

团体标准

T/CIC 432—2025

乘用车铝合金车轮预损伤 疲劳的试验及仿真方法

Experimental and simulation methods for pre damage fatigue of aluminum alloy
wheels in passenger cars

2025-12-25 发布

2025-12-25 实施

中国工业合作协会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 试验设备	2
4.1 预损伤试验装置	2
4.2 动态径向疲劳试验装置	3
5 试验方法	3
5.1 预损伤试验	3
5.1.1 试验车轮	3
5.1.2 试验准备	3
5.1.3 载荷系数计算	3
5.1.4 冲击能量计算	3
5.1.5 试验程序	4
5.1.6 失效判据	5
5.2 径向疲劳试验	5
5.2.1 试验车轮	5
5.2.2 试验准备	5
5.2.3 充气压力的确定	5
5.2.4 径向载荷的确定	5
5.2.5 试验程序	5
5.2.6 失效判据	6
6 仿真方法	6
6.1 乘用车车轮预损伤疲劳仿真分析流程	6
6.2 仿真建模对象	6
6.3 材料参数	6
6.4 载荷与边界条件	6
6.4.1 载荷	6
6.4.2 边界条件	6
6.5 分析计算及输出	6
6.5.1 分析类型	6
6.5.2 输出设置	6
6.6 数据提取	7
6.7 仿真分析结果评价	7
6.8 仿真报告编写	7
6.8.1 报告一般要求	7
6.8.2 仿真分析软、硬件	7
6.8.3 仿真模型简图	7
6.8.4 仿真分析结果及结论	7
附录 A	8
附录 B	9

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国工业合作协会仿真技术产业分会提出。

本文件由中国工业合作协会归口。

本文件起草单位：中信戴卡股份有限公司、中国汽车工程研究院股份有限公司、湖南大学、保定市立中车轮制造有限公司、上海理工大学、临界面（上海）智能科技有限公司、泛亚汽车技术中心有限公司、小米汽车科技有限公司上海分公司、燕山大学、江铃汽车股份有限公司、东风汽车集团有限公司研发总院、河北省冶金研究院、中国北方车辆研究所、北京北汽工程技术研究院。

本文件主要起草人：郎玉玲、李明磊、王进、高翔、徐世伟、李建宇、周羊羊、李战胜、赵礼辉、张东东、周松、王震、魏晨光、孟晓贺、崔巍、马龙、董国疆、肖斯琦、李其宸、毕江、杨晓晖、黄晖、李杰、赵广江、梁晓婧、邱祖峰、朱俊杰、张春富、庞艳辉、刘彦青、冯硕朋、刘敏。

乘用车铝合金车轮预损伤疲劳的试验及仿真方法

1 范围

本文件规定了乘用车铝合金车轮预损伤疲劳的试验及仿真方法。

本文件适用于乘用车铝合金车轮产品，主要针对车轮内轮缘开裂问题。

本文件适用于GB/T 3730.1中规定的乘用车所使用的车轮。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 2933 充气轮胎用车轮和轮辋的术语、规格代号和标志
- GB/T 2978 轿车轮胎规格、尺寸、气压与负荷
- GB/T 3730.1 汽车和挂车类型的术语和定义
- GB/T 33582 机械产品结构有限元力学分析通用规则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

