

基于 GISSMO 模型的铸造铝合金车轮失效模拟研究

余春丽，高翔，周杨智，冯毅
中国汽车工程研究院股份有限公司

【摘要】 轮毂作为小偏置碰撞的重要传力路径之一，其材料模型的准确性对碰撞仿真精度起着决定性作用。为获得高精度碰撞仿真所需的铸造铝合金车轮失效模型，本文开展了铝合金车轮材料的力学性能和断裂力学试验，开发了基于 GISSMO 模型的铝合金车轮失效模型，并设计了铝合金轮毂的动态和静态力学实验，提出了分区设置材料失效参数的方法，使实验结果与仿真具有高度的一致性，为小偏置碰撞仿真提供了可靠的材料性能数据。

【关键词】 铸铝轮毂，MMC，GISSMO，断裂失效，仿真模型

Investigation on Failure Simulation of Cast Aluminum Alloy Wheels Based on GISSMO Model

Yu Chunli, Gao Xiang, Zhou Yangzhi, Feng Yi

China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd.

Abstract: As one of the important force transmission paths for small overlap crash, the accuracy of the material model of the wheel plays a decisive role in the accuracy of collision simulation. In order to obtain the failure model of cast aluminum alloy wheels for high-precision crash simulation, the mechanical properties and fracture mechanics experiments of aluminum alloy wheel were carried out, and the failure model of aluminum alloy wheels based on GISSMO was developed. And dynamic and static mechanical experiments on aluminum alloy wheels were designed. a method of setting material failure parameters in different zones was proposed, so that the experimental results are highly consistent with the simulations, which provides reliable material performance data for small offset collision simulation.

Key words: aluminum alloy wheels, MMC, GISSMO, fracture failure, simulation model

引言

在汽车轻量化的大趋势下，铸造铝合金广泛应用于车轮上。铸造铝合金延展性能差，在碰撞大变形中容易断裂失效。然而，在碰撞仿真分析中常采用刚性车轮模拟，无法准确表征断裂失效行为，从而影响碰撞的仿真精度。为了获得高精度碰撞仿真所需的铸造铝合金车轮失效模型，需要开展铝合金车轮材料的力学性能和断裂失效模型研究。

在碰撞仿真领域，金属材料的失效行为是国内外学者研究的热点。金属材料发生的失效常属于韧性断裂。韧性断裂过程是一个损伤不断积累，同时损伤起始和演化过程不断变化的过程^[1]。模型按照不同参数之间的耦合程度分为强耦合模型和弱耦合模型^[2]。预测材料失效行为的失效强耦合模型主要考虑损伤对材料本构关系的影响。Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN)^[3-6] 模型就是典型的强耦合模型，GTN 模型包含的待定参数超过了 10 个，且参数识别复杂，在工程应用上较少。相比于复杂的强耦合模型，材料参数较少且识别容易的弱耦合模型更适合于工程应用。弱耦合模型一般忽略损伤对材料本构方程的影响，主要有两类：第一类以阈值判定失效，多采用积分形式，大多以影响材料断裂的一些因素，如应力状态、应变率等作为变量构成结构断裂阈值的函数；第二类是基于失效应变的宏观半经验性的失效准则。这类方法表达简单且失效参数可以通过试验进行测定标定，在商业软件上应用较广，常见的失效准则有常应变

