

基于 LS_DYNA 中损伤积累模型的 22MnB5 热成形钢断裂行为研究

梁宾 赵岩* 周佳 范体强 赵清江

中国汽车工程研究院股份有限公司 重庆 401122

摘要: 热成形钢在汽车上的应用是实现汽车轻量化的重要途径,准确预测汽车用热成形零部件在复杂工况下的断裂失效问题是当前研究的热点。热成形钢的临界断裂应变与其受力工况有关,不再是固定值,需采用考虑材料损伤及损伤积累的断裂模型去预测其断裂失效行为。文中以某 22MnB5 热成形钢为研究对象,通过设计多工况下的断裂试样进行断裂性能测试,结合数字图像相关技术设备,得到多应力状态的断裂参数,并基于 LS_DYNA 中 Gissmo 损伤积累模型标定断裂模型参数。分别将 Gissmo 失效模型、传统固定临界断裂应变值及成形极限图用于预测某 22MnB5 热成形防撞梁在三点静压工况下的断裂失效问题,并对数值模拟计算的结果进行实验验证。结果发现,与传统固定临界断裂应变值及成形极限图相比, Gissmo 失效模型计算结果中裂纹形貌、载荷-位移曲线均与实验结果更加吻合,表明 Gissmo 失效模型适合用于准确预测 22MnB5 热成形钢的断裂行为。

关键词: 22MnB5 热成形钢, 断裂失效, 损伤积累, Gissmo 失效模型

引言

近年来,随着汽车轻量化技术的发展,热成形工艺的日渐成熟,以热成形工艺生产的高强度钢被广泛的用于汽车零部件制造中^[1]。用热成形工艺制造汽车零部件,既可以减轻车体重量,又能提高汽车碰撞安全性能,被国际汽车界公认为是同时实现汽车轻量化和提高碰撞安全性的最好途径^[2-5]。

目前,以热成形工艺生产的汽车零部件主要有 A 柱、B 柱、车门防撞梁、前防撞梁等关键结构件^[6-8]。在汽车碰撞过程中,这些关键结构件作为主要受力体,容易产生大变形,甚至断裂。在汽车碰撞试验中,热成形零件的断裂也逐渐被作为评价汽车碰撞安全性能的主要汽车零部件之一。因此,研究热成形钢的断裂失效问题就显得十分重要^[9]。

随着计算机技术的日渐成熟,使用数值仿真技术研究热成形零件的断裂失效问题十分方便。热成形钢作为金属材料,在外力作用下,其变形伴随着非线性应变路径依赖性,在不同受力状态下,临界断裂应变值不同^[10]。因此,采用传统的固定应变值或者成形极限图(Forming Limit Diagram, FLD)去研究热成形钢的断裂失效问题不再适用,需采用考虑损伤积累的断裂失效模型。在汽车碰撞分析的主流软件 LS_DYNA 中,加入了考虑材料损伤及非线性损伤积累的 Gissmo 断裂失效模型,非常适合用于预测热成形钢在复杂受力状态下的断裂失效问题^[11]。然而,针对热成形钢,采用数字图像相关法(digital image correlation DIC)技术测试材料的基本力学性能及断裂性能,并运用损伤积累断裂模型去预测其在复杂受力状态的断裂失效问题,诸如此类的研究在国内外仍较为罕见。

本文以某 22MnB5 热成形钢为研究对象,通过准静态及动态拉伸试验得到其在不同应变率下的真应力-真应变曲线,并采用耦合硬化模型延伸其在高应变下的应力参数,得到本构模型参数值。基于 DIC 设备,通过五种受力状态下的断裂试验测试,得到其在各个受力状态下的临界断裂应变值,并标定 Gissmo 断裂失效模型参数。分别将标定好的 Gissmo 失效模型参数、传统固定断裂应变临界值及 FLD 用于预测 22MnB5 热成形钢前防撞梁在三点静压中的断裂失效,并与实验结果对比,分析了三种断裂准则的预测精度。本文的研究方法能为热成形钢的断裂失效仿真和整车碰撞安全分析计算提供一定的指导和参考。

1 22MnB5 热成形钢材料试验

1.1 基本力学性能试验

基本力学性能测试试验所用材料为 1.5mm 厚的热成形 22MnB5 钢板，其工艺条件为先加热到 930℃，使其完全奥氏体化，保温 5 分钟，后以大于 30℃/s 的速度快速冷却，得到组织为以马氏体为主的 22MnB5 热成形钢板。

为得到 22MnB5 热成形钢的力学性能，分别进行准静态标准拉伸试验及高速拉伸试验，试验式样如图 1 所示，其中，高速拉伸试验分别在 0.1/s、10/s、100/s、200/s、500/s 应变率条件下进行。

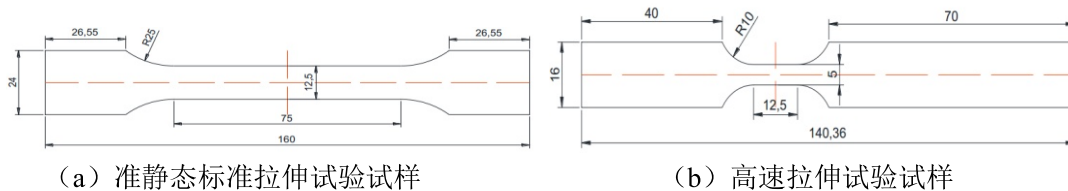


图 1 22MnB5 热成形钢基本力学性能测试试样

通过试验测试，得到不同应变率下的真应力-真应变曲线如图 2 所示。从图中可知，在不同应变率下，22MnB5 热成形钢的真应力-真应变曲线之间存在交叉，并且不成规律，说明其力学性能对应变率不明感。因此，在后续的仿真中，均不考虑应变率的影响，以准静态条件下的真应力-真应变曲线表征 22MnB5 热成形钢的变形。

