

基于 AlSi10MnMg 电池罩盖压铸工艺研究

朱洪军¹ 黄潇苹¹ 间德海²

(1.大连科技学院机械工程学院; 2.大连亚明汽车部件股份有限公司)

摘 要 以新能源汽车 AlSi10MnMg 压铸铝合金电池罩盖为研究对象,通过数值模拟分析,预测充型过程中的卷气缺陷,优化设计压铸模具排溢系统。通过热处理试验,确定该产品人工时效工艺参数。试验证明,数值模拟能有效地控制卷气,经过 190 ℃×2 h 的人工时效,电池罩盖满足抗拉强度为 300 MPa,屈服强度为 210 MPa,伸长率为 5% 的力学性能要求。

关键词 压铸; 电池罩盖; AlSi10MnMg; 数值模拟

中图分类号 TG249.2; TG149.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.07.024

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Die Casting Manufacturing of Battery Cover Based on AlSi10MnMg Alloy Origination

Zhu Hongjun¹, Huang Xiaoping¹, Jian Dehai²

(1.School of Mechanical Engineering, Dalian University of Science and Technology;

2.Dalian Yaming Automobile Parts Co., Ltd.)

Abstract: Through numerical simulation analysis, the entrained gas defect in the filling process of AlSi10MnMg alloy battery cover for new energy vehicle was predicted, and the overflow system of die casting mold was optimized. The artificial aging process parameters of the product were determined by heat treatment test. The experiment proves that the numerical simulation can effectively control the entrainment. After artificial aging at 190 ℃ for 2 h, the battery cover can meet the equirement of 300 MPa in tensile strength and 210 MPa in yield strenth as well as 5% in elongation.

Key Words: Die Casting, Battery Cover, AlSi10MnMg Alloy, Numerical Simulation

近年来由于汽车轻量化的需求,如悬挂梁、承重梁、减震塔及轮毂等铝合金压铸件得到了越来越多的应用。AlSi10MnMg 合金作为新型的高强韧压铸铝合金,具有抗拉强度和伸长率高等特点^[1-2]。在压铸充型过程中,合金熔体在压力作用下以极快的速度填充模具型腔,容易产生卷气缺陷^[3],因此分析充型过程中的卷气状况十分重要。本研究采用 AnyCasting 软件进行卷气数值模拟分析,并通过热处理工艺进一步提高 AlSi10MnMg 薄壁压铸件的力学性能。

1 产品结构

图 1 为某新能源汽车电池罩盖的结构图,其材质为 AlSi10MnMg 合金,该产品平均壁厚为 3 mm,轮廓尺寸为 152 mm×142 mm×22 mm,铸件投影面积为 142 cm²,质量为 0.22 kg。该产品装配于电池上盖,外表面装配多个传感器和螺栓,产品功能上需要保护内部

电池组,防止液体泄漏,同时需要承受一定的外部冲击并抵抗长期的疲劳振动。内控要求抗拉强度大于 300 MPa,屈服强度大于 210 MPa,伸长率大于 5%,加工表面不能有直径大于 1 mm 的气缩孔,密封测试条件为 10 kPa 条件下泄漏速率小于 8 mL/min。该铸态合金抗拉强度为 240 MPa,屈服强度为 140 MPa,伸长率为 5%,无法满足需求,因此从原材料成分、模具设计及人

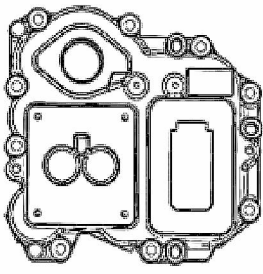


图 1 新能源电池罩盖

Fig.1 Battery cover for new energy automobile

收稿日期:2022-09-20;修改稿收到日期:2022-11-05
基金项目:辽宁省新能源汽车轻量化铸件数字化设计及智能制造重点实验室资助项目(2022JH1310200058);模具设计与压铸应用技术团队资助项目(KYD202206)
第一作者简介:朱洪军,男,1973 年出生,高级工程师,辽宁大连(116036), E-mail:2410400497@qq.com
引用格式:朱洪军,黄潇苹,间德海. 基于 AlSi10MnMg 电池罩盖压铸工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(7): 977-980.
ZHU H J, HUANG X P, JIAN D H. Die casting manufacturing of battery cover based on AlSi10MnMg alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(7): 977-980.

