

铝合金下缸体铸件的局部挤压技术研究

黄潇苹¹ 朱洪军¹ 魏巍²

(1.大连科技学院机械工程学院; 2.大连亚明汽车零部件股份有限公司)

摘要 结合局部挤压技术,以下缸体铸件为研究对象,阐述局部挤压技术解决气孔与结晶缩孔问题的一般流程。首先确定最终凝固的热节为挤压区域,进而通过适当的挤压力确定挤压油缸;其次估算局部挤压体积,进而计算挤压杆行程与直径,最后依据液固共存时间确定局部挤压持续时间。结果表明,合理使用局部挤压技术能有效降低缩孔体积。

关键词 局部挤压;铝合金压铸;模具;缩孔

中图分类号 TG249.2;TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.04.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application of Local Extrusion Technology in Lower Cylinder Block Castings

Huang Xiaoping¹, Zhu Hongjun¹, Wei Wei²

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

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

Abstract:Based on the theory of local extrusion technology, the casting process of lower cylinder block was analyzed, and the general process of using local extrusion technology to solve the problems of gas hole and crystal shrinkage was expounded. Firstly, the local extrusion position was determined to be the hot spot, and then the extrusion cylinder was determined by the appropriate extrusion pressure. Secondly, the volume of local extrusion was estimated, and the distance and diameter of extrusion rod was calculated. Finally, the delay time and duration of local extrusion was presented by the liquid-solid coexistence time. The results show that the reasonable use of local extrusion technology can effectively reduce the shrinkage volume.

Key Words: Local Extrusion, Aluminum Alloy Die Casting, Die, Shrinkage Cavity

铝合金下缸体是汽车发动机核心零件之一,分为上、下两部分,上部仍采用铸铁,下部采用铝合金,既保持了铸铁缸体的优点,又减轻了缸体的质量^[1]。黄志垣等^[1]研究了汽车发动机铝合金下缸体的压铸技术及品质控制,提出合理设计溢流槽结构、位置和容积,强化排气集渣是解决下缸体内部卷气、缩松缺陷的重要方法,并提出镶嵌件预热可提高润湿性及铝液的流动性,降低镶嵌件与铝合金分离缺陷的概率;黄美莲等^[2]根据某下缸体的结构特点,设计了鹰嘴式进料和区域排气抽真空的浇注系统,有效解决了下缸体铸件成形困难、内部卷气、缩孔、缩松等缺陷,并设计了铸铁镶嵌件的合理安装定位,确保模具连续正常生产。

针对以上研究,没有考虑局部挤压参数的问题,本课题在整体布局基础上,借助模拟分析等手段深入探讨局部挤压体积、挤压压力、时间、销钉的结构等技术要点,旨在为其应用提供参考。

1 发动机下缸体结构分析

发动机下缸体材质为 EN AC 1706- AlSi9Cu3 (Fe),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%。铸件外轮廓尺寸为 414 mm $\times$ 378 mm $\times$ 72 mm,平均壁厚为 7 mm,质量为 6.92 kg。该下缸体与曲轴连接部位安置 5 个铸铁镶嵌件,经后续加工成为发动机轴承座(见图 1),5 个铸铁镶嵌件应在每次生产合模前定位在模具定模,压铸后与铝合金一体,且不允许分离,含铸铁镶嵌件的铸件总质量为 9.66 kg。

表 1 AlSi9Cu3 (Fe)合金的化学成分

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

ω_B											
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Ti	Al	
9.6~11	≤ 1.3	2.0~3.5	0.50~0.80	0.05~0.30	≤ 0.15	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 0.1	0.04~0.15	余量	

收稿日期:2021-08-12;修改稿收到日期:2021-10-12

第一作者简介:黄潇苹,女,1986 年出生,副教授,辽宁大连(116036),E-mail:huangxp@dlust.edu.cn

通信作者: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: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.
HUANG X P, ZHU H J, WEI W. Application of local extrusion technology in lower cylinder block castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(4):517-520.

