

车用6082铝合金型材断裂失效行为研究

刘向征 王建哲 喻赛 李文炎 梁天开

(广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院, 广州 510000)

摘要: 基于Gissmo损伤失效模型, 采用数值参数反方法得到车用6082铝合金材料的失效参数, 并设计铝合金防撞梁准静态三点弯曲试验验证6082铝合金Gissmo损伤失效模型的合理性。通过准静态单轴拉伸试验, 得到6082材料的硬化曲线, 并采用Swift-Hockett-Sherby (SHS) 准则对硬化曲线进行外推; 开展不同应力状态下的准静态试验(剪切、单轴拉伸、中心孔、缺口、三点弯曲、杯突), 并采用仿真结合试验的数值反求得到Gissmo失效参数; 设计6082铝合金防撞梁的准静态三点弯曲试验, 验证6082材料失效参数的合理性。结果表明, 本研究中提出的参数反求得到的6082铝合金Gissmo损伤失效模型(含硬化曲线、失效应变曲线、失稳曲线、单元尺寸正则化曲线)可以较好地预测防撞梁材料的失效行为。

关键词: 6082铝合金型材 断裂失效 Gissmo损伤失效模型 参数反求

中图分类号: U465.2*2 文献标志码: B DOI: 10.19710/J.cnki.1003-8817.20230168

Study on Fracture Failure Behavior of 6082 Automotive Aluminum Alloy Profile

Liu Xiangzheng, Wang Jianzhe, Yu Sai, Li Wenyan, Liang Tiankai

(Automotive Engineering Institute, Guangzhou Automobile Group Co., Ltd., Guangzhou, 510000)

Abstract: Based on the Gissmo damage failure model, the failure parameters of 6082 automotive aluminum alloy profile were obtained by numerical parameter inverse method. The reasonability of the Gissmo damage failure model of 6082 aluminum alloy was verified by the quasi-static three-point bending test of the aluminum alloy impact beam. Firstly, the hardening curve of the 6082 material was obtained by quasi-static uniaxial tensile test, and the curve was extrapolated by Swift-Hockett-Sherby (SHS) law. Secondly, quasi-static tests (shear, uniaxial, central hole, notch, three-point bending, cupping) under various stress states were carried out, and Gissmo failure parameters were obtained by numerical inversion of test combined with simulation. Finally, the quasi-static three-point bending test of 6082 aluminum alloy impact beam was designed to verify the reasonability of Gissmo model. The test result shows that the Gissmo damage failure model of 6082 aluminum alloy proposed in this research, including hardening curve, failure strain curve, instability curve and mesh-size regulation curve, can predict the failure behavior of 6082 impact beam.

Key words: 6082 automotive aluminum alloy profile, Fracture failure, Gissmo damage failure model, Parameter calibration

1 前言

铝合金材料具备低密度、高比强度等特性, 使其在汽车结构设计、尤其是汽车车身结构的应用比例逐年增多^[1-2]。同时, 铝合金型材因其易成形,

截面多样等优异性能, 在防撞梁、门槛梁等车身框架应用中逐渐增加。铝合金型材等车身框架结构的强度失效行为直接关系到整车安全性能, 有必要对铝合金型材断裂失效行为开展研究。6082铝合金型材为某车型防撞梁材料, 对其失效行为进

作者简介: 王建哲(1987—), 男, 硕士学位, 研究方向为汽车车身结构性能仿真分析及优化。

参考文献引用格式:

刘向征, 王建哲, 喻赛, 等. 车用6082铝合金型材断裂失效行为研究[J]. 汽车工艺与材料, 2024(2): 52-58.

LIU X Z, WANG J Z, YU S, et al. Study on Fracture Failure Behavior of 6082 Automotive Aluminum Alloy Profile[J]. Automobile Technology & Material, 2024(2): 52-58.

