● 特种铸造 Special Casting ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.12.015

铝合金轮毂挤压铸造工艺参数优化

洪 涛,王东方,华逢志
(南京工业大学 机械与动力工程学院,江苏 南京 211816)

摘 要:以铝合金轮毂为研究对象,对挤压铸造充型和凝固过程进行数值模拟分析。挤压过程中金属液充型不平稳,将产生卷气和涡流等现象,且在轮毂中心和轮辋处易产生缩松和缩孔。在此基础上,对浇注系统进行改进和工艺参数优化,并对优化后的参数进行数值模拟。结果表明,金属液在充型过程中较为平稳,消除了缩松、缩孔等缺陷。

关键词:铝合金轮毂;挤压铸造;数值模拟;工艺参数优化

中图分类号:TG249 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2020)12-1160-05

Numerical Simulation and Optimization of Squeeze Casting Process Parameters of Aluminum Alloy Wheel Hub

HONG Tao, WANG Dongfang, HUA Fengzhi
(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

Abstract: Taking aluminum alloy wheel hub as the research object, the filling and solidification process of squeeze casting was numerically simulated. In the process of extrusion, the metal liquid filling was not stable, which would lead to the phenomenon of air entrainment and eddy, and shrinkage cavity and porosity were easy to occur in the hub center and rim. On this basis, the casting system was improved and the process parameters were optimized, and the optimized parameters were simulated numerically. The results show that the filling process of liquid metal is relatively stable and the defects such as shrinkage cavity and porosity are eliminated.

Key words: aluminum alloy wheels; squeeze casting; numerical simulation; process parameter optimization

目前,汽车轻量化已经成为一种必然趋势。汽车工业是国民经济的支柱产业,对国民经济的带动作用十分明显,汽车工业的发展对国民经济的直接影响达 1:7,间接影响达 1:20。目前我国的汽车工业正在进入成长期,其高速发展的势头至少要保持 5~10 年。到 2010 年,我国乘用车千人保有量将从目前的 7.4 辆提高到 27 辆,2005 年商用车需求约 187 万辆,年平均增长率为 5.1,2010 年商用车总需求量为 235 万辆。因此,未来 10~20 年是我国汽车工业大发展的时代;就汽车轮毂而言,市场容量也以极大的速度增长着,2006 年欧美轿车轮毂市场约为 12 000 万只,中国市场约为 1 800 万只;客车轮毂市场中国约为 100 万只,轻型卡车轮毂全球市场约 11 000 万只,市场的年平均增长量估计在 15%左右,由此可见汽车轮毂市场前景广阔[1]。

收稿日期:2020-09-22

作者简介:洪 涛(1993-),安徽马鞍山人,硕士生.研究方向:CAD/CAE技术及机械系统集成设计.
E-mail:hongtao199308@163.com

通讯作者:王东方(1961-),江苏南京人,教授,硕士,硕士生导师.研究方向:CAD/CAE 技术及机械系统集成设计.
电话:13851443648,Email:njut_wdf@163.com

铝合金轮毂低压铸造工艺,能实现层流充填、无气孔,可通过热处理提高其力学性能,但该法冷却速度较慢,晶粒较为粗大,生产周期长,且在综合力学性能上很难获得更大的提高[2,3]。挤压铸造是一种低速充填、高压结晶的铸造工艺,该工艺充型速度相对较小,补缩作用较强,合金与铸型间的传热系数较大,生产出的铸件晶粒细小,缺陷(缩孔、缩松、气孔)较少,且生产效率较高,通过热处理可更进一步提高材料的综合力学性能,减轻轮毂成品质量,节约能源[4-7]。

本文以汽车铝合金轮毂为研究对象,采用一模一件挤压铸造工艺。利用 UG 建立了带有压室和浇注系统的铝合金轮毂三维模型,应用 PROCAST 对其铸造过程进行数值模拟,对充型凝固模拟结果进行分析,并且预测铸件中有可能产生的缩孔缩松的位置以及出现这些缺陷的原因。依据模拟的结果以及缺陷产生的原因,采取结构工艺改进以及工艺参数优化,消除缺陷,同时提升其力学性能。

