● 工艺技术 Technology ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3052

基于压射速度调控金属流动减少铝制9AT壳体缺陷工艺研究

许延琛[1,2],李 亨[1,2],鲁 超[3],滕兴宇[4],唐 丽[5],吴玉程[1,2]

(1. 合肥工业大学 航空结构件成形制造与装备安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230000; 2. 江南轻合金新材料产业研究院,安徽 池州 247100; 3. 合肥亚明汽车部件有限公司,安徽 合肥 230000; 4. 芜湖瑞鹄轻量化技术有限公司,安徽 芜湖 241000; 5. 安徽环新集团股份有限公司,安徽 安庆 246001)

摘 要:9AT汽车变速器离壳体油路管道、加强筋等复杂结构集中于右侧,对称性差,气密性要求高,导致成型难度大,生产合格率较低。压射速度是影响产品合格率的关键因素,本文通过计算确定了工艺参数并模拟了3组不同流速对金属液流动和缺陷率的影响。结果表明,当浇注温度为680 ℃、压射速度为3.5 m/s、模具温度为200 ℃时流速最为平缓,产生的缩松缩孔体积最小。用该组工艺参数进行压铸实验,并对铸件进行组织形貌观察和性能测试,其抗拉强度和伸长率分别为257.3 MPa、4%。变速器离壳体产品性能和质量满足使用要求,产品合格率由原来的65.3%提高到77.5%。

关键词:压铸;压射速度;数值模拟;变速器离壳体

中图分类号:TG146 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2023)09-0855-06

Research and Development of Process for Reducing Defects in Aluminum 9AT Shells Based on Injection Velocity Control of Metal Flow

XU Yanchen[1,2], LI Heng[1,2], LU Chao[3], TENG Xingyu[4], TANG Li[5], WU Yucheng[1,2]

(1. Anhui Key Laboratory of Aeronautical Structural Parts Forming, Manufacturing and Equipment, Hefei University of Technology, Hefei 230000, China; 2. Jiangnan Light Alloy New Material Industry Research Institute, Chizhou 247100, China; 3. Hefei Yaming Auto Parts Co., Ltd., Hefei 230000, China; 4. Wuhu Ruihu Lightweight Technology Co., Ltd., Wuhu 241000, China; 5. Anhui Huanxin Group Co., Ltd., Anqing 246001, China)

Abstract: Complex structures such as the oil pipeline and reinforcing ribs from the case of 9AT automobile transmission are concentrated on the right side, resulting in poor symmetry and high requirements for airtightness, which lead to great molding difficulties and low production qualification rates. The injection velocity is a key factor affecting the product qualification rate. In this paper, the process parameters were determined through calculation, and the effects of three different flow rates on the metal liquid flow and defect rate were simulated. The results show that when the pouring temperature is 680 ℃, the injection speed is 3.5 m/s, and the mold temperature is 200 ℃, the flow rate is the gentlest, creating the smallest volume of shrinkage porosity and shrinkage cavity. Die casting experiments were carried out with this set of parameters, the microstructure and morphology of the castings were observed, and performance tests were conducted. The tensile strength and elongation are 257.3 MPa and 4%, respectively. The performance and quality of the transmission case product meet the use requirements, and the qualified rate of the products increases from 65.3% to 77.5%.

Key words: diecasting; injection velocity; numerical simulation; transmission case

变速器作为汽车动力总成系统的关键部件,其功能可靠性和耐久性等直接影响到汽车的整体功能[1-4]。9AT变速箱由德国采埃孚集团率先推出,它的最大优势是省油及加速快,在多挡位的情况下,由于每个挡位之间的齿轮落差减小,减速比范围大,高速时可在低转速下实现油耗减少与较强的加速力。

收稿日期:2023-03-11

基金项目:安徽省发改委创新工程项目(JZ2022AFKJO032);中央高校基本科研业务费专项资金(JZ2021HGTB0100, PA2020GDSK0076)

作者简介:许延琛,1997年生,硕士生.研究方向为材料成形过程与技术研究.Email:3035886366@qq.com

通讯作者:李 亨,1984年生,副研究员.研究方向为有色金属制备及塑性成形理论研究.Email:liheng0205@hfut.edu.cn

引用格式:许延琛,李亨,鲁超,等.基于压射速度调控金属流动减少铝制9AT壳体缺陷工艺研究[J].铸造技术,2023,44(9):855-860.