该铸件壁厚差异较大,轴承座上下两端区域局部壁厚为 22 mm,第 5 档末端最大壁厚为 30 mm,铸铁镶件左右两侧最薄处铝合金厚度为 2 mm,模具温度分布极不平衡。铸件要求内部孔隙率小于 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 0.6 mm 的气孔,腔体部分试漏压力为 50 kPa,泄漏量 ≤ 30 mL/min;腔体内设有两条高压油道孔,试漏压力为 400 kPa,泄漏量 ≤ 10 mL/min,因此具有较大的生产难度。

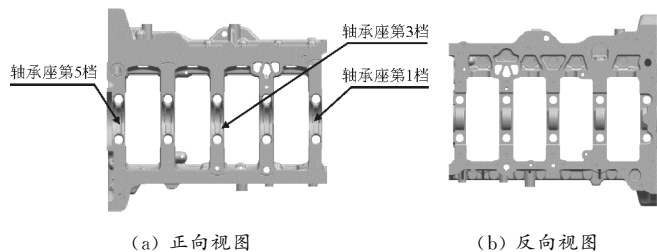


图 1 下缸体
Fig.1 Lower cylinder block

2 铸件局部缩孔缺陷分析

浇注系统采用单侧鹰嘴式浇注系统(见图 2),内浇口面积为 1 600 mm²,压室直径为 120 mm,压室充满度为 28.5%,保温炉内铝液控制温度为(675 $\pm$ 15) °C。结合抽真空系统使气孔减少以及采取高压点冷工艺平衡模具温度,同时将 5 个铸铁镶嵌件在电阻加热箱中升温至 200 °C,并通过专用机械手夹持准确放入对应模具定位销钉中。

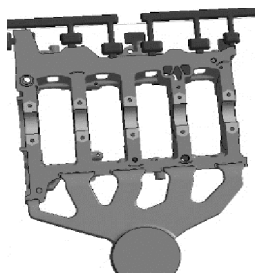


图 2 下缸体浇排系统

Fig.2 Pouring and exhausting system for lower cylinder block

该下缸体主要的缺陷为缩孔和泄漏,并且缩孔和泄漏缺陷为同一位置的两种不同表现形式。通过 XG-160S T/C 型 X 光机检验观测,缩孔集中于浇口对侧的镶嵌件后部,该部位局部厚度为 22 mm(见图 3),缩孔呈弧形弯折卷曲在第 3 档后端部位,两点测距可知,该孔洞长度大于 20 mm,深度为 3 mm。后序加工该部位为直径 20 mm 的通风孔(见图 4),孔内表面存在明显的不规则暗黑色孔洞,肉眼可见该孔洞内表面粗糙,孔洞内壁呈现树枝状结晶铸造凸起;在显微镜下观察,该位置孔洞含有少量的内壁光滑白亮的孔洞,内表面近似球形,证实该部位的孔洞是以缩孔为主,还含有部分气

孔夹杂其中。

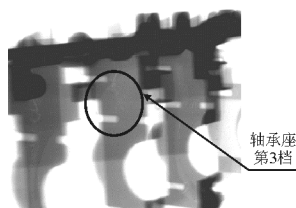


图 3 X 光检测缩孔
Fig.3 X-ray detection of shrinkage hole



图 4 加工后的缩孔
Fig.4 Shrinkage hole after machining

借助 Anycasting6.0 模拟软件进一步分析缩孔和气孔产生的原因,在填充过程中发现,铝液低速通过浇注系统以及鹰嘴式内浇口,进而高速向下填充靠近浇口一侧缸体模具型腔,随后合金液体冲击包裹 5 个铸铁镶嵌件,并在镶嵌件后端卷气产生涡流,在填充第 0.43 s(见图 5),有气体卷入铸件第 3 档末端,同时渣包入料口被封闭,气体不能通过排气道排出;在凝固分析过程中可知,铸件的凝固首先是以 5 个铸铁轴承座为核心向周边逐渐凝固,随后排气道及渣包以及浇口部位逐渐凝固,最后凝固位置存在于轴承座后端 20 mm 左右区域(见图 6)。该区域远离浇口,难以通过压射冲头增压补缩,凝固过程中无法得到有效的补偿,因而产生较多缩孔缺陷。由上述分析进一步证明,第 3 档的孔洞表现形式为缩孔与气孔的复合。

