6082 铝合金汽车法兰挤压铸造数值模拟 及试验验证

姜巨福,孔令波,黄敏杰,鄢璟

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院,黑龙江哈尔滨 150001)

摘要:对挤压铸造6082铝合金汽车法兰件进行了不同挤压铸造工艺参数的数值模拟,并预测 了缩松缩孔缺陷产生的位置。结果表明:各参数下的汽车法兰件充型完整,保压过程中由于 三个凸台对应的部位壁厚大,该处最后凝固;保压结束后,模具承压部位温度明显高于其他 部位,温度分布表现出不均匀性,在实际压铸过程中应当注意防护以免模具损伤。缩孔缩松 位置主要出现在三个凸台对应的厚壁位置,与温度场结果一致。成形试验获得了优良的铸 件,表明数值模拟结果准确、可靠。

关键词: 6082铝合金; 挤压铸造; 数值模拟; 缺陷预测

随着我国经济的高速发展,汽车已经成为人们生活中必不可少的交通工具。随 之也带来了严重的环境污染、能源短缺等问题,节能减排刻不容缓。汽车轻量化是 节能减排的有效方式^[1],可通过车身结构优化和选用轻质合金两个途径实现^[2],其中 选用轻质合金最为直接有效。近年来,纤维增强复合材料、工程塑料、铝、镁、钛 合金^[3-4]等优质材料已经得到广泛运用。在众多轻质材料中,铝合金以密度低、强度 高、耐腐蚀性强、加工性能优异、易于回收、比强度和比刚度高、可热处理强化等 优点^[5-6]受到广泛关注。

在成形工艺方面,挤压铸造作为一种绿色、短流程、安全可靠的绿色近净成形 技术,结合了铸造和锻造的优势,在工业生产中备受青睐^[7-9]。挤压铸造相对于液态 成形和塑性成形而言,具有工艺适应性强、工艺过程简单、生产零件具有可热处理 和微观组织致密^[10]等优点。如图1所示,挤压铸造可分为直接挤压铸造、间接挤压铸 造、复合液锻和智能液锻。可以用挤压铸造工艺成形的材料叫做挤压铸造材料^[11], 挤压铸造所用的材料主要为铸造铝合金,在锻造铝合金^[12]、镁合金^[13]、铜合金^[14]、 锌合金^[15]等金属材料中也有应用,其中铝合金应用最为广泛。



设置合理的工艺参数是提升挤压铸造成形件性能的关键因素。挤压铸造工艺参数包括浇注温度、模具预热温度、挤压压力、保压时间、浇注速度等^[16]。利用数值

姜 巨 福(1976-), 男, 博士后,博士生导师,主 要研究方向为轻合金及其 复合材料液态模锻(挤压 铸造)技术、合金及其复 合材料半固态加工理论与 技术、超大型新能源汽车 薄壁铝合金构件一体化压 铸模具与关键技术等。电 话:18746013176,E-mail: jiangjufu@hit.edu.cn

作者简介:

中图分类号: TG146.2; TG249.2 文献标识码: A 文章编号:1001-4977(2024) 03-0313-08

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB3404204);国家 自然科学基金(U2241232, U2341253和52375317)。 收稿日期: 2023-10-30收到初稿, 2023-12-25收到修订稿。

------ Vol.73 No.3 2024

模拟技术,可以提前预测缺陷存在形式^[17-18],以便改进 成形工艺方案,降低生产成本,缩短制造周期。

针对以上背景,本文以6082铝合金汽车法兰件为 研究对象,使用ProCAST数值模拟软件模拟挤压铸造 过程中的温度场、应力场变化情况进行可视化呈现, 对数值模拟结果进行系统分析,确定缺陷的种类、含 量及分布,阐释挤压铸造过程中法兰件的凝固特性, 对热节以及缩孔、缩松等缺陷分布进行预测,为试验 获得高质量成形件提供指导,能有效地降低生产成本。

1 6082铝合金汽车法兰充型与凝固 数值模拟

1.1 三维模型建立及网格划分

6082铝合金汽车法兰件三维模型如图2所示,为了 减少数值模拟过程中的计算量,只导入成形后的挤压



图2 数值模拟模具图 Fig. 2 Numerical simulation of the mold

铸件与对应的模具型腔,该操作不会对试验结果以及 精度造成干扰。

选择合理的网格尺寸可以兼顾计算精度和运算效 率^[19]。数值模拟的网格划分情况如图3所示,铸件外围 轮廓面取点间距设置为4 mm,部分突出且表面积较小 的区域取点间距减小至3 mm,模具内表面与铸件直接 接触部分网格取点间距设置为4 mm,外表面在达到精