1 预处理

1.1 网格划分

根据轮毂的结构要求,采用中心浇注式的浇注

方法，应用 UG 软件，在铝合金轮毂铸造毛坯上增加初始浇注系统，建立带浇注系统的铝合金轮毂的三维模型，同时建立铝合金轮毂挤压铸造的模具、砂箱、压室、冲头等的三维模型建立的模型如下图 1 所示。

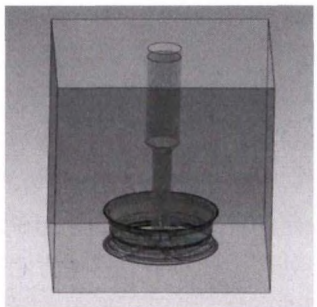

图 1 铝合金轮毂模型(带浇注系统)
Fig.1 Aluminum alloy wheel model (with gating system)

在 UG 中完成模型的建立以后，以 IGS 格式导出，并将其导入 PROCAST 中 Visual mesh 模块中进行网格的划分，进行参数设定及模拟计算。

1.2 参数设置

当用于铸造数值模拟计算时，材料性能参数的设置将直接影响模拟计算结果的准确性。挤压铸造铝合金轮毂的材料为 A356，主要化学成分如表 1 所示，物理参数如表 2 所示。模具采用金属型模具，其材料和冲头的材料均为 H13 模具钢。

表1 A356 铝合金的化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of A356 aluminum alloy

Si	Mg	Ti	Fe	Mn	Cu	Zn	Al
7.50	0.45	0.20	0.12	0.05	0.01	0.50	余量

表 2 A356 铝合金 710 ℃的热物理参数
Tab.2 Thermophysical parameters of A356 aluminum alloy at 710 ℃

密度 /kg·m^{-3}	液相温度 /℃	固相温度 /℃	潜热 / kg·J^{-1}	导热系数 /W·m·K^{-1}
2 435	614	543	432	2 000

1.3 挤压铸造的工艺参数设置

挤压铸造的主要工艺参数有挤压速度、保压时间、保压压力、浇注温度以及模具的预热温度等。原始工艺方案中的参数如表 3、表 4 所示。

表3 现在的铝合金轮毂挤压铸造工艺参数
Tab.3 Current process parameters of aluminium ally wheel squeeze casting

挤压速度 /m·s^{-1}	保压压力 /MPa	保压时间 /s	浇注温度 /℃	模具温度 /℃
0.6	80	40	680	200

表 4 现在的铝合金轮毂挤压铸造冷却系统参数
Tab.4 Current process parameters of aluminium ally wheel squeeze casting

冷却管编号	冷却管道直径 /mm	长度 /mm	冷却介质	流速 /m·s^{-1}	开始时刻 s	结束时刻 s
1	50	100	水	8	20	120
2	50	100	水	8	20	120
3	50	100	水	8	20	120
4	50	100	水	8	20	120
5	50	100	水	8	20	120

2 数值模拟与原过程分析

铸件在充型过程中，金属液流动产生的湍流或导致卷气夹杂。由于凝固过程中会因为补缩不足产生缩孔缩松。因此，通过充型凝固模拟可以准确的再现金属液的填充和凝固。在模拟的过程中，对夹杂、缩孔、卷气等缺陷的预测是显而易见的，这是非常重要的。在充型过程中，由流速和方向产生的变化，严重程度可以初步确定浇注系统设计的优缺点以及可能的缺陷。在凝固过程中，如果铸件产生孤液相区，则可以准确预测液相岛区的位置以及可能会产生的缺陷，凝固完成后可以预测缺陷位置和大小。

2.1 充型和凝固结果及分析

原始工艺的充型过程如图 2 所示。当充型时间为 t=1.06 s 时，铝液充型不平稳，浇注液体分布不均匀，四条轮辐中的浇注的金属液量不相同，产生了卷气现象。如图 2(a)中圆圈所示，容易产生气孔、夹杂等缺陷，对铸件质量产生一定的影响；当浇注时间为 t=1.69 s 时，铝液的液面产生了飞溅现象，如图 2(b)