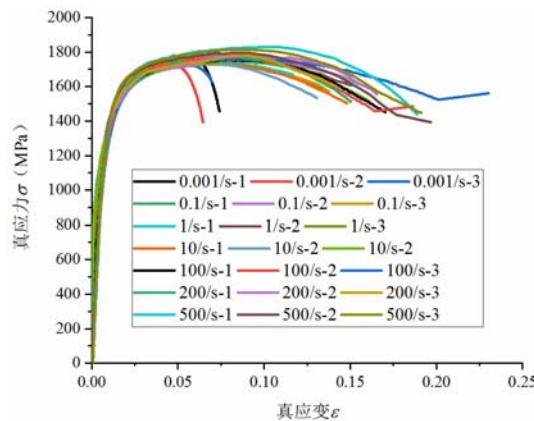


图 2 不同应变率下 22MnB5 热成形钢真应力-真应变曲线

1.2 断裂性能试验

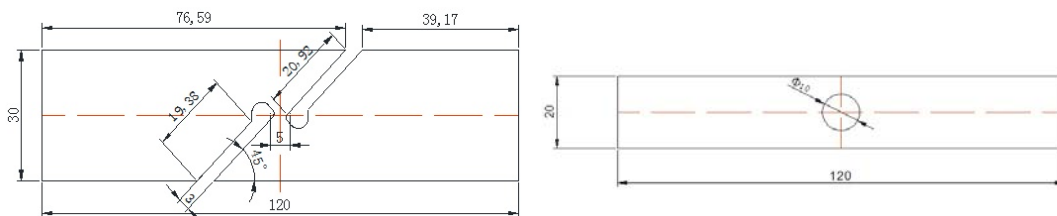
金属材料的断裂极限应变依赖于局部应力状态，在不同受力状态下，断裂失效应变临界值不同^[10]。22MnB5 热成形钢的应力状态可用应力三轴度 η 表征，如式 (1) 所示。

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_v}, \quad \sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

$$\sigma_v = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

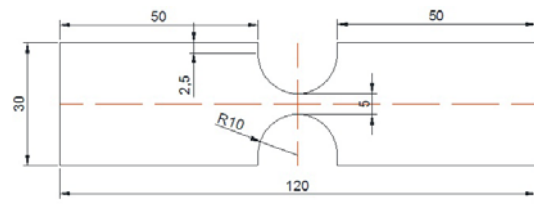
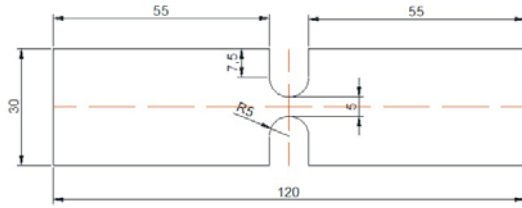
式中 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为第一、第二、第三主应力； σ_m 为静水压力， σ_v 为 Mises 等效应力。

为得到 22MnB5 热成形钢在不同应力状态下的临界断裂应变值，分别进行纯剪拉伸、中心孔拉伸、R5 缺口拉伸、R10 缺口拉伸及杯突试验，在各应力状态下，重复三次试验，试验试样如图 3 所示。采用 DIC 设备对各个试验中材料的应变进行实时追踪测试，得到的断裂应变如图 4 及表 1 所示，其中，杯突试验的断裂应变值采用仿真方法得到。此外，各应力状态下的力-位移曲线如图 5 所示，位移是由 50mm 引伸计测试得到的相对位移。



