

基于 GISSMO 的中空挤压型材碰撞行为分析

王丽红 吕林

(郑州铁路职业技术学院 机车车辆学院, 郑州 451460)

摘要: 为了研究轨道车辆车体中空挤压型材受碰撞后的响应特征,引入广义增量应力状态损伤模型(Generalized Incremental Stress State-damage Model, GISSMO)并进行有限元仿真分析。首先,基于车体常用材料6082-T6铝合金的试验结果,分别使用修正的约翰逊-库克(Modified Johnson-Cook, MJC)模型和DF2016模型对其动、静态力学性能和不同应力状态下的断裂行为进行表征;其次,基于LS-OPT软件和人工选优结合的方法,对GISSMO进行参数标定;然后,针对网格尺寸效应,开展了网格尺寸依赖性修正,并通过试验与仿真对比验证了模型和修正的有效性;最后,针对某一车体侧墙中空挤压型材进行碰撞仿真分析,并对比了考虑和不考虑材料损伤与断裂对仿真结果的影响。结果表明,相较于不考虑材料的损伤与断裂,基于GISSMO可以更加准确反映型材受纵向冲击下的响应。

关键词: GISSMO; 网格尺寸效应; 中空挤压型材; 碰撞行为

中图分类号: U287.1 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.08.008

0 引言

轨道列车在碰撞过程中往往会伴随车体结构的塑性大变形,严重时甚至会出现结构的破坏与断裂。目前对于列车碰撞的研究主要聚焦于车体耐撞性设计、吸能装置和乘员二次碰撞研究等方面^[1-3],而对于结构塑性变形和材料失效的精确表征关注较少。然而,材料的力学性能对车体塑性变形区的吸能效率、变形模式等参数影响较大,进而影响车体耐撞性的判断与设计^[4]。因此,精确表征车体在碰撞过程中的断裂失效行为,进而指导列车车体的防撞设计和乘员安全设计是很有必要的。

目前对于金属材料延性断裂行为的描述主要包括耦合型断裂模型和非耦合型断裂模型两种。耦合型断裂模型指将材料在塑性变形过程中产生的损伤以及随之产生的应力软化效应耦合进材料的本构模型中。最为典型的2种耦合型断裂模型分别为古尔森-特维加德-尼德曼(Gurson-Tvergaard-Needleman, GTN)模型与连续损伤力学(Continuum Damage Mechanics, CDM)模型。前者由GURSON^[5]提出,考虑了孔洞随基体变形的生长规律,并随着大量学者对孔洞形核、生长、聚合和剪切等过程的研究不断完善^[6-7]。该模型精度较高,但参数较多且部分参数物理意义不明确,难以应用于工程实践。后者是LEMAITRE^[8]在不可逆热力学框架下提出的连续介质损伤力学模型,该模型参数标定相对简单,对工程应用相对友好^[9]。非耦合型断裂模型通常将材料

达到断裂条件时的塑性应变作为延性断裂的判据。该类模型不考虑材料损伤对屈服面的影响,因此计算效率更高。常见的非耦合型模型包括Xue模型、修正的莫尔-库伦(Modified Mohr-Coulomb, MMC)、DF2016^[10-12]等考虑应力状态的断裂模型,以及经典的考虑应变率和温度效应的Johnson-Cook(J-C)断裂模型^[13]等。

近年来,广义增量应力状态损伤模型(Generalized Incremental Stress State-damage Model, GISSMO)^[14]受到了众多学者的关注。该模型参考了CDM模型的思想,将非线性的损伤演化以附加参数的形式与等效应力耦合,并将与应力状态和应变率相关的塑性应变极限面作为材料断裂的判据。冯悦等^[15]对比了GISSMO与常应变模型在吸能结构的碰撞响应数值计算中的差异。梁宾等^[16]标定了6061铝合金板材的GISSMO参数,并用于预测汽车发动机罩内板在冲压过程中的断裂失效行为。牟浩雷等^[17]分别使用最大塑性应变失效模型、J-C失效模型和GISSMO分析2024-O-T42搭接口动态拉伸失效行为,发现后者的精度最高。在列车碰撞分析的应用方面,ZHU等^[18]开展了一系列材料试验,标定了轨道车辆常用材料SUS301L-MT的GISSMO失效模型。WANG等^[19]分别使用常应变失效模型和GISSMO,对地铁车辆端部结构的碰撞行为进行仿真分析。刘文等^[20]对6061铝合金进行GISSMO参数标定,并对高速列车侧墙碰撞失效行为进行了分析,但未考虑材料的应变率效应。

综上所述,尽管对于列车车体的损伤断裂行为已

收稿日期: 2024-01-12 修回日期: 2024-02-07

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(252102220071); 郑州铁路职业技术学院科研项目(2025KY006)

作者简介: 王丽红,女,1980年生,河南宜阳人,硕士,副教授; 主要研究方向为城市轨道交通车辆; E-mail: honly_lee@sina.com。

引用格式: 王丽红,吕林. 基于GISSMO的中空挤压型材碰撞行为分析[J]. 机械强度, 2025, 47(8): 66-73.

WANG Lihong, LÜ Lin. Impact behavior analysis of hollow extruded profiles based on GISSMO[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(8): 66-73.