失效模型^[7]、Jonson-cook (JC) 失效模型^[8]、MMC 失效模型^[9]、Generalized Incremental Stress State dependent Model (GISSMO)^[10] 失效模型。常应变失效模型一般是通过单向拉伸试验的等效塑性应变作为判断材料发生韧性断裂的主要依据，一旦等效塑性应变达到阈值，材料就发生韧性断裂，该断裂模式简单，易于实现，但是该应力模型仅适用于较窄的应力三轴度范围，且预测精度较低。JC 失效模型是考虑应力三轴度的损伤演化模型，为了使该模型在工业上得到更广泛的应用，温度和应变率效应也耦合进该损伤模型，该预测模型在高应力三轴度区间有较高的断裂预测精度。JC 失效模型的应力状态、应变率和温度影响互不耦合，参数容易获取，但是 JC 断裂准则以线性方式计算损伤积累，且失效应变随着应力三轴度单调变化。Bai 和 Wierzbicki^[11] 将传统的 Mohr-Coulomb 准则引入应力三轴度和罗德角参数，建立了精度更高的 MMC 模型。GISSMO 失效模型是一种唯象损伤力学模型，以非线性损伤积累的方式描述材料从变形到破坏的整个过程，而不关注损伤的物理背景和材料内部的细观结构变化。其考虑了材料从受损、非线性损伤积累到材料断裂失效的过程，能较为精准地预测材料在不同受力情况下裂纹的产生和扩展过程。GISSMO 模型中包括材料的断裂应变曲线、等效临界应变曲线、非线性损伤累积和应力衰减。在有限元仿真软件 LS-DYNA 中，GISSMO 模型作为独立存在的模型，可以很方便地与其他本构模型耦合，其中，模型中的断裂应变曲线可以借用 JC 或 MMC 模型。该特性使得 GISSMO 模型在汽车领域得到了广泛的应用。国外学者^[12-14]

对 DOCOL 材料在不同应力状态的断裂试验，通过 LS-OPT 对 GISSMO 模型的参数进行标定优化。国内陈自凯、庄华晔、冯悦^[15-17]针对不同的汽车用材设计多种应力状态的试样，获取不同应力状态下的断裂应变，并用 MMC 模型拟合断裂应变关于应力三轴度的关系，基于试验与仿真获取 GISSMO 模型参数，并通过仿真与试验结果的对比验证了 GISSMO 模型的优越性。

在碰撞过程中，车轮处于动态变形状态，通常不同部位具有不同的应力状态。以单一应力、应变为尺度研究材料单元体在空间应力作用下的屈服和破坏准则的传统强度理论难以准确表征车轮在碰撞过程中的失效模式。研究表明，在不同应力状态下，材料的断裂机理与应力三轴度密切相关。本文中基于 MMC 模型的断裂失效曲线与 GISSMO 模型耦合表征铸造铝合金车轮的断裂失效准则，通过系统性的材料级别力学实验，研究了铸铝轮毂的断裂失效模型。基于有限元仿真与零部件试验验证了模型的有效性，为小偏置碰撞仿真提供了准确的材料模型及高精度仿真模型。

1 材料试验及本构模型建立

1.1 材料力学试验

试验材料从辐条上图 1 红框所示位置取样。试验包括材料弹塑性力学性能试验及断裂性能试验，具体试验包含准静态单向拉伸试验、高速拉伸试验、剪切试验、拉剪试验、R5 缺口拉伸试验、R10 缺口拉伸试验、中心孔拉伸试验、杯突试验，试验试样如图 2 所示，每组试验重复 3 次。高速拉伸试验在 ZWICK HTM 5020 高速拉伸试验机上进行，选用 8mm 虚拟引伸计进行测量，应变速率设为 1/s、10/s、100/s、200/s、500/s。其余均在 CMT5305 电子万能试验机上进行，准静态单向拉伸试验的试验速率为 3mm/min，剪切试验、拉剪试验、R5 缺口拉伸试验、R10 缺口拉伸试验及中心孔拉伸试验均选用 25mm 引伸计，试验速率为 0.3mm/min。杯突试验也在 CMT5305 电子万能试验机上进行，冲头速率为 1mm/min，试验过程中，进行相对变形测量。

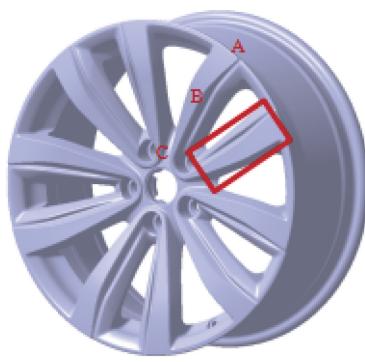


图 1 铸铝车轮取样位置

1.2 本构模型建立

通过 1.1 节的试验介绍开展拉伸试验，得到力-位移数据。通过公式将力-位移数据转化得到工程应力-应变数据，工程应力-应变数据去除弹性段转化得到真实应力应变曲线。

