

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.050

乘用车铸造铝合金车轮内轮缘开裂分析及优化

郭宙, 韩卫强

(北京新能源汽车股份有限公司, 北京 100176)

摘 要:某乘用车在整车耐久路试过程中发生车轮内轮缘开裂失效故障,通过对故障铝车轮生产制造信息进行追溯确认以及对故障件裂纹尺寸、材料、金相、内部缺陷进行分析,均排除制造过程的因素,明确缺陷裂纹是由于径向冲击过大产生微裂纹并逐渐延伸导致。从设计角度建模做 CAE 仿真分析,对内轮缘结构进行优化,提升耐冲击性能。优化后整车路试耐久试验顺利完成。

关键词:乘用车;铸造;铝车轮;内轮缘;裂纹

中图分类号:U463.34 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)06-0274-05

Analysis and Optimization of Inner Rim Crack of Aluminum Wheel of Vehicle Casting

GUO Zhou, HAN Weiqiang

(Beijing New Energy Vehicle Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract:For crack occurring near the inner rim of a certain vehicle wheel during the whole vehicle all-way condition testing, the cracked aluminum wheel manufacture information was traced and determined, information like crack dimensions, materials, metallographics and internal defects were analyzed, which excluded manufacturing process factors and specified the crack causes due to excessive radical impact and gradual extension. Modeling was conducted from design perspective for CAE simulation analysis, and inner-rim structure was optimized to enhance impact resistance performance. The whole vehicle all-way condition testing was smoothly accomplished after optimization.

Keywords:vehicle; casting; aluminum wheel; inner-rim; crack

0 引言

乘用车低压铸造铝车轮作为整车承载的重要结构件,承担着不同路况下正常行驶的重要功能,同时也承受着来自于路面和轮胎反馈的各向冲击力。近年来,国内纯电动汽车普及率越来越高,为了满足消费者的审美和舒适性需求,铝车轮轻量化技术和造型技术在铸造铝合金车轮行业体现得淋漓尽致,其表现主要有两方面:一是为了降低簧下质量,铝车轮质量控制得越来越轻,二是为了外观美学观感将铝车轮规格尺寸设计得越来越大(匹配的轮胎扁平率越来越低),主机厂与供应商在铝轮造型和性能优化方面不遗余力。受铝轮尺寸增大及轮胎扁平率降低趋势影响,前后轮极易在受到路面异物或凹坑路况下高速冲击造成内轮缘局部变形及开裂问题^[1]。行业内应对铝轮轮缘开裂有多重应对措施:一是从内轮缘及轮辋内胎圈座部位的尺寸和结构优化来提升内轮缘区域冲击强度来改善^[2];二是从避免过度轻量化导致横

截面积过小的方向来预防轮辋和轮缘部位裂纹^[3];三是从工艺层面避免锻造过程中反复折叠产生折叠裂纹^[4];四是规避车轮次表面裂纹导致的耐久裂纹延展风险^[5];五是对于铝合金焊接车轮,采用填丝焊工艺对融合区及热影响区的河流状焊接裂纹进行了改善^[6];六是对于铸造铝合金车轮,采用优化冶炼、模具设计、铸造工艺参数来避免铸造裂纹^[7];七是对于锻压轮毂,通过优化棒材冶炼配料、熔炼和铸造工艺来规避锻造过程中产生中心裂纹缺陷^[8];八是通过添加纳米颗粒的方法,在铝合金车轮焊接过程中细化焊缝晶粒和降低焊接热裂纹^[9]。

本文基于某型乘用车 50.8 cm(20 英寸)低压铸造铝车轮在整车综合路况路试耐久阶段约 13 万 km 处发生右侧前轮内轮缘局部变形及开裂问题展开调查、分析及优化。依据追溯信息对故障件内部缺陷、裂口状态、材料成份、金相组织、力学性能及制造过程等因素进行综合调查,在排查了以上诸多因素之后,重新考虑结构强度是否有安