有一定的研究,但仍存在一些不足。对于铝合金车体常用的中空挤压型材结构,在列车碰撞中的力学行为和失效模式的研究还相对较少,研究的材料类型也相对单一。本文对车体常用材料 6082-T6 铝合金进行了本构模型和 GISSMO 的参数标定,通过与试验结果的对比较验证了模型的有效性。在此基础上,对轨道车辆中空挤压型材受碰撞载荷的响应进行了分析。

1 材料模型

1.1 动态本构模型

J-C 本构模型考虑了材料的应变硬化、应变率效应和温度效应。由于其形式简单,参数标定方便,因此,在各类工程和研究中广泛使用。本研究不考虑温度影响,则简化形式的 J-C 本构模型为

$$R_d = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}) \quad (1)$$

式中, R_d 为流动应力; A 、 B 和 n 为流动应力相关参数; ε_p 为塑性应变; C 为应变率敏感参数; $\dot{\varepsilon}$ 为实际应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率。等式右端第 1 部分为 Ludwik 非饱和型硬化模型,其特征为应力随塑性应变呈指数型增长;第 2 部分为对数形式的应变率修正项。由于 Ludwik 硬化模型的局限性,将其修正为与 Voce 饱和型硬化模型的线性加权形式^[21]。修正的约翰逊-库克 (Modified Johnson-Cook, MJC) 本构模型为

$$R_d = \left\{ k(A + B\varepsilon_p^n) + (1 - k)[A + Q(1 - de^{-\beta\varepsilon_p})] \right\} (1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}) \quad (2)$$

式中, k 为比例因子; β 、 Q 、 d 为流动应力相关参数。

1.2 GISSMO

大量的研究表明,金属材料的韧性断裂行为与其所受的应力状态相关。为了量化应力状态,定义了 2 个归一化应力状态参数,即反映静水应力对材料力学性能影响的应力三轴度 η 和反映偏应力对材料力学性能的影响的洛德角参数 L 。GISSMO 考虑了材料在不同应力状态和应变率下的断裂性能、非线性损伤演化路径以及应力软化效应,其损伤累积方程为

$$D = \int_0^{\varepsilon_p} \frac{1}{i+1} \left[\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_f(\eta, L, \dot{\varepsilon})} \right]^{i+1} d\varepsilon_p \quad (3)$$

式中, D 为损伤变量; ε_f 为与应力状态和应变率相关的断裂应变函数; i 为非线性损伤累积参数。当损伤累积至阈值 D_{crit} 时,应力与损伤耦合并开始软化;当损伤累积至 1 时,应力软化至 0,此时有限元模型中对应的网格将被删除。稳定性变量 F 和软化后的等效应力 \tilde{R}_d 计算式为

$$F = \int_0^{\varepsilon_p} \frac{1}{i+1} \left[\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{crit}(\eta, L)} \right]^{i+1} d\varepsilon_p \quad (4)$$

$$\tilde{R}_d = R_d \left(\frac{D - D_{crit}}{1 - D_{crit}} \right)^m \quad (5)$$

式中, ε_{crit} 为与应力状态相关的临界应变函数; D_{crit} 为 $F=1$ 时材料所对应的损伤变量; m 为非线性应力软化参数。临界应变函数和断裂应变函数需要对材料开展不同应力状态下的断裂试验,利用数字图像相关 (Digital Image Correlation, DIC) 技术观察或有限元逆方法计算得到相应的断裂应变值,并采用适当的非耦合韧性断裂模型进行拟合。

2 6082-T6 铝合金模型参数校准

2.1 材料本构及断裂模型参数校准

FAN 等^[22]给出了轨道交通车体常用材料 6082-T6 铝合金的动静态力学性能试验结果。使用万能试验机开展了光滑圆棒拉伸 (Smooth Tensile Bar, STB) 试验、缺口圆棒拉伸 (Double-Notched Tensile Bar, DTB) 试验、平面应力拉伸 (Plane Stress, PS) 试验、面内平剪 (In-Plane Shear, SHEAR) 试验和动态光滑圆棒拉伸 (High-speed Smooth Tensile Bar, HSTB) 试验,并采用 DIC 技术测量了试样表面应变信息。在试样发生颈缩前,不同加载速度下的 HSTB 试验得到的力-位移曲线与 STB 试验的结果基本平行,因此可以使用 MJC 本构模型描述该材料的动静态应力应变关系。基于光滑圆棒的准静态和动态拉伸试验,采用式 (2) 描述 6082-T6 铝合金的动静态本构关系,材料参数如表 1 所示。

表 1 6082-T6 铝合金 MJC 本构模型参数

Tab. 1 MJC constitutive model parameters of 6082-T6 aluminum alloy

参数 Parameter	应变硬化部分 Strain hardening part						应变率部分 Strain rate part		
	A	B	n	Q	β	d	k	$\dot{\varepsilon}_0$	C
值 Value	322	195	0.483	65.1	33.65	1.52	0.85	0.000 83	0.012 23

由于使用 DIC 技术只能采集到试样表面应变信息,所以对于片状试样,可使用 DIC 技术直接测量试样断裂时刻的最大等效塑性应变,而圆棒形试样则需要通过有限元逆方法得到试样断裂时刻内部的最大等效塑性应变。采用式 (6)、式 (7) 计算各试样的平均应力三轴度和平均洛德参数,因为不同形状的试样在变形过程中应力状态并不是保持恒定的。STB 与 HSTB 试验的应力状态参数一致。不同试样的应力状态参数和断裂应变如表 2 所示。表 2 中, $\bar{\theta}_{ave}$ 表示主应力方向的加权平均角度。

$$\eta_{ave} = \frac{1}{\varepsilon_f} \int_0^{\varepsilon_f} \eta(\varepsilon_p) d\varepsilon_p \quad (6)$$

$$\xi_{ave} = \frac{1}{\varepsilon_f} \int_0^{\varepsilon_f} L(\varepsilon_p) d\varepsilon_p \quad (7)$$

