商用车锻造镁合金车轮失效分析

王风雪 杨磊 张小庆 任浩 董壮壮 刘安辉

（中国重型汽车集团有限公司汽车研究总院，济南 250000）

摘要：为提升某商用车轻量化水平，以高强度镁合金为原料，通过锻造、热处理获得AZ80和AZ80-T6镁合金车轮。在整车道路试验中，AZ80-T6镁合金车轮通过验证，AZ80镁合金车轮发生开裂漏气，以最短失效里程的AZ80镁合金车轮为例进行失效分析。观察发现，裂纹沿着转动方向，靠近轮辋边缘。经化学成分、室温力学性能、金相扫描等材料理化检验发现，车轮锻造工艺正常，结合仿真强度分析镁合金车轮径向受力情况，发现AZ80镁合金车轮安全系数低于AZ80-T6镁合金车轮，强度不足是失效的主要原因，更换AZ80-T6状态镁合金车轮后通过道路试验验证。

关键词：镁合金车轮 高性能镁合金 商用车 失效分析

中图分类号：U465.11 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20260004

Failure Analysis of Forged Magnesium Alloy Wheels for Commercial Vehicles

Wang Fengxue, Yang Lei, Zhang Xiaoqing, Ren Hao, Dong Zhuangzhuang, Liu Anhui

(Sinotruk Automotive Research Institute, Jinan 250000)

Abstract: To enhance the light weighting level of a certain commercial vehicle, AZ80 and AZ80-T6 magnesium alloy wheels are produced using high-strength magnesium alloy as the raw material through forging and heat treatment. During the vehicle road test, the AZ80-T6 magnesium alloy wheels passed the verification, whereas the as-forged AZ80 wheels exhibited cracking and air leakage. Taking the AZ80 magnesium alloy wheels with the shortest failure mileage as an example, a failure analysis is conducted. It is observed that the cracks ran along the rotation direction and are close to the rim edge. Through material physical and chemical inspection such as chemical composition, room temperature mechanical properties, and metallographic scanning, it is found that the wheel forging process is normal. Combining with the simulation analysis of the radial force conditions of the magnesium alloy wheels, it is discovered that the safety factor of the AZ80 magnesium alloy wheels is lower than that of the AZ80-T6 magnesium alloy wheels, and the insufficient strength is the main cause of failure. After replacing the AZ80-T6 state magnesium alloy wheels in the road test, the verification is passed.

Key words: Magnesium alloy wheels, High-performance magnesium alloy, Commercial vehicles, Failure analysis

1 前言

商用车车轮数量多且承重大，是承载整车质量和传递动力的重要零部件，高性能车轮有助于减轻整车质量、提高载货质量。镁合金密度约为1.7 g/cm^3，钢的密度约为7.8 g/cm^3，采用镁合金车轮可减轻簧下质量、降低能耗，同时提升整车操纵性。镁合金车轮散热性能和减振性能良好，可降低制动系统过热风险和噪声，有效提高商用车制动性能和驾驶舒适性。

行业对镁合金车轮的关注逐渐增多，程大庆等[1]研究了镁合金车轮强度和耐腐蚀性能，发现镁

作者简介：王风雪（1994—），女，工程师，硕士学位，研究方向为有色金属材料应用。

参考文献引用格式：

王风雪，杨磊，张小庆，等. 商用车锻造镁合金车轮失效分析[J]. 汽车工艺与材料，2026(9)：12-18.

WANG F X, YANG L, ZHANG X Q, et al. Failure Analysis of Forged Magnesium Alloy Wheels for Commercial Vehicles[J]. Automobile Technology & Material, 2026(9): 12-18.

