


图 7 铸件凝固过程温度场

Fig.7 Solidification temperature field of the cylindrical parts

金液的补缩,容易出现缩松等收缩类缺陷。

铸件模拟结果的缺陷预测见图 8。可以看到,除了浇注系统和冒口中的缩孔、缩松缺陷外,在铸件的中下部薄壁区域和中部凸台之间的薄壁区域存在缩松倾向,这与模拟结果一致。结合铸造工艺,对缺陷的产生进行分析,认为凸台处的冷铁厚度太厚,导致凸台区域的合金液冷却速度太快,在冷铁的作用下比附近薄壁区域的冷速还快,导致凝固过程中在凸台之间的薄壁区域出现孤立液相区,凝固后期得不到周围合金液的补缩,最终形成缩松缺陷。铸件中下部薄壁区域存在缩松缺陷倾向,是因为铸件下端框处设置的冷铁加快了该处合金液的冷却速度,导致下端框处的凝固时间小于中下部薄壁处的凝固时间,在凝固过程中存在孤立液相区,最终形成缩松缺陷。

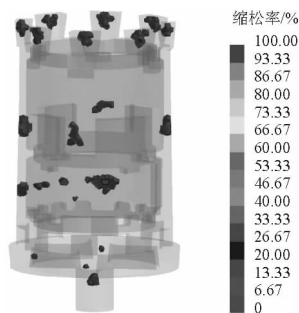


图 8 模拟结果缺陷预测

Fig.8 Simulated defects prediction

3 工艺改进措施

针对初始复合铸型工艺条件下筒形件铸件出现的缩松缺陷,对其复合铸型工艺进行改进,取消下端框处的冷铁,依靠浇注系统对铸件进行补缩;将中部凸台处的冷铁厚度由 20 mm 减小至 10 mm,见图 9。

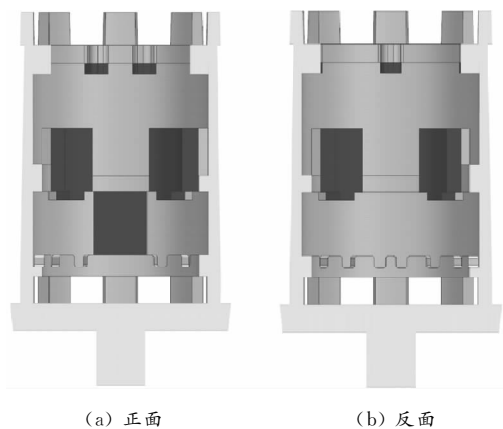


图 9 改进后的冷铁结构及分布示意图

Fig.9 The schematic diagram of modified cold iron structure and arrangement

在改进工艺的基础上,通过 ProCAST 软件对筒形件铸件的充型、凝固过程以及缺陷预测进行模拟仿真,见图 10~图 12。可以看出,合金液通过内浇道进入型腔后,首先进入铸件的下端框厚壁区域,随后流经舱体

中部区域,之后流到上端框厚壁区域,最终从铸件底部由下而上逐步充满铸型型腔,整体呈现自下而上依次充

型。整个过程中,合金液充型比较平稳,直至全部充满型腔,不容易发生卷气现象,气孔和氧化夹渣等铸造缺

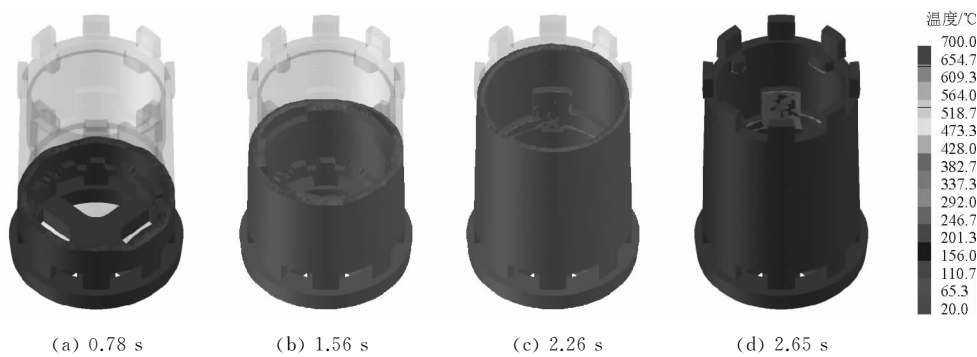


图 10 改进设计后铸件充型过程温度场

Fig.10 Filling temperature field of the cylindrical parts based on the modified design