图3 铸件及模具网格划分效果图 Fig. 3 Mesh division effect of casting and mold. 度要求的情况下划分为6 mm,以提升计算效率。体网格数量为209 728个,面网格划分数量为20 982个。

1.2 ProCAST 数值模拟软件参数设置

模拟利用Cast模块进行数值模拟参数设置,主要设置如下参数:

(1) 浇注金属液温度。浇注温度对铸件的微观组 织及力学性能和模具的寿命有显著影响^[20],合理的浇 注温度能确保成形过程中挤压压力有效传递^[21]。根据 前期DSC试验结果确定6082铝合金汽车法兰件液相线 温度为667.8 ℃,高于液相线温度20 ℃为挤压的合理浇 注温度,故本文设置680 ℃、700 ℃、720 ℃和740 ℃ 四个水平的浇注温度。

(2)模具预设温度。铝合金在挤压铸造成形过程
中,模具温度控制在200 ℃较为恰当^[22],故本文模具预
设温度为160 ℃、190 ℃、220 ℃和250 ℃。

(3)比压。本文数值模拟设计比压为30 MPa、 60 MPa、90 MPa和120 MPa四个水平,均在模具可承 受压力的安全范围内。

(4)保压时间。结合相关文献^[23]和本文成形件的 具体尺寸,选择25 s、30 s、35 s和40 s四个水平的保压 时间进行试验。

1.3 试验组方案设计

本文主要探究数值模拟过程中,浇注温度、模

具温度、比压、保压时间这四个挤压铸造工艺参数对 挤压铸造6082铝合金汽车法兰件在成形过程的影响规 律,采用控制单一变量法进行试验设计,数值模拟方 案如表1所示。

		10		
试验组	浇注温度/℃	模具温度/℃	比压/MPa	保压时间/s
1	680	220	90	30
2	700	220	90	30
3	720	220	90	30
4	740	220	90	30
5	720	160	90	30
6	720	190	90	30
7	720	250	90	30
8	720	220	30	30
9	720	220	60	30
10	720	220	120	30
11	720	220	90	25
12	720	220	90	35
13	720	220	90	40

表1 数值模拟方案 Table 1 Numerical simulation test program

2 6082铝合金汽车法兰挤压铸造数 值模拟结果分析

2.1 铸件保压凝固过程的温度场分析

图4为浇注温度720 ℃、模具温度160 ℃、比压 90 MPa、保压时间30 s时,凝固分数分别达到15%、 30%、60%和90%时铸件的温度场分布图。在铸件凝 固保温开始阶段,铸件外表面温度较均匀一致,在 606~633 ℃这一区间变动,铸件上端面外侧温度比上端 凸缘内外侧柱面转角温度低,主要是因为铸件上端面 外侧为上模和下模结合部位,上下模间隙导致在保温 过程中热传导较快。如图4b-e,温度主要呈现出从内部 到表层逐渐降低的趋势,是因为铸件筒壁和模具直接 接触,由前面的预设参数可知,模具温度远低于金属 液浇注温度,因此和模具贴合部分温度下降远快于铸 件内部。如图4f所示,对于铸件侧壁而言,三个凸台的 增加导致壁厚增加,凝固过程中需要更长时间散热, 因此内部位置可能产生热节^[24]。

图5为铸件保压凝固过程中凝固分数为30%、60% 和90%时剩余液相分布图。在金属液凝固过程中,由 于各处温度降低速率不一致,可能会导致金属液内部



Fig. 4 Cloud diagram of temperature field distribution of castings in different solidification states

形成固相骨架,这将严重阻碍金属液的流动过程,削 弱挤压压力对铸件的强制补缩能力^[25]。从图5可以看 出,在保压过程的初始阶段,凸缘上端部,上端面, 侧壁,底部等与模具直接接触的位置优先凝固,液相 主要集中连续分布在铸件内部。随着保压的进行,金 属液减少,并绕上端凸缘中心连续集中分布,此时补 缩通道尚未断开,压力传递良好。随着保压进一步进 行,当凝固状态达到90%时,剩余液相断开,分别分布 在侧壁凸起的位置和铸件下端主体筒形部分,补缩通 道关闭,成为孤立的液相区,该处极易产生缩孔、缩 松缺陷^[26]。

