

相变诱导塑性钢高应变速率性能和失效行为分析

于 沛, 夏 卿

(黄河科技学院 工学部, 河南 郑州 450063)

摘要: 以 TRIP590 钢为研究对象, 对静态和高应变速率下的力学性能进行测试, 获取性能变化规律, 并对应变速率相关本构模型进行拟合; 采用剪切、中心孔拉伸、缺口拉伸、穿孔等 5 种试样来表征材料在拉伸、剪切及复合状态下的失效行为, 并采用 MMC 断裂失效模型进行拟合; 将材料模型应用于不同试样模型, 开展断裂试验仿真, 并与试验测试结果进行对比, 以验证失效模型的精度; 采用高速冲击折弯进行试验, 验证模型的准确性。结果表明: TRIP590 钢具有良好的延展性, 断后伸长率可达 35.5%, 强塑积达到 21.66 GPa%; 具有较强的应变速率敏感性, 随着应变速率的增加, 其强度不断增加, 而且材料的伸长率也不断提高; 随着应变速率的提升, 材料吸收的能量逐渐增加; 设计的 5 种断裂失效测试试样可以表征材料的失效行为; 应用 MMC 断裂失效模型仿真所得的断裂形貌与试验结果相符, 关键参数仿真与试验测试结果的平均误差均小于 5.5%; 拟合获得材料本构模型用于冲击折弯的仿真结果与实测结果基本一致, 误差控制在 3% 以内, 可以较好地反应材料的力学特征。

关键词: 相变诱导塑性钢; 应变速率; 微观组织; 力学性能; 断裂失效

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.04.034

中图分类号: U463.83; U461.91

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 04-0256-09

Analysis on high strain rate properties and failure behavior of transformation induced plasticity steel

Yu Pei, Xia Qing

(Engineering College, Huanghe Science and Technology University, Zhengzhou 450063, China)

Abstract: For TRIP590 steel, the mechanical properties under static and high strain rates were tested to obtain the change rules of properties, and the constitutive models related to strain rates were fitted. Furthermore, the failure behaviors of material in tensile, shear and composite states were characterized by five kinds of specimens, such as shear, central hole tension, notched tension and perforation, and fitted by the MMC fracture failure model. The material model was used to different sample models, and the fracture test simulation was carried out, the results was compared with the test results to verify the accuracy of the failure model. Finally, the accuracy of the model was verified by high speed impact bending test. The results show that TRIP590 steel has good ductility, the elongation after fracture is 35.5%, the strong plastic product reaches 21.66 GPa%, which has strong strain rate sensitivity. With the increasing of strain rate, its strength increases, and the elongation of material also increases. With the increasing of strain rate, the energy absorbed by the material increases gradually. Five kinds of fracture failure test samples designed can reflect the failure behavior of materials. The fracture morphology simulated by MMC fracture failure model is consistent with the test results, and the average error between the key parameter simulation and test results is less than 5.5%. The simulation result of impact bending by fitting obtained material constitutive model is basically consistent with the measured results, and the error is controlled within 3%, which can better reflect the mechanical characteristics of the material.

Key words: transformation induced plasticity steel; strain rate; microstructure; mechanical properties; fracture failure

相变诱导塑性钢的内部存在一定含量的残余奥氏体, 使得材料在加工、承载变形过程中发生残余

奥氏体向马氏体的转化, 使得材料具有比传统双相钢更优的断后伸长率, 故材料在加工和碰撞中, 呈现出更优的延展性和承载吸能特性^[1]。这种材料被广泛应用于车身中重要的复杂结构件和承载件, 也是实现车身轻量化设计中的重要用材之一。高强钢材料在车身碰撞过程中的组织变化及力学特征变化,

收稿日期: 2022-06-28; 修订日期: 2022-09-09

基金项目: 河南省民办普通高等学校品牌专业建设项目 (ZLG201901)

作者简介: 于 沛 (1983-), 男, 学士, 讲师

E-mail: hnlyj980@126.com

是轻量化选材的重要影响因素；同时，在主机厂开展设计车型碰撞 CAE 分析时，材料在不同应变速率下的本构模型是影响分析结果准确性的重要因素；而断裂失效行为则是影响分析结果的另一个重要因素，由其拟合的失效模型应用于 CAE 分析中，会直接影响到网格的失效，由此呈现材料的力学性能和失效行为。因此，对高应变速率下相变诱导塑性钢的力学特性和材料的断裂失效行为及模型进行研究，具有重要的应用价值。

高强钢在高应变速率下的力学性能及表征方法是学者们研究的重点，国内外学者对此开展了一定的研究：董东阳等^[2]对传统高强钢在不同应变速率下的组织变化和断口形貌进行分析，重点对力学性能变化和 组织变化之间的关系进行研究；张伟等^[3]、张赛等^[4]、黄东英等^[5]、熊自柳等^[6]采用不同的本构方程对不同类型材料的高应变速率本构模型进行拟合，以获取最优的表征方案；Nieto-fuentes J C 等^[7]对 1000 MPa 级超高强钢的力学表征开展研究，通过分析组织的位错运动与外载荷之间的关系，获取描述性能的本构模型；赵清江等^[8]、韩蒙等^[9]分别对材料不同的失效准则对 22MnB5 高强钢和双相钢在碰撞载荷作用下的断裂失效进行预测。相变诱导塑性钢内部具有传统双相钢的铁素体和马氏体组织，还存在一定的残余奥氏体，开展不同应变速率下材料性能变化及断裂失效行为和模型的研究，具有重要的应用价值。