XU Y C, LI H, LU C, et al. Research and development of process for reducing defects in aluminum 9AT shells based on injection velocity control of metal flow[J]. Foundry Technology, 2023, 44(9): 855-860.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

然而,变速器壳体形状复杂、壁厚不均匀,成型技术难度大,对加工精度和气密性要求较高,如果铸造工艺不合适,极易在铸件内部产生缩松、缩孔等缺陷,影响铸件的性能,降低产品合格率[5-7]。因此,大型复杂变速器离壳体零件要通过铸造工艺优化来避免缩松缩孔等缺陷,以达到产品使用要求。祁晨宇等[8]通过汽车铝合金气压制动阀铸件的压铸工艺设计,确定了气压制动阀最佳压铸工艺参数,经生产验证,得到的铸件质量良好,产品合格率得到提升。周传龙等[9]为解决油机活塞在铸造过程中出现的缩孔、缩松问题,采用了径向引入底注式浇注改善浇注系统。Yu 等[10]通过改变压射速度制备 A390 高硅铝合金铸件并进行力学性能分析,结果表明压射速度对铸件内部孔洞和微观组织形态有很大影响。本文针对 9AT 变速器离壳体零件,根据变速器离壳体的结构特点设计合理的铸造工艺,并探究压射速度对变速器离壳体零件充型过程及内部缺陷的影响,为 9AT 变速器离壳体零件的铸造生产提供参考。

1 铸件的结构与材质分析

9AT 变速器离壳体铸件属于铝合金复杂薄壁铸件,轮廓尺寸为 450 mm×415 mm×110 mm,毛坯质量为 9.5 kg,其三维模型如图 1 所示。铸件形状复杂,内部分布着众多加强筋和油路管道,且加强筋和油路大部分分布在铸件的右侧,对称性差。因此,其成型对金属液流动异常敏感,在压铸过程中易产生应力集中,使铸件变形,内部易产生气孔、缩松缩孔等缺陷[11-14]。铸件平均壁厚为 5.2 mm,壁厚最厚处约为 25 mm,壁厚最薄处为 3 mm,差异较大。铸件厚大处在凝固过程中易形成热节,无法充分补缩,产生缩松、缩孔缺陷。另外,变速器壳体对加工精度和气密性要求较高。这些因素使得铸件成型技术难度大,产品合格率不高[15-19]。铸件材料选用 AlSi9Cu3,其化学成分如表 1 所示。

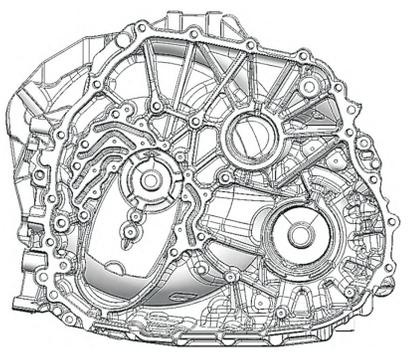


图 1 变速器离壳体三维模型
Fig.1 Three-dimensional model of the transmission case

2 铸造工艺设计

2.1 工艺分析

变速器离壳体压铸生产采用 1 模 1 件，使用力劲 DCC2500T 型卧式冷室压铸机。料管有效长度为(850±20) mm，压室直径为 150 mm。根据实际生产经验，压铸件料饼厚度约为压铸机压室直径的1/3~1/2，取75 mm。

2.2 浇注系统设计

根据铸件特征,选取铸件轮廓最大面为分型面,以便于铸件脱模。为了减少压铸过程中慢压射阶段铝合金溶液的卷气量，在铸件长度方向选取较为平直的一侧设置内浇口。通过下式计算浇口尺寸：

$$Ag=G/(\rho vt) \quad (1)$$

式中,Ag 为内浇口横截面积,mm²;G 为铸件毛坯质量,kg;ρ 为金属溶液密度,g/cm³;ν 为金属溶液内浇口填充速度,m/s;t 为填充时间,s。计算得到浇口截面积为 2 500 mm²,确定内浇口厚度为 2.5 mm。在设计压铸件浇注系统时，主要考虑如何使铝合金溶液同步到达型腔，以及如何减少铝合金溶液在充填过程中的卷气量与包卷现象。因此,在浇道设计时横截面积采用逐级递减的设计。另外,为了保证铝合金溶液在型腔内快速充填完成，沿着铸件轮廓设计全浇口的方式,增大内浇口的横截面积。铸件的三维模型如图 2 所示。

