

Q420 钢材应变硬化与应变率效应的试验

陈俊岭, 李金威, 李哲旭

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 利用 INSTRON 拉伸试验机和 Zwick/Roell HTM5020 型高速拉伸试验机对 Q420 钢材开展了不同应变率下(0.001~288 s⁻¹)的单轴拉伸试验, 研究应变率效应对钢材力学性能的影响。试验结果表明, Q420 钢为应变率敏感型材料, 其硬化特征随应变率的提高而变化。采用 ANSYS 中 LS-DYNA 模块对静力和动力拉伸试验进行仿真模拟, 通过逆向反推的方式获得了 Q420 钢颈缩后的真实应力应变曲线。仿真结果显示, Q420 钢材的真实应力应变关系随着应变率的提高, 从幂次型的 Ludwik 准则向指数型的 Voce 准则转化。为得到更优的本构模型, 在 H/V-R 本构模型中引入新的应变率准则, 以 Cowper-Symonds 模型中的钢材动力放大系数代替 H/V-R 本构模型中的线性 Wagoner 应变率准则。结果显示, 修正 H/V-R 本构模型很好地吻合了试验数据, 准确反映了大应变状态下的应变硬化特征和应变率对应应变硬化的影响。

关键词: 应变率; 应变硬化; 本构模型; Q420

中图分类号: TU391

文献标志码: A

Experimental Study on Strain Hardening and Strain Rate Effect of Q420 Steel

CHEN Junling, LI Jinwei, LI Zhexu

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China.)

Abstract: Uni-axial tensile tests of Q420 steel at different strain rates (0.001-288 s⁻¹) were carried out to study strain rate effect on mechanical properties by INSTRON and Zwick/Roell HTM5020 testing machine. The experimental results show that Q420 steel is sensitive to strain rates, with strain hardening characteristic changing along strain rates. Finite element (FE) modeling of these tensile tests is developed to reversely extrapolate the true stress-strain relationship of Q420 steel beyond necking, using LS-DYNA of ANSYS. The simulation results show that the true stress-strain relationships of Q420 steel transform from power-law Ludwik model to exponential Voce model with the increasing strain

rate. To get a fine dynamic constitutive model, a modified H/V-R model is established by introducing a new strain rate sensitivity function into the H/V-R constitutive model, where Wagoner rate law is replaced by the dynamic increase factor of the Cowper-Symonds model. The results show that the modified H/V - R model fits the experimental data well and captures strain hardening at high strain accurately as well as the variation of strain hardening with strain rate.

Key words: strain rate; strain hardening; constitutive model; Q420

结构的连续倒塌是指结构因突发事件导致局部失效后, 破坏由一个构件扩展到另一个构件, 最终引发结构的大范围倒塌。钢材为应变率敏感型材料, 在爆炸、撞击等突发事件作用下, 结构处于高应变率状态, 因此结构的抗连续倒塌分析不能忽视钢材的应变率效应。已有的研究多采用非线性动力分析的方法对结构进行抗连续倒塌性能评估, 但是考虑材料应变率效应对结构抗连续倒塌性能影响的研究较为少见^[1]。Verleysen 等^[2]的试验研究表明, 欧洲结构用钢 S235 的强度随应变率增加而明显提高, 但当应变率高于一定值后钢材强度变化不再明显, 高应变率下钢材的应变硬化特征发生显著变化。Forni 等^[3]采用液压气动试验机和改进的霍普金森压杆完成了 S355 钢应变率为 0.001~850 s⁻¹的动力性能实验, 并拟合得到了工程中常用的 Johnson-Cook 和 Cowper-Symonds 模型的材料参数。陈俊岭等^[4]采用 INSTRON 和 HTM5020 型拉伸试验机对 Q345 钢材进行应变率为 0.001~330 s⁻¹的单轴拉伸试验, 建立了 H/V-R₂ 经验型本构模型。

Q420 钢是一种低合金高强度结构钢, 在建筑、船舶、桥梁和电站设备等领域已经广泛应用。由于生产工艺和微合金元素的不同, 高强钢的力学性能会

收稿日期: 2016-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(No.51378381)

第一作者: 陈俊岭(1974—), 女, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为高耸结构及钢结构。E-mail: chenjl@tongji.edu.cn

发生一定的变化.已有的关于 Q420 钢材的研究多集中在温度对钢材力学性能的影响^[5],或通过节点或构件试验来验证模型材料的性质^[6].本文分别采用 INSTRON 静力拉伸试验机和 HTM5020 型液压伺服高速拉伸试验机,对 Q420 钢材进行了应变率为 $0.001\sim 288\text{ s}^{-1}$ 下的 7 组单轴拉伸试验,通过逆向外推的方法得到了其在不同应变率下的真实应力应变关系,归纳提出了可用于抗连续倒塌性能分析的 Q420 钢材动本构模型.