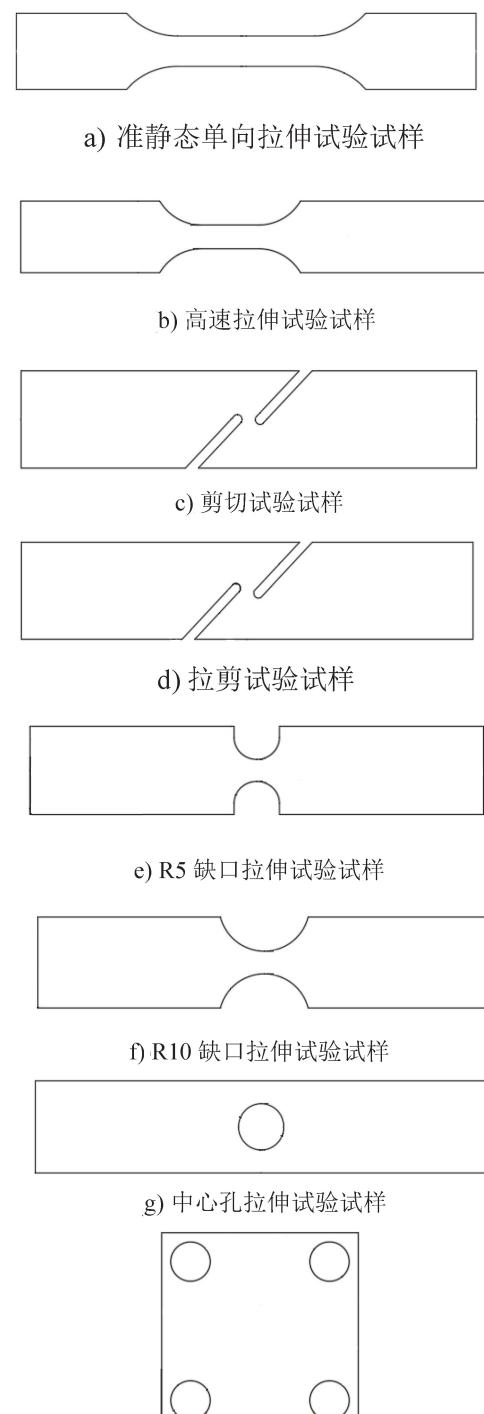


图 2 设计的试验试样

获得真应力-塑性应变曲线后，剔除颈缩点之后的数据，采用 Swift-Hockett-Sherby^[18]混合模型对材料的多个应变速率曲线进行统一拟合外推到 1 的应变。通过建立准静态单向拉伸试验数值模型，基于 LS_DYNA 中的 MAT_24 号材料本构模型，输入不同系数值拟合得到的真应力-塑性应变曲线，进行仿真计算，对标试验及仿真结果中的力-变形曲线，以确定最优拟合系数值。最终得到真应力-应变曲线，如图 3 所示。该铸铝材料塑性硬化行为的应变率效应不明显，但断裂

失效应变有很强的应变率相关性。

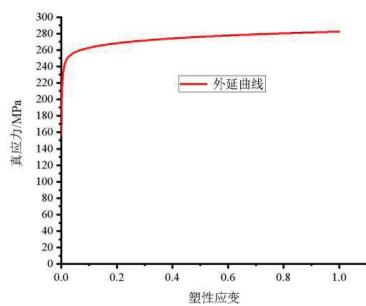


图 3 外延真应力-塑性应变曲线

2 GISSMO 失效模型建立

2.1 GISSMO 断裂失效曲面的建立

材料的不同应力状态由应力三轴度 η 、罗德角参数 ξ 或者归一化罗德角参数 $\bar{\theta}$ 共同表征, 见式(1)~式(3)。

$$\eta = \frac{-p}{q} = \frac{-p}{\bar{\sigma}} = \frac{\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\bar{\sigma}} = \frac{\frac{1}{3}I_1}{\sqrt{3J_2}} \quad (1)$$

式中, p 为静水压力; q 为 Mises 等效应力; I_1 为第一应力不变量。

$$\xi = \frac{27}{2} \frac{J_3}{\bar{\sigma}^3} = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \quad (2)$$