本文以相变诱导塑性钢 TRIP590 为研究对象，对材料静态和高应变速率下的力学性能进行测试，获取变化规律，并对材料应变速率相关本构模型进行拟合；采用剪切、中心孔、缺口、穿孔等 5 种试样来，表征材料在拉伸、剪切及复合状态下的失效行为，获取力-位移曲线和极限塑性应变，并采用基于应力三轴度和罗德角因子的 MMC 断裂失效模型进行拟合，表征材料的失效行为；将高应变速率本构模型和 MMC 断裂失效模型应用于不同试样模型，开展断裂试验仿真，将仿真结果与试验测试结果进行对比，以验证模型的精度；最后采用高速冲击折弯进行对比验证，验证模型的准确性。

1 材料的组织和力学性能

1.1 材料组织

本文选用相变诱导塑性钢 TRIP590 开展研究，其具有较高的初始加工硬化速率和较高的伸长率，

适用于成形较为复杂的结构件和加强件。采取降 Si 增 Al 来保证材料内部残余奥氏体的稳定性，并且提高基材表面镀层的粘合力。所研究材料的主要化学成分如表 1 所示，微观组织如图 1 所示。

表 1 TRIP590 钢的化学成分（%，质量分数）

Table 1 Chemical compositions of TRIP590 steel
(%, mass fraction)

C	Si	Mn	P	S
0.135	0.53	1.67	0.05	0.01

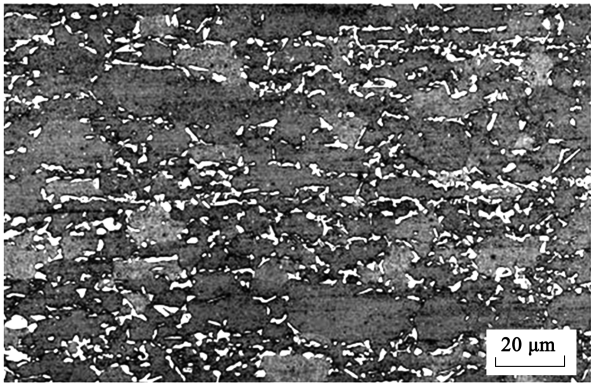


图 1 TRIP590 钢的的微观组织

Fig. 1 Microstructure of TRIP590 steel

由图 1 可知，所研究材料的微观组织主要为铁素体、贝氏体和马氏体，并含有一定量的残余奥氏体。该材料要求残余奥氏体的含量不低于 5%。

1.2 静态力学性能

采用万能试验机，根据 GB/T 228.1—2021^[10]，选取厚度为 1.2 mm 的 TRIP590 钢材料，并分别沿与轧制方向呈 0°、90°、45°的方向开展静态拉伸测试，获得力学性能曲线如图 2 所示，提取关键参数如表 2 所示。

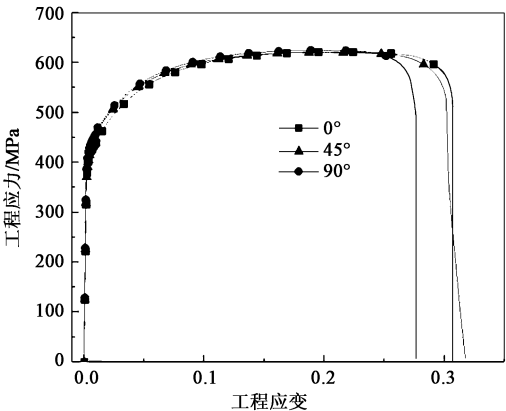


图 2 TRIP590 钢的工程应力-工程应变曲线

Fig. 2 Engineering stress-engineering strain curves of TRIP590 steel

表 2 TRIP590 钢的静态力学性能参数
Table 2 Static mechanical property parameters of TRIP590 steel

方向	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	断后伸长 率/%	塑性硬化 指数 n	屈强比
0°	408	618	31.5	0.24	0.66
90°	405	613	28.0	0.22	0.66
45°	403	615	32.5	0.23	0.66

根据力学曲线和关键参数分析结果可知,材料的强度较高,其屈服强度约为 405 MPa、抗拉强度约为 615 MPa,能够在应用时保证强度;同时,材料具有良好的延展性,断后伸长率可达 35.5%,而同等级强度的双相钢为 23%左右,由此可见,伸长率显著大于双相钢。所研究材料的强塑积达到 21.66 GPa%,而传统双相钢在 15 GPa%左右。同时,各个方向均无明显的屈服平台,且性能相差不大,各向异性不明显;材料的屈强比为 0.66,平均加工硬化指数为 0.23。

2 高应变速率下的力学性能和本构模型

2.1 高应变速率下的力学性能

采用 Instron VHS160/100-20 液压伺服高速拉伸试验机,根据 GB/T 30069.2—2016^[11],进行材料在不同应变速率下的力学性能测试,所选应变速率为 1、10、100、500 和 1000 s⁻¹,每个应变速率下重复测试 3 次。不同应变速率下的拉伸曲线如图 3 所示。