2.3 压铸工艺参数设计

本文采用 ProCAST 软件对设计的铸造工艺进行数值模拟,模拟过程工艺参数的设定如下:压射比压为 80 MPa，慢压射速度为 0.35 m/s，浇注温度为 680 ℃,模具预热温度为 200 ℃,模具种类为 H13,铸件和模具之间换热系数设定为 h=2 000 W/(m²·K),冷却方式为空冷。

该变速器离壳体属于铝合金复杂薄壁铸件,平均壁厚为 5.2 mm,根据表 2 所示的铝合金铸件充型速度选用原则,充填速度范围为 20~30 m/s[20]。在已知压室截面积和浇口截面积的情况下，根据下式换

表 1 AlSi9Cu3 铝合金化学成分
Tab.1 Chemical composition of AlSi9Cu3 aluminum alloy

mass fraction/%

元素	Si	Cu	Fe	Mn	Mg	Zn	Al
含量	8.0～11.0	2.0～4.0	≤1.0	0.1～0.5	0.15～0.55	≤1.2	Bal.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

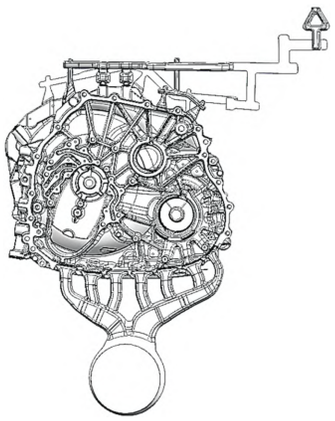


图 2 带浇注系统变速器离壳体铸件

Fig.2 Casting of transmission case with gating system

表2 铝合金充填速度[20]

Tab.2 Filling speed of aluminum alloy[20]

基本壁厚/mm	≤2.5	>2.5～4.0	>4.0～6.0
充填速度/(m·s^{-1})	40～50	30～40	20～30

算出内浇口速度和压射速度的关系：

$$Vp\times(\pi\times D^2/4)=Ag\times Vg \quad (2)$$

式中，Vg 为内浇口速度，m/s；D 为压室直径，mm；Ag 为内浇口面积，mm^2；Vp 为压射速度，m/s。根据几何测量，所设计的内浇口面积为 2 505 mm^2，压室(冲头)直径为 150 mm，计算得到压射速度为 2.8～4.2 m/s。基于此设计压射速度，分别选取 3.0、3.5、4.0 m/s 3个速度值进行对比分析。

3 结果及讨论

快压射速度为 3.0 m/s 时，铸件充型过程中温度场的模拟结果如图 3 所示。可以看到铸件左侧金属溶液充型速度快于中部和右侧，这是因为铸件左侧结构比较简单，而铸件中部和右侧有较多的油路管道和加强筋，导致中部和右侧金属溶液液流比较滞后。由于左侧金属溶液液流较快，易在铸件后端部形成回流与右侧金属溶液相碰撞。这就意味着会有更多的气体被卷入型腔，既增加了产生气孔的可能性，也增加了由于金属溶液融合不良在铸件表面产生冷隔缺陷的可能。

图 4 为快压射速度为 3.5 m/s 时铸件充型过程中温度场的模拟结果。从模拟结果可以看出，左侧金属溶液液流仍快于中部和右侧金属溶液液流，但相较于图 3，中部和右侧金属溶液流动速度明显加快，与左侧金属溶液距离差距较小。这说明金属溶液流动的同步性得到改善，因此铸件产生气孔和冷隔的倾向性会更小。从结果中也可以看出金属溶液基本是由近及远顺序充填。