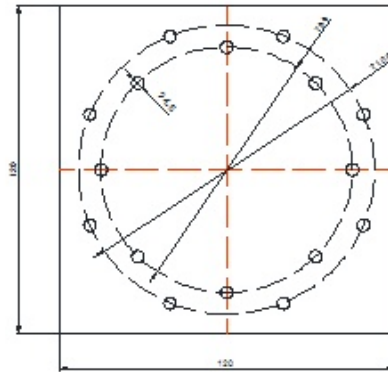
(a) 纯剪拉伸试验试样

(b) 中心孔拉伸试验试样



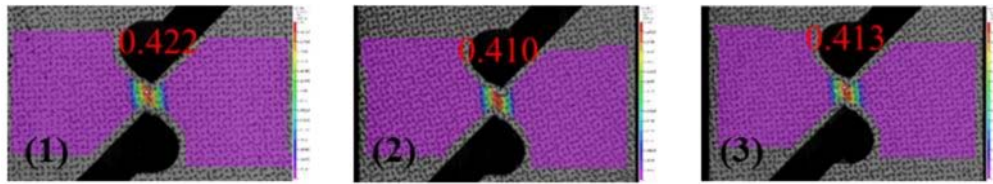
(c) R5 缺口拉伸试验试样

(d) R10 缺口拉伸试验试样

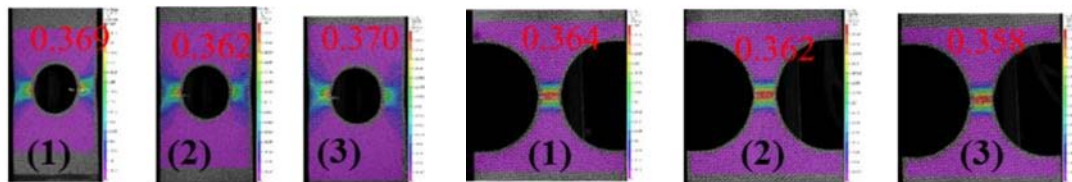


(e) 杯突试验试样

图 3 22MnB5 热成形钢断裂试验试样

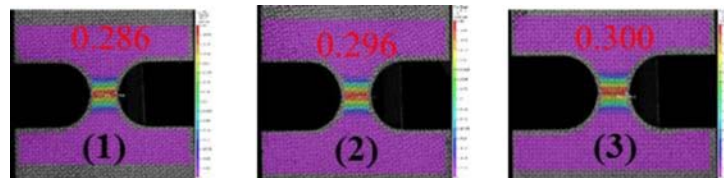


(a) 纯剪拉伸试验 DIC 断裂应变



(b) 中心孔拉伸试验 DIC 断裂应变

(c) R5 缺口孔拉伸试验 DIC 断裂应变



(d) R10 缺口孔拉伸试验 DIC 断裂应变

图 4 22MnB5 热成形钢断裂试验 DIC 断裂应变

表 1 各受力状态下 22MnB5 热成形钢断裂应变

	剪切试验			中心孔拉伸试验			R5 缺口拉伸试验			R10 缺口拉伸试验			杯突试验
	CJ-1	CJ-2	CJ-3	ZXK-1	ZXK-2	ZXK-3	R5-1	R5-2	R5-3	R10-1	R10-2	R10-3	CK
断裂应变	0.422	0.410	0.413	0.369	0.362	0.370	0.364	0.362	0.358	0.286	0.296	0.300	0.752
平均断裂应变	0.415			0.367			0.361			0.294			0.752

从断裂试验结果图 4 及表 1 可知，应力状态不同时，22MnB5 热成形钢的临界断裂应变不同。在相同应力状态下，重复的三次试验中，得到的临界断裂应变存在少许差异，最终断裂应变取三次重复试验的平均值。