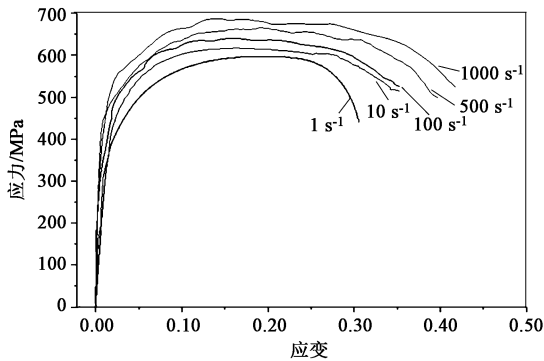


图 3 不同应变速率下的拉伸性能曲线

Fig. 3 Tensile performance curves at different strain rates

从图 3 可以看出,材料具有较强的应变速率敏感性,随着应变速率的增加,其屈服强度和抗拉强度均不断增加,表现出应变速率正相关性,而且材料的伸长率也不断提高。

拉伸过程是材料受力承载,逐渐达到极限,进

而出现断裂的过程,也是吸能的过程。通过对应力-应变曲线的面积进行积分,获得材料的能量吸收值。整个过程包括弹性段、塑性段和断裂失效段,面积越大表征材料吸收的能量越多,材料在碰撞过程中也呈现出较好的承载吸能特性^[12]。图 4 为不同应变速率与吸能关系曲线。

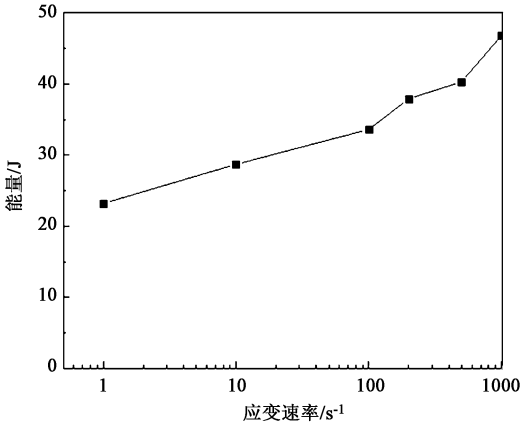


图 4 应变速率与吸收能量的关系曲线

Fig. 4 Relationship curve of strain rate and energy absorption

从图 4 可以看出,随着应变速率的提升,TRIP590 钢吸收的能量逐渐增加。TRIP590 钢与传统的双相钢相比,内部组织中增加了一定量的残余奥氏体,这使得材料表现出更好的延展性。拉伸过程中残余奥氏体逐渐向马氏体转变,TRIP590 钢表现出更优的吸能能力。

2.2 本构模型拟合

不同应变速率下的力学性能测试,是 CAE 仿真分析的基础,通常采用本构模型拟合的方法获取其他应变速率下材料的性能曲线。目前,最常用的本构模型为 Johnson-Cook 模型^[13],考虑到汽车用钢在碰撞过程中的温度变化较低,一般忽略温度因素的影响,仅考虑应变强化和应变速率强化,模型可以写为:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \cdot \left[1 + c \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \quad (1)$$

式中: σ 为有效应力; ε 为有效塑性应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为基准应变速率; A 为基准应变速率屈服强度,此处取 386.5451 MPa; B 、 n 、 c 为待求材料常数。

拟合获得相关参数如表 3 所示,其中, R^2 为二次方差。

表 3 本构模型拟合参数
Table 3 Fitting parameters for constitutive model

参数	B	n	c	R^2
数值	612.8	0.31987	0.018631	0.99163

因此,材料的本构模型方程可以写为:

$$\sigma = (386.5451 + 612.8e^{0.31987}) \cdot \left[1 + 0.018631 \times \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] \quad (2)$$

拟合过程中,二次方差 R^2 为 0.99163,表明本构模型与实测曲线拟合较好,部分应变速率曲线对比如图 5 所示。

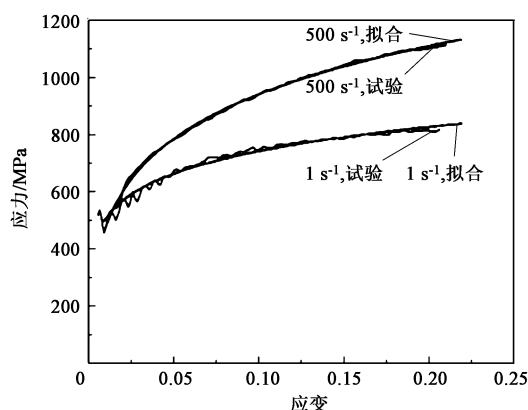


图 5 本构模型拟合结果与试验结果对比

Fig. 5 Comparison between constitutive model fitting results and experimental results

3 断裂失效行为分析

实际材料在碰撞过程中除了受应变速率的影响外,材料的失效行为也对性能具有重要影响,而这种失效行为对应着复杂的应力、应变状态,依据不同的断裂失效模型开展测试拟合分析,最终制作材料断裂卡片。

3.1 断裂失效测试

为了表征材料在拉伸、剪切及复合状态下的失效行为^[14],设计了剪切试验、中心孔拉伸试验、R10 缺口拉伸试验、R5 缺口拉伸试验、穿孔试验等,各试验的试样尺寸如图 6 所示。

在电子万能试验机上进行拉伸测试,每种试样重复 3 次试验,平行段长度为 20~25 mm,拉伸速率为准静态,保持 $0.005 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,平行段喷涂黑白散斑,利用 DIC 对拉伸过程中的应变变化进行测试,获取断裂失效时的极限塑性应变 ε_f ,同时记录整个拉伸过程的力-位移曲线,结果如图 7 所示。