陷产生的倾向小。

从图 11 可以看出,合金液充型结束后,铸件降温最快区域为铸件顶部的上端框处。该区域合金液最先进入型腔,同时上端框处放置着冷铁,合金液冷却速度较快,温度最低;冒口相对上端框部位的凝固温度更高,凝固时间更长,冒口对上端框区域具有一定的补缩作用。整个铸件自上而下温度逐渐升高,符合自上而下逐层顺

序凝固的设想。随着时间延长,铸件整体温度逐渐下降,但整个降温过程中铸件一直保持着自下而上温度逐渐升高的正温度梯度,能最大限度地发挥冒口的补缩作用,降低铸件内部缩松类缺陷的倾向,有利于改善整个铸件的品质。整个凝固过程中没有出现局部过热情况,完全呈现出自上而下的顺序凝固,铸件的缩松倾向相对于改进前大大减小。

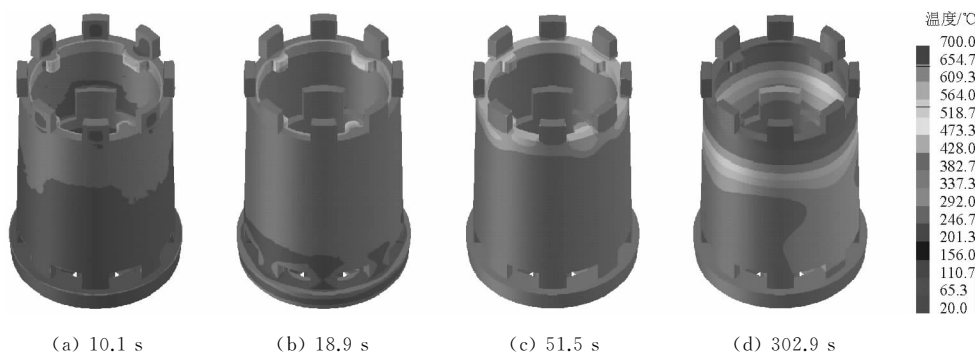


图 11 改进设计后铸件凝固过程温度场

Fig.11 Solidification temperature field of the cylindrical parts based on the modified design

从图 12 可以看到,除了浇注系统和冒口中的缩孔、缩松缺陷外,在铸件的中下部薄壁区域和中部凸台之间的薄壁区域的缩松缺陷得到消除,这与铸件凝固过程温度场的结果一致。

4 铸件浇注

采用无模切砂工艺制作改进后的复合铸型见图 13。按照模拟的低压铸造工艺参数浇注了筒形铸件,见

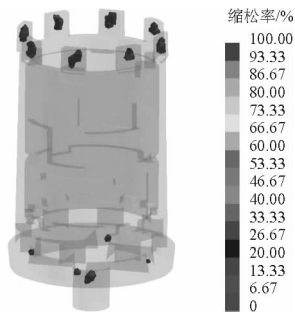


图 12 改进后的模拟结果缺陷预测

Fig.12 The simulated defect prediction based on the modified design

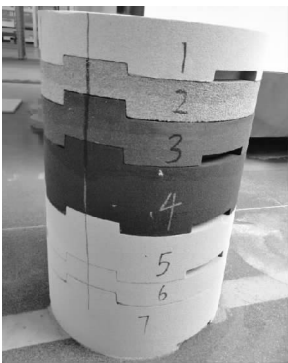


图 13 筒形铸件复合铸型

Fig.13 Composite casting mold for the cylindrical parts

图 14,铸件经 X 射线检测后没有发现超标缺陷,符合 HB7780-2005 I 类铸件要求。经过 T6 热处理后合金抗拉强度为 295 MPa,伸长率为 3.5%,满足要求。



图 14 浇注的筒形铸件
Fig.14 The produced cylindrical parts

5 结 语

利用复合铸型结合低压铸造,实现了高品质镁合金筒形件的铸造成形,其内部品质满足 HB7780-2005 I 类铸件要求,T6 态铸件抗拉强度为 295 MPa,伸长率为 3.5%。

参 考 文 献

[1] 唐见茂. 新能源汽车轻量化材料[J]. 新型工业化,2016,6(1):1-14.
[2] 王新春. 某车载火箭炮空投着陆冲击仿真与轻量化设计[D]. 南京: 南京理工大学,2014.