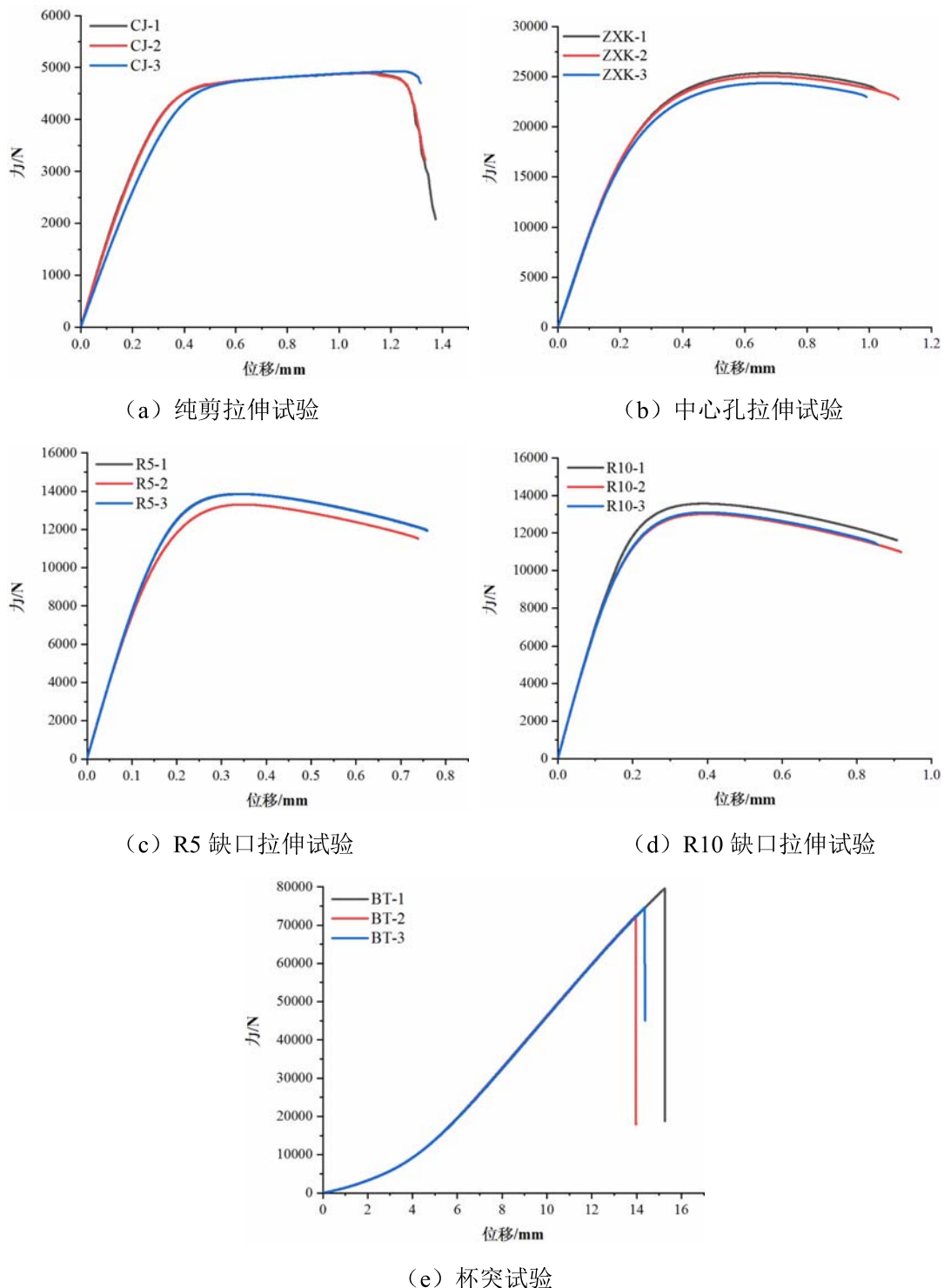


图 5 22MnB5 热成形钢断裂试验力-位移曲线

2 22MnB5 热成形钢塑性变形行为表征

在准静态标准拉伸试验中，由于现有试验设备的制约，只能测试得到 22MnB5 热成形钢在均匀变形段内的真应力-真应变曲线。在高应变下的应力参数，采用 Swift-Hockett-Sherby 混合硬化模型拟合得到^[12]，如式 (2) 所示

$$\sigma = \alpha \left\{ K \cdot (\varepsilon_{pl} + \varepsilon_0)^n \right\} + (1 - \alpha) \left[a - b e^{-c \varepsilon_{pl}^p} \right] \quad (2)$$

式中, α 、 K 、 n 、 a 、 b 、 c 、 p 、 ϵ_0 为拟合系数, σ 为真实应力, ϵ_{pl} 为塑性应变。

基于准静态标准拉伸试验所得颈缩之前的真应力-真应变曲线, 可拟合得到式 (2) 中的 K 、 n 、 a 、 b 、 c 、 p 、 ϵ_0 参数值。基于准静态标准拉伸试验所得的力-位移曲线, 建立数值模型, 采用仿真对标的方式对标力-位移曲线, 得到最优 α 值, 进而得到 22MnB5 热成形钢在高应变下的应力参数值。建立的数值模型如图 6 所示, 对标结果及得到包含高应变下应力值的 22MnB5 热成形钢真应力-真应变曲线如图 7 所示。



图 6 22MnB5 热成形钢准静态标准拉伸数值模型

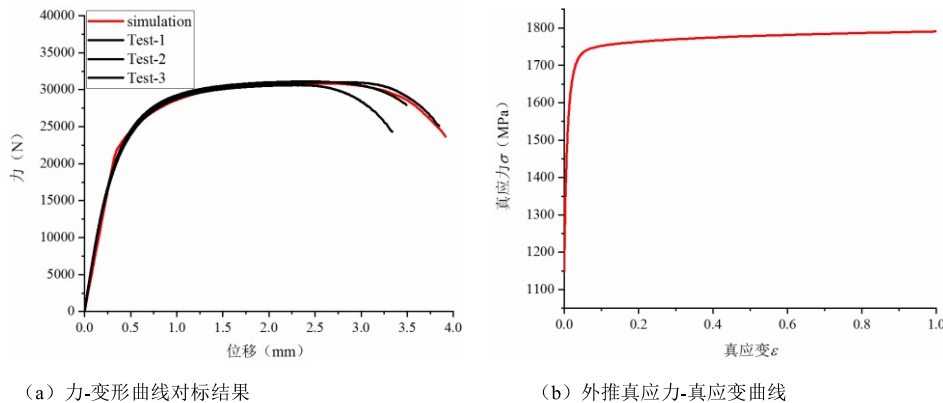


图 7 22MnB5 热成形钢塑性变形行为表征曲线

3 22MnB5 热成形钢断裂行为表征

Gissmo 失效模型基于 Johnson-Cook 断裂模型发展起来, 模型中考虑了材料从损伤、非线性损伤积累到材料完全断裂失效的过程, 非常适合用于预测金属板材的断裂失效问题。在 Gissmo 失效模型中, 允许任意路径的裂纹产生, 裂纹产生与否由损伤因子 D 决定。在材料开始发生塑性变形时, 开始计算损伤积累因子 D 值, 当 $D=1$ 时, 裂纹产生^[12]。 D 由下式计算所得

$$\Delta D = \frac{n}{\epsilon_f} D^{(1-\frac{1}{n})} \Delta \epsilon_v \quad (3)$$

式中 n 为损伤积累指数, $\Delta \epsilon_v$ 为等效塑性应变增量, ϵ_f 为不同应力状态下材料失效时的断裂应变。

在商业软件 LS_DYNA 中的 MAT_ADD_EROSION 中加入了 Gissmo 失效模型, 在壳单元中使用时, 只需添加平面应力失效曲线即可, 失效曲线的横坐标为应力三轴度, 纵坐标为断裂失效应变。在本文研究中, 基于表 1 中的各应力状态下的断裂应变值, 采用非线性拟合方式拟合得到 22MnB5 热成形钢的断裂失效曲线如图 8 所示。从曲线中可知, 拟合得到的平面应力失效曲线经过五个试验点中的三个, 拟合精度较高。