行预测,对于车型安全性能评价及标定很重要。

目前材料常用的断裂失效模型主要有成形极限图(Forming Limit Diagram,FLD)、Johnson-Cook 失效准则^[3]、修正的 Mohr-Coulomb (M-C) 模型^[4]、CrashFem 韧性失效准则^[5]及 Gissmo 损伤失效模型等与应力状态相关联的失效判据。不同于 Johnson-cook 线性损伤累计方法,Gissmo 考虑非线性损伤累计,且仿真参数灵活,开发精度高,适于工程应用。Gissmo 模型是一种唯象的损伤累计失效模型,综合考虑以下因素:

- a.不同应力状态具有不同失效应变(含失效应变曲线);
- b.非比例加载的非线性损伤累计(含失效应变曲线,损伤累计指数);
- c.局部不稳定变形后应力和损伤耦合软化功能^[6-7](含失稳曲线,应力衰减指数);
- d.失效的网格尺寸正则化(含尺寸正则化曲线)。

Gissmo 材料开发目标为通过调试 Gissmo 损伤模型中的相关参数,实现仿真模型能够跟宏观试验现象相一致(一般为力-位移曲线一致)。换言之,Gissmo 材料开发的关键就是求解 Gissmo 失效模型中的待定参数。目前,国内金属失效研究集中在高强钢领域,陈自凯^[8]等基于 Gissmo 损伤模型,考察成形初始损伤对 DP980 材料帽形梁动态压溃试验的影响。方伟^[9]等采用 Gissmo 方法研究了热成形钢的断裂失效行为,并成功预测了热成形 B 柱的三点静压试验。当前,针对铝合金失效的研究相对较少,其断裂失效行为的研究仍需深入。此外,应变率效应对铝合金材料失效开发的影响应关注。

本研究以车用铝合金型材 6082 为研究对象,通过参数反求得到 6082 铝合金型材较完备的 Gissmo 参数,并通过铝合金防撞梁三点弯曲试验证实了材料开发的合理性。

2 试验

金属材料失效通常依赖于应力状态,应力状态由罗德角和应力三轴度^[10]共同确定。平面应力状态下,罗德角可表示成应力三轴度的函数,材料

失效模型可以描述为失效应变和应力三轴度 η 的函数。其中,应力三轴 η 如式(1)所示。

$$\begin{cases} \eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{vm}} \\ \sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \\ \sigma_{vm} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为材料 3 个方向主应力, σ_m 为平均应力(即静水压力), σ_{vm} 为 Mises 等效应力。

平面应力状态下,应力三轴度的范围为 $-2/3 \leq \eta \leq 2/3$ 。设计如图 1 所示的 6 组力学试验,期待较完整覆盖平面应力状态的应力三轴度,试验分别为准静态剪切、单轴拉伸、中心孔、缺口、三点弯曲、杯突。