合金车轮的耐腐蚀性能还需进一步改善。董彬等[2]研究了锻压工艺对AZ80镁合金棒材的影响,结果表明,坯料加热温度优先选470 ℃,模具温度优先选350 ℃,模锻比优先选8。杨洋等[3]优化了锻造AZ80镁合金车轮热处理工艺,结果表明,415 ℃保温3 h、170 ℃时效5 h可获得最优的力学性能。兰文奎[4]研究了AZ80Ce镁合金锻造温度对试样显微组织和力学性能的影响,车轮用镁合金的始锻温度优选400 ℃,终锻温度优先选290 ℃。夏志东等[5]研究了镁合金车轮表面防护层与性能,结果表明,氟碳漆防护层在厚度、结合力和防腐蚀性能中表现优异。商用车的结构设计和大载重特点对镁材料的应用带来了一定限制,研究多基于乘用车且实际装车较少,本文对商用车锻造镁合金车轮的材料、工艺及设计验证,并对道路试验中开裂的镁合金车轮进行失效分析,经材料检测及仿真分析,重新装车后验证了镁合金材料在商用车车轮上的应用可行性。

2　镁合金车轮材料及生产工艺

2.1　镁合金车轮材料

商用车车轮在行驶过程中承受垂直负荷、横向力和驱动力,为保证镁合金车轮的性能,本文选用强度适中、塑性较高、商业用途广的AZ80镁合金材料,对镁合金成分进行优化,并结合T6热处理,制备了AZ80和AZ80-T6态的镁合金车轮。AZ80和AZ80-T6态车轮的主要成分一致,Al、Zn、Mn质量分数分别为8.2%、0.51%、0.125%,其余为Mg。按照不同状态将镁合金熔铸成直径约330 mm的铸棒备用。

2.2　镁合金车轮生产工艺

为保证镁合金车轮成型质量,需控制锻造温度区间、降低残余应力、优化变形参数、改善模具润滑条件。相反,车轮锻造温度不合理、金属流动不良、变形不均、残余应力过大等外部诱因会导致车轮开裂。

镁合金车轮使用锻造工艺生产,工艺流程如图1所示。当锻造温度过低时,镁合金变形仅限于基面滑移和锥面孪生,滑移系仅6个,成型性降低会产生脆性裂纹,当温度过高时,坯料会出现表面腐蚀氧化和晶粒粗大,坯料性能大幅下降[6]。镁合金铸锭使用台车式电阻炉,加热均匀,采用初锻与终锻结合,初锻将铸锭压制成饼状,翻转180°后,放入终锻模具中锻造。终锻采用2次压制,第1次压制中程,第2次喷涂脱模剂继续压制直至达到设定压力,车轮锻造成毛坯状再机加工成型。

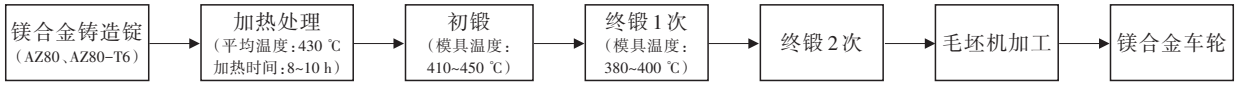


图1　镁合金车轮生产工艺流程

图2所示为镁合金车轮锻造生产过程。机械加工后镁合金车轮表面粗糙度R_a为2.2 μm,质量约为20 kg,商用车铝合金车轮质量约为25 kg,镁合金车轮比铝合金车轮轻20%。



(a)初锻　(b)终锻

(c)锻造毛坯　(d)成品

图2　镁合金车轮锻造生产过程

3　镁合金车轮性能

为验证镁合金车轮是否满足工程设计要求,进行了材料拉伸试验、车轮台架试验(包括动态弯曲疲劳试验及径向疲劳试验)、整车道路试验。

3.1　材料拉伸性能

拉伸性能测试采用毛坯取样,在图2c中镁合金车轮毛坯轴向A处、B处各取2个拉伸试样,分别命名为A-1、A-2、B-1、B-2,径向C处取2个拉伸试样,分别命名为C-1、C-2,拉伸采用电子万能试验机,拉伸试样尺寸如图3所示。镁合金车轮本体拉伸性能结果如表1所示,AZ80-T6镁合金车轮强度优于AZ80。由此可见,镁合金车