第一作者简介:郭宙(1985—),男,北京人,工程师,硕士,研究方向为汽车零部件质量管理, bcyxxycb@126.com。

全冗余设计,同时借鉴行业内常用设计结构,结合CAE结构仿真分析共同完成该产品的结构和强度优化工作。

1 故障件分析

故障车辆试验过程半载载荷,路况有高环路、城市路、城乡结合路、强化耐久路合计约133 000 km(其中城乡结合路90 000 km里程、试验场3 000 km强化里程、一般公路及高速40 000 km里程)。例行检查时发现右前轮胎亏气报警,继而发现该车右前轮毂内轮缘有变形和裂纹。故障件外观裂纹如图1所示,车轮失效区域裂纹清晰。

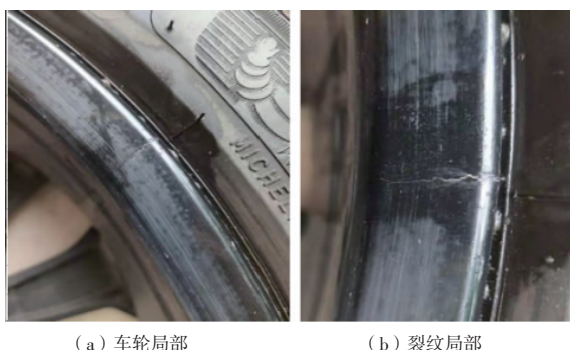


图1 车轮内轮缘裂纹位置

1.1 故障件外观检查

轮胎拆掉后,将故障右前车轮正反面及裂纹局部位置进行了取证,没有了轮胎胎唇的遮挡,轮缘裂纹愈加明显,如图2所示。外观检查可见,返回件内轮缘有一处未贯穿的开裂。开裂位置附近存在漆膜破损、铝基材露出情况。在开裂位置顺时针30°位置的漆膜破损,铝基材已损伤。正面由于轮辐的存在,强度较高未发现明显变形,背面(即内轮缘侧)整体观察,可发现车轮已经产生变形,圆度失真。

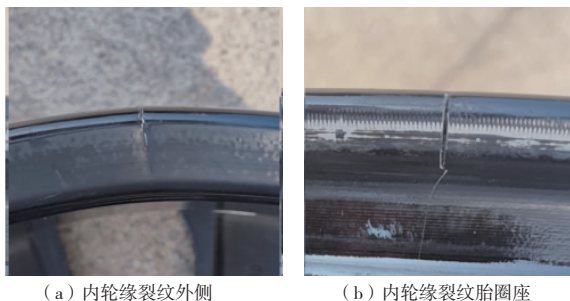


图2 去胎后车轮内轮缘裂纹位置

1.2 故障件内轮缘数据测量

由于故障车轮(右前车轮)内轮缘侧发生了肉眼可见的变形,故安排对内轮缘侧顺序取点测量内轮缘直径。以裂纹位置定义为0°点,每间隔30°取点过车轮中心点测量内轮缘直径。该铝轮内轮缘设计直径为 $547.8 \text{ mm} \pm 0.9 \text{ mm}$,具体测量数值如图3所示。

测量位置	测量结果/mm	示意图
图纸参考值	$\phi 547.8 \pm 0.9$	
0°(开裂)	$\phi 547.10$	
30°(铝基材损伤)	$\phi 545.76$	
60°	$\phi 547.30$	
90°	$\phi 548.62$	
120°/60°	$\phi 548.70$	
150°/30°	$\phi 547.20$	

图3 故障件内轮缘直径测量位置示意图

从测量数据可以看出,裂纹位置内轮缘直径已经靠近设计值的下限,距设计值缩小0.7 mm;距离裂纹点30°位置内轮缘直径已经降低到545.76 mm,距设计值缩小了2 mm;60°位置内轮缘直径缩小了0.5 mm。从以上数据判断撞击位置在30°位置,异常撞击导致0°~60°区域整体凹陷,向上90°基本恢复实件尺寸,向下-30°仍然未恢复,到-60°基本恢复实件尺寸。推测故障车轮30°位置在试验过程中遭受冲击变形,冲击力分别从30°开始向0°、-30°、-60°方向传导,0°位置由于冲击引发的内部撕裂力超过强度极限导致轮缘开裂。