图 5 为快压射速度为 4.0 m/s 时铸件充型过程

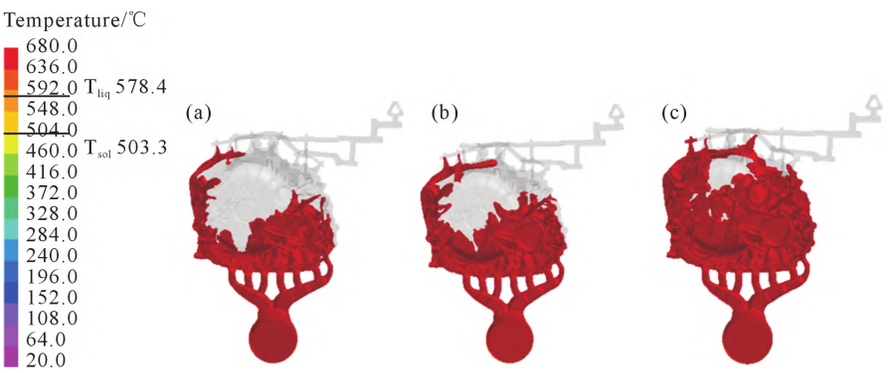


图 3 快压射速度为 3.0 m/s 时充型过程中温度场模拟：(a) 充型 70%，(b) 充型 80%，(c) 充型 90%

Fig.3 Simulation results of the temperature field during mold filling with a fast injection velocity of 3.0 m/s: (a) filling 70%, (b) filling 80%, (c) filling 90%

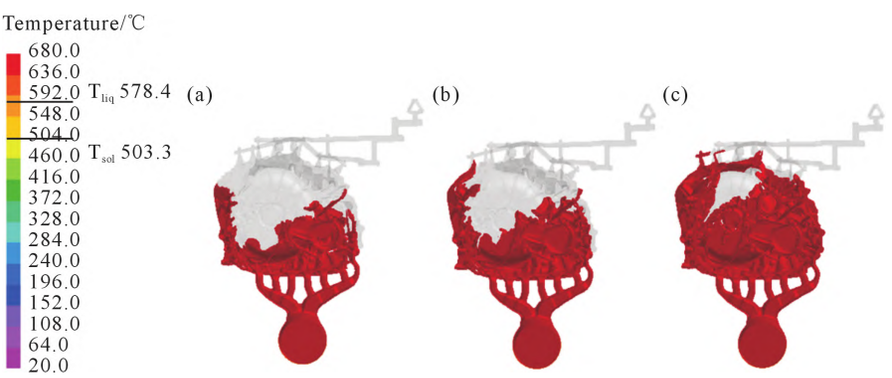


图 4 快压射速度为 3.5 m/s 时充型过程中温度场模拟：(a) 充型 70%，(b) 充型 80%，(c) 充型 90%

Fig.4 Simulation results of the temperature field during mold filling with a fast injection velocity of 3.5 m/s: (a) filling 70%, (b) filling 80%, (c) filling 90%

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

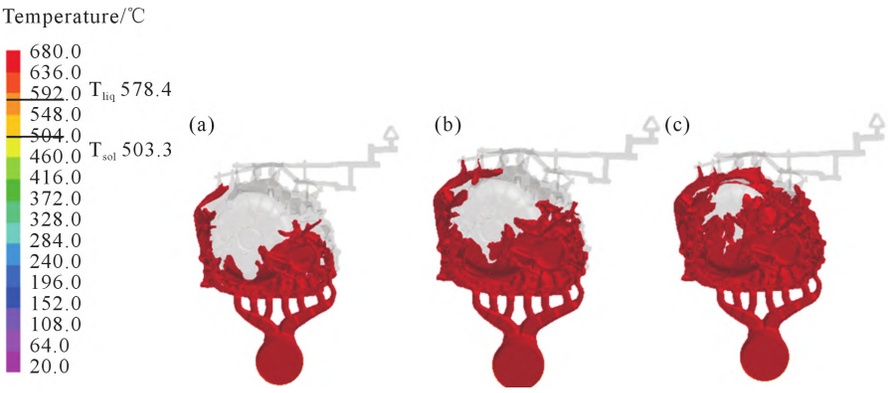


图 5 快压射速度为 4.0 m/s 时充型过程中温度场模拟:(a) 充型 70%,(b) 充型 80%,(c) 充型 90%

Fig.5 Simulation results of the temperature field during mold filling with a fast injection velocity of 4.0 m/s: (a) filling 70%, (b) filling 80%, (c) filling 90%

中温度场的模拟结果。可以看到铸件左侧金属溶液充型速度仍然较快,但金属溶液液流的同步性比图 3 快压射速度为 3.0 m/s 时金属溶液液流的同步性较好,比图 4 快压射速度为 3.5 m/s 时金属溶液液流的同步性稍差。整个金属溶液充型过程中产生的喷流和紊流较小,金属溶液基本以层流的方式进行填充,充型过程比较平稳,有利于将型腔内的气体排出,减少金属溶液卷入气体的含量,从而减少气孔缺陷的产生。