轮径向强度高于轴向强度，轴向下部强度高于上部。

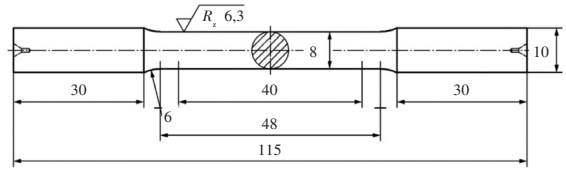


图3 拉伸试样尺寸

表1 镁合金车轮本体拉伸性能

取样位置	AZ80			AZ80-T6		
	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
A-1	114	272	11.1	134	292	7.9
A-2	112	269	11.2	156	293	5.2
B-1	146	310	14.2	171	331	8.9
B-2	148	310	14.4	175	336	8.2
C-1	182	313	12.9	241	347	9.4
C-2	181	314	13.5	236	348	12.8

3.2 车轮台架试验

按照GB/T 5909—2009《商用车车轮弯曲和径向疲劳性能要求及试验方法》，选择2种状态中性能较低的AZ80镁合金车轮进行动态弯曲疲劳试验和径向疲劳试验，车轮直径为22.5英寸，标准要求动态弯曲疲劳试验强化试验系数为1.35、最低循环次数为30万次，动态径向疲劳试验强化试验系数为2.0、最低循环次数为100万次。AZ80镁合金车轮动态弯曲疲劳试验额定载荷为4 125 kg，车轮循环150万次后开裂失效，动态径向疲劳试验额定载荷为3 750 kg，车轮循环旋转181万次后开裂失效，AZ80镁合金车轮满足GB/T 5909—2009中的试验要求。AZ80-T6镁合金车轮强度高于AZ80镁合金车轮，由此可判断AZ80-T6状态镁合金车轮亦满足台架试验要求。

4 镁合金车轮失效分析

4.1 失效背景

使用2种状态的镁合金车轮进行整车可靠性路试验证，路试车辆为某牵引车，驱动形式为4×2，可靠性路试里程最低要求为20 000 km。表2所示为不同状态镁合金车轮在路试中的表现，前桥AZ80-T6镁合金车轮验证通过，后桥AZ80镁合金车轮先后出现开裂，试验里程为5 395~12 271 km。后桥更换AZ80-T6镁合金车轮后通过路试，本文以失效里程（5 395 km）最短的镁合金车轮作为案例，进行失效分析。

表2 不同状态的镁合金车轮路试表现

车轮位置	车轮状态	路试里程/km	路试结果
前桥右侧	AZ80-T6	≥20 000	未失效，路试通过
后桥右内侧	AZ80	5 395	失效，路试结束
后桥左外侧	AZ80	11 610	失效，路试结束
后桥左内侧	AZ80	11 610	失效，路试结束
后桥右外侧	AZ80	12 271	失效，路试结束

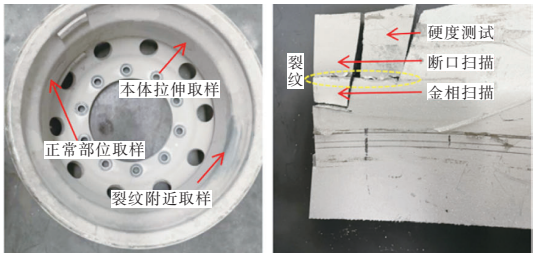
4.2 材料理化分析

在锻造过程中，若车轮局部变形量过大、变形速率过快或温度分布不均，会使车轮内部产生微孔洞、晶间微裂纹、穿晶裂纹及金属折叠等材料缺陷，这些缺陷在应力集中区域易形成先天微裂纹，在循环载荷和冲击载荷下不断扩展。为分析材料工艺、材料缺陷、承载力大小等因素对镁合金车轮失效的影响，对失效车轮进行材料理化分析。化学成分分析采用直读光谱仪（ARL 3460），拉伸性能测试采用电子万能试验机（Z250），扫描电镜采用赛默飞场发射扫描电子显微镜（Apreo 2s）。

失效的AZ80镁合金车轮裂纹沿车轮转动方向开裂，靠近轮辋边缘，与轮胎接触的外部裂纹长度约20 cm，内部裂纹长度约7 cm，内外贯穿导致车轮轮胎漏气。AZ80镁合金车轮开裂位置如图4所示，对失效镁合金车轮进行理化检测，对比裂纹处和正常部位材料，为保证检测结果的合理性，正常部位在轮辋底槽远离裂纹处取样。