车轮轮胎总成 wheel-tire assembly
由车轮、轮胎和气门嘴组装成的组合件。

3.2

裂纹 crack
试验过程中出现的材料分离。

3.3

车轮内轮缘 inner rim flange
给轮胎提供轴向支撑的轮辋内侧部分。

3.4

预损伤 pre-damage
模拟日常行驶中车轮内轮缘受损情况，损伤部位出现残余应力、塑性变形等。

3.5

有限元建模 finite element modeling
构建有限元模型的过程，包括几何模型构建和（或）处理、材料属性定义、网格划分、边界条件施加等步骤。

3.6

材料属性 material property

描述机械产品结构所用材料物理特性的数据集合。

3.7

边界条件 boundary condition

描述机械产品结构在给定工况下，求解域边界上几何以及物理条件，如力、温度、速度、位移等载荷的数据信息。

3.8

约束 constraint

减少系统自由度的各种限制条件。

4 试验设备

4.1 预损伤试验装置

图1给出了一个典型的试验设备原理图。主要由可沿铅直方向移动的冲锤及车轮轮胎总成安装支架组成。主要要求如下：

- 1) 锤头：冲击面夹角 150° ，圆角半径R2，宽度195mm，长度500mm。
- 2) 冲锤基本质量150kg，最大质量315kg，最小可调质量5kg。
- 3) 冲锤所有质量能够固定成一个整体，且下落时间不应超出理论自由下落时间的2%。
- 4) 应有防止冲锤回弹后引起二次冲击的装置。
- 5) 安装支架具有间距200mm的两个可转动支点。
- 6) 两个碟状弹簧，组合刚性 $C_r=(85\pm 5)\text{ kN/mm}$ ，碟簧的预压量为0.2mm。
- 7) 支架的水平位置下倾 $4.5^\circ \pm 0.1^\circ$ ，内轮缘向上。
- 8) 车轮固定装置能够适应车轮偏距的变化，保证轮胎断面中心线与冲锤中心线的交点到图1所示左侧支点的距离为450mm。

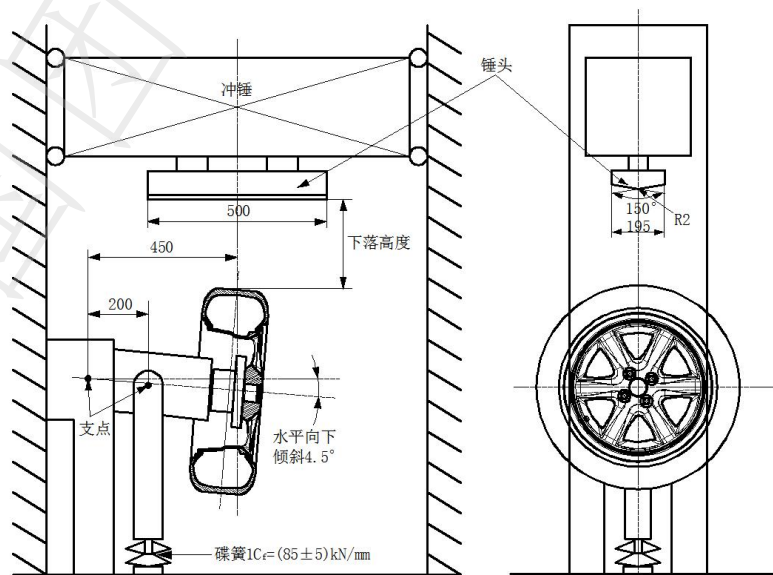


图1 预损伤试验设备原理图

4.2 动态径向疲劳试验装置

试验设备应具有一个被驱动的转鼓和车轮固定座，使车轮轮胎总成在一个固定径向力作用下旋转，见图2。转鼓最小直径为1700mm，宽度不小于轮胎断面，且表面光滑。车轮固定座连接面应与车辆上通常采用的连接件具有相同的装配尺寸特性，表面硬度推荐在HRC40~HRC50，螺孔或螺栓在连接面的分布圆上位置度控制在 $\phi 0.1\text{mm}$ 以内。

加载系统应保持规定的载荷，偏差不超过试验载荷计算值的 $\pm 2.5\%$ 。加载方向垂直于转鼓表面，且与车轮固定座中心和转鼓中心的连线方向一致，转鼓轴线和车轮固定座轴线应平行。