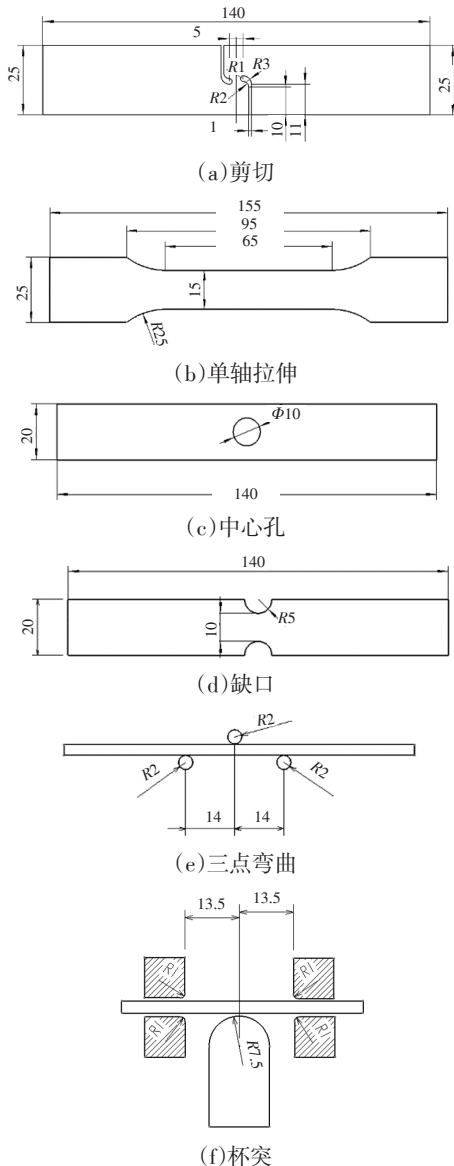


图 1 6082 材料测试样件示意

测试样片均取自 6082 铝合金防撞梁,样片沿防撞梁挤出方向,通过线切割方式制成。

图2为剪切、单轴拉伸、中心孔、缺口、三点弯曲、杯突6项试验的试验后图片。

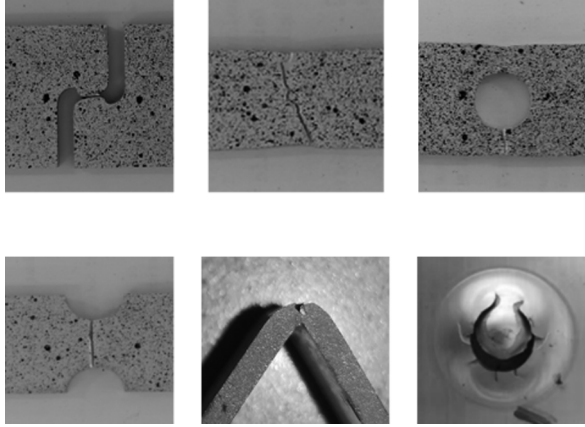


图2 6082材料试验后示意

3 6082材料失效参数获取

3.1 6082材料硬化参数获得

根据体积不变原理,将6082材料单轴拉伸的力-位移曲线,转化为工程应力-工程应变,再转化为真实应力-塑性应变曲线^[4],见式(2)。

$$\begin{cases} \varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon_{eng}) \\ \sigma_{true} = \sigma_{eng}(1 + \varepsilon_{eng}) \\ \varepsilon_{pl} = \varepsilon_{true} - \frac{\sigma_{true}}{E} \end{cases} \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量, σ_{eng} 为工程应力, ε_{eng} 为工程应变, σ_{true} 为真应力, ε_{true} 为真应变, ε_{pl} 为塑性应变。

颈缩失稳后的材料硬化曲线无法通过试验直接获得,需采用Swift-Hockett-Sherby (SHS)硬化准则来拟合外推6082材料塑性硬化行为,SHS准则的见式(3)。

$$\sigma = K \cdot (\varepsilon_{pl} + \varepsilon_0)^d + (\sigma_{sat} - (\sigma_{sat} - \sigma_i)) \cdot e^{-c \cdot \varepsilon_{pl}^p} \quad (3)$$

式中: K 、 ε_0 、 d 、 σ_{sat} 、 σ_i 、 c 和 p 均为待定系数,且 ≥ 0 。待定系数可由式(3)和均匀变形段硬化曲线通过最小二乘法数值求得。6082材料求得的SHS准则参数见表1。

表1 6082材料SHS硬化准则参数表						
K	ε_0	d	σ_{sat}	σ_i	c	p
40.3	0	0.45	348.2	295.0	33.9	1.217

将表1参数代入式(3)生成SHS准则硬化曲线,

同6082单轴拉伸均匀变形段曲线对比,如图3所示。

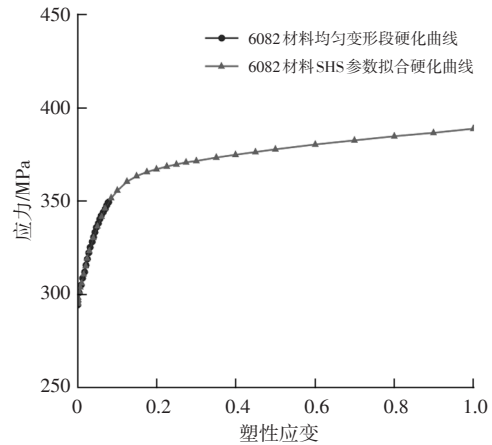


图3 SHS参数拟合硬化曲线

由图3可知,6082的SHS准则外推曲线与均匀变形段硬化曲线重合度较高。

3.2 Gissmo失效模型说明

Gissmo模型,以非线性损伤累计方式去描述材料的破坏过程,其包括了失稳软化和断裂失效2个过程^[6-7]。Gissmo损伤的增量形式见式(4)。

$$\Delta D = \frac{n}{\varepsilon_{fail}(\eta)} \cdot D^{(1-\frac{1}{n})} \cdot \Delta \varepsilon^{epI} \quad (4)$$