式中, ξ 为罗德角参数; J_2 、 J_3 分别为第二、三偏应力张量不变量。

$$\bar{\theta} = 1 - \frac{6\theta}{\pi} = 1 - \frac{2}{\pi} \arccos \xi \quad (3)$$

式中, $\bar{\theta}$ 为罗德角参数。

基于剪切试验、拉剪试验、R5 缺口拉伸试验、R10 缺口拉伸试验、中心孔拉伸试验及杯突试验的试样尺寸及试验条件, 建立各试验的数值模型。在 LS-DYNA 的 MAT_24 材料模型中输入标定后的真应力-塑性应变曲线, 在不输入断裂失效模型参数的情况下进行模拟仿真, 从仿真结果中选取各试验对应的平均应力三轴度值 η 、归一化罗德角参数 $\bar{\theta}$ 。基于提取到的信息, 及不同应力状态断裂试验中采用 DIC 测试得到的临界断裂应变 $\hat{\varepsilon}_f$, 选取 MMC 断裂失效模型进行参数标定及优化, 使得 MMC 断裂失效模型能准确表征铸铝材料在复杂受力状态下的断裂失效行为。实验结果见表 1。

表 1 实验结果

试验类型	η	$\bar{\theta}$	$\hat{\varepsilon}_f$
纯剪试验	0.0330	0.0746	0.104
拉剪试验	0.0315	0.0759	0.085
R5 缺口拉伸	0.483	0.506	0.054
R10 缺口拉伸	0.423	0.713	0.063
中心孔拉伸	0.373	0.917	0.077
杯突试验	0.660	-0.726	0.080

本文采用 MMC 断裂失效模型对 GISSMO 断裂失效曲面进行拟合, 断裂时刻等效塑形应变 $\hat{\varepsilon}_f$ 是应力三轴度 η 及归一化罗德角参数 $\bar{\theta}$ 的函数, 见式(4), 包含 K/C 、 C_θ^S 、 f 、 n 四个系数, 系数值通过试验结合有限元仿真的方法进行标定, 拟合得到的 MMC 断裂曲面如图 4 所示。

$$\hat{\varepsilon}_f = \left\{ \frac{K}{C} \left[C_\theta^S + \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} (1 - C_\theta^S) \left(\sec \left(\frac{\theta\pi}{6} \right) \right) + \left(\eta + \frac{1}{3} \sin \left(\frac{\pi\bar{\theta}}{6} \right) \right) \right] \right\}^{-\frac{1}{n}} \quad (4)$$

式中, K/C 、 C_θ^S 、 f 、 n 为待定系数; $\bar{\theta}$ 为罗德角参数。

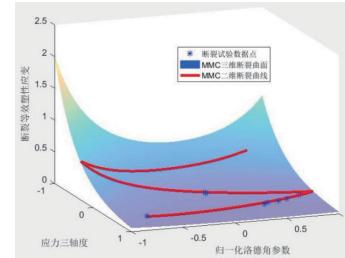


图 4 断裂失效曲面

2.2 GISSMO 参数的标定

GISSMO 失效模型中断裂时刻由塑性损伤值 D 决定, 损伤值的累积见式(5)和式(6)。

$$D = \left(\frac{\varepsilon_p}{\hat{\varepsilon}_f} \right)^n \quad (5)$$

$$\Delta D = \frac{n}{\hat{\varepsilon}_f} D^{\left(1 - \frac{1}{n}\right)} \Delta \varepsilon_p \quad (6)$$

式中, ΔD 表示损伤变量的增量; n 为损伤累积指数; $\Delta \varepsilon_p$ 为等效塑性应变的增量。当 $D=1$ 时, 单元失效, 裂纹产生。

在塑性变形阶段, 材料的损伤累积与应力衰减之间存在耦合关系。在前期稳定变形阶段, 材料因塑性变形产生硬化, 流动应力平缓上升, 进入不稳定变形阶段, 流动应力逐渐减小, 损伤累积加剧, 对于不稳定变形的阈值成为临界应变。稳定性变量及其增量表达式见式(7)和式(8)。

$$F = \left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{crit}} \right)^n \quad (7)$$

$$\Delta F = \frac{n}{\varepsilon_{crit}} F^{\left(1 - \frac{1}{n}\right)} \Delta \varepsilon_p \quad (8)$$