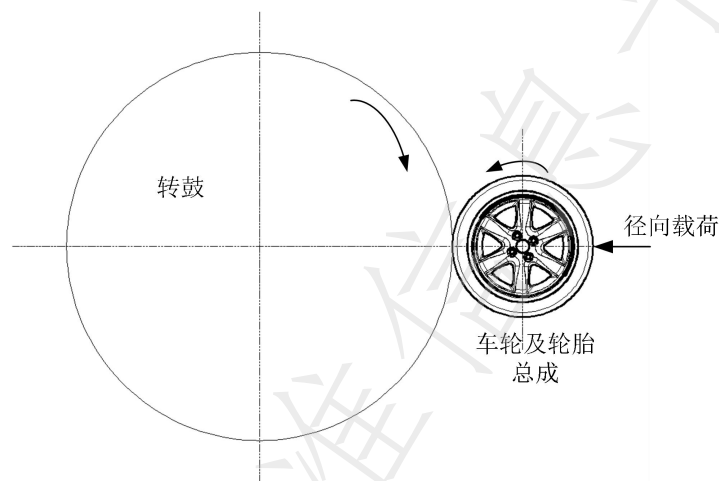


图2 动态径向疲劳试验示意图

5 试验方法

5.1 预损伤试验

5.1.1 试验车轮

经过全部加工工序，可用于车辆的具有代表性的新车轮，件数 $n=2$ 。

本试验使用过的车轮不可再用于车辆上。

5.1.2 试验准备

试验首选车辆或车轮制造商指定型号的轮胎。如果未指定，参考GB/T 2978选择试验车轮可配用的轮胎中断面高度最小的无内胎子午线轮胎。充气压力为车辆制造厂规定值，如果没有规定，则应为 (250 ± 10) kPa。试验环境温度应保持在 $10^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ ，试验环境湿度30%~70%RH。

5.1.3 载荷系数计算

按照公式(1)确定冲击试验的载荷系数 K ：

$$K = 442.33h^2 - 126.01h + 10.336 \quad (1)$$

式中，

h —— 轮胎名义断面高度，m。

5.1.4 冲击能量计算

按照公式(2)确定预损伤试验的冲击能量 E ，单位为焦耳(J)：

$$E = K \times F_v \quad (2)$$

式中，

K —— 载荷系数，J/kg。

F_v —— 车轮或车辆制造厂规定的车轮最大静载荷，kg。

5.1.5 试验程序

1) 将车轮轮胎总成安装到试验机上。保证车轮轮胎总成在试验机上的固定装置在尺寸上应与车辆上使用的固定装置相当。调整车轮轴向位置，使轮胎断面中心线的顶点对准锤头中心线，然后锁定调整机构。调整车轮圆周方向的位置，冲击位置为距离车轮气门孔最远的大窗口正中间。

2) 手动拧紧固定车轮的螺母或螺栓到规定的扭矩值，或者采用车辆或车轮制造厂推荐的方法拧紧。如果没有扭矩要求，推荐采用 (120 ± 10) N·m 的扭矩拧紧。

3) 根据 5.1.3 中计算的冲击能量，参考表 1 选择并调整冲锤质量，计算下落高度（重力加速度取值 9.81m/s^2 ）。当冲击能量小于 2000J 时，冲锤质量为 150kg；当冲击能量在 2000J 以上时，按照 5kg 的幅度递增冲锤质量，并使冲击速度在 (5 ± 0.2) m/s 范围内，冲击能量允许在 $\pm 2\%$ 的范围内调整。

表 1 试验参数调整参考表

冲击能量, J	下落高度, mm	冲击速度, m/s	冲锤质量, kg
500	340	2.6	150
600	408	2.8	150
700	476	3.1	150
800	544	3.3	150
900	612	3.5	150
1000	680	3.7	150
1100	748	3.8	150
1200	815	4.0	150
1300	883	4.2	150
1400	951	4.3	150
1500	1019	4.5	150
1600	1087	4.6	150
1700	1155	4.8	150
1800	1223	4.9	150
1900	1291	5.0	150
2000	1315	5.1	155
2100	1338	5.1	160
2200	1359	5.2	165
2300	1379	5.2	170
2400	1359	5.2	180
2500	1378	5.2	185
2600	1395	5.2	190
2700	1376	5.2	200
2800	1392	5.2	205
2900	1375	5.2	215
3000	1390	5.2	220
3100	1374	5.2	230
3200	1388	5.2	235
3300	1373	5.2	245
3400	1386	5.2	250

3500	1372	5.2	260
3600	1385	5.2	265
3700	1397	5.2	270
3800	1383	5.2	280
3900	1395	5.2	285
4000	1382	5.2	295
4100	1393	5.2	300
4200	1381	5.2	310
4300	1392	5.2	315