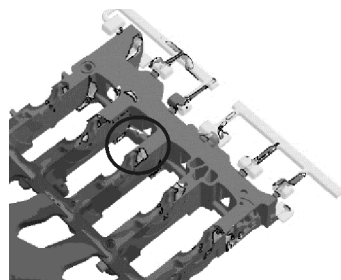


图 5 充型 0.43 s 的模拟结果
Fig.5 Simulation results of filling 0.43 s

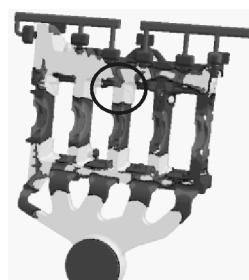


图 6 凝固 4 s 时模拟结果
Fig.6 Simulation results of solidification 4 s

3 局部挤压解决缩孔问题及相关参数研究

解决缩孔问题通常采用优化浇注系统及压铸工艺参数、合理布局冷却以及改进铸件结构等^[3]。当常规的技术手段不能达到理想的效果时可以考虑采用局部挤压技术。

局部挤压是在未完全凝固前,对局部施加较高的机械压力,使其成形和凝固,对局部缩孔(气孔)位置进行强制补缩从而使铸件达到品质要求^[4]。局部挤压需要考虑压铸模具挤压作用点、挤压力、压入体积以及挤压延时和挤压持续时间^[5],进而确定压杆的直径、油缸的尺寸等。

3.1 挤压力与挤压油缸

根据金属凝固原理,对于结晶时体积收缩的金属与合金,不论是匀质形核还是异质形核,增加压力,均能减小临界形核尺寸和形核功,有利于形核^[6]。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,油缸作用于挤压销钉的压力应大于铸造压力(60~100 MPa),挤压销钉才能运动;另一方面,挤压销钉的压力不必超过固态材料的抗压强度,过大的外部压力将使被挤压区域产生挤压裂纹等缺陷。根据经验,一般控制挤压力为铸造压力的3~4倍,选择铸造压力为90 MPa,有效系统油压为12 MPa。挤压力计算如下:

$$P_{\text{铸造}} = \frac{3P_{\text{系统油压}} D_{\text{挤压油缸}}^2}{D_{\text{挤压销}}^2} \quad (1)$$

式中, $P_{\text{系统油压}}$ 为设备使用的系统压力, 取 12 MPa; $D_{\text{挤压销}}$ 为根据挤压体积和模具空间位置确定的挤压杆直径, 取 15 mm; $D_{\text{挤压油缸}}$ 为所求挤压油缸活塞直径。计算得 $D_{\text{挤压油缸}} = 71.2 \text{ mm}$, 圆整后取油缸直径为 80 mm。

3.2 挤压体积

在压铸过程中,液态收缩、凝固收缩是铸件产生缩孔、缩松的基本原因;固态收缩则是铸件产生铸造内应力、变形及裂纹的基本原因^[7]。补缩的体积可以通过模拟分析软件中局部残余熔体模数作为参考,或者通过经验参数进行计算。对于 AlSi9Cu3(Fe)合金,局部挤压最佳温度区间为 550~570 ℃^[8]。在铸件开始局部挤压前温度为 550 ℃左右,材料密度为 2.6 g/cm³,局部挤压后其组织致密,如果没有补缩措施会产生 4% 左右的缩孔,并且缩孔截面往往呈现无规则的形态^[9]。结合缩孔的模拟分析,下缸体在浇口凝固后,镶嵌件后端尚未凝固的体积大约为 44 000 mm³,因而需要补充的材料体积为 1 760 mm³。

为确保挤压销工作稳定,一般取挤压销行程 L 与直径 D 之比为 $1.5:1 \sim 1:1$ 之间,比值越小挤压销稳定性越好,挤压销直径计算如下:

$$D_{\text{挤压销}}^2 = \frac{4V_{\text{挤压}}}{\pi L} \quad (2)$$

式中, $V_{\text{挤压}}$ 为补充材料体积, $1\,760\text{ mm}^3$, 计算得 $D_{\text{挤压销}} = 13\text{ mm}$, 根据实际空间大小并圆整得到挤压销直径为 15 mm , 得到挤压销行程同样设计为 15 mm 。挤压销的基本结构见图 7。