式中, F 为损伤变量; ΔF 为损伤变量的增量; ε_{crit} 为材料的等效临界应变。

对于临界应变关于应力三轴度的失稳曲线, 目前还没有明确的表征方法。当 $F=1$ 时, 材料的损伤累积与弱化现象进行耦合, 准确描述材料断裂的整个过程, 见式(9)。

$$\tilde{\sigma} = \sigma \left[1 - \frac{D - D_{crit}}{1 - D_{crit}} \right]^m \quad (9)$$

式中, D_{crit} 为 F 达到 1 时所对应的损伤值; m 为应力衰减指数; σ 为未修正的流动应力; $\tilde{\sigma}$ 为修正后的流动应力。

对于本论文的铸铝材料来说, 本构曲线没有明显的下降段, 材料直接失效。可将 D_{crit} 设置为 1, 通过优化软件 LS-OPT 对损伤累积指数 n 、 m 和失稳曲线进行优化, 最终得到 $n=2.3$, $m=1.2$ 。

2.3 网格尺寸与应变率断裂效应标定

在有限元仿真中，不同的网格尺寸对应变具有显著的影响。在 GISSMO 模型中，单元尺寸对断裂应变曲线有影响。通过控制变量法^[19]归一化处理得到的网格尺寸修正曲线如图 5 所示。

在不同应变率下，材料断裂时的应变不同，通过仿真与试验相结合，找到各应变率下拉伸试样断裂时的等效塑性应变，见表 2 所列。归一化处理后获得应变率断裂效应修正曲线，如图 6 所示。

表 2 不同速率下的断裂应变

应变率/(1/s)	断裂等效应变	修正系数
0.00125	0.020478	1
1	0.0273157	1.3339
10	0.030651	1.4968
100	0.0339918	1.6599
200	0.037141	1.8137

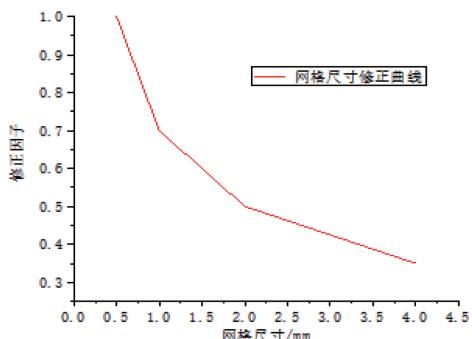


图 5 网格尺寸修正曲线

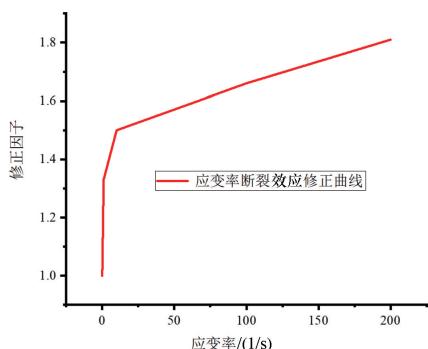
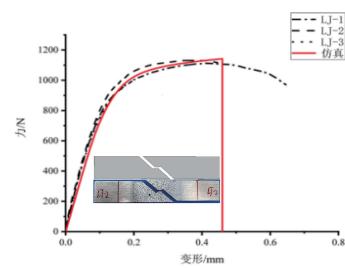


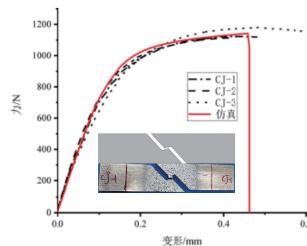
图 6 应变率断裂效应修正曲线

2.4 GISSMO 材料卡片对标

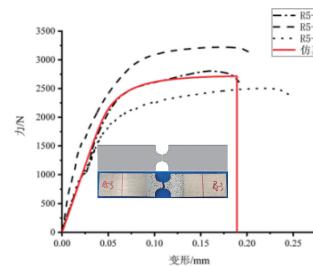
采用上述的 GISSMO 模型参数和 24 号材料卡预测对标 AlSi₇Mg 铸铝材料在不同应力状态下的断裂，对标结果如图 7 所示。添加断裂模型后仿真结果与实验结果在试样断口、力变形曲线中具有良好的一致性，证明了该模型的准确性。