- 4) 释放冲锤，进行冲击。
- 5) 测量车轮内轮缘最外侧变形量并记录。

5.1.6 失效判据

出现下列任何一种情况，试验终止，车轮失效：

- 1) 车轮任何部位出现裂纹，裂纹使用染色渗透方法判定。
- 2) 1 小时内发生气体泄漏。

5.2 径向疲劳试验

5.2.1 试验车轮

选取在 5.1 中试验合格的车轮。

5.2.2 试验准备

试验首选车辆或车轮制造商指定型号的轮胎。如果未指定，按照 GB/T 2978 选择试验车轮可配用的轮胎中具有最大负荷的轮胎。

5.2.3 充气压力的确定

试验车轮轮胎总成的试验充气压力应符合表 2 中的数值。

表 2 充气压力

在使用载荷下的充气压力 (kPa)	试验充气压力 (kPa) ^a
≤160	280
161 ~ 280	450
281 ~ 450	550
≥450	≥使用气压的 1.2 倍

^a 允许误差±10 kPa。

5.2.4 径向载荷的确定

按照公式 (3) 确定径向载荷 F_r ，单位为牛顿 (N)：

$$F_r = F_w \cdot S \quad (3)$$

式中：

- F_w ——车轮或车辆制造厂规定的车轮最大垂直静负荷或车轮的额定负荷，单位为牛顿 (N)。
- S ——强化系数，取 2.5。

5.2.5 试验程序

1) 参考图 2 将车轮轮胎总成夹紧到试验设备上。将车轮拧紧螺栓(或螺母)拧紧至车辆或车轮制造商所规定的力矩值。如果没有规定推荐设定拧紧力矩为 $(120 \pm 10) \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

2) 设置载荷、转速和循环次数等试验参数,开始试验。循环次数不大于1万转时,可停机将车轮拧紧螺栓或螺母重新拧紧一次。试验过程中如果螺栓断裂,则更换全部螺栓后继续试验。在试验期间,轮胎气压将升高,无需调整。每50万转停机检查一次,确认车轮无裂纹,1小时内气体无泄漏后继续转。

3) 完成100万转循环次数后停机检查,要求车轮无裂纹,1小时内气体无泄漏。

注:如有需要,合格判据可根据车轮或车辆制造厂根据车轮服役需求设定。

5.2.6 失效判据

出现下列任何一种情况,车轮失效,试验终止。

1) 车轮任何部位出现裂纹,裂纹使用染色渗透方法判定。

2) 1小时内发生气体泄漏。

5.3 试验报告

试验完成后出具相应试验条件的试验报告,包含试验条件、试验车轮内轮缘最外侧变形量、冲击后径向疲劳试验转数等。

6 仿真方法

6.1 乘用车车轮预损伤疲劳仿真分析流程

乘用车车轮预损伤疲劳仿真分析流程主要包括车轮有限元建模、边界条件设置、提交计算、结果后处理及撰写报告等内容,具体参见附录A。

6.2 仿真建模对象

以选定的研究目标为主要分析对象,预损伤试验建模模型包含车轮、轮胎和冲击块,径向疲劳试验建模模型包含车轮和轮胎。

主研究对象网格采用二阶四面体实体网格,车轮内轮缘处网格目标尺寸建议3mm,车轮其余部位网格目标尺寸建议8mm,冲击块采用刚性单元,网格目标尺寸建议12mm,轮胎采用超弹性单元,网格目标尺寸建议12mm,具体见附录B。

6.3 材料参数

主研究对象材料参数设置分为线性材料和非线性材料属性。

6.4 载荷与边界条件

6.4.1 载荷

根据试验标准所提取的主研究对象所承受的瞬时速度和载荷进行加载,瞬时速度单位mm/s,力单位为N。

6.4.2 边界条件

根据载荷传递路径选取约束位置,车轮约束法兰盘平面。与主研究对象直接接触且连接方式为非螺纹连接的,采用接触(contact)关系进行连接。具有配合关系的区域,在建立接触对的同时考虑装配属性,配合关系值使用装配图纸标准的名义值,接触区域要充分考虑分析过程中的滑动过程。