3.2 MMC 断裂失效模型

Modified Mohr-Coulomb Model (MMC Model) 是

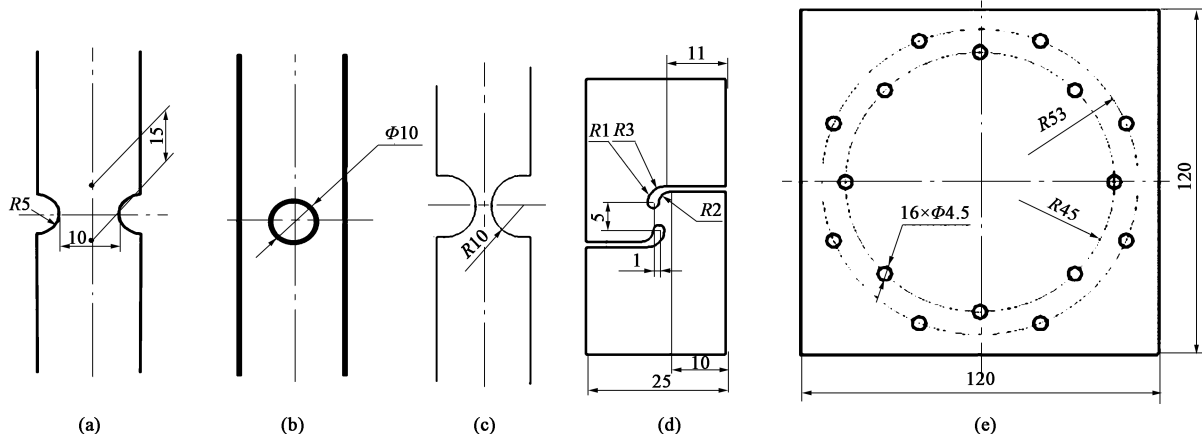


图 6 各试验试样尺寸

(a) R5 缺口拉伸试样 (b) 中心孔拉伸试样 (c) R10 缺口拉伸试样 (d) 剪切试样 (e) 穿孔试样

Fig. 6 Sample sizes for various test

(a) R5 notched tensile specimen (b) Center hole tensile specimen (c) R10 notched tensile specimen
(d) Shear specimen (e) Perforated specimen

在 2007 年基于 Mohr-Coulomb 断裂机理提出的^[15]。原始的 Mohr-Coulomb 模型中,假设剪应力和摩擦力的混合应力达到临界最大值时发生断裂。

$$(\tau + f\sigma_n)_{\max} = C \quad (3)$$

式中: τ 为剪应力; σ_n 为正应力; f 为材料内部的摩擦因数; C 为常数。

使用拉格朗日乘数求解式 (3) 的最大值,将式 (3) 转变为:

$$(\sqrt{1+f^2} + f)\sigma_1 - (\sqrt{1+f^2} - f)\sigma_3 = C \quad (4)$$

式中: σ_1 为主应力; σ_3 为切向主应力。

理论情况下,式 (3) 和式 (4) 可以直接用于有限元计算中,但在试验中 τ 和 f 均不能直接通过

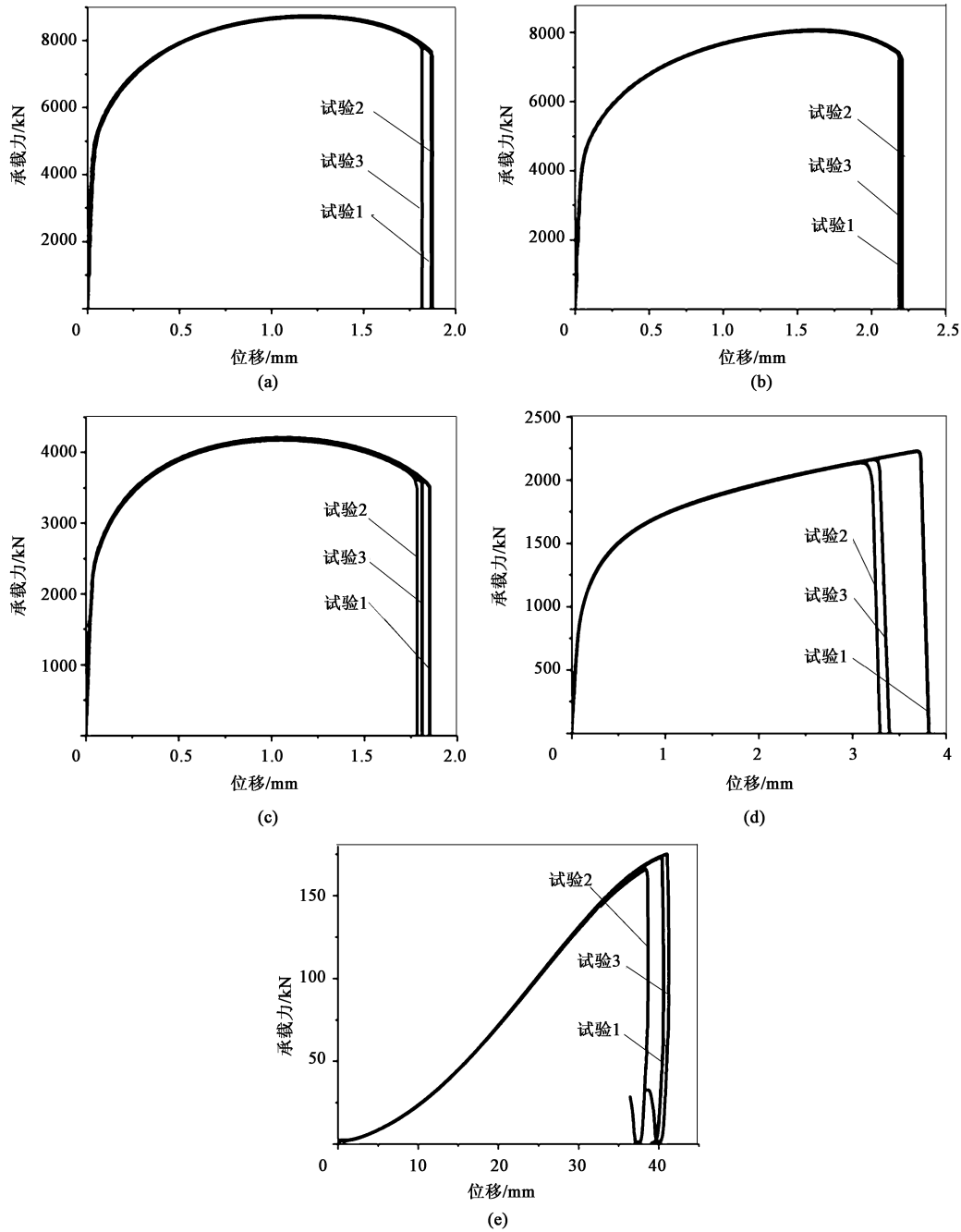


图7 不同试样的力-位移曲线

(a) R5 缺口拉伸试样 (b) 中心孔拉伸试样 (c) R10 缺口拉伸试样 (d) 剪切试样 (e) 穿孔试样

Fig. 7 Force-displacement curves of different samples

(a) R5 notched tensile specimen (b) Center hole tensile specimen (c) R10 notched tensile specimen

(d) Shear specimen (e) Perforated specimen

测试得到, 通常将式 (4) 转变为应力三轴度 η 及洛德角 θ 的方程式:

$$F(\bar{\varepsilon}) = C / \left[\frac{\sqrt{1+f^2}}{3} \cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) + f \left(\eta - \frac{1}{3} \sin\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) \right) \right] \quad (5)$$

式中: $F(\bar{\varepsilon})$ 为应力, MPa; $\bar{\varepsilon}$ 为平均应变。

假设损伤按照线性进行积累, 定义损伤指数 D 如式 (6) 所示:

$$D = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} \right) \Rightarrow dD = \frac{d\varepsilon_p}{\varepsilon_f(\eta, \xi)} \quad (6)$$

式中: ε_p 为塑性应变; ξ 为拟合系数。

3.3 参数提取及模型拟合

根据剪切试验、中心孔拉伸试验、R10 缺口拉伸试验、R5 缺口拉伸试验、穿孔试验的试样尺寸及试验条件，基于 HyperMesh 搭建不同试验的壳单

元（Shell）数值模型^[16]，模型主要变形区域网格尺寸为 0.5 mm，材料力学性能曲线参照式（2）所示的高应变速率本构模型，所搭建的模型如图 8 所示。

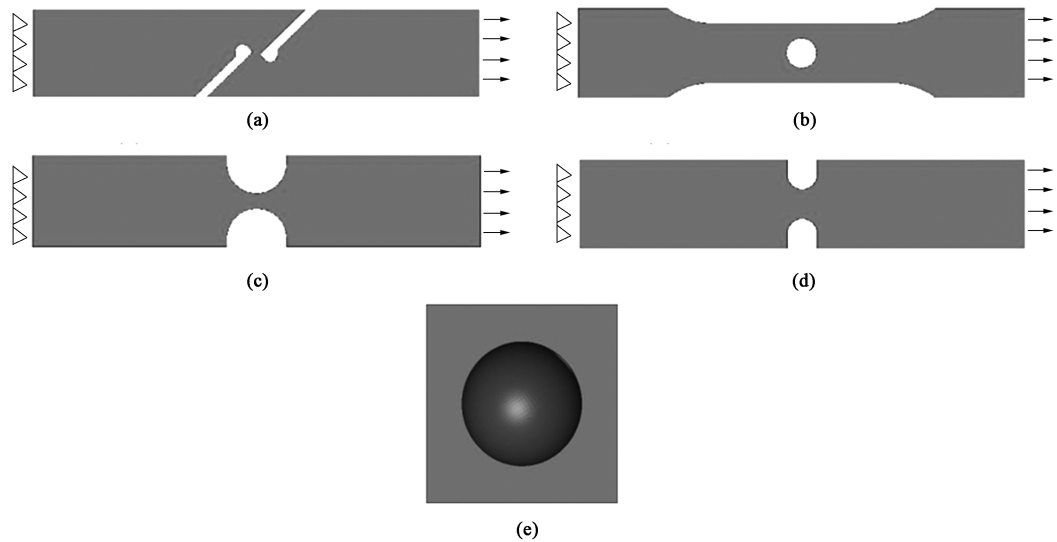


图 8 不同试样的仿真模型
(a) 剪切试样 (b) 中心孔拉伸试样 (c) R10 缺口拉伸试样 (d) R5 缺口拉伸试样 (e) 穿孔试样
Fig. 8 Simulation models of different specimens
(a) Shear specimen (b) Center hole tensile specimen (c) R10 notched tensile specimen
(d) R5 notched tensile specimen (e) Perforated specimen

利用仿真分析模型，从不同断裂试验仿真结果中提取断裂单元的应力三轴度 η ，并最终获取应力三轴度 η 的平均值以及 ε_f ，见表 4。

表 4 不同应力状态下的断裂参数值
Table 4 Fracture parameter values under different stress states

试验	η	ε_f
剪切	0.030	0.364
中心孔拉伸	0.398	0.808
R10 缺口拉伸	0.455	0.596
R5 缺口拉伸	0.533	0.526
穿孔	0.666	0.692

基于表 4 中断裂参数及式（5），在 MatLab 中拟合获得 MMC 断裂失效模型失效曲线，如图 9 所示。

3.4 仿真结果对比

将高应变速率本构模型（式（2））及 MMC 断裂失效模型（图 9）应用至前文所搭建的不同试样模型中，并在 LS_DYNA 中进行材料参数定义，选用 MAT24 进行高应变速率力学性能定义，主要

