

变速箱壳体压铸件局部挤压技术研究

赵玉利^{1,2} 孙志豪² 赵而团² 赵圣诗¹ 王洪涛²

(1. 中国重型汽车集团工艺工匠研究院, 济南 250101; 2. 山东理工大学机械工程学院, 淄博 255049)

摘要 介绍了大型变速箱壳体压铸件结构特点、品质要求以及存在的局部泄露问题,描述局部挤压工艺参数的计算方法和生产调试工艺。结果表明,当挤压力为225 MPa,油缸规格为 $\phi 63$ mm,挤压销直径为 $\phi 14$ mm,挤压深度为20 mm,加压延时时间为5 s,加压持续时间为10 s时,壳体局部缩松和泄露问题得到解决,孔隙率从15%降低到2.2%,试漏合格率达30%提高到98%,实现了产品的量产。

关键词 压铸;缩松;局部挤压;变速箱壳体

中图分类号 TG249.2 文献标志码 A DOI:10.15980/j.tzzz.T20250256

Local Extrusion Technology for Gearbox Housing Die Castings

ZHAO Yuli^{1,2}, SUN Zhihao², ZHAO Ertuan², ZHAO Shengshi¹, WANG Hongtao²

(1.Development and Research Insittute of Sino Truck, Jinan 250101; 2.School of Mechaincal Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049)

Abstract: The structure characteristics, quality requirements and existing local leakage problems of large gearbox housing parts were described. The calculation method and production debugging process of partial extrusion papame-ters were systematically introduced. The results indicate that local shrinkage and leakage of castings are solved with extrusion force of 225 MPa, cylinder specification of $\phi 63$ mm, extrusion pin diameter of 14 mm, extrusion depth of 20 mm, pressurization delaying time of 5 s, and pressurization duration of 10 s, where the porosity is reduced from 15% to 2.2%, and the yield of leak test is increased from 30% to 98%, realizing the mass production.

Key Words: Die Casting, Porosity, Local Extrusion, Gearbox Housing

随着汽车轻量化进程的加速,压铸工艺凭借其高精度、高效率及良好的表面质量,已成为变速箱壳体制造的主要技术。然而,复杂结构导致的局部厚大区域在凝固过程中极易形成缩孔、缩松缺陷,严重威胁产品的气密性与可靠性^[1]。传统冷却优化或参数调整手段对此类缺陷控制效果有限^[2]。局部挤压技术通过在铸件凝固阶段对厚大部位施加定向压力,强制金属发生塑性流动并实现动态补缩,从根本上消除内部缺陷。该技术不仅显著提升铸件致密度,更突破了传统工艺的局限性,为复杂结构压铸件的高质量制造提供参考。

1 壳体结构分析

图1为变速箱前壳铸件,外轮廓尺寸为 $\phi 556$ mm $\times$ 460 mm,主体壁厚为8 mm,质量为32.5 kg,为同类铸件里质量最大。壳体材质为AlSi9Cu3(Fe)-EN1706,

其化学成分见表1,要求铸态试棒抗拉强度大于240 MPa,屈服强度大于140 MPa,伸长率大于1%。

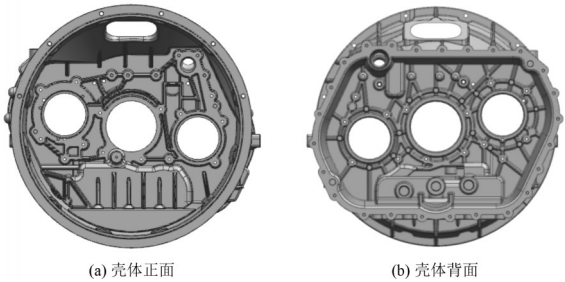


图1 变速箱壳体

Fig.1 Gearbox housing

表1 AlSi9Cu3(Fe)合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of AlSi9Cu3(Fe) alloy %

w_B										
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Ti	Al
8~11	≤ 1.3	2.0~4	≤ 0.55	0.05~0.55	≤ 0.15	≤ 0.55	≤ 1.2	≤ 0.25	≤ 0.25	余量