1 试验

1.1 试验材料及试样

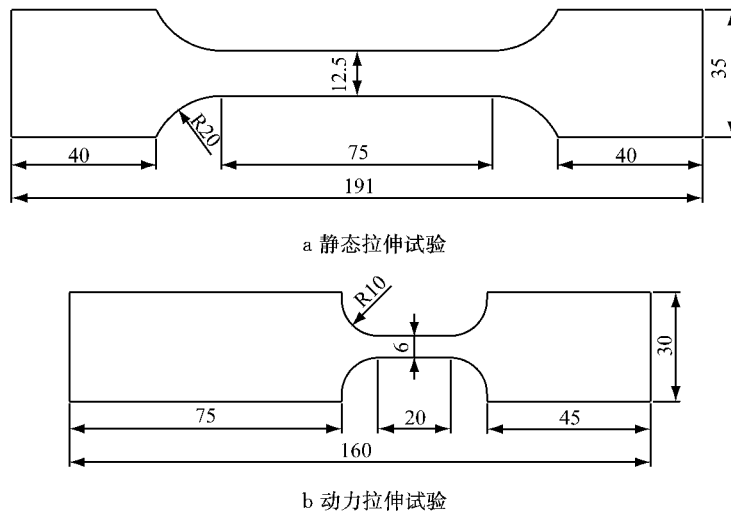


图 1 拉伸试件尺寸示意图(单位: mm)

Fig.1 Details of tensile specimens (unit: mm)

1.2 试验仪器及方法

静力拉伸试验的设计应变率为 $1.0\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$,试验中对应的拉伸速率为 $3\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.采用最大拉伸力 200 kN 的 INSTRON 拉伸试验机进行静力拉伸试验,利用 50 mm 标距接触式引伸计测量试验中钢材的名义应变.对动力拉伸试样,采用高速摄像机拍摄测定钢材的名义应变.在动力拉伸试验中,用黑色喷漆将试样的标距段涂黑以便于摄像,并用高速摄像机拍摄拉伸过程中试样的标距段变化,得到各时间点的标距段的变形图片,经过处理得到动力拉伸试验中钢材的应变与时间的变化关系.运用 Zwick/Roell 公司生产的 HTM5020 型高速拉伸试验机开展 Q420 钢动力拉伸试验(图 2),该试验机的最大拉伸力可达 50 kN,最大拉伸速度为 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.试样下端夹持于固定端夹头,上端与试验机加速拉伸夹头相连.由于试件振动和力传感器自身震

选取河北钢铁股份有限公司生产的 6 mm 厚 Q420 钢板为试样材料,通过静力和高速拉伸试验研究不同应变率下 Q420 钢的力学性能.分别按照《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)^[7]和国际标准《金属材料高应变率下的拉伸试验第 2 部分:液压伺服及其他试验系统》(ISO 26203-2—2011)^[8]设计静力拉伸试样和动力拉伸试样(图 1),所有拉伸试样的设计厚度均为 3 mm,制作试样过程中,沿钢材轧制方向线精加工 6 mm 厚钢板至设计厚度,并避免由于机加工造成的钢材表面产生硬化及过热而改变其力学性能.

荡的原因,试验机的力传感器所测得的力信号波动较大,采用在试件弹性区粘贴应变片的方式所测得的力值信号波动小、精确度高^[9].因此,对高速拉伸试样,在每次试验前以 3 kN(远低于试样屈服的拉力)的拉伸力进行静力拉伸,并由超动态应变采集仪记录下的应变信号换算得到试验拉伸过程中力信号与应变信号的换算系数.在高速拉伸试验中,该换算系数在试样的弹性区依然适用,因此可通过换算系数与超动态应变采集仪得到的应变信号直接得到力信号.

2 试验结果与分析

2.1 名义应力应变曲线

静力拉伸试验和每个应变率下的动力拉伸试验均进行 3 次,以保证试验的可重复性.对每个试样,

标距段宽度和厚度测量 3 次取平均值以计算试样的横截面积. 选取 3 次拉伸试验中最接近平均值的试验结果, 拟合得到 Q420 钢的名义应力应变曲线(见图 3a). 图 3b 为 Q420 钢在不同应变率下名义应力应变曲线的对比结果, 应变率根据试样的断裂应变

与拉伸用时之比算得. 由图 3b 可以看出, Q420 钢材在不同应变率下均有明显的屈服平台, 钢材应力在屈服平台之后继续增加, 应变硬化不断开展. 名义应力达到最大值时, 钢材进入颈缩阶段. 不同应变率下的屈服强度和极限抗拉强度见表 1.