式中: n 为损伤累计指数, ΔD 为损伤增量, $\Delta \varepsilon^{epI}$ 为等效塑性应变增量, $\varepsilon_{fail}(\eta)$ 为失效应变曲线,即不同应力三轴度下材料失效的等效塑性应变。当损伤值累计到 $D=1$ 时,单元失效删除。

此外,为解决材料失效前的颈缩失稳^[5]等问题,类似定义损伤增量,Gissmo定义了一个不稳定变形因子 F ,用以描述颈缩后、失效前的载荷下降问题, F 的增量形式见式(5)。

$$\Delta F = \frac{n}{\varepsilon_{fail}(\eta)} \cdot F^{(1-\frac{1}{n})} \cdot \Delta \varepsilon^{epI} \quad (5)$$

式中: ΔF 为不稳定变形因子增量, $\varepsilon_{fail}(\eta)$ 为失稳曲线,即不同应力三轴度下材料发生失稳变形的等效塑性应变。当 $F \geq 1$ 时,应力和损伤变量发生耦合,见式(6)。

$$\sigma_{fading} = \begin{cases} \sigma & D < D_{crit} \\ \sigma \cdot \left(1 - \left(\frac{D - D_{crit}}{1 - D_{crit}} \right)^m \right) & D \geq D_{crit} \end{cases} \quad (6)$$

式中: σ 为未损伤的应力, σ_{fading} 为弱化后的真应力, D_{crit} 为 $F=1$ 时的损伤值, m 为应力衰减(软化)指数。由式(6)可知, $m=0$ 时,应力 $\sigma_{fading} = 0$,应力

衰减最为剧烈。

3.3 6082 材料 Gissmo 参数反求

车用铝合金 6082 的材料失效参数反求中, 仿真模型采用 LS-DYNA 的 *MAT_24 材料本构和失效卡片 *Mat_Add_Erosion, 单元类型为壳单元。采用 LS-OPT 开展参数反求^[11-12], 参数反求流程示意图 4。

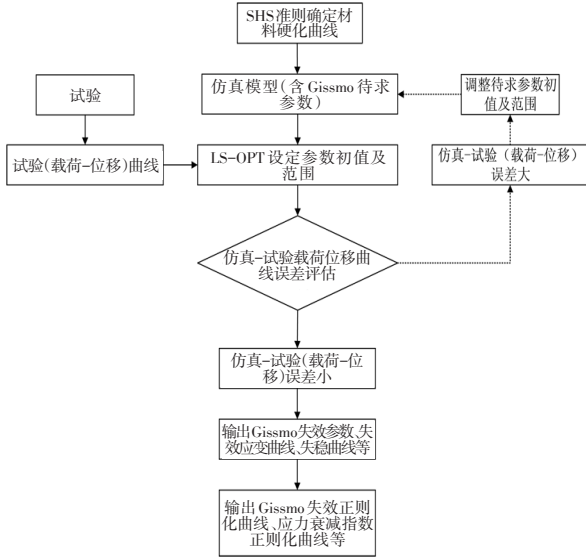


图 4 Gissmo 参数反求流程示意

图 4 所示的流程中, 待求参数合理的初值选择可以显著提升参数反求的成功率, 如失稳曲线初值的确定如下。失稳曲线某点初值 $\bar{\eta}_{hole}, \bar{\epsilon}_{ep1-hole}$, 见式(7)和式(8)。

$$\bar{\eta}_{hole} = \frac{\int_0^{s_1} \eta(s) ds}{s_1} \quad (7)$$

式中: $\eta(s)$ 为中心孔仿真模型中单元应力三轴度 η 与位移 s 的函数。

$$\bar{\epsilon}_{ep1-hole} = \epsilon_{ep1}(s) \Big|_{s=s_1} \quad (8)$$

式中: $\epsilon_{ep1}(s)$ 为中心孔仿真模型中单元塑性应变 ϵ_{ep1} 与位移 s 的函数, s_1 为中心孔试验最大载荷所对应的位移值(由试验确定), $\bar{\eta}_{hole}$ 为 $\eta(s)$ 在 $(0-s_1)$ 变形区间的平均应力三轴度, $\bar{\epsilon}_{ep1-hole}$ 为 $s=s_1$ 时 $\epsilon_{ep1}(s)$ 塑性应变。