(a)t=1.06 s　(b)t=1.69 s　(c)t=1.85 s

图 2 不同浇注时间下充型过程的温度场
Fig.2 Temperature field of filling process under different pouring time

所示，很容易使铝溶液的表面氧化膜破裂，容易引起氧化夹渣的缺陷会影响铸件的质量；当浇注时间为 t=1.85 s 时铝液充满整个铸件型腔。由图(2)c 可知，整个挤压充型过程中铝液的最低温度都高于液相线温度，这就说明整个挤压过程中铝合金金属液具有良好的流动性。这说明选取的金属液温度和模具预热温度是合理的，但是，由于挤压速度比较快、浇注系统设计的不合理，导致了一些缺陷的产生，例如卷气、夹渣等。

充型完成后，由于轮毂中心处是整个挤压充型的通道，温度约为 680 ℃，而较高处的轮辋边缘温度约为 610 ℃，说明温差较大，构建的温度梯度较好，利于对轮毂中心厚大处进行补缩。如图 3 为铝合金轮毂铸件凝固过程固相率分布。铸件轮辋边缘处开始后向轮毂中心处凝固，最后凝固的是浇口和压室，铸件边缘处设有集渣槽，利于挤压充型过程的集渣和排气，并对轮辋边缘处起到一定的补缩作用。但是，由于挤压铸造挤压成型时间短，压室和直浇口的设计不合理，导致铝液在充型到铸件时铝液充型不平稳，产生了涡流卷入了气体，容易使得铸件产生气孔和夹杂的的缺陷。

原始工艺铸造凝固工艺的固相比分布如图 3(a)所示。铸件从轮辋最高点开始向轮毂中心处凝固，最终凝固区是浇口和压室，铸件轮毂周边没有设置集渣槽，不利于铸件挤压过程中的排气和集渣，并对轮辋处的缩孔没有一定的补缩作用。如图 3(b)中 1 处所示，轮毂与轮辋交接处产生了热节，这里肯定会有缩松缩孔的产生。从图 3(c)中 2 处可以看出，零件(主要是指浇口和轮毂中心厚大处的区域)的凝固填充率较低，容易产生一定的缩松缩孔。由于轮毂中心处距离冲头较远，轮毂中心处的壁厚较大，没有得到及时的补缩，冲头的补缩能力受到距离的限制，补缩效果较差。

(a)t=3.2 s　(b)t=5.8 s　(c)t=11.2 s

图 3 不同时间下的凝固过程固相率

Fig.3 Solid phase ratio during solidification at different times

铸件出现缩松缩孔的缺陷区域与固相区产生热节处一致，如图 4 所示。铸件中心的缩松缩孔严重影响了轮毂的力学性能，轮毂中心中具有安装孔，如若不缩小此缺陷，对汽车的安全驾驶存在一定的隐患。因此，需要进行工艺优化，消除该轮毂中心处的缺陷。

图 4 原始工艺方案的缩松缩孔分布

Fig.4 Shrinkage porosity distribution of original casting process

3 优化方案及仿真结果与分析

由图 1 可知，浇注方式为从轮毂中心内部浇注，浇注系统的直浇口高度过高，造成对轮毂中心厚大处部分地方的补缩能力减弱，导致了对该区域的部分区域没能得到及时补缩，易形成缩松、缩孔的缺陷。因此，对浇注系统进行改进，并对工艺参数进行一定的修正。浇注系统改进并增加了集渣槽，新的方案如图 5 所示。浇注的方式改为从轮毂中心外部开始浇注，与之前对比是将轮毂转了一个角度，将浇注系统距离轮毂中心距离缩短，同时还将

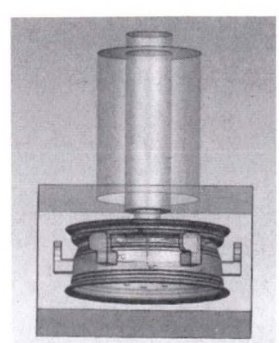

图 5 工艺优化后的三维模型

Fig.5 3D model after process optimization

冷却系统中开始时间延迟了 10 s，并在轮辋周围均匀分布设置了 6 个集渣槽，这样可以有效防止充型不平稳，挤压过程中产生的气体，通过集渣槽可以顺利将气体排除，并对其进行一定的补缩。