工时效几个方面对其进行改善。

2 化学成分分析

AlSi10MnMg 是基于 Silafont-36 合金,依据 DIN EN 1706 标准规定制备的,其化学成分见表 1。Si 含量略低于 Al-Si 共晶合金的,具有较好的流动性,而 Fe 含量低,使 Al-Fe-Si 相得以消除,压铸件在受力状态下不易产生裂纹^[4]。一定的 Mn 含量可以减弱 Fe 的危害,防止压铸时合金出现粘模现象,组织呈球状。

表 1 AlSi10MnMg 的化学成分

Tab.1 Chemical composition of AlSi10MnMg alloy %										
w_B										
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Ti	Al
10~	≤	≤	0.4~	0.1~	—	—	≤	—	<0.1	余量
11.5	0.20	0.05	0.8	0.6	—	—	0.07	—	—	—

由表 1 可知,Mg 含量为 0.1%~0.6%,范围比较宽。许四祥等^[5]研究发现,Mg 含量的增加与抗拉强度与屈服强度正相关,与伸长率负相关。Mg 含量过低致使强度较低,也不利于后续的热处理,而 Mg 含量过高会导致伸长率降低,但 Mg 与 Si 形成 Mg_2Si 强化相,使得 $\alpha-Al$ 固溶体结晶点阵发生畸变,从而起到强化合金的作用。Mg 含量为 0.2%~0.4% 时合金具有较好的综合力学性能。

Fe 是压铸铝合金中一种有害元素,其以 $FeAl_3$ 和 Al-Si-Fe 的片状或者针状组织存在,降低合金的力学性能^[6],Fe 含量要低于 0.15%,Mn 可以与 Fe 形成化合物,进一步消除 Fe 的有害影响,同时 Mn 可以提高产品球状结晶组织含量,将 Mn 含量保持为 0.5%~0.8%。

适当增加 Ti 能显著细化铝合金的晶粒组织,提高合金的力学性能,降低合金的热裂倾向,故将 Ti 含量控制在 0.06%~0.1% 之间。由此,调整后压铸铝合金的成分见表 2。

表 2 调整后 AlSi10MnMg 合金的化学成分

Tab.2 Chemical composition of modified AlSi10MnMg alloy %										
w_B										
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Ti	Al
10~	≤	≤	0.5~	0.2~	—	—	≤	—	0.06~	余量
11.5	0.15	0.05	0.8	0.4	—	—	0.07	—	0.1	—

3 模具设计与数值模拟

图 2 为该电池罩盖浇注系统基本结构,总投影面积为 290 cm^2 ,浇注总质量为 0.78 kg,选用 UB350ic 压铸机,该设备锁模力为 3 500 kN。设计模具 1 模 1 件,压室直径为 $\phi 60$ mm,料缸充满度为 35%。模具具有 5 个分支浇道,其中左侧分支浇道制造伴随铸件的试样片 3,并通过阻断器 1 控制是否需要制造试样片。根据该产

品要求,铸件内左下侧“眼镜孔”区域、右下侧“矩形方框”区域、浇注末端“圆孔”区域安装传感器,这 3 个部位是通孔,并且该区域加工后所有加工表面气孔应小于 0.6 mm。铸件 4 个分支浇道呈梳状结构,内浇口长度为 75 mm,浇口厚度为 2.0 mm,浇口总截面积为 150 mm^2 ,计算可得平均流速约为 40 m/s。压铸模采用 FS438 压铸热作模具钢,其具有良好的淬透性、韧性、热强性和热疲劳性能,热处理变形小等^[7]。冷却介质为水,局部采用 10 kg/cm^2 的可编程间断高压点冷却,自然排气,通过模拟分析确定渣包位置以及排气波板的设计。