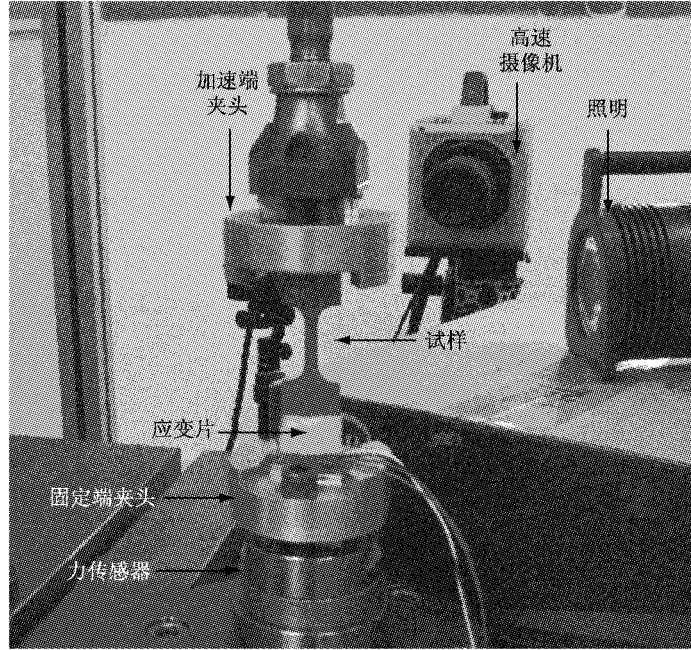


图 2 高速拉伸试验

Fig.2 Setup for high speed tensile test

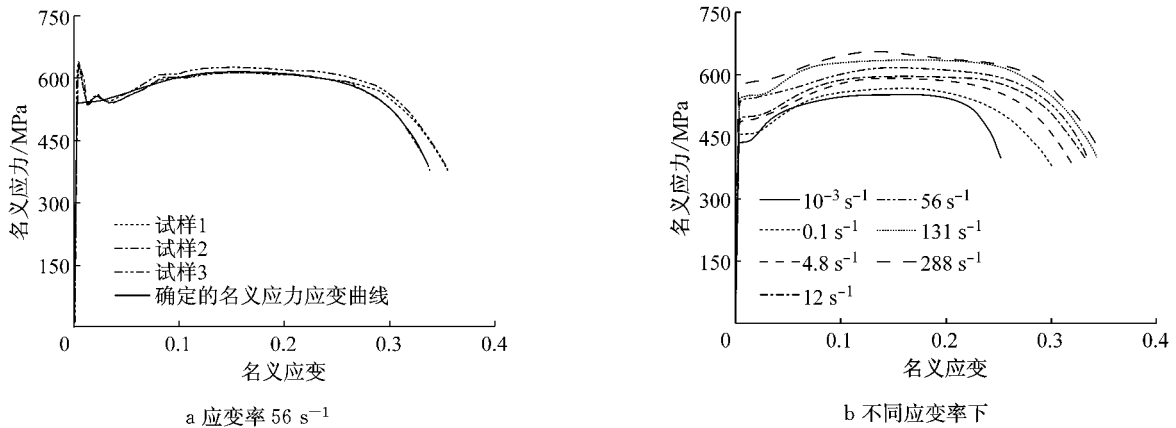


图 3 Q420 名义应力应变曲线

Fig.3 Nominal stress-strain curves of Q420 steel

表 1 不同应变率下 Q420 屈服强度和极限抗拉强度

Tab.1 Yield strength and ultimate tensile strength of Q420 steel under different strain rates

	应变率/ s^{-1}						
	0.001	0.1	4.8	12	56	133	288
屈服强度/MPa	436.3	455.4	487.1	496.1	538.8	547.8	579.5
极限抗拉强度/MPa	551.5	565.7	588.9	595.8	615.3	634.5	650.6

钢材强度和延伸率随应变率的变化趋势如图 4 所示. 均匀延伸率为试件在试验中即将形成缩颈时

的延伸率, 即对应于极限抗拉强度时刻的延伸率; 断裂延伸率为试件拉断时的延伸率. 由于动力试样和静力试样的尺寸不同, 静力试样的断裂延伸率未列入图中. 从图 4 可以看出, 随着应变率的提高, Q420 钢材的屈服强度和极限抗拉强度明显提高, 断裂延伸率逐渐增大, 而均匀延伸率变化不明显. 基于表 1 中各个应变率下的屈服强度和极限抗拉强度的数据, 运用 Cowper-Symonds 模型^[10](式(1))对试验数

据进行拟合,拟合曲线如图 5 所示,拟合参数见表 2。从图 5 可以看出,拟合曲线与试验结果吻合良好。

$$I = \frac{\sigma_d}{\sigma_s} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{P}} \quad (1)$$

式中: I 为钢材的动力放大系数; σ_d 和 σ_s 分别为钢材的动强度和静强度,MPa; $\dot{\epsilon}$ 为应变率, s^{-1} ; D 和 P 为待定的材料参数, D 的单位为 s^{-1} , P 为量纲一。

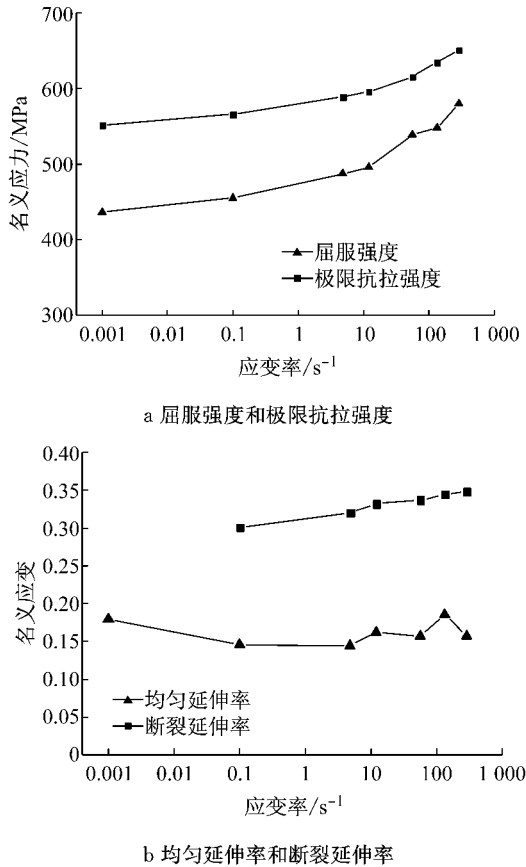


图 4 强度和延伸率随应变率的变化

Fig. 4 Variations of engineering stress and elongations with increasing strain rate