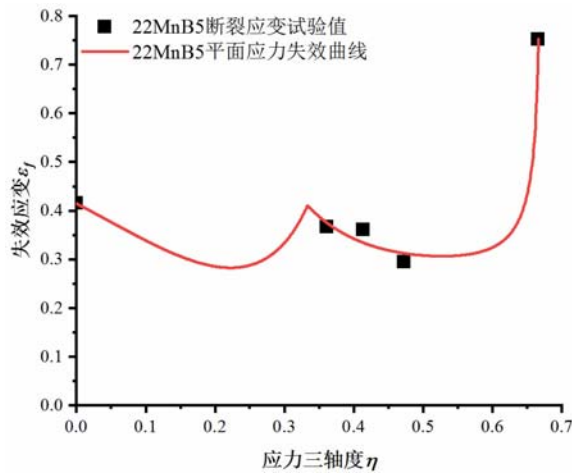


图 8 22MnB5 热成形钢 Gissmo 失效曲线

4 22MnB5 热成形钢 Gissmo 失效模型应用

4.1 试样级别应用

建立 22MnB5 热成形钢在不同应力状态下的断裂试验壳单元数值模型，模型中，主要变形区域网格尺寸为 0.5mm，如图 9 所示。模型中以 LS_DYNA 中的 MAT_24 作为其本构模型，输入图 7 (b) 所示真应力-真应变曲线。同时，在 LS_DYNA 中的 MAT_ADD_EROSION 中添加图 8 所示的 Gissmo 失效曲线作为其断裂判据，对不同应力状态下的断裂进行预测。

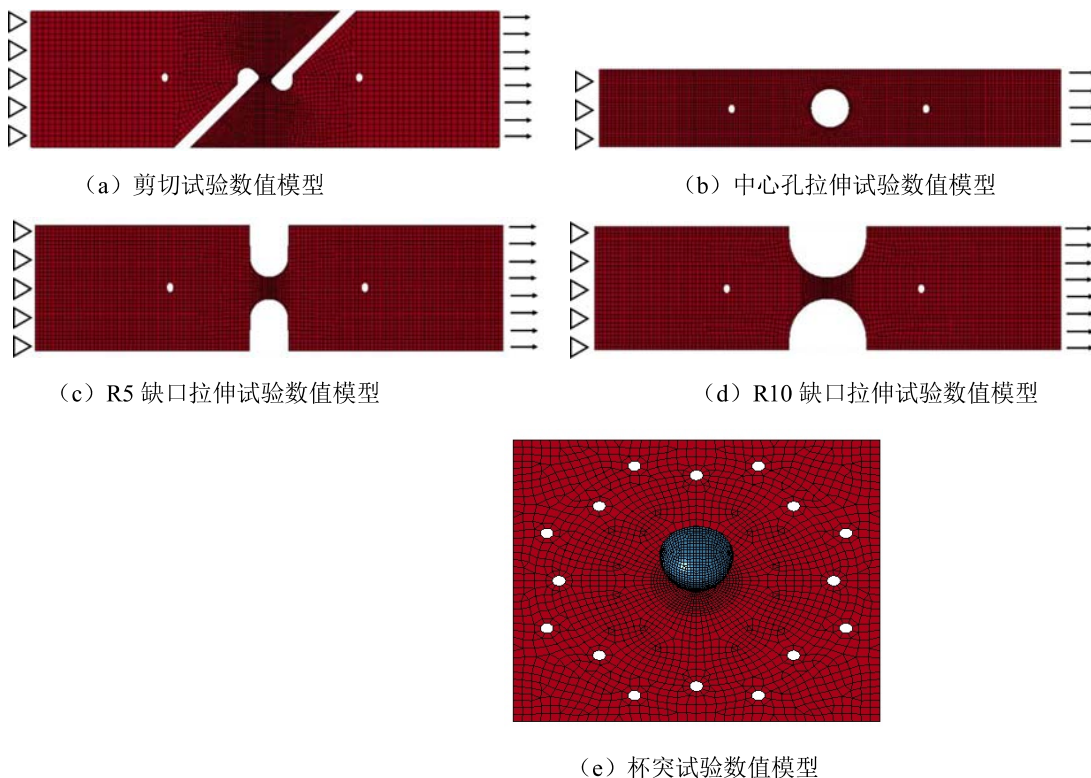
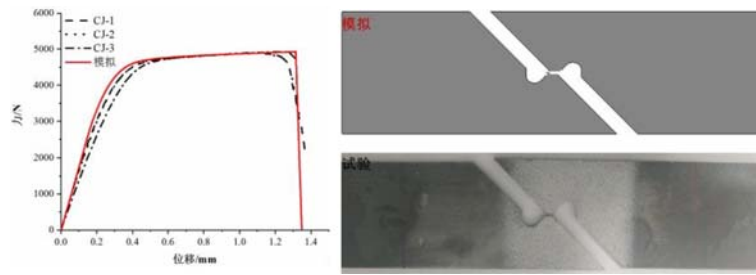
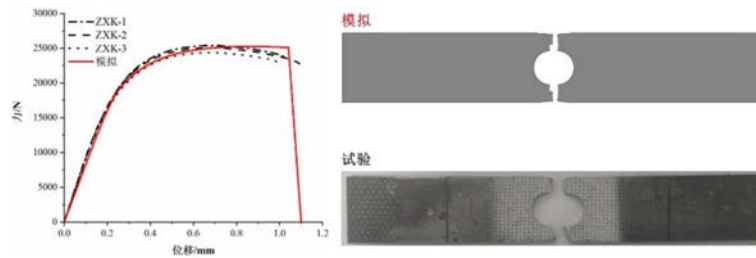