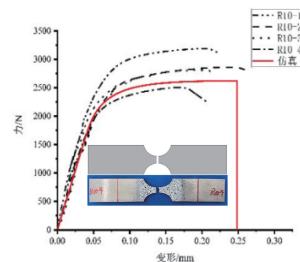
a) 剪切试验对标结果



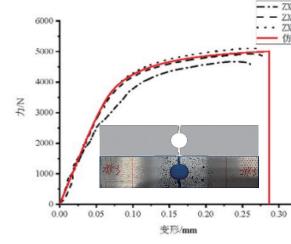
b) 拉剪试验对标结果



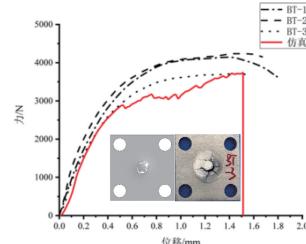
c) R5 缺口拉伸试验对标结果



d) R10 缺口拉伸试验对标结果



e) 中心孔拉伸试验对标结果



f) 杯突试验对标结果

图 7 GISSMO 材料卡片对标结果

3 轮毂子系统试验及仿真对标

3.1 轮毂子系统试验

通过轮毂子系统试验对有限元分析验证 GISSMO 失效卡片的准确性。在 25% 偏置碰撞中常见的断裂失效就是辐条和轮辋的破坏。子系统试验设置了动态冲击试验和静态压溃试验。试验工装和加载方式如图 8 和图 9 所示。动态冲击试验在落锤试验机上完成，锤头质量为 226kg，接触速度为 7.29m/s，冲击能量为 6kJ。静态压溃试验在万能试验机上完成，加载速度为 0.5mm/s，加载至产生明显失效。



图 8 动态冲击试验装置



图 9 静态压溃试验装置

3.2 动态冲击有限元仿真对标

动态冲击的有限元模型如图 10 所示，工装、加载条件与边界条件和试验一致。考虑到计算效率与模拟精度，车轮的网格模型采用六面体实体单元，网格尺寸为 2~4mm。轮毂模型的单元数量为 239710 个。将上文中得到的本构模型和 GISSMO 失效材料赋予轮毂，得到的力-位移曲线与试验结果的对比如图 11 所示，断裂失效情况与试验结果的对比如图 12 所示。从力-位移曲线分析可知最大峰值力仿真与试验基本保持一致，但是第一个峰值和第三个峰值仿真均高于试验。从断裂形貌分析发现，试验中轮芯位置发生了断裂失效，轮辋与工装的上下接触面位置并未发生明显失效，仿真结果与试验结果有较大差异。

该车轮由压铸工艺生产完成，车轮不同部位的晶粒组织存在差异，从而力学性能也有差异。通过微观组织观察发现，轮芯位置 A 到轮辐 B 再到轮辋位置 C（图 1），枝晶间距依次减小（图 13、表 3），材料的韧性从内到外依次增强。论文中材料的实验失效卡是从轮辐 B 处取样拟合获得的，将轮辐的失效特性赋予整个车轮与实际情况不符，因而需要