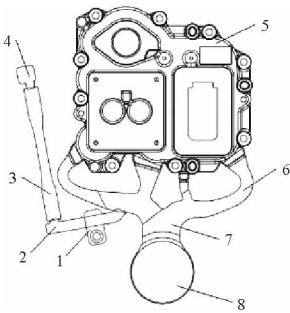


图 2 电池罩盖浇注系统

Fig.2 Gating system for battery cover

- 1.阻断器 2.分支浇道 3.试样片 4.集渣包 5.电池罩盖
6.横浇道 7.直浇道 8.料柄

借助 AnyCasting 6.0 软件进行模拟分析^[8]。模拟分析对象为铸件与压铸模具,划分 1 560 万个网格,根据薄壁件高速填充特点,设定初始边界条件,熔体温度为 680 $^{\circ}C$,模具温度为 185 $^{\circ}C$,冲头充型速度为 3.5 m/s,模具与铸件液相线传热系数设置为 3 000 $W/(m^2 \cdot K)$,固相线传热系数为 7 000 $W/(m^2 \cdot K)$,空气与铸件传热系数为 41.87 $W/(m^2 \cdot K)$,模具间传热系数为 3 000 $W/(m^2 \cdot K)$ 。

模拟分析结果见图 3。合金液在压射冲头推动下以较低速速到达内浇口,中间 2 个浇口的铝液首先被填充。由图 3a 可知,第 0.015 s 开始高速压射,浇口平均速度为 42 m/s 左右,铝液冲击模具和型芯,以紊流状态填充型腔。从图 3b 可见,第 0.017 5 s 到达“眼镜孔”区域,在模具上该部位为贴合模具型芯,铝液将冲击型芯产生涡流卷气。为确保该重要部位品质,将眼镜孔通孔设计变更为 2 mm 深的盲孔,即模具在该部位优化为 2 mm 的间隙,卷气状况明显改善,增加的 2 mm 材料在后序加工中切除。从图 3c 可见,在填充 0.021 s 左右,两股铝液分别到达圆孔和矩形孔末端,通过模拟发现,浇道对侧圆孔末端与矩形孔末端均有明显卷气情况发生,故分别设计渣包于圆孔和矩形孔内,渣包入料口为模拟铝液交汇处;第 0.024 s 填充至铸件末端,流向铸件

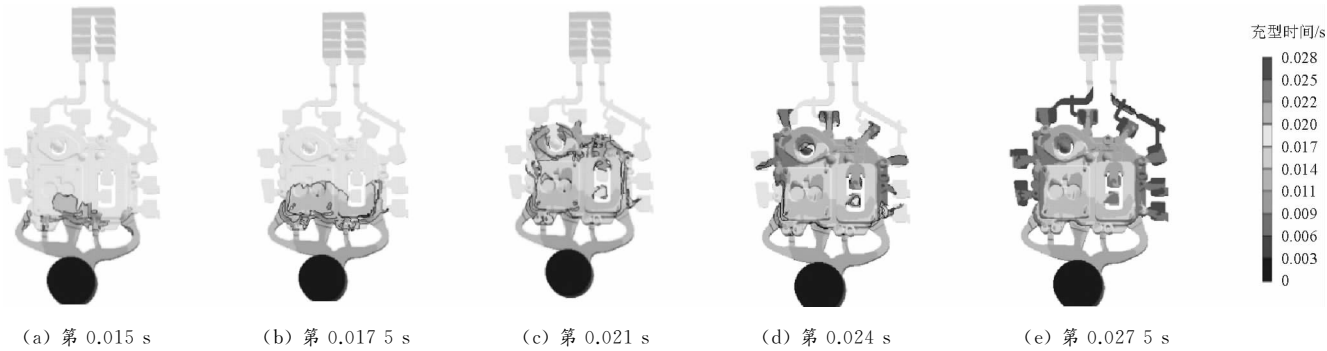


图 3 电池罩盖充型过程卷气模拟

Fig.3 Entrapment-gas simulation of battery cover

周边渣包,见图 3d。经多次模拟分析,在铸件填充末端分别设置 8 个渣包,铸件生产后经 X 射线显示,周边渣包内含有多气缩孔与氧化夹渣。

图 4 为填充 0.277 s 时的速度云图。“π”型排气波板是将一个传统的排气波板中间隔离,同时保留末端连通,一般左右两边隔离长度为 4~5 个牙扣,该结构既可以保证左右两侧气体排出互不干扰,同时缩小空间,节省加工制造成本。此外,该时刻左侧铝液达到第一牙扣,右侧即将抵达第一牙扣,使用粒子跟踪技术测量左侧前端速度为 12 m/s,右侧为 13 m/s。由于波板平均间隙为 0.7 mm,两股铝液经过第一牙扣后速度迅速下降,到第二牙扣几乎停止运动,铝液最终停止的位置与铝液粘度、模具温度以及铸造压力等有关。设计左右两侧分别设置 4 个独立牙扣,在第 5~8 个牙扣连通,实践证明“π”型排气波板设计合理,生产过程使用可靠。