仿真模型和试验结果通过式(7)、式(8)结合, 共同确定待求参数的初值。类似的, 失稳曲线的其他点初值可由其余试验确定。

经图 4 流程所示数值参数反求, 得到的 6082 材料失效应变曲线、失稳曲线如图 5 所示。图 5 中, 应力三轴度 $\eta = \sqrt{3}/3$ 为失效应变曲线最低点。图 5 中, 失稳曲线中间低, 两端高, 部分呈现出

抛物线的特征。

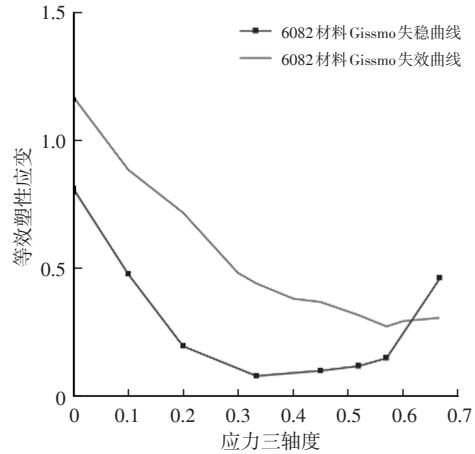
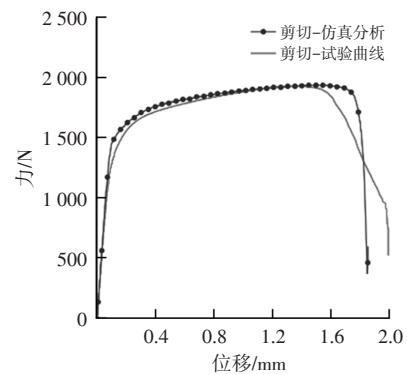


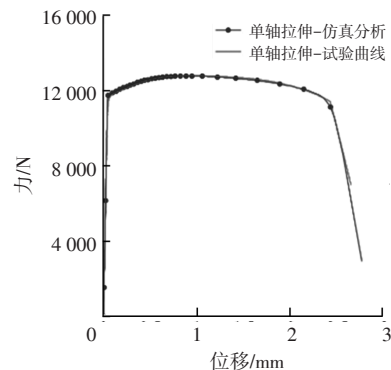
图 5 6082 材料失效应变曲线和失稳曲线

采用图 5 失效参数的 6082 材料, 剪切、单轴拉伸、中心孔、缺口、三点弯曲、杯突, 六项试验图片及试验和仿真对比结果, 如图 6 所示。

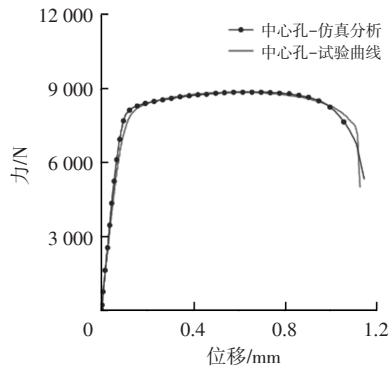
图 6a、图 6b、图 6c、图 6d 分别为剪切、单轴拉伸、中心孔、缺口仿真和试验力-位移曲线。由图可知, 试验和仿真曲线具有较高一致性。图 6e、图 6f 分别为三点弯曲和杯突仿真试验力-位移曲线对比, 图 6e、图 6f 仿真曲线突变是由于仿真模型积分点删除引起的, 这与图 7 三点弯曲试验中观察到的样件裂纹扩展现象具有一致性。