（a）车轮外部 （b）车轮内部



(c)取样位置　　(d)检测项目

图4　AZ80镁合金车轮开裂位置

4.2.1　化学成分

车轮化学成分如表3所示,主元素在GB/T 5153—2016《变形镁及镁合金牌号和化学成分》范围内,化学成分正常,排除成分影响。

表3　AZ80镁合金车轮化学成分(质量分数)　%

元素	Mg	Al	Zn	Mn	Fe	其他
检测值	余量	7.80	0.61	0.18	0.01	≤0.05
GB/T 5153—2016要求	余量	7.80~9.20	0.20~0.80	0.12~0.50	<0.05	<0.30

4.2.2　力学性能

经检测,车轮平均硬度为73.4 HBW5/62.5/10。在失效AZ80镁合金车轮轮辋底槽处取5个本体拉伸试样,分别命名为L1、L2、L3、L4、L5,试样尺寸如图3所示,取样位置如图4c所示。AZ80镁合金车轮本体拉伸性能如表4所示,平均屈服强度为168.8 MPa,平均抗拉强度为284 MPa,平均延伸率为6%。

表4　AZ80镁合金车轮本体力学性能

编号	L1	L2	L3	L4	L5
屈服强度/MPa	172	162	161	187	162
抗拉强度/MPa	289	282	287	279	285
延伸率/%	7.0	5.5	6.0	5.5	6.0

由于镁合金流动性差,为防止车轮单次锻造成型变形量过大、变形速率过快,在轮辐、轮辋、圆角等流动困难区域形成剪切带、表面拉裂与内部撕裂,车轮轮辋部分采用整体锻造再加工,此时车轮成品性能与毛坯性能一致。如表4所示,车轮成品屈服强度高于毛坯轴向屈服强度(148 MPa),成品抗拉强度在毛坯抗拉强度范围(269~310 MPa)内,排除AZ80状态镁合金车轮锻造性能不足带来的影响。

4.2.3　微观组织

拉伸断口扫描可通过微观形貌判断断裂类型,定位裂纹源,指导材料设计和工艺优化。AZ80镁合金车轮拉伸断口扫描如图5所示,局部断裂表面具有平坦的小面状特征,在倾斜面上可见等轴的韧窝和细长的韧窝,具有典型的准解理特征,脆性Mg-Al相旁出现二次裂纹,推断随着车轮在路试过程中循环变形次数的增加,第二相周围的位错被重新激活,在拉伸试验中应力浓度急剧增加,导致颗粒与基体分离,最终促进二次裂纹的形成。

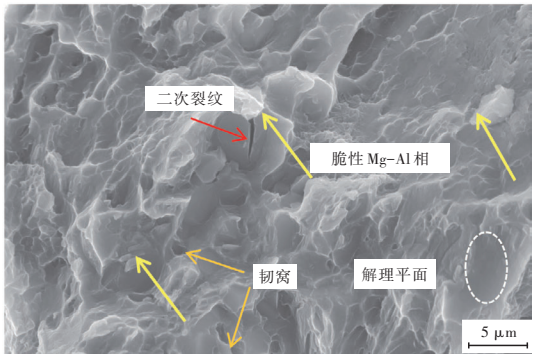
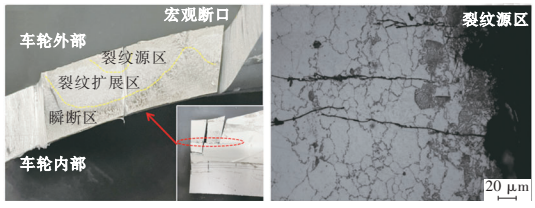
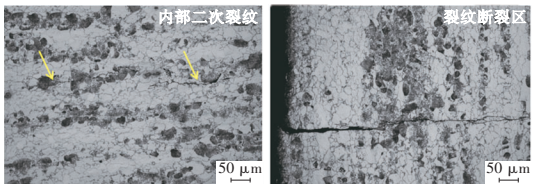