铸件内部缩松缩孔缺陷分布如图 6 所示,从模拟结果可以看出,当快压射速度为 3.0、3.5、4.0 m/s 时铸件内部产生的缺陷体积大小分别为 64.396、46.619、58.622 cm^3。由此可见当快压射速度为 3.5 m/s 时,铸件内部产生的缺陷体积最小,所以将快压射速度设置为 3.5 m/s 对铸件进行了实际生产。

生产得到的铸件如图 7(a)所示,铸件工作表面光滑,没有缺铸、冷隔和裂纹等。为研究变速器离壳体铸件的微观组织,对铸件近浇口处进行取样并进行 OM 观察,如图 7(b)所示。可以看出其组织主要由细小的 α-Al 和共晶组织组成,组织中白色的 α-Al 相形状圆整,分布较为均匀,组织致密并且很少能看到明显的铸造缺陷;共晶 Si 以针片状存在,同时从金相组织还能观察到,基体中存在少量的析出相;其微观组织中还有浅灰色的富 Fe 相,主要为块状、条状,尺寸相对不大但数量较多,铸件中过高的 Fe 含量会使铸件产生脆性,降低铸件强度。

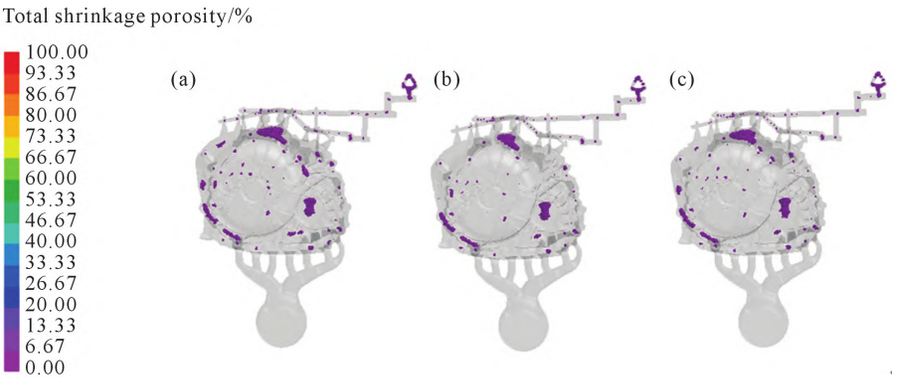


图 6 不同快压射速度下铸件内部缩松缩孔缺陷分布:(a) 3.0 m/s, (b) 3.5 m/s, (c) 4.0 m/s

Fig.6 Distribution of shrinkage porosity and cavity defects in castings with different fast injection speeds: (a) 3.0 m/s, (b) 3.5 m/s, (c) 4.0 m/s

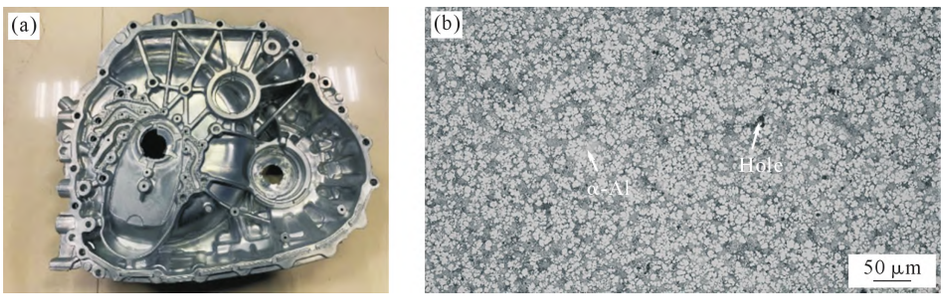


图 7 变速器离壳体铸件及金相组织:(a) 铸件,(b) 金相组织

Fig.7 Transmission case casting and metallographic structure: (a) casting, (b) metallographic microstructure