1.3 X光内部缺陷探测

依据故障车轮追溯信息对其制程数据进行复核,该批次产品熔炼(化学成分、铝液密度)、铸造(X光)、热处理(过程性能)、机械加工(外观、尺寸)、终检(外观)符合要求,且全序生产无异常,无报警记录。对故障铝车轮按生产线X光检测程序要求再次进行检查,主要包括轮心位置、轮辐位置、轮辐根部、轮辋及轮缘区域,结果如图4所示。其中轮心、轮辐及根部、轮辋未发现超过缺陷评价标准的可见缺陷,但在内轮缘裂纹位置裂纹清晰可见。

1.4 裂纹电镜扫描分析

对故障件铝车轮裂纹位置取样做试样,分别在裂纹源头区域及扩展区域进行电镜扫描分析,结果如图5所示。

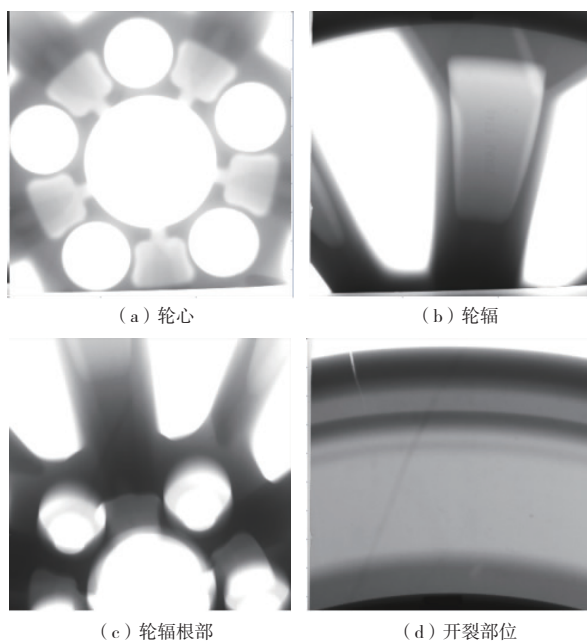


图4 故障件主要部位X光检查结果

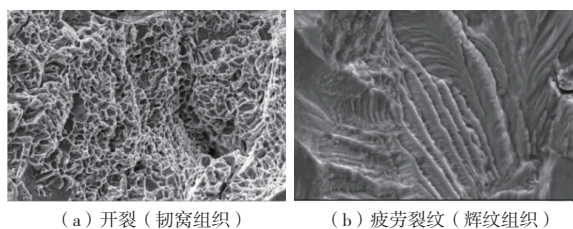


图5 故障件裂纹区域电镜扫描结果

在裂纹位置取样观察,裂纹源头区域存在由于撞击导致的韧窝状撕裂组织(图5(a)),而在裂纹尾部区域存在疲劳裂纹的辉纹扩散组织(图5(b))。从该结果可以分析得出,车轮在经过撞击产生撕裂裂纹后,尚未发生明显漏气,但随整车耐久试验继续进行一段时间后,裂纹发生扩展产生疲劳裂纹扩散现象。

1.5 材料成份及力学性能分析

故障铝车轮材质为 A356.2,为低压铸造用铝合金,光谱分析故障件材料成分及比例,结果均符合要求^[10];铝轮采用低压铸造工艺,热处理按 T6 标准执行,具体包括固溶、淬火、时效处理。T6 热处理结束后,内轮缘区域试样强度应满足以下要求:屈服强度不小于 180 MPa,抗拉强度不小于 280 MPa,延伸率不小于 8%;轮心硬度标准为 70~105 HB/W5/250。材料力学性能分析是评价铸造铝合金性能的有效手段,在铝液浇铸过程中内轮缘区域距离浇口较远,且壁厚较薄,极易在铸造过程中因铝液流动不畅或冷凝不均产生铸造缺

陷,因此力学性能分析极为必要。

通过对故障车轮内轮缘圆周方向取样(准确起见取 9 个试样)做材料力学性能分析,试样取样位置及检测结果如图 6 所示。从数据判定,内轮缘全部 9 个试样力学性能均满足要求。

测量位置	测量结果			示意图
	屈服/MPa	抗拉/MPa	延伸率/%	
标准	≥180	≥280	≥8	
1 (断口0°)	216	284	8.8	
2	215	286	9.7	
3 (90°)	214	286	10.9	
4	213	288	9.3	
5 (180°)	217	287	9.0	
6	216	283	9.6	
7 (270°)	216	283	8.7	
8	214	285	9.8	
9 (断口360°)	215	289	9.8	