收稿日期:2025-06-24;修订日期:2025-09-27
基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2021ME136)
第一作者:赵玉利,男,1988年出生,工程师, E-mail:441353441@qq.com
通信作者:王洪涛,男,1984年出生,副教授, E-mail:htwang@sdut.edu.cn
引用格式:赵玉利,孙志豪,赵而团,等. 变速箱壳体压铸件局部挤压技术研究[J]. 特种铸造及有色合金,2026,46(7):1 113-1 116.
ZHAO Y L,SUN Z H,ZHAO E T,et al. Local extrusion technology for gearbox housing die castings[J]. Special Casting &. Nonferrous Alloys, 2026,46(7):1 113-1 116.

该铸件壁厚差异较大,中间辐板区域局部壁厚为 24 mm,而周围区域厚度为 6~8 mm,壁厚差异导致模具温度分布不平衡,容易引发缩松、裂纹。图 2 为壳体的高压气道结构,内有一处 $\phi 7$ mm 的 L 型高压气道孔,见图 2a,气道孔所在的圆柱凸台长度为 90 mm,直径为 $\phi 30$ mm,结构上与侧壁、辐板及外部凸台相贯穿,因孔径太小,仅能预铸端部的 15 mm,见图 2b,内部需加工成形,导致底部热节极大。圆柱外壁也需要进行部分加工,加工后内外壁的最小距离只有 3.5 mm,对于压铸件,内外壁全部加工会破坏致密层,容易引发泄露缺陷。

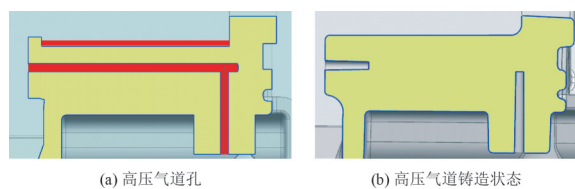


图 2 高压气道

Fig.2 High pressure airway

铸件要求内部孔隙率低于 5%,且装配前该产品要进行密封检验,加工后密封表面不允许有大于 1 mm 的孔隙存在(含气孔和缩孔),腔体部分试漏压力为 0.3 MPa,泄漏量 ≤ 30 mL/min。特别是,气道孔需要单独进行试漏,试漏压力为 1.2 MPa,是壳体本体的 4 倍,保压 3 min 不允许泄露,该位置的试漏需要通过增压泵来实现超高的压力检测,而常规的壳体无气道孔结构,因此本壳体的生产难度远超常规壳体。

2 壳体缺陷分析

浇注系统采用单侧浇注,内浇口面积为 3 500 mm²,压室直径为 $\phi 180$ mm,压室充满度为 57.6%,保温炉内铝液控制温度为 (670 ± 10) °C。配备抽真空系统减少气孔,采取油温机和高压水冷、点冷措施调节模具温度。

壳体主要问题是泄漏,图 3 为铸件泄露位置,位于气道凸台跟辐板相交处,泄露比例为 70%,泄露程度较轻,但无法满足使用要求。通过 X 光机检验,无法观测到明显气孔。为进一步分析泄露原因,对该部位进行解剖,使用 Axio Observer 7M 电镜进行观察,腐蚀剂选用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液。图 4 为泄露位置



图 3 铸件泄露位置

Fig.3 Leakage location in the casting

的切片表面形貌,可以看到该位置含有大量的微孔,微孔的直径为 $\phi(20 \sim 100)$ μm ,但无 500 μm 以上的大孔洞,以缩松为主,孔隙率为 15%。