由以上充型过程分析可知，挤压时间比较短，对挤压速度进行调整，可以保证铝液在受到冲头挤压过程中能够平稳充型，可以实现低速、高压力。

3.1　充型和凝固过程的结果与分析

工艺优化的温度充型场如图 6 所示。工艺优化铝液受到冲头的挤压充型，如图 6(a)中 1 处所示，充型速度较为缓慢，实现了平稳充型，解决了原始工艺中涡流卷入的气体的问题，如图 6(b)中 2 处无液体飞溅的问题存在。如图 6(c)可知，金属液在受到挤压的过程中，液面最低温度均高于液相线温度，而且与之前原始工艺相比，金属液充满整个铸件后的温度比原始工艺充满后的温度要高出一些。这就表明金属液流动性比原始工艺中的更好，能够完全的被挤压到型腔中，说明浇注系统和挤压力参数的优化较为合理。

图 6 显示了工艺优化后的铸造凝固的固相率分布，实际充型的挤压速度为 0.5 m/s，充型时间约为 1.89 s，保压压力为 100 MPa，保压时间为 60 s，从铸件完全充型后开始加压，可以提升其力学性能。优化后的工艺参数如表 5 所示。

表5 优化后铝合金轮毂挤压铸造浇注工艺参数
Tab.5 Optimised casting parameters of squeeze casting cooling system for aluminium alloy wheel

挤压速度 /m·s^{-1}	保压压力 /MPa	保压时间 /s	浇注温度 /℃	模具温度 /℃
0.5	150	60	710	200

由上述凝固过程分析可知，采用原始冷却工艺参数时，铸件中轮辐与轮辋连接处出现了热节，说明原始的冷却系统存在一定的缺陷，需要进行一些改变，以减小产生热节处的大小，改善铸件的质量；对冷却工艺进行以下的改变：其他工艺参数不变，提高流速以及将冷却开始时间提前 5 s，优化后的参数如表 6 所示。

表6 优化后铝合金轮毂挤压铸造冷却系统参数
Tab.6 Optimised parameters of cooling system of squeeze casting cooling system for aluminium alloy wheel

冷却管路编号	冷却管道直径 /mm	长度 /mm	冷却介质	流速 /m·s	开始时刻 /s	结束时刻 /s
1	50	100	水	10	15	120
2	50	100	水	10	15	120
3	50	100	水	10	15	120
4	50	100	水	10	15	120
5	50	100	水	10	15	120

由图 7 凝固过程可知，采用原始工艺，轮辋中间处出现了几处缩松缩孔的缺陷，但是在轮辋周边均匀的分布了 6 个集渣槽以后，轮毂在凝固的时候能够有轮辋最高点顺利向轮毂中心和浇口处凝固，并且将轮辋产生的缩松缩孔顺利的移到了设置的集渣槽中，此外轮辋与轮辐连接处热节明显减小，得到了致密性能更好的铸件。轮毂中心厚度较大，所以凝固收缩较慢，这是完全符合凝固顺序，如图 7(c)所示。

工艺优化后的缩孔分布如图 8 所示，将轮毂中心处的浇口距离缩短，顺利的轮毂中心厚大处缩松缩孔转移到了浇道中，可以有效提升铸件的补缩能力。原工艺方案中，轮毂中心处的缩松已被消除，说明缩短轮毂中心与浇口和压室的距离，可以有效提升冲头对轮毂中心的补缩能力，有效避免铸件产生缩松、缩孔缺陷的可能；轮辐与轮辋接口处的热节部分也被冲头上的压力补缩消除了，轮毂中心处的缩松缩孔也被转移到了浇道中。但是，由于集渣槽设置在轮辋中间，两边上下的补缩、排气能力有限，所以轮辋最高处还存在一定的微观缩孔，铸造时减小该区域涂料厚度，可有效避免该处产生的缺陷。