图6 故障件内轮缘试样力学性能测试结果

1.6 金相组织分析

对故障铝车轮材质进行分析,同时观察同批次合格铝车轮金相实际状态,决定增加在相同车辆左侧未开裂车轮取样进行金相分析,制样标准按金相试验标准要求制作。金相判定合格标准: α -Al 基体组织呈现为枝晶细小而均匀,共晶 Si 球化呈细小颗粒分布于晶界处^[11]。对两种金相放大 200 倍观察,轮缘共晶 Si 变质效果优于 D 级。金相对比试验结果如图 7 所示。

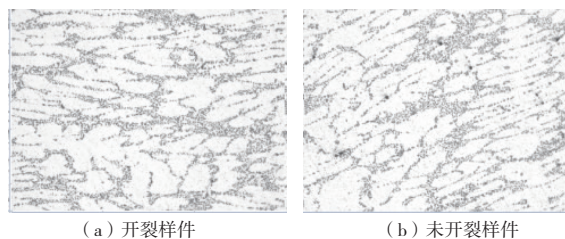


图7 故障件内轮缘试样金相组织

图 7(a) 为裂纹车轮试样金相结果,图 7(b) 为非裂纹车轮试样金相结果,两图对比差异较小, α -Al 枝晶细小,与共晶体均匀分布;共晶 Si 多数呈小圆颗粒状,少量呈小条块状,变质效果优于 D 级。经过评价,故障件试样金相与同批次合格件试样金相均满足要求。

经过对失效铝车轮进行全方位的取证及检测后,排除了材料、制程等因素对内轮缘裂纹产生的潜在影响。从失效铝轮内轮缘圆周直径测量数据可以推断,内轮缘结构设计存在薄弱之处,结构强度安全冗余量不足,需要从设计角度考虑对内轮缘尺寸及强度进行优化。

2 设计优化及仿真分析

乘用车轻合金车轮 90°冲击试验台架试验结果与实际车轮突然撞击异物结果接近,可以有效评价轮辋及内轮缘部位高速冲击异物的性能表现^[12],故对故障车轮建模做 90°冲击试验模拟仿真,试验标准参考国标《乘用车轻合金车轮 90°冲击试验方法》执行,冲锤质量 1 010 kg^[13]。该产品 90°冲击性能实验设计标准为:冲击后内轮缘变形量小于 5.8 mm,仿真结果如图 8 所示。

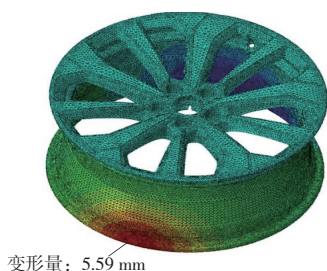


图 8 故障件车轮建模 90°冲击 CAE 仿真分析结果

从图 8 仿真结果看出,内轮缘变形量符合设计要求,但比较接近于设计变形阈值。考虑到实际路况存在比模拟试验更苛刻的情况,为了降低铝车轮在实际路况下的冲击失效风险,需要从产品设计角度重新设计提升内轮缘抗冲击强度。

2.1 结构设计预防

铝合金车轮内轮缘强度主要由内轮缘设计结构决定,对标行业内主流铝车轮内轮缘结构形式,主要包括两类,图 9(a)是断面单侧拐角设计(后称直耳结构),图 9(b)是断面单侧倾斜设计(后称斜耳结构)^[14]。从结构断面图可以看出,斜耳形式内轮缘断面面积明显比直耳结构更加充盈,斜耳结构抗冲击强度明显要比直耳结构高,降低了内轮缘部位加工应力^[15];同时斜耳结构造型优化有效减少内轮缘区域的铸造残余应力和塑性变形,在铸造过程中同步降低了裂纹风险^[16]。