2.2 模具温度场分析

本文分析了13组铸件保压结束后的模具温度场分 布,温度分布规律基本一致,以5号数值模拟的结果为 例进行说明,如图6所示。保压结束后模具温度场呈现



Fig. 6 Cloud view of mold temperature distribution after holding pressure for test piece No. 5

不均匀分布,直接与金属液接触部位温度高于远离与 金属液接触的部位,并且模具外侧温度变化不明显。 凹模温度场以铸件为中心向高度方向的两侧呈递减趋 势。与铸件接触的部位温度场变化复杂,局部凸起的 棱角部位温度超过370℃,这是由于模具与金属液温度 差异过大造成的。从图6b-c中可以看出,对于凸模和顶 杆,主要承压的部位温度高于其他部位。在挤压铸造 过程中,压力能提高热量的传递效率,从而在保压阶 段,轴向压力大于其他方向的压力,故凸模和顶杆轴 向中心承压大于其他方向。在对模具的防护过程中应 该重点关注该部位,以免因为模具损伤而降低成形质 量。

2.3 铸件保压凝固过程的应力场分析

图7为5号件保压凝固过程中不同时间的等效应力 云图。保压时间10 s后,铸件上端筒底部内应力较大, 最大部位甚至超过140 MPa,其他部位等效应力大多 在70 MPa以下,此时整体凝固分数为83%。当保压20 s 时,铸件完全凝固,铸件上端筒底部和铸件下端面压 力进一步增大,这些部位在成形过程中容易产生较大 的内应力。随着保压时间增加到30 s,此时压力已经扩 展到整个上端凸缘及下方筒壁的内侧区域,保压过程 完成,整个铸件的平均等效应力为83.14 MPa。



如图8所示,进一步分析了数值模拟的5号件保压 结束后的等效应力情况。可以看出,等效应力主要集 中分布在上端筒壁内侧,上下筒壁连接处等效应力最 大,超过了350 MPa。主要是该部位厚度较小,凝固速 度快,保压阶段一直受到很大的应力,相比其他部位 更容易产生裂纹缺陷。该处因挤压铸造需要进行了填 充,后续将机械加工为通孔,因此,该处若产生缺陷 对主体部分影响不大。

2.4 铸件缺陷分布预测

图9为数值模拟5号件在保压阶段可能出现的缺陷

分布图。由图9可以看出,缺陷主要分布在成形件的上 端面外周区域以及下方主体筒形部分中与侧面的三个 凸耳相对应的区域,这与前文在保压凝固阶段利用温 度场预测缺陷位置的结果吻合。分布在上端面外围主 要为孔隙度≤10%的缩孔缩松缺陷,这是铸件较早凝 固的部位,金属液很难填充到该处,所以容易产生缺 陷。在铸件下方主体筒部与侧面三个凸耳对应区域显 示出了严重的缺陷,这是因为该处壁厚大,变形抗力 增大致使压力传递效果不明显^[27-28],成形过程中应重点 关注。



2.5 成形工艺参数的选择

图10为不同浇注温度、模具温度和比压下金属 液的凝固时间变化图。可以看出,凝固的总体时间 随着浇注温度和模具温度的增加都显示出增加的趋 势。在浇注温度为680~740 ℃时,铸件的凝固时间为 18.34~21.12 s,整体变化幅度不大(图10a)。这一结 果主要受到热量传递的控制,升高温度势必增加整个 凝固时间^[29],但是由于模具和外界温度保持不变,金 属液温度和模具与外界温度差变大,使得保压过程中 冷却速度加快。图10c表明凝固时间随比压的增加而降 低,主要是因为压力增加使得成形件与模具之间的换 热条件发生变化,热传导速率加快使得铸件温度降低 速率提高。