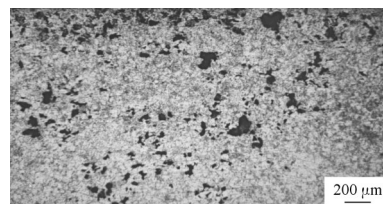


图 4 孔隙率为 15% 的表面形貌

Fig.4 Surface morphology with porosity of 15%

借助 AnyCasting6.8 软件进一步分析缩松的原因,网格划分数量为 2 000 万个,网格大小为 3 mm 的正方体网格,铸件材质为 AlSi9Cu3,模具材质为 SKD61,模具温度设置为 220 °C,铸件与模具的传热系数设定为在 535 °C(固相线温度)以下时为 1 000 W/(m²·K),在 590 °C(液相线温度)以上时为 2 700 W/(m²·K),压射低速区速度为 0.2~0.5 m/s,高速速度为 4.5 m/s,料饼厚度为 80 mm。

图 5 为铸造仿真的结果。从图 5a 分析可知,凸台根部区域因厚度骤增至 30 mm(约为相邻薄壁区的 4 倍),形成孤立热节且凝固时间延长至 22 s(对比浇口区 4 s),同时距离浇口位置较远,导致压射冲头的增压补缩作用难以有效覆盖。在凝固末期,糊状区金属液的流动阻力剧增,而外部补缩压力不足,最终形成缩松缺陷。从图 5b 可见该位置存在缺陷,与金相分析中观察到的一致。

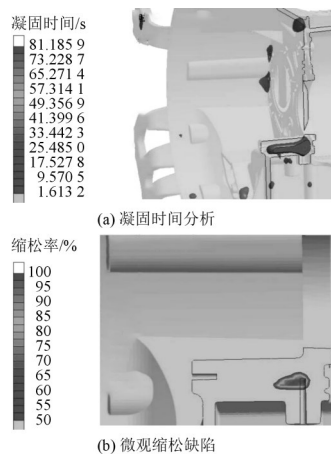


图 5 铸造仿真分析

Fig.5 Simulation analysis for casting

3 局部挤压工艺

在压铸缩松控制中,传统方法包括优化浇注系统、调控工艺参数及改进铸件结构。当常规手段难以满足复杂结构铸件质量要求时,可采用局部挤压技术。该

技术在铸件固相率为30%~70%时,对目标区域施加定向压力,通过半固态金属塑性流动实现强制补缩。实施精准定位挤压点,结合铸件结构与合金特性确定挤压力($F=pA$)、压入体积,确定压杆直径和油缸规格,优化加压延时与持续时间,有效解决局部厚大部位缩松问题。根据产品的结构特点和泄露位置,壳体的挤压位置选择在图3泄露位置的下方。

3.1 挤压力计算

局部挤压时铝合金处于液固共存的状态,挤压销承受铸造压力、油缸推出力以及与挤压套的摩擦力共同作用^[3],挤压力可以通过挤压比压来计算,挤压比压通常为10~20 MPa^[2]。

使用伊之密45 000 kN压铸机,该设备的液压系统可提供挤压油缸液压最大压力为21 MPa,设定挤压的加压压力为15 MPa,挤压比压选择为15,其挤压部位压力为225 MPa,采用直径为 $\phi 14$ mm的圆柱型芯(挤压销)挤压铸件,根据下式反算油缸的直径。

$$P_{\text{加压}} \times S_{\text{油缸活塞}} = P_{\text{挤压力}} \times S_{\text{挤压销}} \quad (1)$$

式中, $P_{\text{加压}}=15$ MPa; $P_{\text{挤压力}}=225$ MPa; $S_{\text{挤压销}}=(1/4)\pi D_{\text{挤压销}}^2$; $S_{\text{油缸活塞}}=(1/4)\pi D_{\text{油缸}}^2$;

计算得出 $D_{\text{油缸}}$ 直径为54 mm,综合考虑到生产过程中挤压销与销套摩擦力,以及液压油缸通用标准等因素,最终选择液压油缸活塞直径为 $\phi 63$ mm。