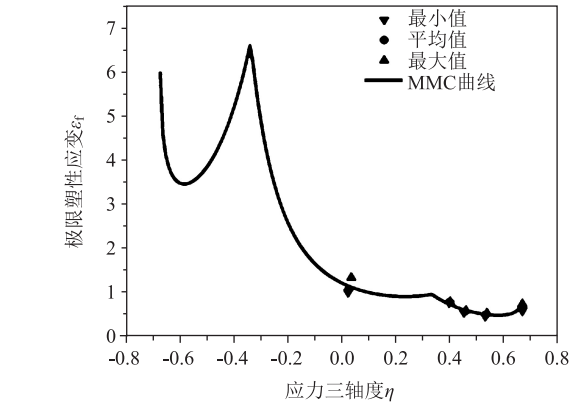


图 9 MMC 断裂失效模型失效曲线
Fig. 9 Failure curve in MMC fracture failure model

参数由式（2）获得，选用 MAT_ADD_EROSION 定义材料的断裂失效性能，如表 4、式（5）及图 9 所示。试样一端固定，另一端加载拉伸，如图 8 所示，直至整个试样拉伸断裂，提取断裂前极限塑性应变如图 10 所示。

以此，可以对材料进行不同应力三轴度下的断裂试验仿真，R10 缺口拉伸试样的仿真与试验的力-位移曲线和断裂形貌对比结果如图 11 所示，不同断裂试验的仿真误差统计如表 5 所示。

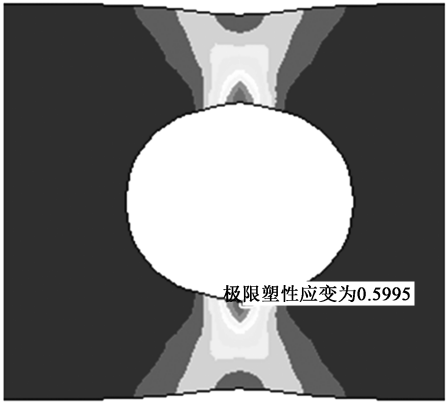


图 10 不同试样的失效过程模拟
Fig. 10 Failure process simulation of different samples

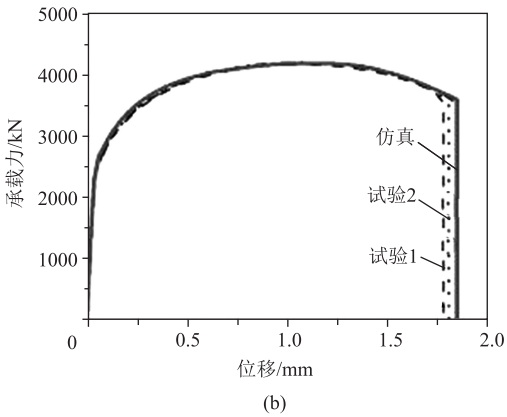
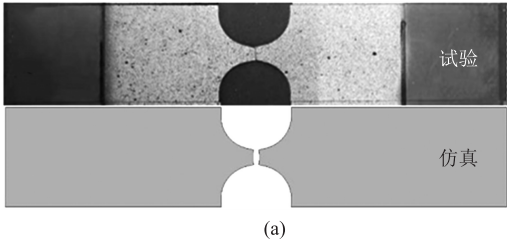


图 11 R10 缺口拉伸试样的仿真试验结果
(a) 断裂形貌 (b) 力-位移曲线
Fig. 11 Simulation and test results of R10 notched tensile sample
(a) Fractured morphology (b) Force-displacement curves

表 5 试验与仿真关键参数误差分析

Table 5 Error analysis of key parameters between test and simulation

试验	断裂位移			曲线面积 (断裂能量)		
	试验/	仿真/	误差/	试验/	仿真/	误差/
	mm	mm	%	J	J	%
剪切	3.57	3.53	1.22	8033	7773	3.23
中心孔拉伸	2.26	2.38	-5.22	17741	16942	4.50
R10 缺口拉伸	1.68	1.64	2.21	7308	7144	2.24
R5 缺口拉伸	1.86	1.83	1.55	15477	15227	1.61
穿孔	38.94	40.16	-3.14	5373720	5234003	2.60

由图 11 和表 5 中的结果可知,应用 MMC 断裂失效模型仿真所得断裂形貌与试验结果相符。对断裂位移、曲线面积 (断裂能量) 而言,试验结果的平均绝对误差均小于 5.5%,建立的 MMC 断裂失效模型满足高精度断裂模型要求。

4 模型试验验证

采用冷弯试验对材料进行动态折弯试验,试验在配备工装的万能试验机上完成,主要包括支撑底座、支撑辊轮、压头等部件,设备如图 12 所示。试样尺寸为 80 mm×80 mm,加载速度为 2 mm·s⁻¹,启动设备对试样进行连续弯曲加载,实时采集加载载荷与位移数据,同步生成力-位移曲线,当试样弯曲力-位移曲线上的力降低至最大载荷的 5% 时^[17],立即停止试验,获取整个测试过程的力-位移变化曲线。同时,在 HyperWorks 中建立相同的 CAE 分析模型,根据前述的材料本构,选用 MAT24 材料卡片,对材料进行定义,其中失效定义为应变失效,达到最大塑性应变 0.45 时,网格失效,同样提取整个过程的力-位移曲线。试验和仿真模型如图 13 所示。获取的力-位移曲线对比如图 14 所示。