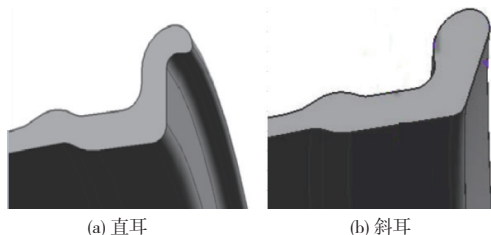


图 9 铝车轮内轮缘常见结构设计

经过对比决定选用斜耳内轮缘断面结构作为

基础方案。在此基础上对斜耳内轮缘局部尺寸进行再次优化调整。影响斜耳结构的相关尺寸主要有斜耳高度及斜耳宽度,如图 10 所示。

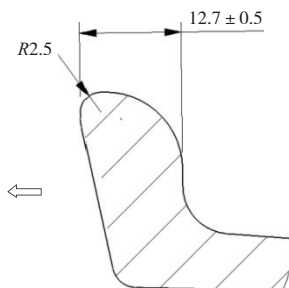


图 10 铝车轮内轮缘斜耳结构设计

从整车设计角度考虑,由于铝车轮整体尺寸已确定(参考国标选型及车轮装配要求),故无法对车轮径向尺寸进行调整,即内轮缘高度尺寸没有调整空间,只能对内轮缘宽度进行调整。由于内轮缘右侧为车轮与轮胎装配区域,且轮胎尺寸同样依据国标选型确定,故无法向右侧扩展,只能向外侧(图 10 箭头方向)加厚。从成本及整车性能综合考虑,最终确定在现有基础上将内轮缘宽度从 12.7 mm 向外加厚至 14.3 mm。

2.2 建模仿真分析

确定内轮缘结构设计形式及参数后,在此基础上重新建模做 90°冲击试验 CAE 仿真分析,冲锤质量 1 010 kg,冲击高度 170 mm,仿真结果如图 11 所示。

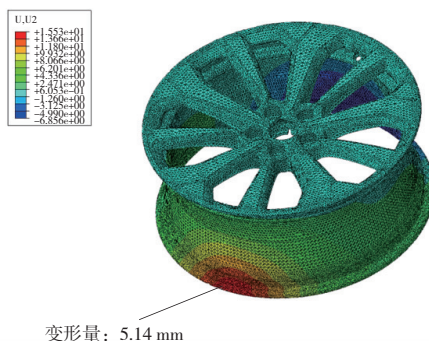


图 11 故障件车轮建模 90°冲击 CAE 仿真分析结果

由图 11 试验结果表明,冲击区域发生变形量 5.14 mm,较改善前 5.59 mm 变形量缩小了 0.45 mm,优化结果有效。立即对该 50.8 cm(20 英寸)铝轮铸造模具内轮缘区域按设计优化结构进行了修模,并随机选用 3 件新模具件进行了台架 90°冲击试验,冲击结果未发生漏气,未发现裂纹。安排车辆重新搭载优化后铝车轮按整车综合路试耐久

试验标准进行试验,最终圆满完成了全部综合路况耐久试验。

3 结语

本次综合路试耐久车辆铝车轮裂纹事故优化验证案例,结合多种检测工具对故障铝车轮进行了详细调查分析,排除了铝车轮材料及制程潜在失效因素;通过内轮缘结构优化及尺寸调整,采用斜耳型内轮缘结构,同时向外侧加厚了内轮缘厚度,最终优化后的铝车轮达成设计标准并通过了整车综合路况耐久试验验证。在车辆日常使用过程中,要极力避免车辆在高速情况下通过凹坑或者碾压异物行为,避免因异常冲击导致铝车轮内轮缘部位产生早期微观裂纹,杜绝因持续行驶引发疲劳裂纹及扩展导致漏气产生安全事故。在铝车轮生产过程中也要采用无损探伤技术来尽早发现缺陷产品,从而杜绝流入市场^[17]。

为了有效提高铝车轮内轮缘抗冲击强度,近年来国内已经开发出搅拌摩擦焊工艺的铝车轮,主要由 A356 铸造铝合金轮辐与 6061 型材卷绕焊接成形的轮辋采用搅拌摩擦焊而成,其中轮辋亦是采用搅拌摩擦焊工艺,将 6061 铝合金板卷绕焊接而成,内轮缘区域通过翻边卷绕工艺而成,内轮缘强度比传统铸造旋压铝轮或锻造旋压铝轮工艺都要高。搅拌摩擦连接技术作为一种新型固相焊接技术,与传统熔化焊接方法相比焊合件具备良好的力学性能^[18]。对于新能源汽车领域轻量化的极致追求目标,搅拌摩擦焊工艺铝车轮在保证铝车轮设计强度的基础上,更能有效降低铝轮质量,是汽车行业轻量化的有效途径之一^[19]。在应对轻量化趋势中,企业应该加强车轮早期裂纹失效监控。目前主流监控方式有以下几类,一是在 X-ray 扫描基础上通过机器视觉采集车轮裂纹特征来检测表面裂纹^[20];二是通过脉冲调频超声红外热像检测方法,其具有较大检测范围、结果直观等优点^[21];三是通过电涡流效应来实现对铝合金焊接车轮边缘实现裂纹检测^[22]。随着新技术应用越发广泛,未来产业中定会有更加简易、直观、高效的裂纹监控方法。