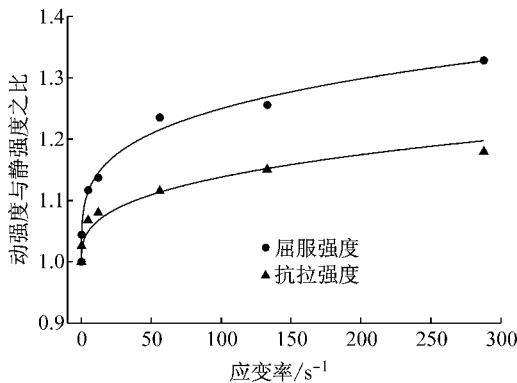


图 5 动力放大系数随应变率的变化

Fig. 5 Variation of dynamic increasing factors with strain rates

表 2 Cowper-Symonds 模型材料参数

屈服强度		极限抗拉强度	
D/s^{-1}	P	D/s^{-1}	P
22 305.8	3.90	35 062.1	2.96

2.2 真实应力应变关系

工程中常用的应力应变曲线只能近似反映钢材在弹性阶段的本构关系,实际上是一种名义应力应变曲线.结构连续倒塌分析中需要考虑钢材的大应变状态甚至断裂,需要采用能够反应钢材塑性阶段的真实应力应变关系曲线.真实应力应变曲线可反映材料在拉压过程中的塑性变形规律,是确定材料真实破坏强度和材料变形能力的重要依据,反映了金属材料固态流动应力的变化规律,是采用非线性有限元法对结构进行数值分析的基础.在钢材的单向拉伸试验中,试样在达到最大拉力前变形均匀,真实应力 σ_{true} 和真实应变 ϵ_{true} 可通过式(2)–(3)计算:

$$\sigma_{true} = F/A \quad (2)$$

$$\epsilon_{true} = \int_{L_0}^L \frac{1}{l} dl = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \quad (3)$$

式中: F 为试验测得的荷载; A_0 和 A 分别为标距段内的原始截面面积和拉伸过程中的真实截面面积; L_0 和 L 分别为原始标距段长和拉伸过程中的真实标距段长。

当钢材达到名义极限抗拉强度后,试样发生颈缩,由于颈缩段变形不均匀、处于复杂的应力状态,公式(2)和公式(3)不再适用.对颈缩段至试样拉断时刻的真实应力应变关系的获取,主要有两种方法:用经验公式修正颈缩段的单向应力,从而得到钢材的等效拉应力;结合有限元数值模拟,对试验结果进行逆向模拟,得出钢材的真实应力应变关系^[11].本文选用逆向方法,通过数值模拟对颈缩段后的真实应力应变关系进行外推,并与试验结果对比得出钢材的真实应力应变关系。

对于有明显屈服点的钢材,常用的应变硬化准则见式(4)–(5)。

Ludwik 准则^[12]:

$$\sigma = \sigma_0 + K_L (\epsilon_p)^n \quad (4)$$

式中: σ_0 为钢材的屈服强度; ϵ_p 为钢材的真实塑性应变; K_L 和 n 分别为钢材的强度系数和应变硬化指数。

Voce 准则^[13]:

$$\sigma = \sigma_s - (\sigma_s - \sigma_i) e^{-k\epsilon_p} \quad (5)$$

式中: σ_s 为饱和应力; σ_i 为钢材进入塑性状态时的初始塑性应力; n 为与钢材应变硬化特征相关的材料参

数.

试样发生颈缩时, 钢材达到名义抗拉强度, Considère 准则^[14]成立. 见式(6).

Considère 准则:

$$\left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon_p} \right|_{\varepsilon_p=\varepsilon_u} = \sigma_u \quad (6)$$

式中: ε_u 为颈缩点对应的钢材真实塑性应变; σ_u 为颈缩点钢材的真实应力.

Ludwik 准则为幂次型硬化准则, 应力随着应变的增加而不断上升; Voce 准则为指数型硬化准则, 在大应变状态时不断接近饱和应力状态, 即真实应力应变关系曲线存在水平渐近线. 在高应变率下的单向拉伸试验中, 钢材的真实应力在随着应变的发展趋向于饱和应力状态, 因此, Voce 准则更适合描述高应变率下钢材的真实应力应变关系.