图 9 22MnB5 热成形钢断裂试验壳单元数值模型

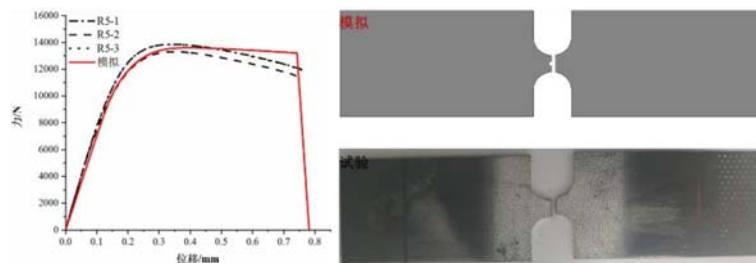
将各应力状态下数值模拟计算的结果与断裂试验结果进行对比，如图 10 所示。从图中可知，各应力状态下，数值模拟与断裂试验结果中，力-位移曲线变化趋势相同，断裂时刻基本一致。同时，断裂后，宏观裂纹形貌相似。表明 Gissmo 失效曲线能较为准确的预测 22MnB5 热成形钢在多个应力状态下的断裂失效行为。



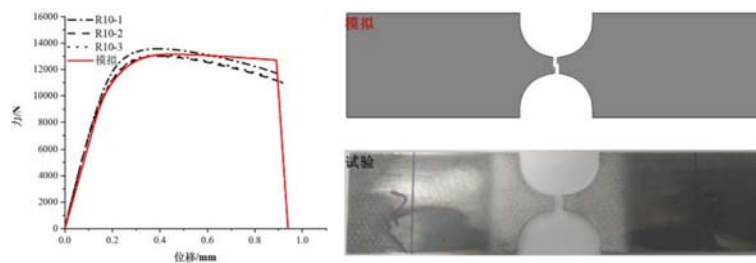
(a) 剪切试验数值模拟与试验结果对比



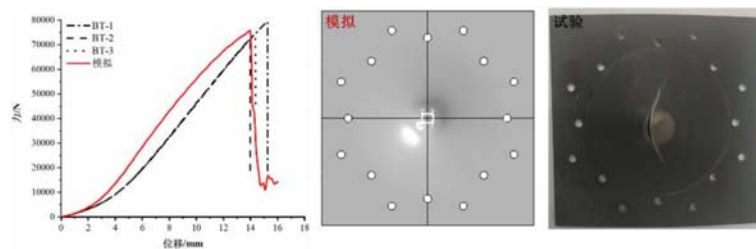
(b) 中心孔拉伸试验数值模拟与试验结果对比



(c) R5 缺口拉伸试验数值模拟与试验结果对比



(d) R10 缺口拉伸试验数值模拟与试验结果对比



(e) 杯突试验数值模拟与试验结果对比

图 10 Gissmo 失效曲线在试样级别应用结果对比

4.2 零部件级别应用

为进一步研究 Gissmo 失效曲线在预测 22MnB5 热成形钢在复杂应力状态下的断裂失效时是否适用，建立了前防撞梁三点静压数值模型，如图 11 所示。数值模型中，前防撞梁两端与吸能盒连接，约束吸能盒底部，压头以 1000mm/s 的速度下压前横梁，下压距离为 180mm。分别以图 8 所示的 Gissmo 失效曲线、传统固定断裂应变临界值(0.361)、FLD 作为前防撞梁的断裂准则，预测前防撞梁在三点静压工况下的断裂失效。针对数值模型，采用 22MnB5 热成形钢制造的前防撞梁总成零件，进行三点弯曲实验，如图 12 所示，对数值模拟计算结果进行实验验证。