表2 6082-T6 铝合金断裂参数汇总

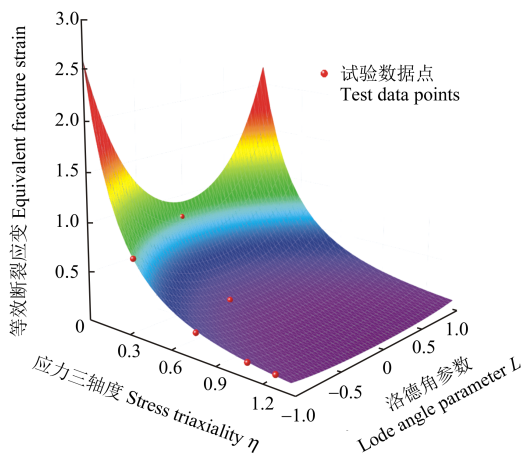
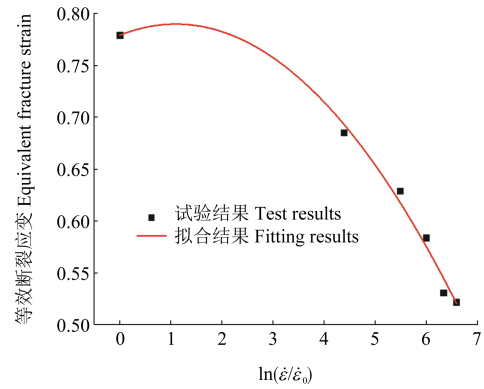
试验编号 Test number	应力状态部分 Stress state part					应变率部分 Strain rate part	
	ε_f	η_{ave}	ξ_{ave}	L_{ave}	$\bar{\theta}_{ave}$	试验编号 Test number	ε_f
STB	0.779	0.337	1	-1	1	HSTB-100	0.685
DTB ₂	0.131	1.279	1	-1	1	HSTB-300	0.629
DTB ₃	0.149	1.105	1	-1	1	HSTB-500	0.584
DTB ₉	0.258	0.771	1	-1	1	HSTB-700	0.531
PS	0.195	0.541	0.464	-0.281	0.307	HSTB-900	0.522
SHEAR	0.797	0.037	0.100	-0.058	0.064		

为了表征 6082-T6 铝合金的应力状态与断裂应变间的关系,分别采用 RT(Rice-Tracey)模型、MMC 模型和 DF2016 模型进行拟合,其中 RT 模型仅考虑了应力三轴度对断裂应变的影响,MMC 模型和 DF2016 模型同时考虑了应力三轴度和洛德角参数对断裂应变的影响。几种模型的拟合优度 R^2 分别为 0.666 5、0.990 6 和 0.999 4,可以看出,DF2016 模型拟合效果最好。对于该材料应变率与断裂应变的关系,则使用 STB 和 HSTB 的试验结果,并采用 J-C 断裂模型中的应变率项的高阶二次修正形式进行拟合,拟合优度 R^2 为 0.988 3,拟合效果较好。完整的断裂应变模型见式(8),拟合结果如表 3 所示,与试验结果的对比如图 1 所示。

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{\varepsilon}_f &= D_3 / \left[\left(\frac{2}{\sqrt{L^2 + 3}} \right)^{D_1} \left(\frac{f(\eta, L, D)}{f(1/3, -1, D)} \right)^{D_2} \right] [1 + \\ &D_5 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} + (D_6 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})^2] \quad (8) \\ f(\eta, L, D) &= \eta + D_4 \frac{(3 - L)}{3\sqrt{L^2 + 3}} + D \end{aligned} \right.$$

表3 6082-T6 铝合金断裂模型参数

参数 Parameter	应力状态部分 Stress state part					应变率部分 Strain rate part			
	D	D_1	D_2	D_3	D_4	$\dot{\varepsilon}_0$	D_5	D_6	
值 Value	0.666	6.839	2.687	5.038	-0.113	0.000 83	0.018	-0.012	

(a) 应力状态-断裂应变
(a) Stress state-fracture strain

(b) 应变率-断裂应变

(b) Strain rate-fracture strain

图1 6082-T6 铝合金断裂应变试验与拟合结果对比

Fig. 1 Comparison of fracture strain test and fitting results of 6082-T6 aluminum alloy

2.2 GISSMO 失效模型参数校准

除了等效断裂应变外,GISSMO 失效模型还有不同应力状态下的临界应变、非线性损伤累积参数和非线性应力软化参数等需要校准。

对于临界应变的校准,参考丁浩涓等^[23]的方法。建立与试验试样和边界条件一致的有限元计算模型,如图 2 所示。其中,发生塑性大变形的区域采用特征尺寸为 0.1 mm 的网格(0.1 mm×0.1 mm×0.1 mm 的六面体网格或 0.1 mm×0.1 mm 的矩形网格)进行划分,其他区域则适当地增大网格尺寸以减小计算成本。对比试验结果和不含损伤参数的有限元计算结果,将两者斜率产生偏离处记为临界应变识别点。取有限元模型中达到临界应变识别点时试样最小截面处或最大塑性应变处的 10 个单元的应变均值作为该应力状态下所对应的临界应变。采用 DF2016 对上述临界应变进行拟合,得到的临界应变曲面如图 3 所示。