试样发生颈缩前的真实应力应变关系可通过式(2)和式(3)计算得到. 在颈缩段, 钢材的名义应力达到最大值时, 钢材进入颈缩阶段, 此时的真实应力应变值和一阶导数可以作为两个已知条件用来确定 Ludwik 准则和 Voce 准则中的材料参数. 然而 Ludwik 准则和 Voce 准则均为三参数模型, 且模型中 n 值变化范围较小, Ludwik 准则中 n 值在(0, 1)之间, Voce 准则的 n 值在(1, 3)之间. 因此可将两种准则中的未知参数 n 作为待定参数, 通过假设外推确定, 如图 6 即为运用 Ludwik 准则对 Q420 钢在 0.001 s^{-1} 应变率下颈缩后真实应力应变关系假设外推的示意图.

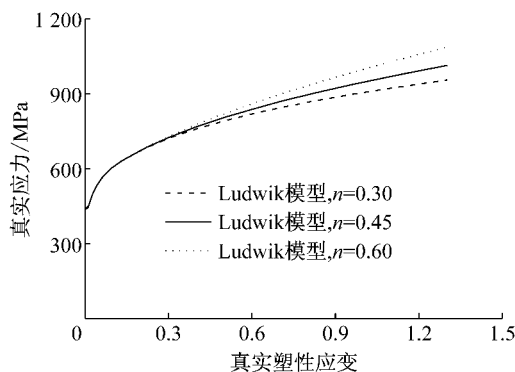


图 6 应变率 0.001 s^{-1} 时 Ludwik 准则真实应力应变关系
Fig. 6 True stress vs. strain curves by Ludwik model at the strain rate of 0.001 s^{-1}

运用 ANSYS 中 LS-DYNA 模块对静力和动力拉伸试样进行仿真模拟, 有限元模型如图 7 所示. 采用 8 节点 Solid164 单元对试样平行长度段的网格局部加密, 一端固接, 另一端自由, 拉力匀速施加在自由端. 采用分段线性塑性模型, 选用合适的拉伸用时

和断裂应变考虑应变率影响.

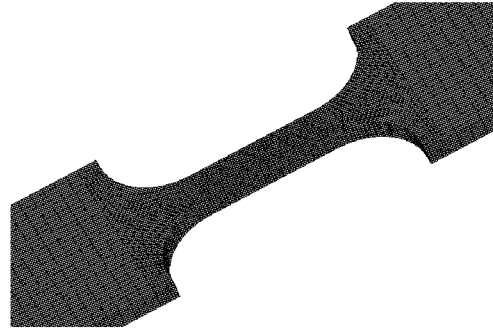


图 7 动力拉伸试样的有限元模型

Fig. 7 Finite element model of high-speed tensile specimen

对于 Ludwik 准则和 Voce 准则中的待定参数 n , 通过输入不同 n 值对应的真实应力应变曲线作为钢材的本构模型进行多组有限元仿真模拟. 将有限元模拟中得到钢材的名义应力应变曲线与试验得到的名义应力应变曲线进行对比, 选取最接近试验结果的有限元模拟中钢材的本构模型作为钢材的真实本构模型. 图 8 为应变率 0.001 s^{-1} 时有限元数值分析得到的名义应力应变曲线和试验所得名义应力应变曲线的对比, 从图中可以看出, 当 $n=0.45$ 时, 数值分析结果与试验结果最接近. 采用同样的方法, 分别确定了各个应变率下最接近试验结果的应变硬化准则以及待定参数 n , 进而得到 Q420 钢颈缩后真实应力应变关系, 最终结果见表 3. 由表 3 可以看出, Q420 钢材的应变硬化准则随着应变率的提高由 Ludwik 准则向 Voce 准则转变.

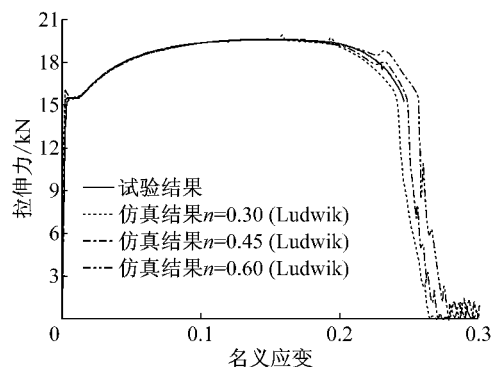


图 8 应变率 0.001 s^{-1} 时不同材料参数 n 对仿真结果的影响
Fig. 8 Influence of constant n at the strain rate of 0.001 s^{-1}

3 钢材的动本构模型

很多学者提出了描述钢材在不同应变、应变率和温度下真实应力应变关系的本构模型. 目前, 常用的考虑钢材应变率效应的本构模型有 Johnson-Cook 模型^[15] 和 Cowper-Symonds 模型^[10], 这两种模型因

表 3 Q420 钢颈缩后真实应力应变关系的外推结果

Tab.3 Post-necking true stress-strain model parameters for Q420 steel

应变率/s ⁻¹	硬化准则	颈缩后真实应力应变关系表达式	断裂应变
0.001	Ludwik	$\sigma=246.05+605.51\epsilon_p^{0.45}$	1.08
0.1	Ludwik	$\sigma=368.62+581.11\epsilon_p^{0.55}$	1.20
4.8	Voce	$\sigma=1\,155.78-579.31e^{-1.4\epsilon_p}$	1.10
12	Voce	$\sigma=1\,224.89-644.52e^{-1.3\epsilon_p}$	1.20
56	Voce	$\sigma=1\,220.17-620.33e^{-1.4\epsilon_p}$	1.16
133	Voce	$\sigma=1\,252.99-642.77e^{-1.5\epsilon_p}$	1.18
288	Voce	$\sigma=1\,436.66-799.61e^{-1.1\epsilon_p}$	1.33