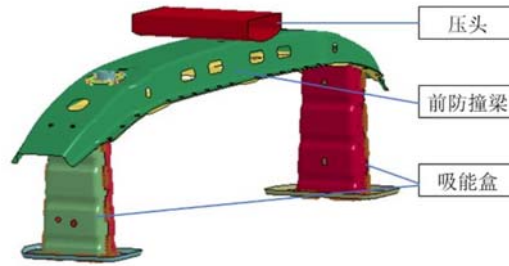


图 11 22MnB5 热成形钢前防撞梁三点静压数值模型

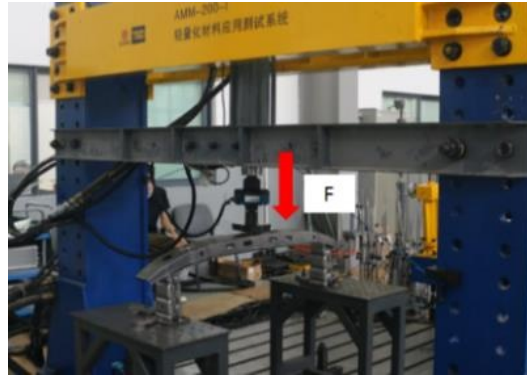


图 12 22MnB5 热成形钢前防撞梁三点静压实验

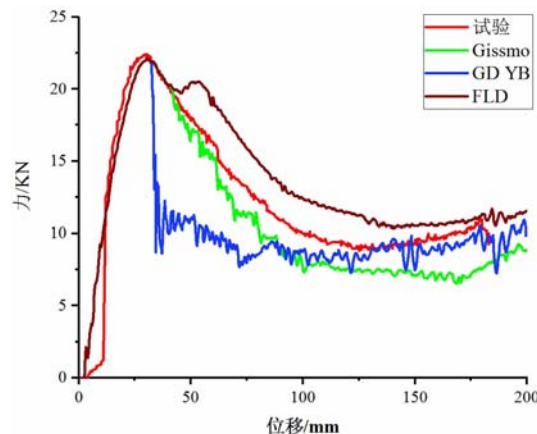


图 13 前防撞梁三点静压实验与模拟力-位移曲线对比

将数值模拟的结果与实验结果中的力-位移曲线进行对比，如图 13 所示。从图中可知，采用 Gissmo 失效曲线、传统固定临界断裂应变值（GD YB）与 FLD 分别去预测 22MnB5 热成形钢前防撞梁在三点静压后的断裂失效时，数值模拟得到的力-位移曲线与实验结果变化趋势相同，均是先增加后降低。在峰值点前，Gissmo、GD YB、FLD 计算得到的力-位移曲线基本重合，变化趋势与实验结果一致；峰值点时，Gissmo、GD YB、FLD 对应的峰值分别为 22.11kN、22.07kN、22.09kN，实验峰值为 22.41kN，分别相差 0.30kN、0.34kN、0.32kN，数值模拟与实验结果基本吻合；峰值点后，GD YB 对应的力-位移曲线迅速降低，之后曲线逐渐保持稳定，与实验结果相比，曲线偏软。FLD 中由于不会直观的出现裂纹，因此，对应的曲线和实验结果相比偏硬。Gissmo 计算得到的力-位移曲线变化趋势与实验结果基本吻合。终值点时，Gissmo、GD YB、FLD 对应的终值分别为 7.60kN、9.34kN、11.32kN，实验峰值为 10.95kN，分别相差 3.35kN、1.61kN、-0.37kN。计算整个静压过程中 Gissmo、GD YB、FLD 得到的力-位移曲线与实验曲线的平均误差，分别为 12.46%、17.83%及 14.59%。整体对比可知，与 GD YB、FLD 对比，Gissmo 失效曲线计算得到的力-位移曲线整体与实验结果更加吻合，表明，Gissmo 失效曲线的预测精度高于传统固定临界断裂应变值与成形极限图。

将数值模拟的结果与实验结果中的断裂后宏观裂纹形貌进行对比，如图 14 所示。从图中可知，在三点静压实验后，前防撞梁产生裂纹，如图中红色圆框内所示。Gissmo、GD YB、FLD 的计算结果中在相同区域均出现裂纹，如图中红色方框内所示。与实验结果相比，数值模拟断裂区域均稍大于实验断裂区域，整体看来，断裂区域基本吻合。

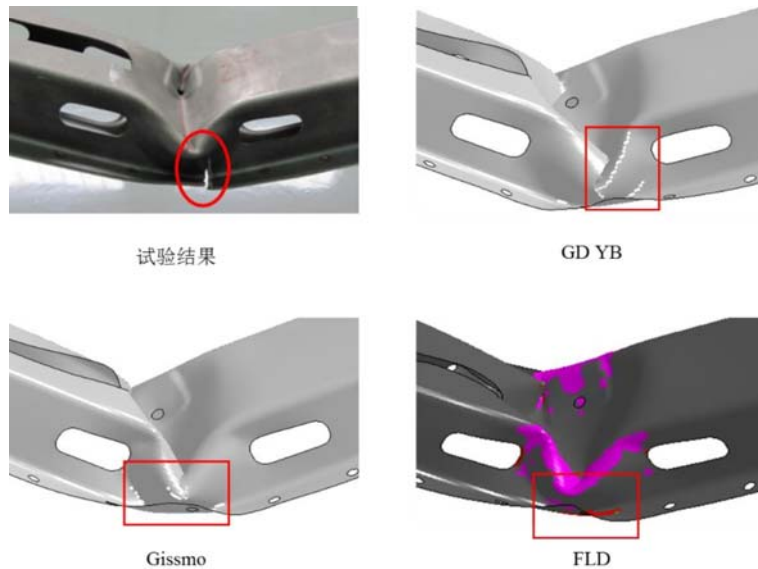


图 14 前防撞梁三点静压实验与模拟宏观裂纹形貌对比

整体对比数值模拟及实验结果，可知，试样级别上，Gissmo 失效模型能较为准确预测出了 22MnB5 热成形钢在多种受力状态下的断裂失效区域，且力-位移曲线与试验结果吻合；零部件级别上，Gissmo 失效模型准确预测了 22MnB5 热成形钢前防撞梁在三点静压后的断裂，与传统固定临界断裂应变值与成形极限图相比，其预测的裂纹区域及力-位移曲线与实验结果更加吻合。表明本研究得到的 22MnB5 热成形钢的 Gissmo 失效曲线具有较好的适用性。

5 结论

(1) 完成了 22MnB5 热成形钢在准静态及动态条件下的力学性能试验测试，得到了在多种应变率下的真应力-真应变曲线。试验结果表明，22MnB5 热成形钢的力学性能对应变率不敏感。基于准静态拉伸的试验结果，采用 Swift-Hockett-Sherby 混合硬化模型及仿真对标的方法，得到了 22MnB5 热成形钢在高应变下的应力参数值，校准了本构模型参数。