3.2 挤压体积计算

按照质量守恒的原则($V_{\text{液态}}\rho_{\text{液态}}=V_{\text{固态}}\rho_{\text{固态}}$),压铸件需增压的体积可以近似地理解为铝液凝固成为固态后所减小的体积^[4],其计算公式为:

$$V_{\text{挤压}}=V_{\text{液态}}-V_{\text{固态}}=V_{\text{液态}}(1-\rho_{\text{液态}}/\rho_{\text{固态}}) \quad (2)$$

式中, $\rho_{\text{液态}}=2.4$ g/cm³; $\rho_{\text{固态}}=2.7$ g/cm³。

$V_{\text{液态}}$ 通过三维图可进行测量,本壳体需挤压部位的体积为21 205 mm³。根据式(2)计算得 $V_{\text{挤压}}=2$ 356 mm³,挤压深度 $L=V_{\text{挤压}}/S_{\text{挤压销面积}}=15.3$ mm。

实际生产中一般增加1.2倍以上的安全系数,且需要校核挤压销行程 L 与直径 D 的比值。为确保挤压销工作稳定,一般取该比值为1.0~1.5。本壳体挤压销按照1.2倍安全系数得 $L_{\text{安全}}=18.3$ mm,取整为20 mm, $L_{\text{安全}}$ 与 $D_{\text{挤压销}}$ 比值为1.4,满足要求。

图6为挤压运动过程。为保证生产的连续,制造挤压销和销套需要考虑组件的结构和间隙,挤压销与销套之间在端部间隙配合,配合段长度一般为20~40 mm,间隙为0.03~0.05 mm,配合段以外,销套和挤压销扩大间隙至0.5~1.0 mm。该结构可保证挤压销和销套在装配和挤压动作过程中,仅配合段产生摩擦,

保证装配和挤压动作顺畅。同时配合段的间隙设置合理,避免了间隙过小导致动作卡滞,也避免了间隙过大铝液进入间隙导致动作卡滞。

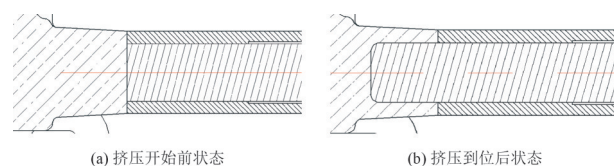


图6 挤压过程

Fig.6 Extrusion process

从图6a中可以看出,挤压开始前,铝液充填到型腔内,与销套、挤压销端面平齐。从图6b中可以看出,挤压时销套不动,挤压销压入铸件中20 mm,在销周围形成一个环状凸台,通过机加工去除。在挤压过程中,挤压销前端的合金含有表面硬化层,对铸件挤压点前端产生压痕甚至产生微裂纹,需要对挤压后的铸件保留1 mm的端面余量^[3],因此,销套与模具端面的距离为21 mm。实际生产中挤压深度波动较大,端面加工余量可能>1 mm,编制加工工艺时需要设定加工量的波动值。

3.3 加压时间验证

(1)加压延时时间 当金属液处于半固态时开始施加挤压压力可获得最佳的挤压效果。当延时时间过早时,金属液尚处于流体状态,挤压力会因液态金属的流动性而发生显著衰减,导致挤压销的机械作用无法形成有效补缩压力场;而延时时间过晚时,铸件表面已形成一定厚度的坚硬凝固壳层,此时挤压销的压入阻力剧增,不仅无法突破凝固层实现内部补缩,还可能因局部应力集中导致铸件产生冷隔或开裂等缺陷。该参数的优化需基于合金凝固特性(如铝合金固液共存区温度范围),并且通过生产中工艺验证确认^[5]。

分别对加压延时时间为3、4和5 s进行了调试验证。图7为挤压位置内部切片的表面形貌。可以看出,当加压延时时间为3 s时,孔隙率为4.6%,见图7a;加压延时为4 s时,孔隙率为3.15%,见图7b;加压延时为5 s时,孔隙率为2.2%,见图7c。经验证,本壳体确定加压延时时间为5 s。