形式简单而被广泛嵌入于各种有限元软件的材料库中. 由于 Johnson-Cook 模型和 Cowper-Symonds 模型假定应变硬化效应和应变率效应相互独立, 不能准确描述应变硬化效应与应变率效应的相互耦合现象. 因而, 很多学者提出了能反映钢材应变硬化效应和应变率效应耦合现象的本构模型, 即将钢材的应变硬化表达式表征为应变和应变率的函数, 如 Rusinek-Klepaczko (RK) 模型^[16]、Khan-Huang-Liang (KHL) 模型^[17] 等. 这些钢材本构模型的形式大致分为两类: 饱和应力型(如 Voce 准则)为基础的模型和幂次型(如 Hollomon 准则^[18])为基础的模型. H/V 模型^[19] 采用 Hollomon 准则和 Voce 准则的线性组合来描述钢材温度和应变率对应变硬化的影响. H/V 模型中两种硬化准则的贡献仍需进一步优化, Kim 等^[20] 在 H/V 模型中加入计量钢材应变率敏感性的函数, 提出了 H/V-R 模型来描述钢材的应变硬化效应与应变率效应的耦合关系, 见式(7).

$$\bar{\sigma} = f(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}})g(\dot{\bar{\epsilon}}) = [\alpha(\dot{\bar{\epsilon}})f_H + (1 - \alpha(\dot{\bar{\epsilon}}))f_V]g(\dot{\bar{\epsilon}}) \quad (7)$$

$$\alpha(\dot{\bar{\epsilon}}) = \alpha_1 - \alpha_2 \ln(\dot{\bar{\epsilon}}) \quad (8)$$

$$f_H = a\bar{\epsilon}^b \quad (9)$$

$$f_V = c - d \exp(-E\bar{\epsilon}) \quad (10)$$

$$g(\dot{\bar{\epsilon}}) = (\dot{\bar{\epsilon}}/\dot{\bar{\epsilon}}_0)^{m_1+m_2 \ln \dot{\bar{\epsilon}}} \quad (11)$$

式(7)–(11)中 $\bar{\sigma}$ 和 $\bar{\epsilon}$ 分别为真实应力和真实塑性应变; $\dot{\bar{\epsilon}}$ 和 $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ 分别为真实塑性应变率和参考应变率, 本文中 $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ 取 $0.001 \cdot s^{-1}$; $\alpha(\dot{\bar{\epsilon}})$ 是与应变率 $\dot{\bar{\epsilon}}$ 相关的权; f_H 为 Hollomon 模型; f_V 为 Voce 模型; $g(\dot{\bar{\epsilon}})$ 是线性 Wagoner 应变率准则, 用于计量钢材应变率敏感性; $\alpha_1, \alpha_2, a, b, c, d, E, m_1, m_2$ 均为待定的材料参数.

本文采用 H/V-R 模型对表 3 中 Q420 钢材的真实应力应变关系进行拟合, 拟合参数如表 4 所示, H/V-R 模型拟合结果与试验结果的对比见图 9a. 从图中可以看出, 两者的变化趋势一致, 可见, Hollomon 准则和 Voce 准则的线性组合能比较准确地反映 Q420 钢的应变率效应和应变硬化效应, 但模型结果对于高应变率和低应变率的试验结果仍有误差. 为得到更优的 Q420 钢材动本构模型, 对 H/V-R 模型进行修正, 采用 Cowper-Symonds 模型中的动力放大系数 $h(\dot{\bar{\epsilon}})$ (式(12)) 替代线性 Wagoner 应变率准则, 拟合得到的参数见表 5. H/V-R 模型和修正 H/V-R 模型与试验结果的误差见表 6. 修正 H/V-R 模型拟合结果与试验结果的对比见图 9b. 从图中可以看出, 修正后的模型与试验结果基本吻合一致, 能准确地反映 Q420 钢应变硬化特征随应变率的变化.

$$h(\dot{\bar{\epsilon}}) = 1 + \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{m_1}\right)^{\frac{1}{m_2}} \quad (12)$$

式中: $h(\dot{\bar{\epsilon}})$ 为计量钢材应变率敏感性的函数; m_1 和 m_2 为待定的材料参数.