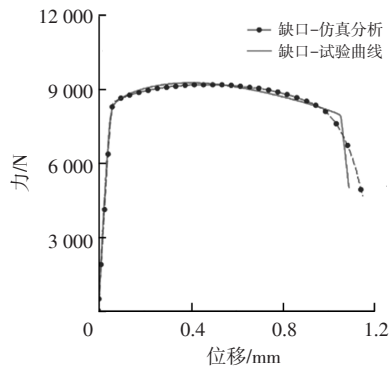
(a) 剪切



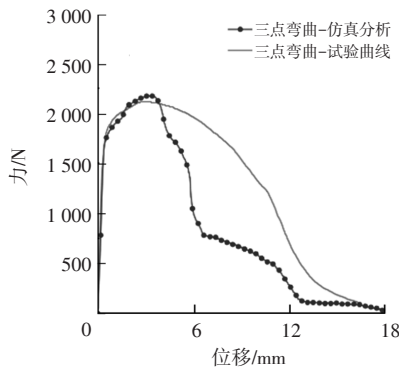
(b) 单轴拉伸



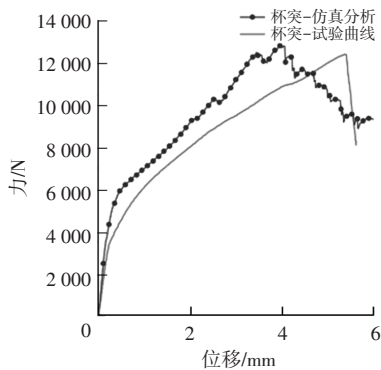
(c)中心孔



(d)缺口



(e)三点弯曲



(f)杯突

图6 参数反求得到的6082仿真与试验曲线对比

图7为6082三点弯曲试验后图片,裂纹发生自受拉伸侧表面,后随着载荷的增加,裂纹由表面沿厚度方向逐渐扩展,直至无法承载载荷。

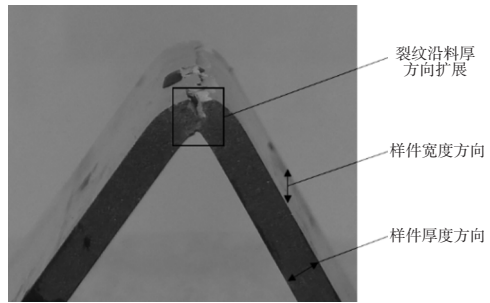


图7 6082三点弯曲试验后示意

与图6对应,6082材料试验和仿真失效位移的对比结果见表2。由表2可以得到,6082材料六项试验的仿真试验绝对误差平均值4.3%。

表2 参数反求得到6082失效位移仿真试验对比						
失效位移	剪切	单轴	中心孔	缺口	三点弯曲	杯突
试验/mm	1.97	2.42	1.12	1.06	16.2	5.38
仿真/mm	1.82	2.46	1.12	1.16	16.3	5.66
误差/%	-7.6	1.7	0.0	9.4	0.6	5.2

有限元数值模拟中,材料达到局部失稳阶段(如颈缩)后,相同材料失效应变下,不同网格尺寸失效结果不同。文中基于单轴拉伸试验,对失效进行网格尺寸正则化处理。单轴拉伸尺寸分别为0.5 mm、1 mm、2 mm、4 mm。