(2)加压持续时间 加压持续时间短,挤压杆过早回退,铸件没有完全凝固,挤压区域将有缩孔或者收缩裂纹缺陷;挤压持续时间过长,则会导致完全凝固后的铸件与挤压杆之间抱紧力过大,导致挤压杆的寿命降低^[3]。在实际生产中确定该产品的加压持续时间为10 s。

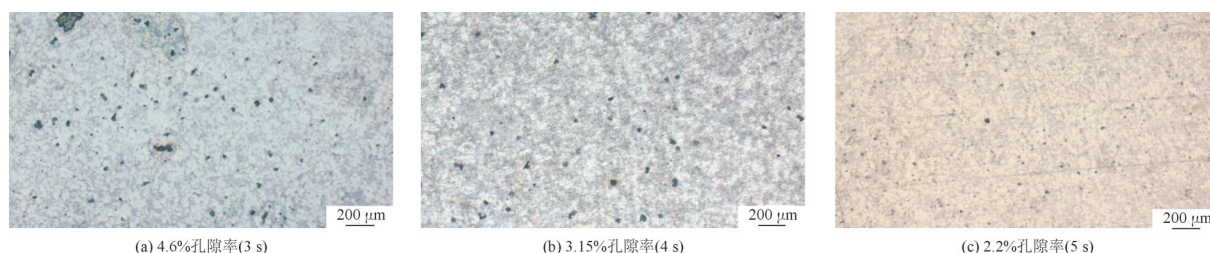


图7 不同加压延时时间下壳体表面形貌

Fig.7 Surface morphologies of gearbox housing with different pressurized delaying time

4 局部挤压的实施效果

制作挤压销及销套,材质选择SKD61,洛氏硬度(HRC)为48~50,表面作氮化处理,氮化层硬度(HV)为1 000~1 100。模具选择SKD61钢,压铸机为伊之密45 000 kN卧式冷式压铸机,配备抽真空系统。压铸时铝液温度保持在 $(670 \pm 10)^\circ\text{C}$,喷涂后模具平均温度为 $(220 \pm 20)^\circ\text{C}$,压铸工艺参数见表2。

表2 压铸参数

Tab.2 Die casting parameters

料筒直径/mm	高速速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	铸造压力/MPa	加压延迟时间/s	加压持续时间/s	冷却时间/s
180	4.5	65	5	10	30

图8为铸件局部挤压后的形貌,带有一圈挤压环。经生产验证,通过局部挤压优化后的壳体质量良好,试漏合格率达98%以上。同时在金相显微镜下观测该部位切片,组织较为致密,切片孔隙率为2.2%左右,见图7c,满足批量生产要求。



图8 铸件实物

Fig.8 Entity of castings

5 结论

(1)大型变速箱压铸件在局部厚大凸台处存在疏松、泄露等问题,通过局部挤压使孔隙率从15%降低到2.2%,试漏合格率从30%提高到98%,实现批量生产。

(2)局部挤压的关键工艺参数是挤压力、挤压油缸的规格、挤压体积、加时延时时间以及加压持续时间。经过计算及生产优化的挤压工艺参数:挤压力为225 MPa,油缸规格为 $\phi 63$ mm,挤压销直径为 $\phi 14$ mm,挤压深度为20 mm,加压延时时间为5 s,加压持续时间为10 s。

参考文献

- [1] 周海军,陆建成,伍世添,等.变速箱壳体压铸工艺分析及缺陷改善[J].特种铸造及有色合金,2019,39(11):1 216-1 219.
- [2] 赵一粟,吴志军.局部挤压技术在缸盖罩壳铸件上的应用[J].时代汽车,2019(1):109-110.
- [3] 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.
- [4] 王凯乐.局部挤压技术在铝合金压铸件中的应用[J].模具制造,2021(3):57-60.
- [5] 侯丽彬,曲太旭.铝合金支架压铸件局部增压工艺的研究[J].特种铸造及有色合金,2023,43(11):1 579-1 581.

(编辑:张正贺)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国60年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊接、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺1001大厦11楼

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024,

85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