表 4 H/V-R 模型材料参数

Tab.4 H/V-R model material constants

参数	α_1	α_2	a/MPa	b	c/MPa	d/MPa	E	m_1	m_2
参数值	0.161 92	0.012 30	1 597.98	0.182 7	857.96	471.16	1.389	0.016 87	0.001 77

表 5 修正 H/V-R 模型材料参数

Tab.5 Modified H/V-R model material constants

参数	α_1	α_2	a/MPa	b	c/MPa	d/MPa	E	m_1	m_2
参数值	0.262 05	-0.000 54	2 948.30	0.664 0	2 605.95	1 990.13	-0.171	75 202.7	3.485 3

表 6 H/V-R 模型和修正 H/V-R 模型与试验结果的误差
Tab.6 Error of H/V-R model and the modified H/V-R model with test results

H/V-R 模型		修正 H/V-R 模型	
残差平方和/MPa ²	可决系数 R ²	残差平方和/MPa ²	可决系数 R ²
44 709.75	0.995 0	21 268.91	0.997 6

和 EDDQ 钢^[20] 的试验结果进行拟合, 拟合参数见表 7. 拟合结果和试验结果的对比如图 10 所示. 从图中可以看出, 修正 H/V-R 模型对这两种低碳钢的试验结果吻合度较高, 能准确反映钢材的应变硬化和应变率效应的相互耦合关系.

采用所提出的修正 H/V-R 模型, 对 Q345 钢^[4]

表 7 修正 H/V-R 模型的两种钢材的材料参数

Tab. 7 Material constants of the modified H/V-R model for two kinds of steels

	参数								
	α_1	α_2	a/MPa	b	c/MPa	d/MPa	E	m_1	m_2
Q345 钢	0.130 21	-0.002 50	5 779.87	0.569 8	2 574.76	2 108.92	-0.122	74 413.9	3.960 5
EDDQ 钢	0.309 33	0.034 13	732.97	0.447 1	2 470.18	2 248.02	0.006	123.60	7.356 8

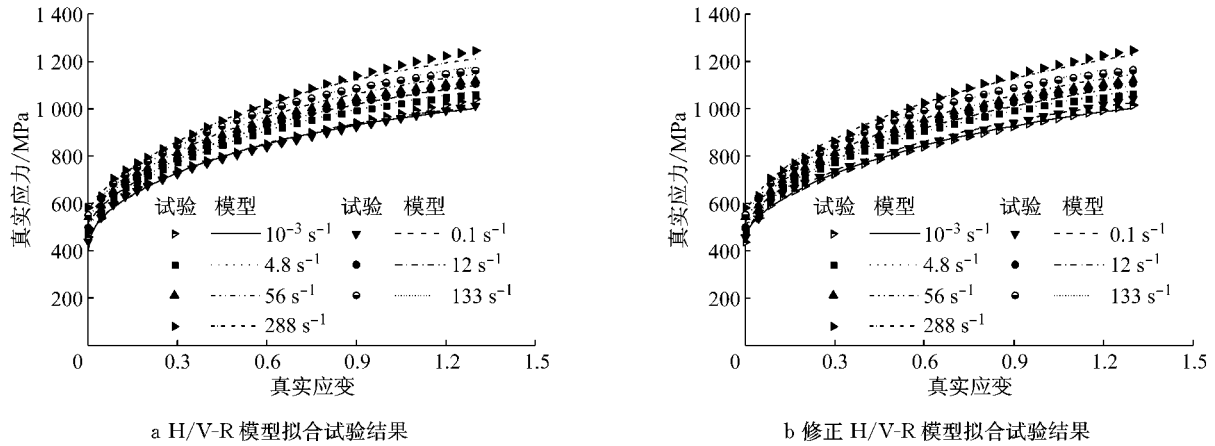


图 9 试验结果与拟合结果的对比

Fig. 9 Comparison between the experimental data and correlations of fitting results

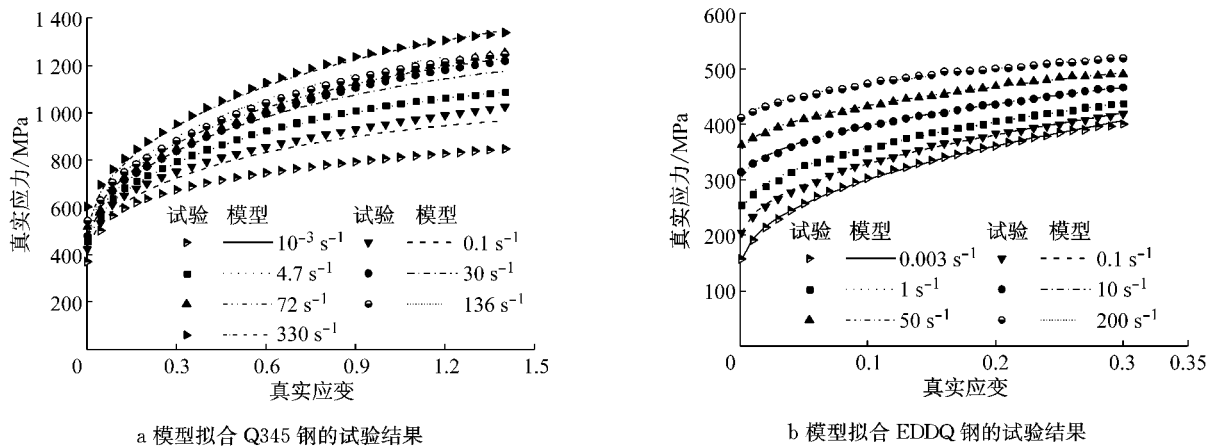


图 10 修正 H/V-R 模型的适用性验证

Fig. 10 Validation of the modified H/V-R model by other experimental results

4 结论

本文通过准静态和高速拉伸试验研究了应变率效应对 Q420 钢材力学性能的影响. 试验结果表明: Q420 钢为应变率敏感型钢材, 随着应变率的提高, 钢材屈服强度和抗拉强度均提高, 且屈服强度对应变率更为敏感; 运用 Cowper-Symonds 模型, 得到了 Q420 钢屈服强度和抗拉强度的动力放大系数与应变率之间的数学关系, 可为工程设计和结构分析提供参考; 验证了 H/V-R 本构模型能比较准确地反映 Q420 钢的应变硬化随应变率的提高而变化的现象;