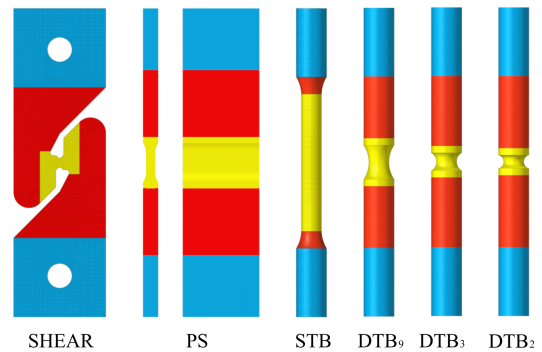


图2 有限元仿真模型

Fig. 2 Finite element simulation model

对于线性损伤累积参数和非线性应力软化参数,则借助 LS-OPT 优化软件和人工选优相结合的方法,找到一组适用于 6082-T6 铝合金的参数,GISSMO 失效

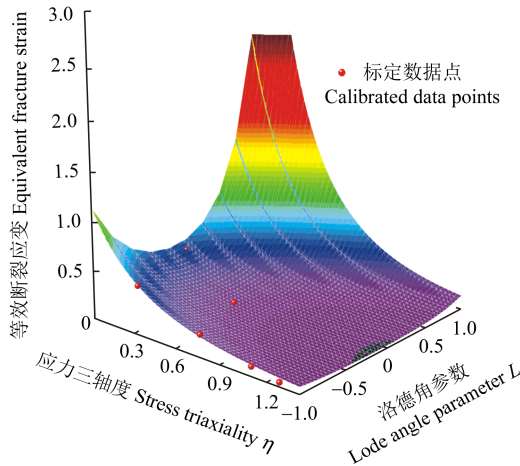


图3 6082-T6 铝合金应力状态-临界应变拟合曲面

Fig.3 Stress state-critical strain fitting surface of 6082-T6 aluminum alloy

模型参数如表 4 所示。基于 GISSMO 失效模型的仿真结果与试验结果对比如图 4 所示,由图 4 可知,采用该模型可以很好地描述 6082-T6 铝合金应力损伤与断裂行为。值得注意的是,仿真得到的曲线与试验结果仍有一定的差异,如 PS 和 SHEAR 试样。这是由于本文采用的是 von Mises 屈服函数和关联流动法则,而材料的屈服行为和应变硬化行为可能与应力状态或加载方向相关^[24],本文未对此做进一步的探究。

表 4 6082-T6 铝合金 GISSMO 参数

Tab.4 GISSMO parameters of 6082-T6 aluminum alloy

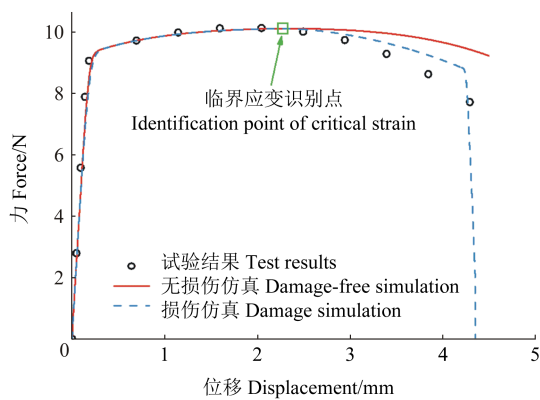
参数 Parameter	临界应变部分 Critical strain part					非线性参数部分 Nonlinear parameter part	
	D	D_1	D_2	D_3	D_4	m	i
值 Value	1.000	8.024	5.176	18.156	1.394	2.5	1.5

3 轨道车辆中空挤压型材碰撞仿真分析

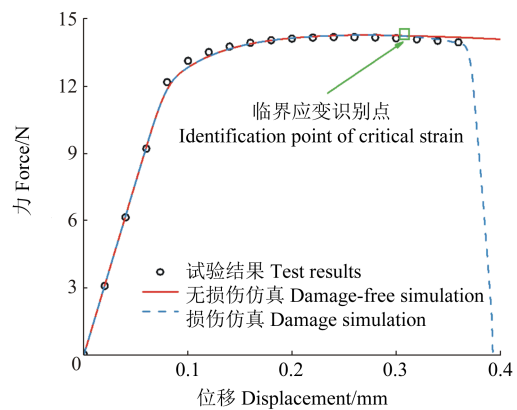
3.1 网格尺寸依赖性修正

上文的 GISSMO 参数校准均是基于特征尺寸为 0.1 mm 的网格。而在轨道车辆碰撞分析时,由于结构较大,往往需要更大尺寸的网格以降低计算成本。在达到临界损伤前,认为材料处于均匀变形阶段,此时网格尺寸对计算结果影响较小;达到临界损伤后,认为材料开始发生塑性大变形,此时网格尺寸将直接影响材料的应变场。为了减小网格尺寸对计算精度的影响,本节将基于单轴拉伸试样对断裂应变进行修正。