图5　拉伸断口扫描

失效镁合金车轮开裂处宏观断口如图6a所示,具有明显的疲劳裂纹特征,裂纹起源于车轮外部,在循环载荷的持续作用下经过裂纹扩展区,最终在瞬断区断裂,车轮内外裂纹贯穿,轮胎漏气失效。在锻造过程中,若因成分不均匀,温度、变形速率、模具润滑等工艺参数控制不当形成内应力及成型缺陷,在微观上等效于内部缺口,会成为裂纹萌生核心。图6b所示为裂纹源区金相图,可见沿着开裂方向一条裂纹始于车轮内部,两条裂纹始于车轮外部,裂纹长短不一,贯穿晶粒。图6c所示为裂纹扩展区金相图,内部存在微裂纹,靠近第二相沿晶界分布。图6d所示为裂纹断裂区金相图,裂纹长直贯穿晶粒及晶界,与车轮开裂方向一致,推断该车轮在行驶过程中受载过大,在服役中承受循环弯曲、扭转及冲击载荷,缺陷尖端产生高应力集中,材料内部沿晶界出现微裂纹,当循环受力达到极限后,微裂纹沿晶界或滑移面不断扩展,贯穿硬度较软的基体晶粒,形成长裂纹并导致最终开裂失效。



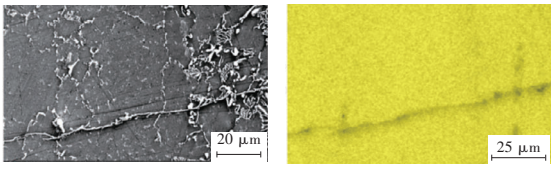
(a)宏观断口 (b)裂纹源区金相图



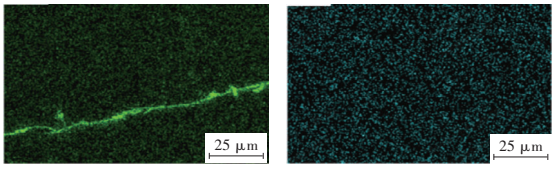
(c)裂纹扩展区金相图 (d)裂纹断裂区金相图

图 6 宏观断口及断口处金相图

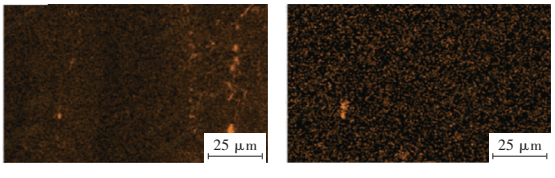
对裂纹源处进行面扫描，如图 7 所示，裂纹处含有大量氧元素，其他元素沿裂纹方向无明显特征，表明裂纹扩展使氧气进入后发生氧化，裂纹开启处无夹杂。



(a)裂纹源扫描图 (b)Mg 元素分布图



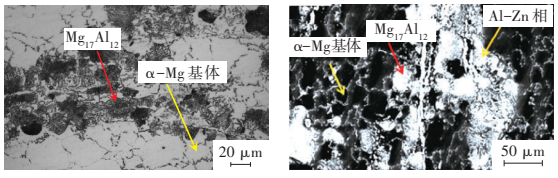
(c)O 元素分布图 (d)Zn 元素分布图



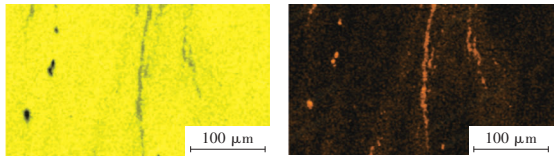
(e)Al 元素分布图 (f)Mn 元素分布图

图 7 裂纹源面扫描

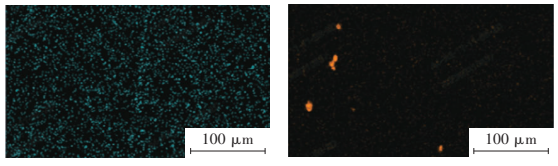
正常部位取样的金相和扫描电镜图如图 8 所示。图 8a 所示为金相图，灰色相为镁基体，黑色为 $Mg_{17}Al_{12}$ 相。图 8b 所示为扫描电镜图，图 8c~图 8f 分别为 Mg 元素、Al 元素、Zn 元素、Mn 元素面扫描图。扫描图中可见长条状的亮白色相，经面扫描判断为 Al-Zn 相，少量块状相为 Al-Mn 相，与失效部位的金相与扫描图一致，经材料理化分析后发现，AZ80 车轮金相、化学成分、力学性能合格。AZ80-T6 镁合金车轮强度较高，未发生开裂失效，需结合仿真进一步分析车轮在行驶过程中的受力情况，以判断材料过载是否为失效的主要原因。