(2) 完成了 22MnB5 热成形钢在多种应力状态下的断裂性能测试，采用数字图像相关法 (digital image correlation, DIC) 技术测试了对应的临界断裂应变值。基于试验结果，校准了 Gissmo 失效模型中的参数，得到了 Gissmo 失效曲线。

(3) 将研究得到的本构模型及 Gissmo 失效曲线带入到多种应力状态的断裂试验数值模型中，预测了 22MnB5 热成形钢在试样级别的断裂失效。结果表明，Gissmo 失效曲线预测的裂纹宏观形貌及力-位移曲线均与试验结果吻合，说明了 Gissmo 失效曲线能较为准确的预测 22MnB5 热成形钢在多个应力状态下的断裂失效行为。

(4) 分别将研究得到的 Gissmo 失效曲线、传统固定临界断裂应变值 (GD YB) 与 FLD 带入到前防撞梁的数值模型中，预测了 22MnB5 热成形钢在三点静压工况下的断裂失效。结果表明，与传统固定临界断裂应变值与成形极限图相比，Gissmo 预测的裂纹区域及力-位移曲线与实验结果更加吻合。表明本研究得到的 22MnB5 热成形钢的 Gissmo 失效曲线具有较好的适用性。本文的研究方法能为热成形钢的断裂失效仿真和整车碰撞安全分析计算提供一定的指导和参考。

致谢

感谢中国汽车工程研究院股份有限公司院内课题“耐撞性与维修经济性及 25%偏置碰撞关键技术研究”、国家自然科学基金项目“汽车用超高强度钢热冲压成形组织强韧性机理与调控”(编号: U1564203) 对本研究的资助。

参考文献

- [1] Karbasian H, Tekava A E. A review on hot stamping [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210: 2103-2118.
- [2] 徐伟力, 艾健, 罗爱辉, 等. 钢板热冲压新技术介绍 [J]. 塑性工程学报. 2009, 16(4): 39-43.
- [3] 胡平, 马宁. 高强度钢板热成形技术及力学问题研究进展[J]. 力学进展, 2011, 41(3), 310-334.
- [4] 马宁, 申国哲, 张宗华, 等. 高强度钢板热冲压材料性能研究及在车身设计中的应用[J]. 机械工程学报, 2011, 47 (8) :60-65.
- [5] 郭怡晖, 马鸣图, 张宜生, 等. 汽车前防撞梁的热冲压成形数值模拟与试验 [J]. 锻压技术, 2013, 38(3): 46-50.
- [6] Kuriyama Y, Takahashi M, Ohashi H. Trend of car weight reduction using high strength steel [J]. Automotive Technology, 2001, 55 (4): 51-57.
- [7] 马宁, 胡平, 闫康康, 等. 高强度硼钢热成形技术研究及其应用[J]. 机械工程学报, 2010, 46 (14): 68-72.
- [8] Lechler J, Merklein M. Hot stamping of ultra high strength steels as a key technology for lightweight construction [J]. Materials Science and Technology, 2008,5 (9): 1698-1709.
- [9] 王栋, 刘淼, 王光耀, 等. 基于 LS-DYNA 的热成形钢断裂失效预测研究 [J]. 固体力学学报. 2018, 39(2):197-202.
- [10] BASARAN M. Stress state dependent damage modeling with a focus on the lode angle influence[D]. Aachen: Rheinisch-Westf Lischen Technischen HochschuleAachen, 2011.
- [11] NEUKAMM F, FEUCHT M, BISCHOFF M. On the application of continuum damage models to sheet metal forming simulations[J]. Ibai Publishing, 2008, (4): 616-629.
- [12] LS-DYNA Keyword User's Manual[J]. Materials & Design, 1(LS-DYNA R8.0): 03/23/15 (r:6319).

作者简介: 梁宾, 男, 1991 年出生, 硕士。主要研究方向为材料失效模拟、热成型模拟。

E-mail: liangbin@caeri.com.cn

赵岩(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士, 高级工程师。主要研究方向为材料工艺仿真模拟。

E-mail: zhaoyan@caeri.com.cn.

Fracture Behavior Research of 22MnB5 Thermoformed Steel Based on Damage

Accumulation Model in LS_DYNA

LIANG Bin ZHAO Yan* ZHOU Jia FAN Tiqiang ZHAO Qingjiang
China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122

Abstract: The application of thermoformed steel in automobiles is an important way to realize the lightweight of automobiles. It is a hot research topic to accurately predict the fracture failure of automotive thermoformed parts under complex conditions. The critical fracture strain of thermoformed steel is related to its stress condition and is no longer a fixed value. It is necessary to use the fracture model considering material damage and damage accumulation to predict its fracture failure behavior. In this paper, a 22Mn B5 thermoformed steel was used as the research object. The fracture test was carried out by designing the fracture specimen under multiple working conditions. Combined with the digital image related technology equipment, the fracture parameters of multi-stress state were obtained, and the Gissmo fracture model parameters was calibrated based on the damage accumulation model in LS_DYNA. The

Gissmo fracture model, the traditional fixed critical fracture strain value and the forming limit diagram were used to predict the fracture failure of a 22MnB5 thermoformed impact beam at three-point static pressure conditions, and the results of numerical simulation were verified experimentally. The results show that the crack morphology and load-displacement curve are more consistent with the experimental results, which indicates that the Gissmo fracture model is suitable for accurately predicting the fracture behavior of 22MnB5 thermoformed steel.

Key words: 22MnB5 thermoformed steel; fracture failure; damage accumulation; MMC failure model