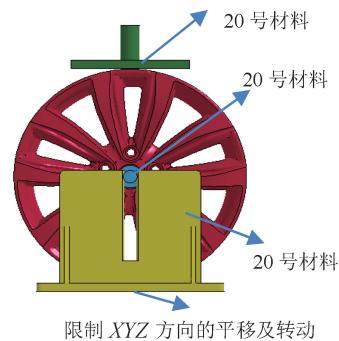


图 10 动态冲击有限元模型

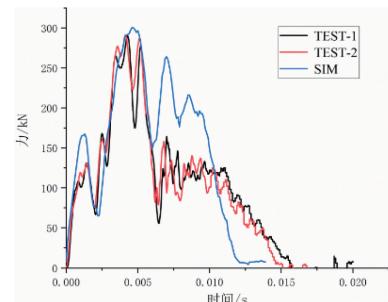


图 11 动态冲击力-位移初次对标结果

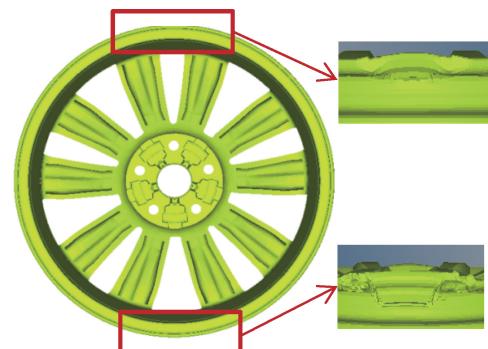


图 12 动态冲击仿真断裂情况

对轮芯和轮辋部分的材料失效曲面单独定义。通过一系列仿真发现，将轮辐失效曲面分别缩放 0.5 倍和 4 倍后（图 14），轮芯和轮辋部分的失效曲面动态压溃仿真的力-位移曲线与试验吻合度较高，如图 15 所示。试验的峰值为 290.3kN，仿真的峰值为 300.5kN，仿真精度为 96%。失效形式与实验也具有一致性，如图 16 所示。仿真结果说明分区定义轮芯、轮辐、轮辋的材料参数与实际情况更吻合。论文下一小节将该分区模型代入静态压溃试验中，进一步验证其有效性。

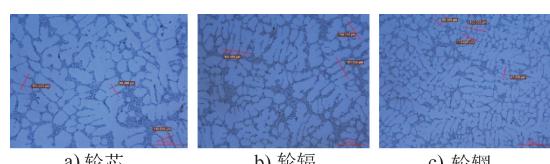


图 13 不同部位的晶粒组织

表 3 不同区域的平均枝晶间距

区域	A	B	C
平均枝晶间距/ μm	55.640	46.412	30.849

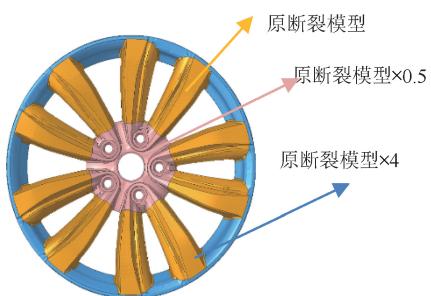


图 14 分区后的有限元模型

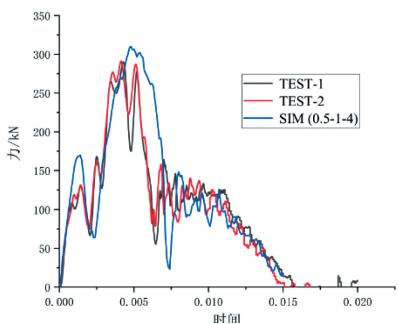


图 15 分区后的动态冲击力-位移对标结果



图 16 分区后的动态冲击断裂形貌对标结果

3.3 静态压溃有限元仿真对标

静态压溃的工装、加载条件与边界条件和试验一致。仿

真得到的力-位移曲线与试验的对比如图 17 所示，分析可知，试验与仿真具有高度的一致性，试验的峰值力为 319.5kN，仿真的峰值力为 318.9kN。试验的断裂失效形式与仿真的断裂失效的位置及断裂形貌具有一致性，如图 18 所示。

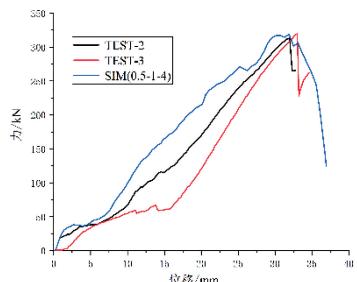


图 17 分区模型静态压溃力-位移对标结果



图 18 分区后的静态压溃断裂形貌对标结果

4 结论

1) 论文通过系统性的材料力学试验及仿真分析，建立了铸铝车轮材料的 GISSMO 失效仿真卡片，并在材料级别实现了准确的对标。

2) 由于铸造工艺的影响，轮毂的各个部位微观组织不同，从芯部到轮辐再到轮辋韧性依次增强，在有限元仿真中，可以大致将轮毂分成三个部分，分别赋予不同失效参数的材料模型，其中轮芯和轮辋的断裂应变曲面为轮辐的失效断裂曲面系数的 0.5 和 4 倍。