通过参数反求,得到失效应变的正则化曲线,及应力衰减指数 m 正则化曲线(图8)。

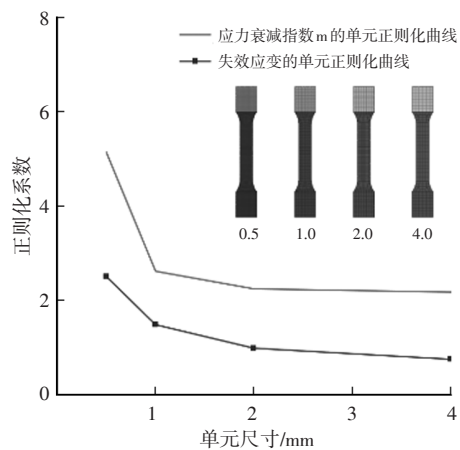
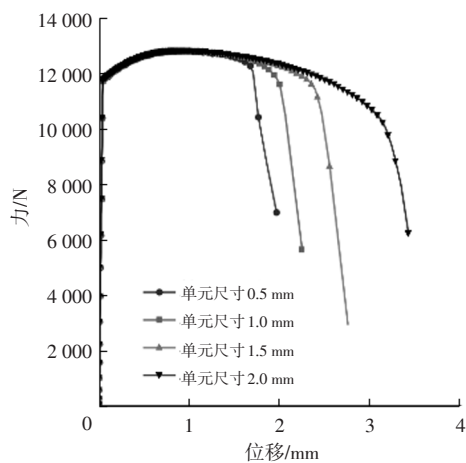


图8 6082材料的网格尺寸正则化曲线

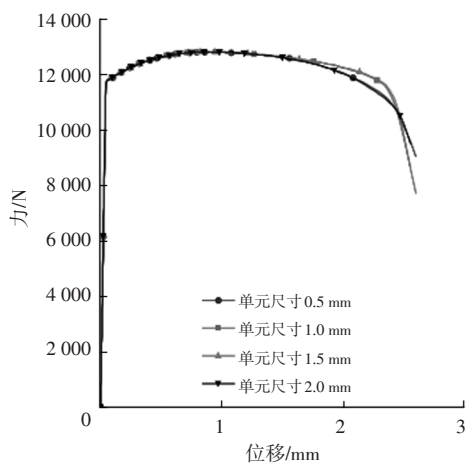
网格尺寸正则化对6082材料单轴拉伸的影响对比,如图9所示。

由图9a可知,未考虑网格尺寸正则化,单轴拉伸失效表现了的尺寸效应,小尺寸单元失效较早,大尺寸单元失效较晚。由图9b可知,考虑正则化

曲线后,6082单轴拉伸,不同网格尺寸表现一致的失效现象。此外,铝合金材料失效开发也应关注其硬化曲线的应变率强化效应以及失效应变的应变率增强效应^[13]。



(a)未考虑尺寸正则化



(b)考虑尺寸正则化

图9 网格尺寸正则化对6082材料单轴拉伸的影响

4 6082 铝合金防撞梁三点弯曲试验验证

4.1 防撞梁三点弯曲试验

为证实 6082 材料失效参数的合理性,设计 6082 防撞梁三点弯曲挤压试验验证。如图 10 所示,采用 6082 铝合金型材直梁进行三点弯曲测试。

图 10 中,压头直径 305 mm,压头加载速度为 0.15 mm/s,支辊直径 50 mm,支辊跨距 600 mm。防撞梁截面为“口”字型截面,见图 10。试验压头下压至直梁失效停止。

4.2 防撞梁三点弯曲对标

图 11 展示了口字型防撞梁三点弯曲试验和仿

真失效位置对比。6082 防撞梁三点弯曲试验,图 11a 断裂失效位置为防撞梁非挤压侧的中间位置,仿真模型中网格单元失效图 11b 位置与试验位置一致。

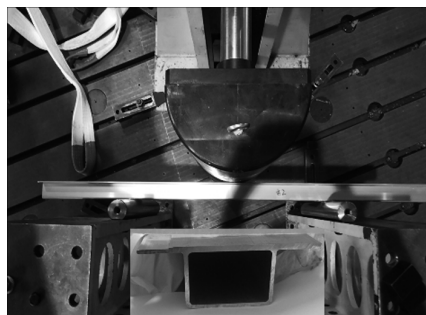
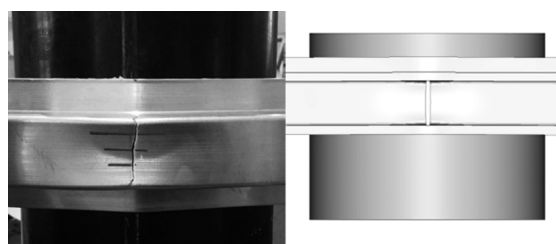