参考文献:

- [1] 赵玉涛. 铝合金车轮制造技术[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [2] 任志霞,王顺新. 低压铸造铝合金车轮设计要点[J]. 现代零部件,2013(5):70-73.
- [3] 张艳新,阿拉腾,金洪福,等. A356 铸造铝合金车轮轮

辐裂纹分析及改进方法[J]. 兵器材料科学与工程,2023,46(3):134-139.

- [4] 徐会文,李树林,张磊,等. 车轮轮辋周向裂纹原因分析[J]. 大型铸锻件,2020(5):41-42.
- [5] 魏云鹏,吴亚平,段志东,等. 车轮次表面裂纹力学特性分析[J]. 兰州交通大学学报,2019,38(3):58-63.
- [6] 朱江,张生庭,葛金波,等. 6063/6082 铝合金焊接裂纹分析及其填丝焊改善[J]. 金属加工(热加工),2025(1):44-50.
- [7] 唐和雍,伍尚生,韩春旺,等. 铝合金铸件裂纹缺陷分析及对策[C]//2024 重庆市铸造年会论文集. 重庆:重庆市铸造行业协会,2024:196-202.
- [8] 詹磊,何生平,郝海. 锻压轮毂用 6061 铝合金圆铸棒中心裂纹分析及改进[J]. 轻金属,2023(11):44-48.
- [9] 杨旭,张天理,朱志明,等. 纳米颗粒对铝合金焊接凝固裂纹抑制机理及影响因素的研究进展[J]. 材料导报,2025,39(6):183-192.
- [10] GB/T 23301—2024 汽车车轮用铸造铝合金[S].
- [11] 易有福,龙思远,徐绍勇,等. 低压铸造 A356 铝合金轮毂的微观组织和力学性能[J]. 特种铸造及有色合金,2008,28(5):373-375.
- [12] 刘振华. 汽车铸造铝合金车轮 90° 冲击试验对比分析[J]. 汽车零部件,2012(5):70-72.
- [13] QC/T 991—2015 乘用车 轻合金车轮 90° 冲击试验方法[S].
- [14] 李力重. 动力性试验失效模式下的低压铸造铝车轮内轮缘开裂的止裂设计[D]. 秦皇岛:燕山大学,2015.
- [15] 王顺新,王佳琦,朱利利. 铝合金车轮内轮缘开裂问题的研究和探讨[J]. 汽车工艺师,2022(10):53-56.
- [16] 曹学锋,朱大智,张少文,等. 铝合金车轮铸造裂纹研究[J]. 铸造,2022,71(9):1178-1181.
- [17] 郭晓亮,郭勇,姜鹏程. 车轮轮辋裂纹损伤检测装置的设计与实现[J]. 智慧轨道交通,2022,59(6):82-85.
- [18] 李泽阳,祝宗煌,左立生,等. 6061 铝合金盒体的搅拌摩擦封装温度场研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(1):10-13.
- [19] 中国汽车制造业搅拌摩擦焊技术应用[J]. 现代焊接,2011(7):24-25.
- [20] 蒲富鹏,赵军,安喆. 基于机器视觉的车轮裂纹识别与提取[J]. 铁道科学与工程学报,2018,15(8):2113-2122.
- [21] 张珊珊,宋英豪,王飞,等. 铝合金裂纹的脉冲调频超声红外热像检测方法[J]. 红外与激光工程,2025,54(1):166-176.
- [22] 高涛. 基于涡流效应的航空铝合金铆接结构裂纹检测方法研究[D]. 桂林:桂林电子科技大学,2023.

收稿日期:2023-11-23