图11显示了不同浇注温度和模具温度水平下,试 验件的平均等效应力变化情况,其中试验件的比压均 为90 MPa,保压时间为30 s。可以看出保压阶段结束 后,试验件的平均等效应力随着浇注温度的提高而增 大,随着模具温度的提高而减小。这是因为金属液与 模具表面温度差增大会使得铸件内外的冷却速率差异 增大,这导致铸件内外收缩率不一致而产生内应力。 提高浇注温度增加了温度差,而提高模具温度降低了 温度差,因此产生以上结果。





综上, 浇注温度一方面影响金属液的流动充填 能力, 另外一方面影响铸件的内应力和凝固时间。由 于浇注温度对凝固时间影响不大,为降低内应力的影 响,浇注温度确定为700 ℃。模具温度确定为220 ℃, 此时铸件具有较低的内应力。由于铸件完全凝固所需 最长时间为23 s,故保压时间确定为30 s,确保铸件完 全凝固的同时,能够达到强制补缩的目的。由于提高 比压对缩孔、缩松等缺陷的抑制效果非常明显,成形 的比压可直接设置为数值模拟过程的最高压力120 MPa 或者设置为液压机的最高压力。

3 挤压铸造试验验证

数值模拟结果可对成形试验进行指导,但其结果 的可靠性仍然需要用成形试验进一步验证。根据数值 模拟结果,选择最佳工艺方案:浇注温度700℃,模 具温度220℃,保压时间30s,比压147 MPa(液压机 的最大值)进行挤压铸造试验验证,获得成形件如图 12所示。可以看出,挤压铸造成形获得的法兰件表面 质量高,无明显的浇不足、缩孔、缩松和宏观裂纹等 常见缺陷。说明在此参数下,金属液充填平稳且补缩 良好,这与数值模拟结果十分吻合。这也说明,挤压



图12 压铸造试验件 Fig. 12 Squeze casting experimental parts

铸造作为一种优质的成形技术,在焊合孔洞,减少缩 孔、缩松等缺陷方面具有显著的优势^[30]。

4 结论

(1)保压过程中,温度场是以上端凸缘芯部为中 心向其他部位呈现温度逐渐降低的趋势。壁厚较大的 法兰件下端主体筒部位最后发生凝固。保压结束后, 模具各部位温度不一致,表现为凹模型腔的突出结构 以及冲头和顶杆的中心承压部位温度明显高于其他位 置,在成形过程中应该注意对模具的防护。

(2)软件预测的缺陷位置与凝固过程中对温度场的分析高度一致,即缩孔、缩松位置主要集中在侧面三个凸台对应的位置,成形时应当予以关注。

(3)成形试验结果表明,数值模拟参数设计合理,结果准确可靠。在实际生产中,浇注温度可设置为700℃,模具温度可设置为220℃,保压时间可设置为30 s,比压可设置为液压机和模具能承受的最大比压。

参考文献:

- [1] 马鸣图,李志刚,易红亮,等.汽车轻量化及铝合金的应用[J].世界有色金属,2006(10):10-14.
- [2] 范子杰,桂良进,苏瑞意.汽车轻量化技术的研究与进展 [J].汽车安全与节能学报,2014,5(1):1-16.
- [3] 陈志俊. 金属材料在汽车轻量化中的应用与发展 [J]. 中国金属通报, 2021 (3): 9-10.
- [4] 赵雨. 汽车轻量化材料及制造工艺分析 [J]. 内燃机与配件, 2021(16): 44-45.
- [5] 毕江,刘雷,张东生,等.铸造、快凝及增材耐热铝合金的研究进展[J].中国有色金属学报,2023,33(4):969-996.
- [6] DURSUN T, SOUTIS C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys [J]. Materials & Design, 2014, 56: 862-871.
- [7] 贾海龙,周文强,王思清,等.高性能挤压铸造铝合金研究进展[J].特种铸造及有色合金,2020,40(11):1187-1194.
- [8] 周鹏飞,贲能军,陆从相,等.挤压铸造Al-9.5Si-0.45Mg-(x)Cu合金组织和性能的演变[J].铸造,2022,71(11):1382-1388.
- [9] 邢书明,闫光远,鲍培玮,等.挤压铸造高品质大型结构件[J].特种铸造及有色合金,2021,41(2):133-138.
- [10] MENG F, LIN B, FAN J. Status and prospects of indirect squeeze casting technology [J]. Advanced Materials Research, 2013, 634– 638: 2885-2888.
- [11] 邢书明. 挤压铸造合金材料及其工艺性能 [J]. 铸造, 2015, 64 (7): 628-631.
- [12] 邢书明,邢若兰.液态模锻(挤压铸造)技术研究与应用进展 [J].常州大学学报:自然科学版,2021,33 (5):1-7.
- [13] 肖泽辉,罗吉荣,吴树森,等.镁合金挤压铸造成形的研究[J].铸造,2003 (9):672-674.