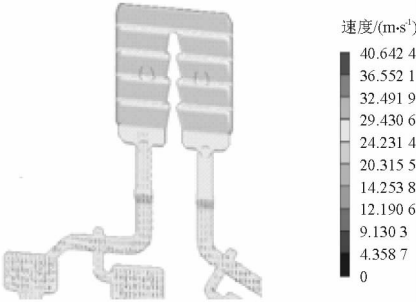


图 4 填充 0.277 s 时的速度矢量

Fig.4 Velocity vector at 0.277 s

依据模拟分析结果,使用 UB350iC 压铸机生产该零件,压射冲头尺寸为 $\phi 60$ mm,实测冲头与料缸间隙为 0.07 mm,为适应薄壁件充型,保温炉设定合金液温度为 680 $^{\circ}\text{C}$,实际模具温度控制在 180~200 $^{\circ}\text{C}$ 之间,铸造压力为 80 MPa,慢压射速度为 0.2 m/s,快压射速度为 3.5 m/s,铸件见图 5。使用 XG-160S T/S X 射线实时成像仪检查零件内部品质,可以看到铸件整体轮廓清晰,见图 6,眼镜孔、方形孔及圆孔周边重要功能区域无可见气孔、氧化夹渣等缺陷,浇注末端品质良好,周围密封环形槽满足设计要求。同时,随件试片轮廓清晰,无

气孔等缺陷。使用 WDW-50 电子万能试验机测量随件试片力学性能,其抗拉强度平均值为 260 MPa,屈服强度值为 170 MPa,伸长率为 6%,性能不能满足设计要求。

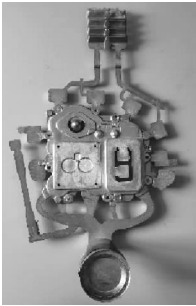
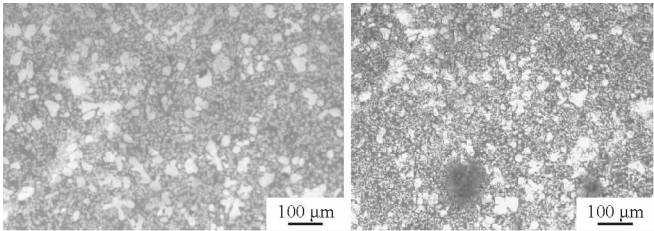


图 5 铸件
Fig.5 The castings



图 6 X 光检验图
Fig.6 X-ray detection

在产品 3 个重要区域取切片抛光并在质量分数为 10% 的 NaCl 溶液中腐蚀,使用 AX10 金相显微镜进行组织观察,见图 7。白亮 α -Al 为块状或枝状,晶粒尺寸较为粗大,个别尺寸大于 80 μm ,细小暗黑色 Al-Si 共晶相分布于 α -Al 周边,较为均匀,但仍可见细小气缩孔,孔隙率为 3.5%。圆孔内渣包,发现多个呈圆形黑色气孔空洞,且周边存在密集分布的细小孔洞,经图像识别测量,渣包内孔隙率大于 9%,说明该处渣包可实现集气及排渣的功能,气体在铝液流动前端被高速卷入渣包,在高压下被压缩为孔洞。该现象与模拟分析结果基本一致,说明模具渣包设计较为合理。



(a) 圆形区域 (b) 渣包

图 7 不同区域的金相组织

Fig.7 Microstructure of different region

4 热处理工艺效果

铝合金铸件热处理目的是提高合金的力学性能,增强耐腐蚀性能,改善加工性能,获得尺寸的稳定性^[9-10]。铝合金的时效硬化不仅决定于合金的组成、时效工艺,还取决于合金在生产过程中的缺陷,特别是空位、位错的数量和分布等^[11]。AlSi10MnMg 薄壁压铸零件在适当 T5 及 T6 处理下,都能得到较好的性能要求。由于固溶热处理工艺较为复杂,并且较高的温度容易导致薄壁铸件变形超差,且该薄壁零件可以在 2 h 得到均匀的溶解,因此以温度为变量采用人工时效处理。