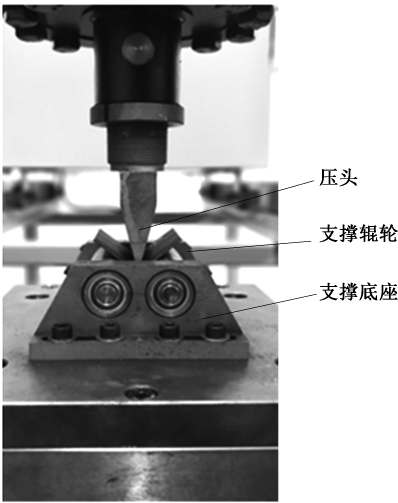
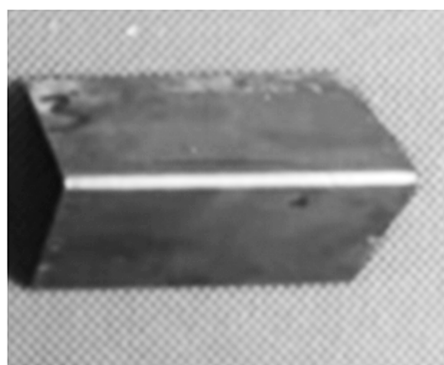
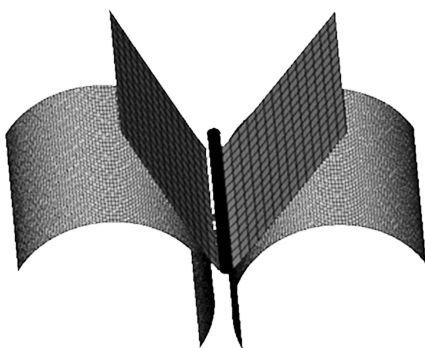


图 12 试验设备
Fig. 12 Test equipment

由图 14 可得,试验测试获得的极限载荷、位移分别为 55.18 kN 和 12.52 mm,仿真模型获得的极限载荷、位移分别为 56.35 kN 和 12.81 mm,误差在 3% 以内;曲线的变化趋势保持基本一致,表明本构模型可以真实地反应材料的力学特征。



(a)



(b)

图13 折弯试验(a)和仿真模型(b)

Fig. 13 Bending test (a) and simulation model (b)

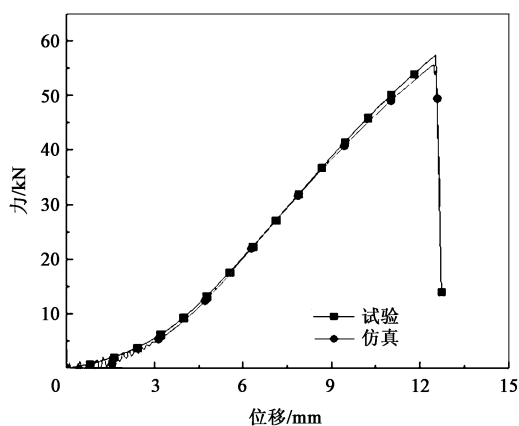


图14 折弯试验的力-位移曲线

Fig. 14 Force-displacement curves of bending test

5 结论

(1) TRIP590 钢具有良好的延展性, 断后伸长率可达为 35.5%, 显著大于双相钢; 强塑性积达到了 21.66 GPa%, 而传统双相钢在 15 GPa% 左右; 各个方向均无明显的屈服平台, 且性能相差不大, 各向异性不明显。

(2) TRIP590 钢具有较强的应变率敏感性; 随着应变速率的增加, 其强度和断后伸长率不断增加; 随着应变速率的提升, 材料吸收能量逐渐增加。

(3) 设计的 5 种断裂失效测试试样可以反应材料的拉伸、剪切及复合失效行为; 应用 MMC 断裂失效模型仿真所得断裂形貌与试验结果相符, 所得断裂位移、曲线面积 (断裂能量) 相比于试验结果的平均绝对误差均小于 5.5%, 建立的 MMC 断裂失效模型满足高精度断裂模型要求。

(4) 试验测试获得的极限载荷和位移, 与仿真模型获得结果的误差在 3% 以内, 且曲线的变化趋势保持基本一致, 表明本构模型可以真实地反应材料的力学特征。

参考文献:

- [1] 王文英, 王慧, 曲世永. 相变诱导塑性钢 TRIP590 的烘烤硬化特性 [J]. 金属热处理, 2020, 45 (8): 43-46.
Wang W Y, Wang H, Qu S Y. Bake hardening behavior of transformation induced plasticity steel TRIP590 [J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45 (8): 43-46.
- [2] 董丹阳, 刘杨, 王磊, 等. 应变速率对 DP780 钢动态拉伸变形行为的影响 [J]. 金属学报, 2013, 49 (2): 159-166.
Dong D Y, Liu Y, Wang L, et al. Effect of strain rate on dynamic deformation behavior of DP780 steel [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49 (2): 159-166.
- [3] 张伟, 李春光, 韩赞, 等. 高强双相钢动态力学本构模型对比分析 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (6): 75-82.
Zhang W, Li C G, Han Y, et al. Comparative analysis of dynamic mechanical constitutive model of high strength dual phase steel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (6): 75-82.
- [4] 张赛, 孟庆振, 谢书港, 等. B250P1 低合金钢的动态力学行为及其本构模型 [J]. 理化检验-物理分册, 2016, 52 (6): 370-374.
Zhang S, Meng Q Z, Xie S G, et al. Dynamic mechanical behavior and constitutive model of B250P1 low alloy steel [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2016, 52 (6): 370-374.
- [5] 黄东英, 徐亮, 刘晓红. 冲击载荷下中碳低合金钢的动态力学性能与 J-C 本构模型的改进 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 225-230.
Huang D Y, Xu L, Liu X H. Dynamic mechanical properties of medium carbon low alloy steel and improvement of J-C constitutive model under impact load [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 225-230.
- [6] 熊自柳, 吝章国, 孙力, 等. 汽车用高强度钢板的动态变形行为 [J]. 机械工程材料, 2018, 42 (8): 18-23, 36.