320 11 10 FOUNDRY 轻合金凝固技术专题

- [14] 洪慎章,曾振鹏.挤压铸造比压对铜合金阀体性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2000(S1):43-45.
- [15] SAVAS M A, ALTINTAS S, ERTURAN H. Effects of squeeze casting on the properties of Zn-Bi monotectic alloy [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 1997, 28 (7): 1509–1515.
- [16] 刘筱,朱必武,李落星,等.基于数值模拟的铝合金汽车行李箱盖内板挤压铸造 [J].铸造技术,2017,38(2):445-447.
- [17] 许若震,姜银方,孟祥豹,等.汽车前副车架挤压铸造数值模拟研究 [J]. 热加工工艺,2016,45(21):94-96.
- [18] 王迎春,谢敏,赵诚,等.阀座挤压铸造计算机数值模拟[J].铸造,2005(7):698-701.
- [19] 李道忠. 汽车结构件半固态流变挤压铸造成形工艺研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [20] 李海涛,范建磊,罗宗强,等.浇注温度对挤压铸造Al-Li-Cu合金微观组织和力学性能的影响 [J]. 热加工工艺,2015,44(5):15– 18.
- [21] 汪先送,程佩,林波,等.工艺参数对挤压铸造Al-4.80%Cu-0.44%Mn合金显微组织的影响[J].铸造,2012,61(9):998-1002.
- [22] 李明星. 大壁厚差复杂形状铝合金挤压铸件局部加压成形研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2021.
- [23] 邢书明,鲍培玮,于佰水,等.挤压铸造工艺参数的设计准则[J].特种铸造及有色合金,2015,35(6):576-579.
- [24] 陈席国. 液态模锻铝合金轮毂温度场与应力场数值模拟 [J]. 铸造, 2012, 61(11): 1331-1335.
- [25] GOURLAY C M, DAHLE A K. Dilatant shear bands in solidifying metals [J]. Nature, 2007, 445 (7123): 70–73.
- [26] 洪涛,王东方,华逢志.铝合金轮毂挤压铸造工艺参数优化 [J].铸造技术, 2020, 41 (12): 1160-1164.
- [27] 黄海峰,王东方.轮壳挤压铸造数值模拟与设计优化 [J].中国铸造装备与技术,2022,57(4):81-85.
- [28] 张东生,李世德,徐佐,等. A356铝合金轮毂低压铸造数值模拟以及组织与力学性能 [J]. 中国有色金属学报,2023,33(6): 1720–1731.
- [29] 牛晓峰. 镁合金挤压铸造过程数值模拟技术研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- [30] RAGATHI P, ELANSEZHIAN R. Mechanical and microstructure behaviour of aluminum nanocomposite fabricated by squeeze casting and ultrasonic aided squeeze casting: A comparative study [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 956: 170203.

Numerical Simulation and Experimental Validation of Squeeze Casting 6082 Aluminum Alloy Automotive Flanges

JIANG Ju-fu, KONG Ling-bo, HUANG Min-jie, YAN Jing

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin150001, Heilongjiang, China)

Abstract:

The numerical simulation of 6082 aluminum alloy automobile flange under different squeeze casting process parameters was carried out, and the location of shrinkage defect was predicted. The results showed that the flange parts were completely filled under each parameter. During the pressure holding process, the corresponding parts of the three bosses were large wall thickness, which finally solidified. After the end of the pressure holding, the temperature of the pressuredregion of the mold was significantly higher than that of other region, and the temperature distribution showed uneven. Attention should be paid to avoid mold damage in the actual process. The shrinkage and dispersed shrinkage mainly appeared in the thick-wall position corresponding to the three bosses, which was consistent with the temperature field results. Excellent castings were obtained from the forming experiments, indicating that the numerical simulation results were correct and reliable.

Key words:

6082 aluminum alloy; squeeze casting; numerical simulation; defect prediction