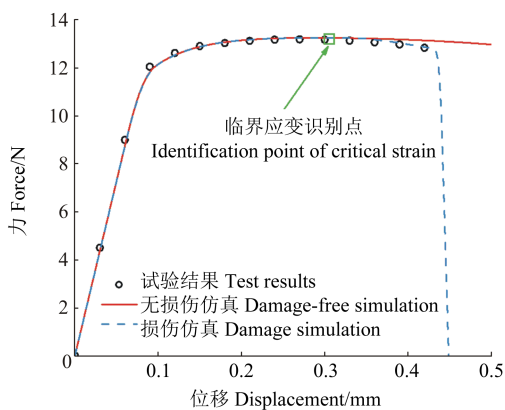
在 GISSMO 中,可以通过输入断裂应变正则化修正曲线对网格尺寸依赖性进行修正。分别采用特征尺寸为 0.1、0.25、0.5、1 mm 网格对单轴拉伸试样进行建模,并保证边界条件与试验一致。同样,基于 LS-OPT 优化软件和人工选优相结合的方法,对单轴拉伸



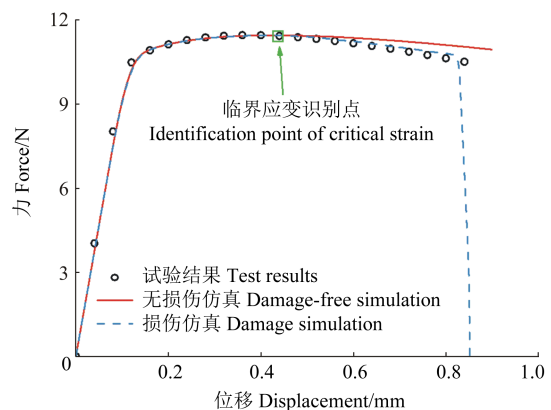
(a) STB



(b) DTB₂



(c) DTB₃



(d) DTB₉

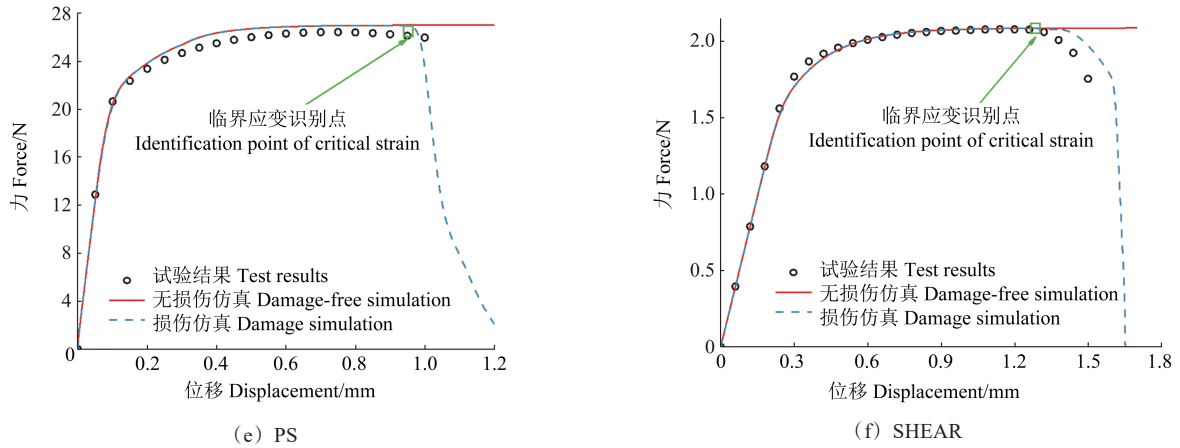
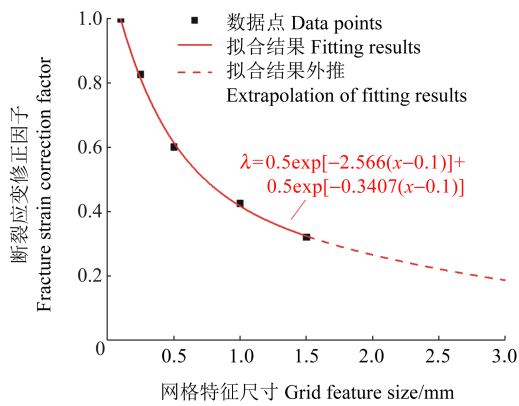


图4 6082-T6 铝合金试验与仿真结果对比

Fig. 4 Comparison of test and simulation results of 6082-T6 aluminum alloy

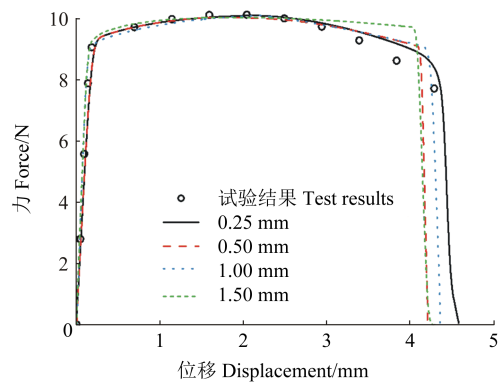
断裂应变进行正则化修正,并通过函数进行拟合,该函数需要保证在网格特征尺寸等于0.1 mm时,断裂应变修正因子为1。断裂应变正则化修正曲线如图5(a)所示,修正后几种网格尺寸的模型计算结果如图5(b)所示,可以看到修正效果较好。

所示。由图6可知,不同网格尺寸的有限元仿真结果力-位移曲线有一定的差异,这是网格尺寸较大时,计算沙漏能导致的额外应力较大。但试样最终的断裂位移基本一致,可以证明本文网格尺寸依赖性修正的有效性。