(a)t=1.01 s　　(b)t=1.23 s　　(c)t=1.78 s

图 6 优化后不同浇注时间的充型温度场
Fig.6 Filling temperature field with different pouring time after optimization

(a)t=5.62 s (b)t=8.54 s (c)t=12.36 s

图 7 优化后不同时间下凝固过程固相率

Fig.7 Solid phase ratio during solidification at different times after optimization

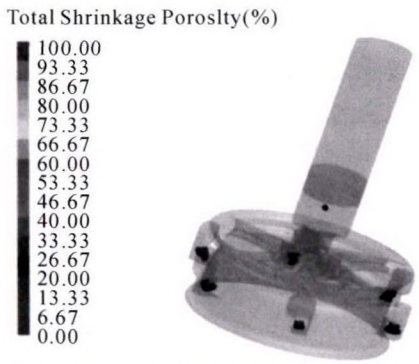

图 8 优化工艺方案后缩松缩孔分布图

Fig.8 Shrinkage porosity distribution after casting parameters optimization

4 结论

(1)利用数值模拟方法模拟铝合金轮毂挤压铸造的填充和凝固过程的温度、液相率和收缩孔隙率,预测轮毂中可能存在缺陷的位置,并对其原因进行分析,可为随后的工艺改进提供基础。

(2)通过对原始工艺方案的分析,提出对浇口和压室结构的改进、减小挤压速度增加保压时间以及在轮辋周边缘均匀分布 6 个集渣槽,该方案可以使铝液充型平稳,充型过程无气体卷入。铸件在凝固时从轮辋最高点(铸件最薄处)顺序向轮毂中心处凝固,并且将缩松、缩孔缺陷转移到集渣槽,消除了原始铸造工艺中存在的缺陷。

(3)采用数值模拟的方法对原始铸造工艺中存在的缺陷进行分析,并对工艺中存在的不合理处进行优化,可以有效的减少试制次数,减少生产成本,其优化后的结果表明,铝液充型平稳,铸件的缩松缩孔得到了明显的改善。

参考文献:

[1] 张立君,范云波,赵洁,等. 挤压铸造重型车辆铝合金轮毂组织和性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2020, 43(5):112-116.

[2] 苏大为. 铝合金汽车轮毂低压铸造过程的数值模拟及工艺优化[D]. 江苏大学, 2008.

[3] 白清华. 低压铸造大型壁厚不均铸件缩松的解决 [J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29(5):434-435,388.

[4] 冯喜瑞. 低压铸造在大型薄壁航空铝合金铸件上的应用研究[D]. 南昌大学, 2007.

[5] 齐丕骧. 挤压铸造技术的最新发展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2007(9):688-694,653.

[6] 罗继相,李敏华. 挤压铸件品质的综合控制[J]. 特种铸造及有色合金, 2006(11):715-718,677-678.

[7] 罗继相. 我国挤压铸造技术的回顾及展望[J]. 铸造, 2003(1):1-6.

(上接第 1159 页)

轮座铸件具有一定的强度和高度伸长率,要想生产出满足要求的齿轮座铸件,就必须设计合理的铸造造型工艺,严格控制其化学成分、合理的球化孕育处理工艺以及严格遵守浇注工艺。

设计合理的浇注系统、放置合格的冷铁、控制好浇注温度就能减少减轻齿轮座铸件出现夹渣缺陷的几率。

参考文献:

[1] 王尧. 高强度高塑性球墨铸铁车辆制动用杠杆的研制[D]. 芜湖:安徽工程大学, 2019.

[2] 郭双桥. 复合粉体对 QT400-18 力学性能影响的研究[D].大连:大连交通大学,2018.

[3] 柯志敏,陈鹏辉. 使用不同球化剂生产 QT400-18 渣灌的对比试验[J]. 铸造设备与工艺, 2018(2):27-29.

[4] 占连扬,刘柯,杨友杰,等. 球墨铸铁 QT400-18 的石墨球化率对超声声速的影响[J]. 无损检测, 2017, 39(11):36-38.

[5] 姜广杰. 高韧铁素体球墨铸铁组织及性能的研究[D]. 镇江:江苏科技大学, 2017.