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 8(a)为从铸件截取的拉伸试样断口 SEM 照片。从图中可以看出,断口中出现较多的台阶形态,为准解理断裂;从拉伸断口中可以看出存在大量的韧窝和撕裂棱,但韧窝多数小而浅,韧窝的内部存在大量的第二相,通过能谱分析可知主要为共晶 Si 相和 AlMnFeSi 相。从图 8(b)力学性能测试结果可以看出,拉伸试样抗拉强度和伸长率分别为 257.3 MPa、4%,变速器离壳体的力学性能要求为抗拉强度达到 190 MPa,伸长率大于 1%,由此可见当快压射速度为 3.5 m/s 时生产的变速器离壳体完全符合生产要求。

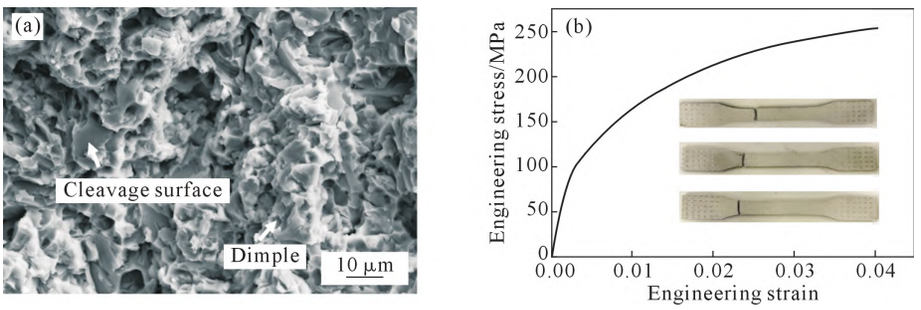


图 8 试样的断口形貌图及工程应力–应变曲线:(a) 断口形貌,(b) 工程应力–应变曲线

Fig.8 Fracture morphology and engineering stress-strain curve of the sample: (a) fracture morphology, (b) engineering stress-strain curve

4 结论

(1)针对壳体复杂结构设计了非对称的浇注横浇道,且快压射速度为 3.5 m/s 时充型过程相对平稳,铸件内部产生的缺陷体积最小,为 46.619 cm^3。确定了该离壳体压铸件工艺参数:快压射速度为 3.5 m/s,浇注温度为 680 ℃,模具预热温度为 200 ℃。

(2)经试生产,所得铸件表面无明显缺陷,内部组织晶粒细小,组织致密。铸件抗拉强度和伸长率分别为 257.3 MPa、4%,达到该零件的服役要求。

参考文献:

[1] 蔡春杰. 汽车变速器箱体有限元分析与拓扑优化设计[D]. 镇江:江苏大学,2017.
CAI C J. Finite element analysis and topology optimization design of automobile transmission housing[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.

[2] 刘高峰,张维江,杨波. 客车变速器壳体消失模铝合金铸造工艺研究[J]. 铸造技术,2020, 41(8): 761-763.
LIU G F, ZHANG W J, YANG B. Study on lost foam technology of aluminium alloy transmission housing for passenger car[J]. Foundry Technology, 2020, 41(8): 761-763.

[3] 白云. 工艺参数对汽车变速器箱体低压铸造质量的影响[J]. 热加工工艺,2019, 48(15): 69-71, 77.
BAI Y. Effect of process parameters on low pressure casting quality of automobile transmission case[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(15): 69-71, 77.

[4] 辛莹莹. 汽车变速器壳体加工工艺与技术要点研究[J]. 内燃机与配件,2019(8): 128-129.
XIN Y Y. Research on the processing technology and key technical points of automobile transmission case[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2019(8): 128-129.

[5] NIU Z C, LIU G Y, LI T, et al. Effect of high pressure die casting on the castability, defects and mechanical properties of aluminium alloys in extra-large thin-wall castings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 303: 117525.

[6] 韩亚斌,郑霏,刘冬冬. 厚大中开面多级离心泵缩尺控制及铸造工艺研究[J]. 铸造技术,2021, 42(11): 948-951.
HAN Y B, ZHENG F, LIU D D. Study on scale control and casting technology of thick and middle-separated surface multistage centrifugal pump[J]. Foundry Technology, 2021, 42(11): 948-951.

[7] 魏言标,卢润泽,王俊有,等. 压铸铝合金变速箱体参数的有限元分析[J]. 特种铸造及有色合金,2022, 42(4): 521-525.
WEI Y B, LU R Z, WANG J Y, et al. Finite element analysis of parametersfor diecasting aluminum alloy gearbox[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(4): 521-525.