6.5 分析计算及输出

6.5.1 分析类型

预损伤试验分析类型选择动态显式分析。

径向疲劳试验分析类型选择静态隐式分析。

6.5.2 输出设置

场变量输出中，全局场变量输出应力、应变、位移、接触应力和接触状态。
历程变量中输出接触法向力、接触切向力、接触面积等。

6.6 数据提取

提取预损伤试验内轮缘处在卸载后的残余变形量（U）。
提取径向疲劳试验内轮缘处应力（Von-Mises）。

6.7 仿真分析结果评价

- 1) 预损伤试验内轮缘处在卸载后的残余变形量用以评价强度。
- 2) 径向疲劳试验内轮缘处应力值用以评价疲劳寿命。

注：仿真分析结果与试验结果进行对标，得出仿真结果精度，根据精度可进行仿真模型修正。

6.8 仿真报告编写

6.8.1 报告一般要求

对分析任务进行背景介绍，并说明本报告分析的内容和关注的分析结果。根据分析对象及分析内容，填写分析报告的名称、编号和报告编写人员等信息。

6.8.2 仿真分析软、硬件

记录仿真软件的官方名称、软件类型、版本等信息。

6.8.3 仿真模型简图

仿真分析报告包含模型示意图。

6.8.4 仿真分析结果及结论

按 6.6 要求输出相应的仿真分析结果，根据仿真分析结果，总结分析结论。

附录 A
(规范性附录)
仿真分析流程

仿真分析流程见图 A.1。

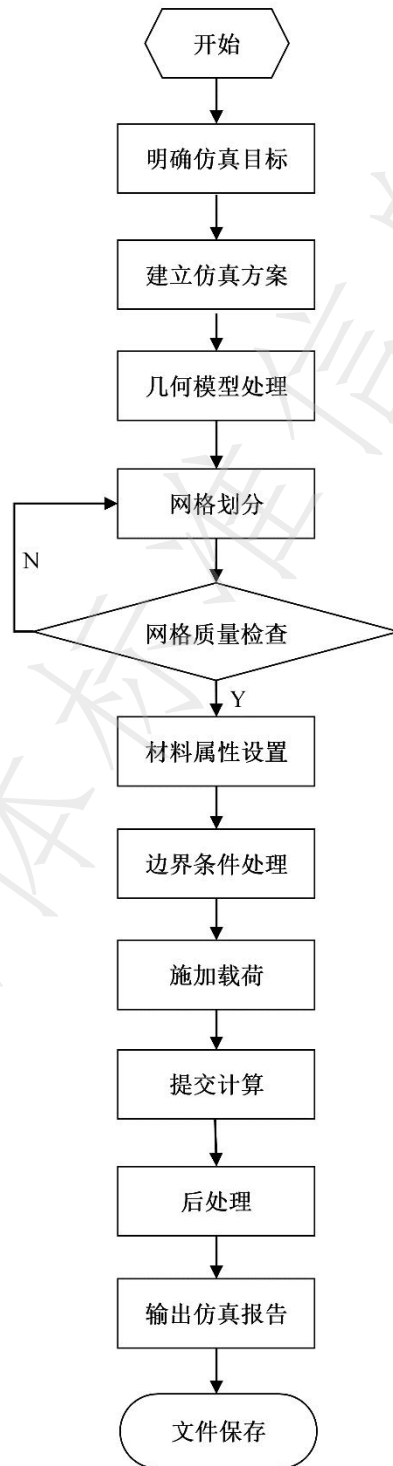


图 A.1 仿真分析流程图

附录 B
(规范性附录)
网格质量评价标准

网格质量评价标准推荐值见表 B.1。

表 B.1 网格质量评价标准推荐值

单元类型	项目名称	目标值
面网格	翘曲度	不大于 15°
	最小单元尺寸	不小于 2mm
	长宽比	不大于 8
	三角形单元最小内角	不小于 15°
	三角形单元最大内角	不大于 140°
	雅克比	不小于 0.6
体网格	最小单元尺寸	不小于 2 mm
	偏斜度	不大于 60°
	坍塌比	不小于 0.1