为保证生产的连续,在制造挤压销和套筒需要考虑组件的间隙和硬度。由于该部位承受 600 ℃ 以上的高温以及 270 MPa 的高压,过小的间隙使组件间摩擦阻力大,容易产生挤压销被卡滞在挤压套内,从而中断生产;反之,过大的间隙将导致铝液窜入挤压销与套筒之

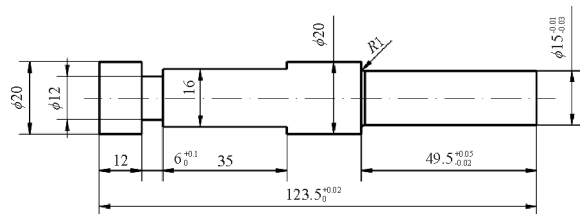


图 7 挤压销结构图

Fig.7 Structural diagram of extrusion pin

间,形成环状披缝,同样卡滞导致停机。由生产得知,0.04 mm左右的间隙数值较为合理,可以连续生产3 000~5 000件。

图 8 为挤压销运动过程,套筒前端与模具贴合的三个位置。由图 8a 可知,挤压前销钉前端与挤压套平齐,并与模具前端面距离 16 mm;由图 8b 看出,挤压销在挤压缸作用下向前运动 15 mm,使挤压杆与模具前端面保持 1 mm 距离。防止应力集中,模具前端面有圆角 R1,见图 8c,该挤压结构的优点为方便机械手对挤压区域喷涂防止过热,缺点是在铸件上产生环形凸台,需要后续机加工去除。

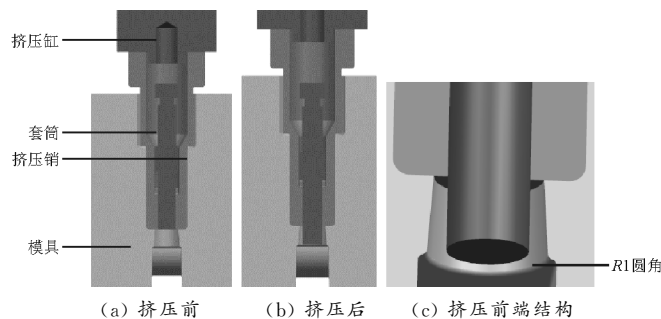


图 8 挤压销运动过程

Fig.8 Extrusion pin movement process

挤压后的铸件见图 9。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,横向剖切挤压点下方 0.2 mm 左右看到压痕,随着横向剖切深度的增加压痕逐渐减小直至消失,见图 9b。由此,挤压后的铸件保留 1 mm 的端面余量是合理的。

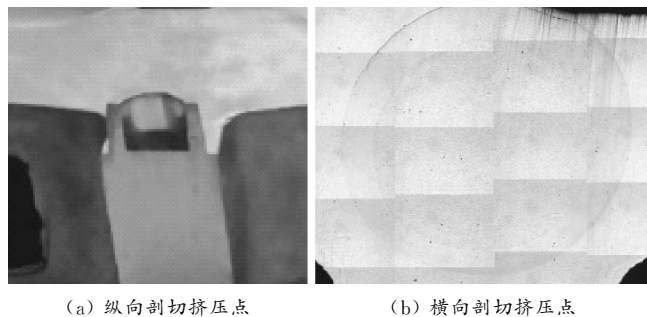


图 9 挤压后的铸件

Fig.9 Castings after extrusion

3.3 挤压时间

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。挤压延迟时间过早,金属液还处于流动状态,厚大部位并没有凝固结晶,导致挤压销变为型芯,无挤压效果;挤压延迟时间过晚,金属液凝固,在模具壁上形成坚硬的凝固层,导致挤压销受阻,无法补缩而不能实现增压效果(见图 10)。挤压销插入的最佳时机与被挤压部位的凝固状态和浇口补缩通道有关。借助凝固模拟分析可知,缩孔部位凝固过程缓慢,在填充结束后第 4 s 左右浇口区域凝固基本完成,无法对铸件补缩,调整延时参数,在第 2.6 s 发现挤压销压入深度不足 2 mm,而在第 2 s 开始挤压时在 X 光下可观测到清晰的缩孔缺陷,设定每 0.1 s 时间间隔调试 3 个产品,多次试验后确定挤压延时时间为 2.2 s(见图 11)。