[3] 成耀龙,马力,王皎. 重型专用车车架轻量化结构优化设计[J]. 专用汽车, 2006(1): 29-32.
[4] 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, 6(3): 281-292.
[5] WANG J, LIU R, LUO T, et al. A high strength and ductility Mg-Zn-Al-Cu-Mn magnesium alloy[J]. Mater. Design, 2013, 47: 746-749.
[6] 丁文江,付彭怀,彭立明,等. 先进镁合金材料及其在航空航天领域中的应用[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(2): 103-109.
[7] 李新雷,郝启堂,介万奇. 镁合金低压铸造专用混合保护气体系统[J]. 铸造, 2011, 60(3): 268-270,275.
[8] 李新雷,郝启堂,蔡增辉,等. 镁合金低压铸造连续化生产技术的研 究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(4): 718-722.
[9] 王艳光,彭晓东,赵辉,等. 大型薄壁精密镁合金铸件铸造技术进 展[J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 9(5): 101-104.
[10] 聂小武. 镁合金铸造技术研究[J]. 金属加工, 2007(2): 62-63.
[11] 黄志伟,黄静,邓天泉,等. Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr 镁合金铸造组织 性能研究[A]. 重庆市铸造年会[C]. 重庆, 2013.
[12] 王建国,任朋立,王清川. 高性能镁合金铸造技术的研究现状[J]. 热加工工艺, 2014, 43(17): 21-23.
[13] 胡瑞霞,袁训锋,杨燕,等. 铸型对镁合金铸造过程温度分布的影 响[J]. 中国铸造装备与技术, 2015(4): 50-53.
[14] 何庆彪,杜庆安,李滨,等. 航天器大型镁合金铸造结构件的研制 [J]. 航天制造技术, 2010(6): 24-26.
[15] 王有喜. 镁、铝合金低压铸造成型工艺及力学性能研究[D]. 山东 淄博: 山东理工大学, 2010.

(编辑:张正贺)

万丰科技以技术创新,赋能有色铸造行业高质量发展

万丰科技是万丰集团旗下一家国家级高新技术企业,专业从事机器人自动化装备,低压、差压、重力铸造设备等的研发与制造。近年来,公司一直坚持科技创新,积极推动企业自动化、数字化、智能化建设,建立了机器人研究院,增强自主创新能力,加强产学研用一体化发展,培育了先进制造机器人产品与技术创新团队、增材设备与关键工艺创新团队、机器人和 3D 打印技术创新团队等多支领军型创新创业团队,拥有授权专利 120 多项,参与起草《低压铸造机技术条件》《工业机器人重力浇注》等国家和行业标准 12 项。由万丰科技自主研发的低压(差压、重力)铸造机及配套自动化项目还替代国外进口,并出口至美国、法国、俄罗斯、印度、墨西哥等国家,广泛应用于汽车零部件、摩托车零部件、高压开关、电子电力、工程机械、轨道交通、航空航天等领域。

“原先,我们生产汽车部件使用的低压铸造机都是从美国进口,技术受制,公司下定决心进行自主研发,从而打破了中国低压铸造机市场依赖进口的局面。”万丰科技技术部经理章旭霞告诉记者,万丰低压铸造机投入市场后,得到了诸多国内外客户的肯定和选购。一美国客户在购买万丰科技研发的低压铸造机后,对设备的技术、服务、使用效果都非常满意,前段时间又追加了第二批订单。

日前,由万丰科技提供的用于航空零部件产品后处理多道工序的全自动化生产项目获得了中国航发集团专家组认可,成功中标,这意味着万丰“智”造将配套服务于中国顶尖的航空发动机产品升级。

(万丰科技供稿)