(a)金相图 (b)扫描图



(c)Mg 元素面扫描图 (d)Al 元素面扫描图



(e)Zn 元素面扫描图 (f)Mn 元素面扫描图

图 8 正常部位金相和扫描电镜图

4.3 仿真强度疲劳分析

在路试过程中，失效 AZ80 镁合金车轮所有裂纹在径向位置与开裂方向上统一，均分布在车轮与轮胎座圈结合处且沿车轮转动方向开裂，因此，仿真重点关注径向载荷的影响，分析车轮单元应力与位移分布情况。在径向载荷强度分析中，车轮气压按照 1 MPa 均匀施加，车轮单元数约为 150 万个，单元平均尺寸约为 4 mm。

当车辆行驶时，径向载荷被视为车轮持续旋转产生的周期性载荷，建立径向疲劳有限元模型，将轮胎与轮辋产生的径向压力简化为余弦分布规律，因此，将常幅值的力载荷转化为余弦的压强载荷，基于 J. Stearns 的载荷分布模型[7]，车轮径向分布力与最大径向分布力的关系转化为：

$$W_r = W_0 \cos\left(\frac{\pi}{2}\frac{\theta}{\theta_0}\right) \tag{1}$$

式中：W_r 为角度为 θ 时，对应的车轮等效径向分布力；W_0 为等效的最大径向分布力；θ 为各加载面上的压力 W_r 与最大载荷 W_0 之间的夹角；θ_0 为径向分布载荷作用的最大偏转角。

对式(1)进行积分转换可得：

$$W = b\int_{-\theta_0}^{\theta_0} W_r r_b \mathrm{d}\theta \tag{2}$$

式中：b 为轮胎座宽度，r_b 为轮胎座半径。

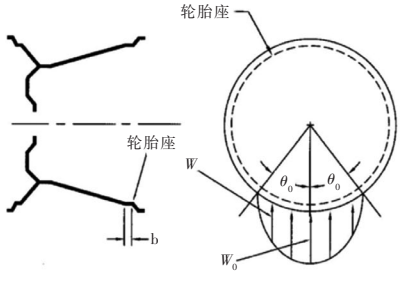
由式(1)、式(2)得:

$$W_0 = \frac{W\pi}{4br_b\theta_0} \tag{3}$$

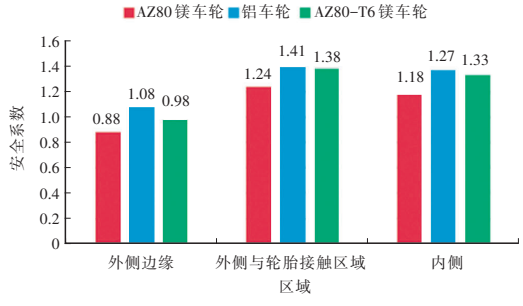
文献[7]指出,θ_0最大为40°,本文中θ_0=36°,则轮辋单侧施加的径向载荷为:

$$W=5.23\cos(2.5\theta) \tag{4}$$

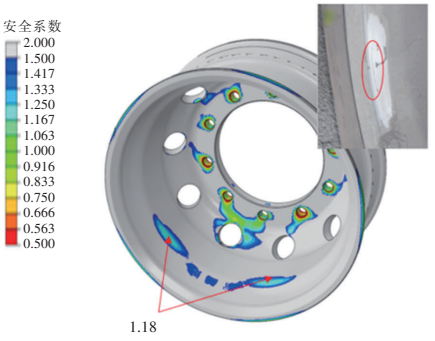
为模拟车轮旋转过程中的疲劳受力情况,在车轮胎座圈处每旋转72°记作1个载荷步,旋转一周共计5个载荷步,计算车轮旋转150万次后的疲劳安全系数,车轮受力示意如图9a所示。失效AZ80镁合金车轮本体屈服强度最低,约160 MPa,将镁合金车轮材料替换为AZ80-T6后,屈服强度提高至240 MPa,不同危险区域的安全系数提高12%左右。铝合金车轮在商用车中应用广泛,其屈服强度达到310 MPa。3种车轮径向疲劳安全系数对比结果如图9b所示,AZ80镁合金车轮内、外侧安全系数较低区域与实际开裂位置相吻合。图9c所示为内侧安全系数较低区域,图9d所示为外侧安全系数较低位置。除螺栓孔固定区域外,AZ80锻态镁合金车轮在外侧边缘处的安全系数为0.88,外侧与轮胎接触区域为1.24,内侧安全系数为1.18,其余位置安全系数均大于1.5,安全系数较小区域与实际开裂位置一致。由此推断,车轮材料强度是影响车轮安全系数的重要指标,AZ80镁合金车轮强度低是造成开裂失效的主要原因。



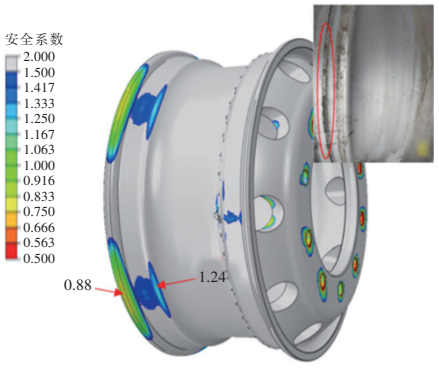
(a)车轮受力示意



(b)不同车轮径向疲劳安全系数对比



(c)AZ80镁合金车轮内侧疲劳安全系数云图



(d)AZ80镁合金车轮外侧疲劳安全系数云图

图9　仿真强度分析

4.4　结论分析

锻造镁合金车轮开裂通常是材料塑性低、锻造工艺控制精度不足、结构应力集中三者耦合的结果。控制锻造温度区间、优化变形量与速率、改善金属流动条件、降低应力集中点强度是抑制开裂、提高车轮服役可靠性的关键。通过对失效AZ80镁合金车轮进行化学成分、力学性能和断裂面扫描分析,化学成分与力学性能满足要求,开裂部位微观组织与正常部位无差别,说明车轮失效与锻造生产工艺无直接关联。仿真结果显示,AZ80镁车轮安全系数较低、强度不足是导致车轮开裂失效的主要原因。

5　结论

a. AZ80镁合金车轮路试开裂失效,经材料检测和仿真分析发现,AZ80镁合金车轮强度不足是导致失效的主要原因。T6热处理的AZ80-T6镁合金车轮强度较高,未出现失效,与实际相符。

b. 仿真分析结果表明,将AZ80镁合金车轮改为AZ80-T6镁合金车轮,能提高危险区域安全系数,其安全系数与铝车轮接近,可有效改善商用车

锻造镁合金车轮的断裂失效问题。

c. 为提高镁合金车轮的安全系数，结构设计时应避免车轮与轮胎的接触区域出现过大凸起，使其连接区域的应力更平滑。

参考文献：

[1] 程大庆, 韩卫强, 王硕. 镁合金车轮的性能分析[J]. 北京汽车, 2023(3): 25-27+46.

[2] 董彬, 杨娜. 锻压工艺对汽车镁合金棒材性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017: 46(9): 154-156+163.

[3] 杨洋, 王震. 锻造AZ80镁合金车轮热处理工艺优化[J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(6): 63-67.

[4] 兰文奎. 汽车车轮用AZ80Ce镁合金的锻造温度优化研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(11): 107-110.

[5] 夏志东, 杨建军, 向峻伯, 等. 镁合金汽车轮毂的表面防护层与性能研究[J]. 机械设计与制造, 2024(9): 70-73.

[6] 王震. AZ80锻造镁合金车轮材料组织研究和性能提升[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.

[7] STEARNS J, SRIVATSAN T S, Prakash A, et al. Modeling the Mechanical Response of An Aluminum Alloy Automotive Rim[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 366(2): 262-268.

AT&M