图 10 挤压延迟时间 2.6 s
Fig. 10 Extrusion delay time 2.6 s



图 11 挤压延迟时间 2.2 s
Fig. 11 Extrusion delay time 2.2 s

挤压持续时间(duration)又称为保压时时间^[10]。挤压持续时间短,挤压杆过早的回退,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,则会导致完全冷凝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。在实际生产中,依据多次 X 光检测以及剖切检验,确定该产品的挤压持续时间为 6 s。

4 局部挤压的改善效果

依据上述分析结果对该压铸模具设计优化,模具选择 W403 钢,压铸机为 DCC 20000 kN 卧式冷式压铸机,配备抽真空和沃尔林编程喷涂。镶嵌件电阻加热箱,机械手自动安装。压铸时铝液温度保持在 $(665 \pm 15)^\circ\text{C}$,喷涂后模具平均温度为 $(200 \pm 20)^\circ\text{C}$,辅以水基涂料 SL-3188,压铸工艺参数见表 2。

表 2 压铸工艺参数
Tab.2 Die casting process parameters

料缸直径/mm	二级速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	铸造压力/MPa	挤压延迟 时间/s	挤压持续 时间/s	冷却时 间/s	镶嵌件 温度/ $^\circ\text{C}$
120	3.5	90	2.2	6	20	200

图 12 为带浇注系统的铸件毛坯。经生产验证,优化后的下缸体 X 光检验品质良好,无明显孔洞缺陷,见图 13,批量产品合格率大幅提高;同时在 AX-10 蔡司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 5% 左右,见图 14,满足项目要求。



图 12 铸件实物图
Fig.12 Actual product



图 13 优化后的 X 光图
Fig.13 X-ray detection

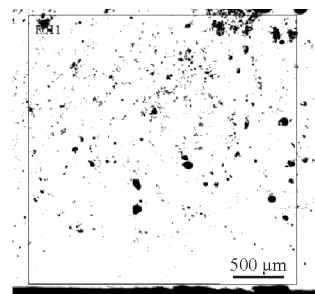


图 14 孔隙率为 4.48% 表面形貌
Fig.14 Surface morphology at porosity percentage of 4.48%

5 结 语

正确的使用局部挤压技术能消除缩孔、减小气孔;局部挤压技术需要确定挤压体积、挤压压力、延时时间以及挤压持续时间;借助模拟分析可确定局部挤压位置,根据收缩比以及材料影响区域体积计算挤压体积,进而确定挤压杆的直径与挤压深度;挤压压力的大小与铸造压力有关,进而确定挤压油缸直径;挤压延时时间和持续时间取决于材料处于固液共存时间。挤压延时时间为 2.2 s,挤压持续时间为 6 s。

参 考 文 献

- [1] 黄志垣,万里,孙永明,等.汽车发动机下缸体的压铸技术及品质控制[J].特种铸造及有色合金,2012,32(4):350-352.
- [2] 黄美莲,罗柏奎,李彬,等.汽车发动机铝合金下缸体的压铸模设计[J].特种铸造及有色合金,2019,39(4):398-401.
- [3] 朱洪军,侯丽彬.局部挤压技术在 MQ200 变速器壳体上的应用[J].铸造,2020,69(6):602-605.
- [4] 罗继相,赵利华,谢少庆,等.挤压铸造实用技术研究[J].特种铸造及有色合金,2005,25(3):150-152.
- [5] 邓建新,邵明,游东东.挤压铸造设备现状及发展分析[J].铸造,2008,57(7):643-646.
- [6] 吴树森,柳玉起.材料成型原理[M].北京:机械工业出版社,2017.
- [7] 田梅娟,坚增运,海瑞.Al-Si 合金凝固收缩率的研究进展[J].铸造,2020,69(10):1060-1064.
- [8] 高子威.局部挤压辅助 HPDC 成型降低发动机支架气孔缺陷的研究[D].杭州:浙江工业大学,2016.
- [9] 贾志欣,毛杰杰,李继强,等.局部挤压辅助提高压铸件质量的研究和应用[J].特种铸造及有色合金,2018,38(7):728-730.
- [10] 张志斌,高子威,柴国钟,等.局部挤压降低压铸发动机支架的气孔缺陷[J].特种铸造及有色合金,2017,37(10):1088-1092.

(编辑:张正贺)