(a) 断裂应变正则化修正曲线

(a) Correction curves of fracture strain regularization



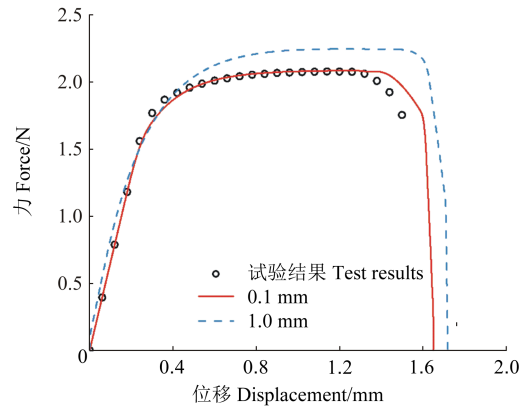
(b) 单轴拉伸试样修正结果

(b) Correction results of uniaxial tensile specimens

图5 单轴拉伸试样的网格尺寸依赖性修正

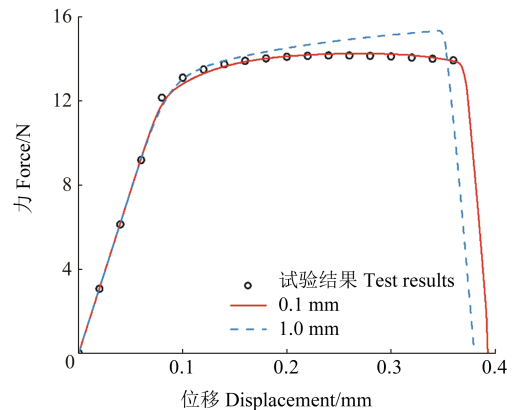
Fig. 5 Grid size dependent correction for uniaxial tensile specimens

进一步采用特征尺寸为1 mm的网格对SHEAR试样和DTB₂试样分别进行建模并计算,计算结果如图6



(a) SHEAR 试样修正结果

(a) Correction results of SHEAR sample



(b) DTB₂ 试样修正结果

(b) Correction results of DTB₂ sample

图6 网格尺寸依赖性修正结果

Fig. 6 Correction results of grid size dependency

3.2 中空挤压型材碰撞行为分析

本节对轨道车辆中常用的中空挤压型材进行碰

撞仿真分析,其结构尺寸如图 7 所示。该结构取自某型有轨电车的侧墙,整体尺寸为 1 000 mm×450 mm×48 mm;蒙皮厚度为 3 mm,内筋厚度为 2.5 mm。出于轻量化的考虑,一侧蒙皮及内筋开有 660 mm×120 mm 的减重孔。考虑型材受纵向冲击的工况,计算设置和边界条件是:材料模型为 GISSMO,与不考虑材料失效的情况进行对比。在型材前、后侧分别设有刚性墙,一侧与型材固定,另一侧刚性墙配重 1 t,以 36 km/h 的初速度冲击型材。型材采用 2 mm 壳单元网格进行划分,沿厚度方向定义 5 个积分点。型材结构施加单面自动接触,型材与刚性墙之间施加面面自动接触。

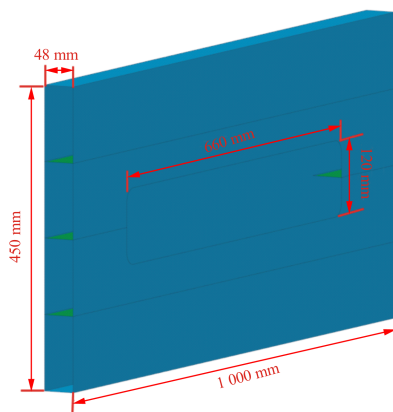
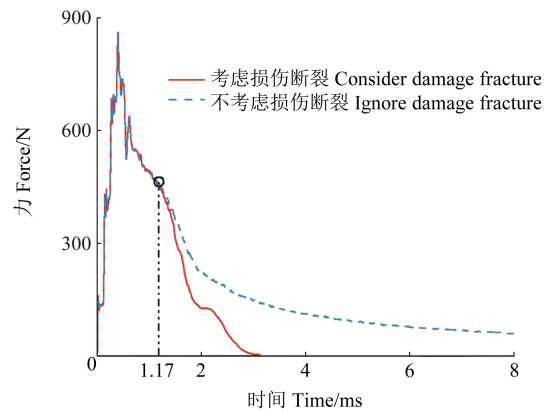


图 7 中空挤压型材尺寸示意图

Fig. 7 Dimension diagram of the hollow extruded profile

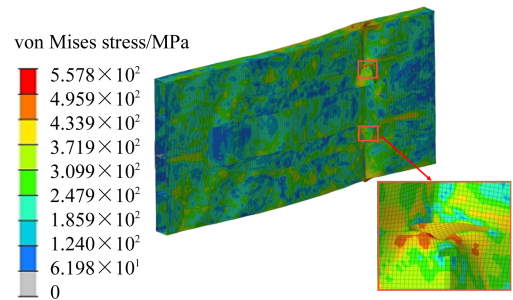
计算结果如图 8 所示。由图 8 可知,在 0~1.17 ms,不考虑与考虑材料失效的力-时间曲线基本一致。刚性墙与型材的接触力快速达到峰值 865 kN 后有所下降。在 1.17 ms 时,两种工况的力-时间曲线开始出现分离。采用不考虑材料失效的模型时,冲击力缓慢下降,表现出一定的连续性;而采用考虑材料失效的模型时,冲击力卸载较快。这是因为前者未考虑材料的破坏,型材板主要变形为发生褶皱与屈曲,其纵向刚度缓慢下降;而后者在 1.17 ms 时,型材减重孔附近出现了单元失效,并随着碰撞过程的进行形成了较大的裂口,使得型材板的刚度迅速下降而丧失承载能力,如图 8(b)所示。材料的断裂失效将显著影响型材的吸能效率,考虑与不考虑材料失效,使用 GISSMO 计算得到的型材吸能量分别为 7.64、13.62 kJ。