[8] 祁晨宇,蔡琴. 汽车铝合金气压制动阀压铸工艺设计[J]. 热加工工艺,2018, 47(21): 103-105.
QI C Y, CAI Q. Design of pressure casting process of automobile aluminum alloyair brake valve[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(21): 103-105.

[9] 周传龙,何强,周宏根,等. 基于 ProCAST 的柴油机活塞铸造工艺模拟及优化[J]. 铸造,2022, 71(5): 632-636.
ZHOU C L, HE Q, ZHOU H G, et al. Simulation and optimization ofcasting process for diesel engine piston based on ProCAST[J]. Foundry, 2022, 71(5): 632-636.

[10] YU W B, YUAN Z H, GUO Z P, et al. Characterization of A390 aluminum alloy produced at different slow shot speeds using vacuum assisted high pressure die casting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(12): 2529-2538.

[11] 高正宇. 变速器上盖消失模铸件的缺陷分析及控制[J]. 铸造技术,2008(9): 1248-1250.
GAO Z Y. Analysis and control of the defects for gearbox top head casting on EPC[J]. Foundry Technology, 2008(9): 1248-1250.

[12] 崔少朋,李朝兴,苏文平. 局部挤压在压铸铝合金变速器壳体上的应用[J]. 特种铸造及有色合金,2022, 42(10): 1312-1314.
CUI S P, LI C X, SU W P. Application of partial squeezingin aluminum alloy transmission housing[J]. Special Casting & Nonfer-

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

rous Alloys, 2022, 42(10): 1312-1314.

[13] 柯春松，唐杰，庄舰，等. 八挡自动变速器主壳体压铸工艺优化[J]. 铸造，2022, 71(8): 997-1004.
KE C S, TANG J, ZHUANG J, et al. Optimization of the die casting process for main case of eight-speed automatic transmission[J]. Foundry, 2022, 71(8): 997-1004.

[14] 刘祥，任飞，胡文平，等. AlSi9Cu3 铝合金变速箱外壳高压铸造模拟分析[J]. 铸造技术，2018, 39(6): 1243-1247.
LIU X, REN F, HU W P, et al. Simulation and analysis of AlSi9Cu3 aluminum alloy gearbox shell in high pressure die casting [J]. Foundry Technology, 2018, 39(6): 1243-1247.

[15] 汪闵，赵玉涛，陶然，等. Sr 对 AlSi9Cu3 合金组织与力学性能的影响[J]. 铸造技术，2018, 39(6): 1153-1156, 1160.
WANG M, ZHAO Y T, TAO R, et al. Effect of Sr on microstructure and mechanical properties of AlSi9Cu3 alloy [J]. Foundry Technology, 2018, 39(6): 1153-1156, 1160.

[16] 印厚尚，张松利，梁智萍，等. 热处理对原位(ZrB_2+TiB_2)增强 AlSi9Cu3 复合材料组织和性能的影响[J]. 铸造技术，2018, 39(7): 1554-1558.
YIN H S, ZHANG S L, LIANG Z P, et al. Effect of heat treatment on microstructures and properties of in-situ (ZrB_2+TiB_2) particles reinforced AlSi9Cu3 composites [J]. Foundry Technology, 2018, 39(7): 1554-1558.

[17] LATTANZI L, FABRIZI A, FORTINI A, et al. Effects of microstructure and casting defects on the fatigue behavior of the high-pressure die-cast AlSi9Cu3 (Fe) alloy [J]. Procedia Structural Integrity, 2017, 7: 505-512.

[18] 宗福春，葛素静，钱伟涛，等. 合金元素和浇注温度对 AlSi9Cu3 铝合金收缩率和流动性的影响[J]. 热加工工艺，2021, 50(15): 45-47, 50.
ZONG F C, GE S J, QIAN W T, et al. Effect of alloy elements and pouring temperature on shrinkage and fluidity of AlSi9Cu3 aluminum alloy [J]. Hot Working Technology, 2021, 50(15): 45-47, 50.

[19] GAIN S, SILVA T E F, JESUS A M P, et al. Mechanical characterization of the AlSi9Cu3 cast alloy under distinct stress states and thermal conditions[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 216: 106499.

[20] 白猛. 结构复杂铝合金压铸件工艺及组织性能研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2018.
BAI M. Study on process, structure and properties of aluminum alloy die castings with complex structure[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net