- Xiong Z L, Lin Z G, Sun L, et al. Dynamic deformation behaviour of high strength steel sheet for automotive [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2018, 42 (8): 18-23, 36.
- [7] Nieto-fuentes J C, Rittel D, Osovski S. On a dislocation-based constitutive model and dynamic thermomechanical considerations [J]. International Journal of Plasticity, 2018, (8): 601-615.
- [8] 赵清江, 郭怡晖, 梁宾, 等. 22MnB5 高强度钢板材的断裂失效准则研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (4): 132-137.
- Zhang Q J, Guo Y H, Liang B, et al. Research on fracture criterion of 22MnB5 high-strength steel plate [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (4): 132-137.
- [9] 韩蒙, 李迪, 孙彩凤, 等. 基于修正 GTN 模型的双相钢断裂失效判据研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (1): 117-122.
- Han M, Li D, Sun C F, et al. Study on fracture failure criterion of dual phase steel based on modified GTN model [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (1): 117-122.
- [10] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].
- GB/T 228.1—2021, Metallic material—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [11] GB/T 30069.2—2016, 金属材料 高应变速率拉伸试验 第 2 部分: 液压伺服型与其他类型试验系统 [S].
- GB/T 30069.2—2016, Metallic material—Tensile testing at high strain rates—Part 2: Servo-hydraulic and other test systems [S].
- [12] 徐梅, 米振莉, 李辉, 等. 基于位错密度理论的超高强双相钢 DP1000 热变形本构模型 [J]. 材料研究学报, 2017, 32 (8): 576-584.
- Xu M, Mi Z L, Li H, et al. Constitutive model based on dislocation density theory for hot deformation behavior of ultra-high strength dual phase steel DP1000 [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2017, 32 (8): 576-584.
- [13] 高永亮, 胡士廉, 陈巍, 等. 高应变速率拉伸条件下 TWIP 钢动态力学性能与组织演变规律的研究 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (16): 56-60.
- Gao Y L, Hu S L, Chen W, et al. Research on dynamic mechanical behavior and microstructure evolution rule of TWIP steel under high strain rate tensile condition [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (16): 56-60.
- [14] 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.
- Xu W, Fang G, Zhang J P, et al. Fracture failure characterization and verification of hot forming steel for vehicle crash safety [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (6): 121-128.
- [15] 伍星星, 刘建湖, 孟利平, 等. 金属材料试件在压缩, 扭转, 拉伸断裂过程中的应力状态变化及表征 [J]. 高压物理学报, 2020, 34 (5): 143-152.
- Wu X X, Liu J H, Meng L P, et al. Variation of stress distribution in metal fracture process under compressive, torsional, and tensile loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34 (5): 143-152.
- [16] 罗玉梅, 王博, 李伟. 基于落锤压溃高强双相钢断裂失效模型 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (9): 200-206.
- Luo Y M, Wang B, Li W. Fracture failure model of high-strength dual-phase steel based on falling weight collapse [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (9): 200-206.
- [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): 487-496.
- Feng Y, Xiao S N, Zhu T, 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.

(上接第 151 页)

- Zhang Q, Zhou M, Jin Y J, et al. Analysis and prevention of pitting defect in 40Cr steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42 (5): 197-200.
- [11] 张槐祥, 刘纲, 张芳, 等. 加热炉降低氧化烧损的实验研究 [J]. 工业加热, 2013, 42 (4): 32-35.
- Zhang H X, Liu G, Zhang F, et al. Experiment research on reducing the oxidation burning loss of heating furnace [J]. Industrial Heating, 2013, 42 (4): 32-35.
- [12] 杨丽琴, 丁美良. 加热炉氧化烧损研究及改进措施 [J]. 金属热处理, 2016, 41 (9): 168-170.
- Yang L Q, Ding M L. Research on oxidizing burning loss of heating furnace and improvement measures [J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41 (9): 168-170.
- [13] 赵小龙, 王雍期, 唐兴昌, 等. 钢坯在加热过程中的氧化机理及其研究综述 [J]. 轧钢, 2019, 36 (6): 66-68.
- Zhao X L, Wang Y Q, Tang X C, et al. Review on the oxidation mechanism and its research of steel billet in heating process [J]. China Rolling, 2019, 36 (6): 66-68.
- [14] 魏亚彬, 屈明友, 郭艳花. 高压水除鳞技术在邯钢 CSP 生产线上的应用 [J]. 轧钢, 2008, 25 (1): 59-61.
- Wei Y B, Qu M Y, Guo Y H. Application of the power descaling system on CSP production line of Handan iron and steel [J]. China Rolling, 2008, 25 (1): 59-61.
- [15] 董欣欣, 唐勤. SPHC 热轧带钢氧化铁皮成因和控制措施 [J]. 轧钢, 2011, 28 (5): 56-58.
- Dong X X, Tang Q. Scale formation cause of hot rolled SPHC strip and its control measures [J]. China Rolling, 2011, 28 (5): 56-58.