图 10 6082 防撞梁三点弯曲示意



(a)试验失效位置 (b)仿真失效位置

图 11 6082 防撞梁三点弯曲失效位置对比

图 12 展示了 6082 口字型防撞梁三点弯曲仿真和试验的力-位移曲线对比。

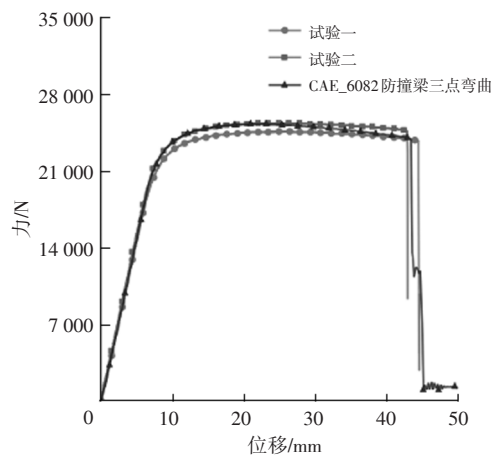


图 12 6082 防撞梁三点弯曲力-位移曲线对比

从图 12 可知,仿真和试验力-位移曲线,一致性较高。对应于图 12,6082 防撞梁三点弯曲最大载荷和断裂位移对比见表 3。

由表 3 可得到,仿真和试验误差小于 3.0%。由图 11、图 12 和表 3 可知,失效位置和失效位移,6082 防撞梁三点弯曲仿真和试验均吻合。据此,车用 6082 的 Gissmo 失效参数合理预测了防撞梁三点弯曲试验,进而证实开发方法的合理性。

表 3 6082 防撞梁三点弯曲最大载荷和失效位移

防撞梁三点弯曲	最大载荷/kN	失效位移/mm
试验 1	24.6	44.5
试验 2	25.4	42.8
仿真	25.3	43.3

5 结论

a. 以车用 6082 铝合金型材为研究对象, 通过仿真+试验的参数反求法获得了较完备的 Gissmo 失效参数, 为后续相关铝合金材料的在车辆安全开发应用提供一些参考。

b. 设计 6082 铝合金型材直梁的三点弯曲试验, 验证车用 6082 铝合金 Gissmo 参数的合理性, 也验证数值参数反求金属失效模型方法具有合理性。

参考文献:

[1] 张鹏, 刘志敏, 陈琳琳, 等. 白车身铝合金轻量化的应用现状和发展趋势. 汽车工艺与材料, 2019(3): 4-8.

[2] 刘云刚, 王鹏, 曹海龙, 等. 高强度铝合金型材防撞梁碰撞性能研究[J]. 汽车工艺与材料, 2022(10): 7-11.

[3] 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): 487 - 496.

[4] 赖兴华, 王磊, 李洁, 等. 铝型材防撞梁的碰撞断裂失效

表征[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(5): 504-510.

[5] 吴长鹏, 谢斌, 潘锋, 等. 汽车动力总成悬置的碰撞失效模拟研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(1): 36-41.

[6] LS-DYNA Keyword USER'S Manual VOLUME II[M]. Livermore : Software Technology Corporation, 2018.

[7] 梁宾, 张冲, 范吉富, 等. 金属板材高精度断裂卡片研发及应用[J]. 汽车工艺与材料, 2022(8): 28-40.

[8] 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): 110-118.

[9] 许伟, 方刚, 张钧萍, 等. 面向汽车碰撞安全的热成形钢断裂失效表征与验证[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(6): 121-128.

[10] 李祖吉, 云艳, 怀灿, 等. 空调塑料材料的碰撞失效模拟研究[J]. 工程力学, 2020, 37(7): 240-246.

[11] LS-OPT User's manual[M]. Livermore: Software Technology Corporation, 2019.

[12] CHEN X M, CHEN G F, HUANG L, et al. Calibration of Gissmo model for fracture prediction of a super high formable advanced high strength steel [C]//15th international LS-DYNA users conference, Dearborn, 2018: 1-10.

[13] 周伦, 苏兴亚, 敬霖, 等. 6061-T6 铝合金动态拉伸本构关系及失效行为[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(9): 113-124.