选取人工时效温度为 170~210 ℃,每间隔 10 ℃ 作为 1 组,保温时间均为 2 h。采用 SX2-12-6 电阻炉进行人工时效,额定功率为 12 kW,炉膛尺寸为 550 mm×550 mm×450 mm;将每组 3 个试片悬挂放置入炉膛中间部位,通风,升温 15 min 到达规定时效温度,随后自动保温计时,最后由人工将试片取出空气中冷却。

使用 WDW-50E 万能拉伸试验机在室温条件下进行拉伸测试,拉伸测试过程依据 GB/T228.1-2010 进行,见图 8,伸长率由卡尺测量拉伸前后数值计算获得,每组测 3 件并取平均值,测试结果见表 3。



图 8 不同时效温度下拉伸试片结果

Fig.8 Tensile specimens at different aging temperatures

表 3 铸态及不同时效温度下合金的力学性能

Tab.3 Mechanical properties of the alloy as-cast and different as-aged state

温度/℃	时间/h	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
铸态	—	268.8	165.0	5.7
170	2	288.8	213.8	3.6
180	2	297.1	223.1	3.7
190	2	307.6	222.1	5.4
200	2	281.5	214.8	4.4
210	2	286.5	205.4	3.5

从表 3 可以看出,经过不同温度人工时效后,合金的屈服强度、抗拉强度和伸长率均先升高后降低,其中,屈服强度和抗拉强度均高于铸态,而伸长率均低于铸态的,190 ℃×2 h 时分别 222 MPa 和 307.6 MPa 和 5.4%。

进一步选择时效温度为 190 ℃,保温 8 h 对电池罩

盖铸件进行过时效处理,进行拉伸测试后得到抗拉强度为 307 MPa,屈服强度为 227 MPa,但伸长率下降到 2.6%,说明过长的热处理时间对合金强度影响不大,但对伸长率影响很大。

5 结 论

基于 AlSi10MnMg 压铸合金,针对新能源汽车电池罩盖力学性能要求,提出解决该问题的一般方法,即合理选择合金成分、优化设计压铸模具、正确配置人工时效方案。结果表明,合金中 Mg 的含量为 0.2%~0.4%,根据零件结构特性优化排溢系统,人工时效选择 190 ℃×2 h,其性能可以满足要求。

参 考 文 献

[1] 赵旭,王平,孙晶莹,等.压铸 AlSi10MnMg 铝合金中铸态缺陷分析[J].特种铸造及有色合金,2019,39(12):1291-1293.

[2] ZHU B W, LI L X, LIU X, et al. Effect of viscosity measurement method to simulate high pressure die casting of thin-wall Al-Si10MnMg alloy castings[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24(12): 5032-5036.

[3] 胡宸,赵海东,王雪灵,等. Mg 含量对高真空压铸 AlSi10MgMn 合金时效强化的影响[J]. 中国有色金属学报,2020,30(7):1481-1490.

[4] 万里,刘学强,胡祖麒,等. 高真空压铸 AlSi10MnMgFe 合金的组织及力学性能[J]. 特种铸造及有色合金,2014,34(5):499-503.

[5] 许四祥,吴树森,毛有武,等. 铸造镁合金中微孔对其组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2007,27(1):11-13.

[6] YUAN Z H, GUO Z P, XIONG S M. Microstructure evolution of modified die-casting AlSi10MnMg alloy during solution treatment and its effect on mechanical properties[J]. Transactions of Chinese Nonferrous Society, 2019, 29(5): 919-930.

[7] 刘宝石,牟风,黄艳玲,等. 高品质热作模具钢 FS438 组织及性能研究[J]. 模具制造,2018,18(3):84-87.

[8] 黄潇苹,朱洪军,魏巍. 铝合金下缸体铸件的局部挤压技术研究[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(4):517-520.

[9] 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.

[10] 徐翠鹏,李德江,李子昕,等. 热处理对压铸 AlSi10MnMg 减震塔组织及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(7):884-889.

[11] 全泳琪,程汉明,王鹤睿,等. 热处理对压铸 AlSi10MnMg 合金组织和力学性能的影响[J]. 有色金属科学与工程,2022,13(2):98-106.

(编辑:张正贺)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com