将 Cowper-Symonds 模型中的动力放大系数引入 H/V-R 模型中, 替代线性 Wagoner 应变率准则, 得到了能准确反映 Q420 钢应变率效应的修正 H/V-R 本构模型, 为工程结构的精细化有限元分析奠定基础.

参考文献:

[1] Elsanadedy H M, Almusallam T H, Alharbi Y R, et al. Progressive collapse potential of a typical steel building due to blast attacks[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 101: 143.
 [2] Verleysen P, Peirs J, Van Slycken J, et al. Effect of strain rate on the forming behaviour of sheet metals[J]. Journal of

- Materials Processing Technology, 2011, 211(8): 1457.
- [3] Forni D, Chiaia B, Cadoni E. Strain rate behaviour in tension of S355 steel: base for progressive collapse analysis [J]. Engineering Structures, 2016, 119: 164.
- [4] 陈俊岭, 李哲旭, 舒文雅, 等. 不同应变率下 Q345 钢材力学性能试验研究[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2015, 45(6): 1145.
- CHEN Junling, Li Zhexu, SHU Wenya, *et al.* Experimental study on dynamic mechanical behavior of Q345 steel under different strain rates [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2015, 45(6): 1145.
- [5] 李婧, 赵德文, 刘相华. Q420 钢热变形行为及流变应力模型研究[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2010, 31(2): 202.
- LI Jing, ZHAO Dewen, LIU Xianghua. Investigation on hot deformation behavior and mathematical models of flow stress of Q420 HSLA steel [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2010, 31(2): 202.
- [6] 施刚, 姜雪, 周文静, 等. Q420 焊接圆钢管轴心受压稳定性试验和设计方法研究[J]. 工程力学, 2015, 32(2): 64.
- SHI Gang, JIANG Xue, ZHOU Wenjing, *et al.* Experimental study on the buckling behavior of Q420 high strength steel welded tubes under axial compression and design methods [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(2): 64.
- [7] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 228.1—2010 金属材料拉伸试验. 第1部分: 室温试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- Standardization Administration of China. GB/T 228.1—2010 Metallic materials-tensile testing—part 1: method of test at room temperature [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2011.
- [8] The International Organization for Standardization. ISO 26203-2 Metallic material-tensile testing at high strain rates—part2: servo-hydraulic and other test systems [S]. Geneva: The International Organization for Standardization, 2011.
- [9] Wood K C, Schley C A, Williams M, *et al.* A method to calibrate a specimen with strain gauges to measure force over the full-force range in high rate testing [C] // DYMAT-International Conference on the Mechanical and Physical Behavior of Materials under Dynamic Loading. Brussels: [s. n.], 2009: 265-273.
- [10] Cowper G R, Symonds P S. Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams [R]. Providence: Brown University, 1957.
- [11] 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[C]//中国汽车工程学会第十六届汽车安全技术学术会议论文集. 杭州:[s. n.], 2013: 282-293.
- ZHU Juner, ZENG Long, MA Lingchen, *et al.* A hybrid experimental-numerical converse method for the necking behavior study of high strength steel sheets [C] // The 16th China Conference of Automotive Safety Technology. Hangzhou: [s. n.], 2013: 282-293.
- [12] Ludwik P. Elemente der technologischen Mechanik [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1909.
- [13] Voce E. The relationship between stress and strain for homogeneous deformation [J]. Journal of the Institute Metals, 1948.
- [14] Yasnikov I S, Vinogradov A, Estrin Y. Revisiting the Considère criterion from the viewpoint of dislocation theory fundamentals [J]. Scripta Materialia, 2014, 76: 37.
- [15] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C] // Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. The Hague: International Ballistics Committee, 1983: 541-547.
- [16] Rusinek A, Zaera R, Klepaczko J R. Constitutive relations in 3-D for a wide range of strain rates and temperatures-application to mild steels [J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(17): 5611.
- [17] Khan A S, Liang R. Behaviors of three Bcc metal over a wide range of strain rates and temperatures; experiments and modeling [J]. International Journal of Plasticity, 1999, 15 (10): 1089.
- [18] Hollomon, J H. Tensile deformation [J]. Transactions of AIME, 1945, 162: 268.
- [19] Sung J H, Kim J H, Wagoner R H. A plastic constitutive equation incorporating strain, strain-rate, and temperature [J]. International Journal of Plasticity, 2010, 26(12): 1746.
- [20] Kim J, Kim D, Han H N, *et al.* Strain rate dependent tensile behavior of advanced high strength steels; experiment and constitutive modeling [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 559: 222.