图 9 所示为型材发生破坏前的应力状态云图。由图 9 可知,由于发生了褶皱,型材多处应力三轴度接近 0.666,洛德角参数 L 接近 1,即处于双轴拉伸应力状态。对于 6082-T6 铝合金以及其他轨道车辆车体常用金属材料,其断裂应变往往随着应力三轴度的增大而减小,在双轴拉伸应力状态下容易发生韧性断裂。型



(a) 考虑与不考虑材料损伤的接触力-时间曲线

(a) Contact force-time curves with/without material damage

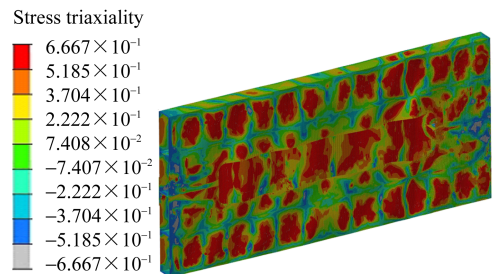


(b) 1.17 ms 时刻考虑材料损伤的型材板应力云图

(b) Stress nephogram of the profile plate with material damage at 1.17 ms

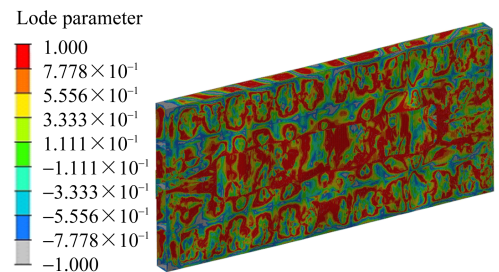
图 8 型材碰撞仿真结果

Fig. 8 Simulation results of profile collision



(a) 应力三轴度

(a) Stress triaxiality



(b) 洛德角参数 L

(b) Lode angle parameter L

图 9 型材发生破坏前应力状态云图

Fig. 9 Stress state nephogram of the profile before failure

材受冲击能量较大的纵向碰撞时,应力集中区域发生破坏的可能性较大。因此,采用 GISSMO 对中空挤压型材碰撞行为进行分析是更加合理与准确的。综上

所述,应在碰撞仿真分析中考虑基于 GISSMO 的材料失效,以避免过高估计中空挤压型材的吸能效率。

4 结论

基于 6082-T6 铝合金的试验结果,对其动、静态力学性能及断裂行为进行表征,并开展了中空挤压型材碰撞仿真,得到的结论如下:

1)采用 MJC 模型和 DF2016 模型可以很好地表征 6082-T6 铝合金的动静态力学性能和不同应力状态下的断裂行为。基于 GISSMO 的有限元仿真结果与试验结果较为吻合。

2)针对网格尺寸效应,开展了断裂应变修正研究。仿真结果表明该修正可以在一定程度上解决网格尺寸依赖性问题。

3)对比了考虑和不考虑材料损伤与断裂对中空挤压型材碰撞仿真结果的影响。结果表明,相较于不考虑材料的损伤与断裂,基于 GISSMO 可以更加准确地反映型材受纵向冲击下的响应。

参考文献(References)