3) 轮毂的静态和动态冲击试验与有限元仿真的对比表明，GISSMO 断裂模型和 24 号材料卡结合准确模拟了铸造铝合金车轮在动态冲击和静态压溃下的失效行为，仿真与试验具有高度一致性。论文为小偏置碰撞仿真提供了可靠的材料性能数据。

参 考 文 献

- [1] 顾彬, 何霁, 李淑慧, 等. 金属板料各向异性断裂模型及断裂实验研究进展 [J]. 塑性工程学报, 2019 (1): 14.
- [2] 杨婷, 熊自柳, 孙力, 等. 汽车用先进高强钢韧性断裂模型的研究与应用进展 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (1): 8.
- [3] TVERGAARD V. Influence of Voids on Shear Band Instabilities under Plane Strain Conditions [J]. International Journal of Fracture, 1981, 17 (4): 389-407.
- [4] TVERGAARD V. On Localization in Ductile Materials Containing Spherical Voids [J]. International Journal of Fracture, 1982, 18 (4): 237-252.
- [5] TVERGAARD V, NEEDLEMAN A. Analysis of the Cup-Cone Fracture in A Round Tensile Bar [J]. Acta Metallurgica, 1984, 32 (1): 157-169.
- [6] NEEDLEMAN A , TVERGAARD V . An Analysis of Duct-

- tile Rupture in Notched Bars [J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 1984, 32 (6): 461-490.
- [7] 周惠久, 黄明志. 金属材料强度学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [8] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21 (1): 31-48.
- [9] DUNAND M, MOHR D. On The Predictive Capabilities of the Shear Modified Gurson and the Modified Mohr-Coulomb Fracture Models over A Wide Range of Stress Triaxialities and Lode Angles [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2011, 59 (7): 1374-1394.
- [10] LI C, DONG L, ZHANG J C, et al. Application of Mohr-Coulomb Ductile Fracture Criterion on Simulation of Shearing Process of High Strength Steel [J]. Suxing Gongcheng Xuebao/Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (4): 234-239.
- [11] BAI Y L, WIERZBICKI T. Application of Extended Mohr-Coulomb Criterion to Ductile Fracture [J]. International Journal of Fracture, 2010, 161 (1): 1-20.
- [12] DANIEL H. Parameter Identification of GISSMO Damage Model for DOCOL 1200M: A study on crash simulation for High Strength Steel Sheet Components [D]. Karlstad: Karlstad University, 2015.
- [13] CHALAVADI S K. Parameter Identification of GISSMO Damage Model for DOCOL 900M High Strength Steel Alloy: Usage of A General Damage Model Coupled with Material Modeling in LS-DYNA for Advanced High Strength Steel Crashworthiness Simulations [D]. Trollhättan: University West, 2017.
- [14] NEUKAMM F, HAUFFE A, FEUCHT M. Consistent Damage Modelling in the Process Chain of Forming to Crashworthiness Simulations [C]//7th German LS-DYNA Forum. [S. l. : s. n.], 2008.
- [15] 陈自凯, 张骥超, 徐晨阳. 考虑成形损伤的 DP980 钢板 GISSMO 失效模型开发及试验验证 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (4): 9.
- [16] 刘军, 孟宪明, 杨黎明, 等. 某车用铝合金动态力学性能及其本构模型研究 [C]//中国汽车工程学会. 第十九届汽车安全技术学术会议论文集. [出版地不详: 出版者不详], 2016: 1-7.
- [17] 冯悦, 肖守讷, 朱涛, 等. 考虑材料失效准则的吸能装置失效行为与碰撞特性 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2019, 50 (2): 10.
- [18] 朱俊儿, 曾龙, 马令晨, 等. 一种针对颈缩现象的高强钢板材力学行为研究方法 [J]. 北京理工大学学报, 2014, 34 (1): 75-77.
- [19] 刘禹昕. SUS301L-MT 材料及车辆端部结构冲击失效行为分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2021