- [1] ZHU T, XIAO S N, LEI C, et al. Rail vehicle crashworthiness based on collision energy management: an overview [J]. *International Journal of Rail Transportation*, 2021, 9(2): 101-131.
- [2] 高广军,舒康,关维元,等. 列车收缩管吸能防爬器耐撞性研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(2): 520-527.
GAO Guangjun, SHU Kang, GUAN Weiyuan, et al. Crashworthiness analysis of shrink circular tube energy absorbers with an anti-clamber for trains [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, 19(2): 520-527. (In Chinese)
- [3] 高广军,吴小伟,于尧. 减轻乘员二次碰撞损伤的列车铝蜂窝吸能桌耐撞性研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(1): 299-309.
GAO Guangjun, WU Xiaowei, YU Yao. Study on crashworthiness of the train honeycomb energy absorbing table for reducing the secondary impact injury of occupant [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(1): 299-309. (In Chinese)
- [4] 杨超. 列车碰撞动力学关键问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016: 53-55.
YANG Chao. Research on key issues of train collision dynamics [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016: 53-55. (In Chinese)
- [5] GURSON A L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: part I—yield criteria and flow rules for porous ductile media [J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1977, 99(1): 2-15.
- [6] TVERGAARD V. On localization in ductile materials containing spherical voids [J]. *International Journal of Fracture*, 1982, 18(4): 237-252.
- [7] HE Z, ZHU H, HU Y M. An improved shear modified GTN model for ductile fracture of aluminium alloys under different stress states and its parameters identification [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 192: 106081.
- [8] LEMAITRE J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture [J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1985, 107(1): 83-89.
- [9] 张凯,岳振明,张杰. 基于改进型 CDM 模型的 AA365-T7 板材失效预测[J]. *塑性工程学报*, 2021, 28(6): 26-33.
ZHANG Kai, YUE Zhenming, ZHANG Jie. Failure prediction of AA365-T7 sheet metal based on improved CDM model [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2021, 28(6): 26-33. (In Chinese)
- [10] XUE L, WIERZBICKI T. Ductile fracture initiation and propagation modeling using damage plasticity theory [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(11): 3276-3293.
- [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] LOU Y S, CHEN L, CLAUSMEYER T, et al. Modeling of ductile fracture from shear to balanced biaxial tension for sheet metals [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2017, 112: 169-184.
- [13] 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.
- [14] ANDRADE F X C, FEUCHT M, HAUF A, et al. An incremental stress state dependent damage model for ductile failure prediction [J]. *International Journal of Fracture*, 2016, 200(1): 127-150.
- [15] 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.
FENG Yue, XIAO Shoune, ZHU Tao, et al. Failure behavior and collision characteristics of energy-absorbing structures considering material failure criteria [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(2): 487-496. (In Chinese)
- [16] 梁宾,赵岩,赵清江,等. 基于 GISSMO 失效模型的 6016 铝合金板材断裂行为研究及应用[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(18): 53-62.
LIANG Bin, ZHAO Yan, ZHAO Qingjiang, et al. On the prediction of failure in 6016 aluminum alloy sheet by GISSMO damage model [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(18): 53-62. (In Chinese)
- [17] 牟浩蕾,陈英实,魏家威,等. 基于损伤模型的 2024-O-T42 搭接件动态拉伸失效分析[J]. *材料导报*, 2023, 37(增刊): 462-432.
MOU Haolei, CHEN Yingshi, WEI Jiawei, et al. Dynamic tensile failure analysis of 2024-O-T42 lap joint based on damage model [J]. *Materials Reports*, 2023, 37 (Suppl. 1): 22080203. (In Chinese)
- [18] ZHU T, DING H X, WANG C, et al. Parameters calibration of the

- GISSMO failure model for SUS301L-MT[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2023, 36(1): 348-359.
- [19] WANG X R, ZHU T, ZHANG J K, et al. Effect of material failure criteria on collision behavior of metro vehicle end structures[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2023, 237(4): 419-428.
- [20] 刘文, 张乐乐, 茹一帆. 基于损伤演化模型的高速列车侧墙碰撞失效分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(5): 1834-1842.
- LIU Wen, ZHANG Lele, RU Yifan. Failure analysis of high-speed train sidewall collision based on damage evolution model[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(5): 1834-1842. (In Chinese)
- [21] 陈爱国, 王开明, 邢信慧, 等. 单调荷载下 Q345 钢焊缝金属的延性断裂性能研究[J]. 工程力学, 2020, 37(1): 88-97.
- CHEN Aiguo, WANG Kaiming, XING Jihui, et al. Ductile fracture behavior of weld metal for Q345 steel under monotonic loading [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(1): 88-97. (In Chinese)
- [22] FAN F, XU T L, ZHI X D, et al. Research on dynamic constitutive model and fracture criterion of 6082-T6 aluminium alloy[J]. Structures, 2022, 38(Suppl. C): 14-27.
- [23] 丁浩谓, 朱涛, 肖守讷, 等. SUS301L-MT 不锈钢失效行为表征[J]. 机械工程学报, 2023, 59(8): 99-110.
- DING Haoxu, ZHU Tao, XIAO Shoune, et al. Characterization of failure behaviour of SUS301L-MT stainless steel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(8): 99-110. (In Chinese)
- [24] 秦彩芳, 许泽建, 窦旺, 等. 金属材料在复杂应力状态下的塑性流动特性及本构模型[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(9): 77-87.
- QIN Caifang, XU Zejian, DOU Wang, et al. Plastic flow properties and constitutive model of metallic materials under complex stress states[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(9): 77-87. (In Chinese)

Impact behavior analysis of hollow extruded profiles based on GISSMO

WANG Lihong LÜ Lin

(Locomotive and Vehicle College, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Zhengzhou 451460, China)

Abstract: To study the response characteristics of the hollow extruded profile of the vehicle after the collision, the generalized incremental stress state-damage model (GISSMO) was introduced and the finite element simulation was carried out. Firstly, based on the test results of 6082-T6 aluminum alloy, the dynamic and static mechanical properties and fracture behavior under different stress states were characterized by the modified Johnson-Cook (MJC) model and DF2016 model respectively. Secondly, the parameter calibration of GISSMO was carried out based on the combination of LS-OPT software and manual optimization. Then, according to the mesh size effect, the mesh size dependence correction was carried out, and the effectiveness of the model and correction were verified by comparison between the experiment and simulation. Finally, the impact simulation analysis of a hollow extruded profile on the side wall of a vehicle body was carried out, and the impact of material damage and fracture on the simulation results was compared. The results show that GISSMO can more accurately reflect the response of profiles under longitudinal impact than without considering the damage and fracture of materials.

Key words: GISSMO; Mesh size effect; Hollow extruded profiles; Collision behavior

Corresponding author: WANG Lihong, E-mail: honly_lee@sina.com

Fund: Henan Province Science and Technology Key Project (252102220071); Scientific Research Project of Zhengzhou Railway Vocational & Technical College (2025KY006)

Received: 2024-01-12 Revised: 2024-02-07