

# Q235 钢材在不同应变率下力学性能的试验研究

陈俊岭, 舒文雅, 李金威

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 通过 INSTRON 拉伸试验机和 HTM5020 型高速拉伸试验机开展 Q235 钢材的准静态和高速拉伸试验, 研究钢材的动态力学性能. 结果表明: Q235 钢材为应变率敏感型材料, 随着应变率的提高, 钢材的屈服强度和极限强度明显提高, 钢材的应变硬化特征发生显著变化, 其名义屈服强度和名义抗拉强度的动力放大系数与应变率之间满足 Cowper-Symonds 模型. 基于钢材颈缩前的真实应力应变关系, 提出了修正的 Johnson-Cook 模型, 该模型可更合理地描述 Q235 钢应变率效应与应变硬化效应耦合现象.

**关键词:** Q235 钢材; 连续倒塌; 应变率; 本构模型; Johnson-Cook 模型

中图分类号: TU391

文献标志码: A

## Experimental Study on Dynamic Mechanical Property of Q235 Steel at Different Strain Rates

CHEN Junling, SHU Wenyua, LI Jinwei

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

**Abstract:** Quasi-static and dynamic tensile tests of Q235 steel were performed to study the dynamic tensile behaviors under different strain rates by INSTRON and HTM5020 testing machines. Experimental results show that Q235 steel is very sensitive to strain rates. Both the yield strength and the ultimate tensile strength of Q235 steel increase with the growth of strain rate. The hardening characteristics also vary evidently with the increasing strain rate. The dynamic increasing factors of both engineering yield stress and engineering ultimate stress can be expressed as the function of strain rates by using the Cowper-Symonds model. Based on the true stress-strain relationship before necking of Q235 steel, the Johnson-Cook model is modified to take into account the coupled effect of strain hardening and strain rate.

**Key words:** Q235 steel; progressive collapse; strain rate; constitutive model; Johnson-Cook model

钢材因强度高、塑性和韧性好、材质均匀、可焊性好、工业化程度高等优点, 近年来在各类公共建筑中得到广泛应用. 钢结构体系在正常使用和维护条件下的设计方法已经非常成熟, 但是因各种突发事件发生局部破坏后剩余结构的抗连续倒塌能力尚需要进一步研究. 目前, 对钢框架结构抗连续倒塌性能的研究主要集中在采用数值分析方法研究局部关键构件失效后受损结构的响应, 材料本构模型假定为理想的或线性强化的弹塑性模型. 这种理想化的假设虽然简化了分析和设计过程, 可以定性分析结构体系在局部柱失效后的内力重分布过程, 但实际上突发事件对结构的作用是一种快速、非循环的冲击荷载, 持续时间通常为数毫秒至数百毫秒, 而钢材为应变率敏感型材料, 因此应变率对钢材力学性能的影响不能忽视. Xu 等<sup>[1]</sup>研究了汽车用孪生诱发塑性 (TWIP) 钢的动力力学性能, 指出 TWIP 钢在低应变率时强度与应变率负相关, 但在高应变率下表现为与应变率正相关. Singh 等<sup>[2]</sup>研究了 MP800HY 高强钢在应变率为  $0.001 \sim 750 \text{ s}^{-1}$  下的应变率效应, 运用 Johnson-Cook 模型拟合得到了钢材的本构模型, 研究结果表明该钢材对应变率效应并不敏感. Huh 等<sup>[3]</sup>研究了应变率和温度对多种汽车用钢材强度的影响, 结果表明这些钢材的应变率效应会随着温度的提升而减弱, 并提出用考虑钢材应变率效应和应变硬化效应相互耦合的 Khan-Huang-Liang 模型来替代 Johnson-Cook 模型作为钢材的本构模型, Verleysen 等<sup>[4]</sup>的试验研究结果表明, 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. Yu 等<sup>[5]</sup>通过拉伸试验研究了 Q345 钢在高温和高应变率 ( $5 \times 10^2 \sim 4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ) 下的力学性能, 建立了 Q345 钢和温度及应变率相关的本构关系, 结果表明 Q345 钢是应变率

敏感型材料,但是在超高应变率下钢材强度变化不大。

由此可见,已有的关于钢材应变率敏感性的研究主要针对汽车用高强度钢材,关于建筑用钢材的应变率效应研究较少。Q235 钢材是一种广泛应用于建筑、桥梁、船舶等领域的碳素结构钢,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,完成了应变率为  $0.001 \sim 315 \text{ s}^{-1}$  下 Q235 钢材的静态和动力拉伸试验,分析了 Q235 钢材在不同应变率下的动力特性,基于不同应变率下试样颈缩前的真实应力应变关系,归纳提出了可用于工程结构非线性动力分析的钢材经验型本构模型。

## 1 试验方法

### (1) 试验材料及试样

选取河北钢铁股份有限公司生产的 6 mm 厚 Q235B 钢板为研究对象,通过静力和高速拉伸试验确定 Q235 钢在不同应变率下的力学性能。静力拉伸试样(见图 1a)和高速拉伸试样(见图 1b)分别按照我国标准《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1-2010)<sup>[6]</sup> 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)<sup>[7]</sup> 设计,所有拉伸试样的厚度精加工至 3 mm。

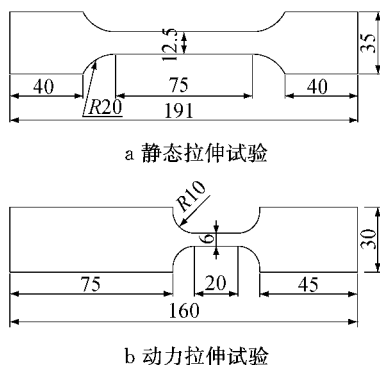


图 1 拉伸试样尺寸示意图(单位: mm)

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

### (2) 试验条件

静力拉伸试验在最大拉伸力为 200 kN 的 INSTRON 拉伸试验机上开展,试验中运用接触式引伸计(50 mm 标距)测量试验中钢材的名义应变,拉伸速度为  $3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,对应的应变率为  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。高速拉伸试验在最大拉伸力为 50 kN 的 HTM5020 型高速拉伸试验机上开展,最大拉伸速度

可达  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。试件下端夹持于固定端夹头,上端与试验机加速拉伸夹头相连,采用高速摄像机测定钢材的名义应变。由于高速拉伸试验中力传感器所测得的力信号波动较大,采用在试件下部夹持段的弹性区粘贴应变片的方式记录试验中的力信号<sup>[8]</sup>(见图 2)。每次高速拉伸试验前,在静力拉伸试验机上以 3 kN 的拉伸力对该动力拉伸试件进行静力拉伸,运用超动态应变仪记录应变片在拉伸试验过程中的应变信号,借助静力试验机力传感器获取力信号,并换算得到该试样拉伸试验过程中力信号与应变信号的换算系数。由于高速拉伸试验中,试件弹性区的横截面积变化很小,因此可运用该换算系数将高速拉伸试验中的应变信号转换为力信号。图 3 给出了通过力传感器和应变片获取的力信号对比,从图中可以看出,应变片测定的力信号波动明显减小,准确度更高。

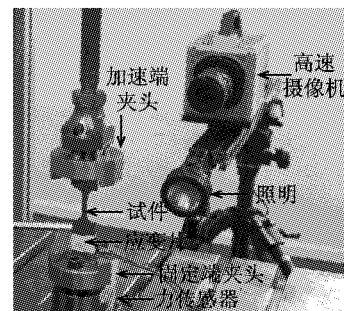


图 2 高速拉伸试验试件布置图

Fig.2 Specimen setup for high speed tensile test

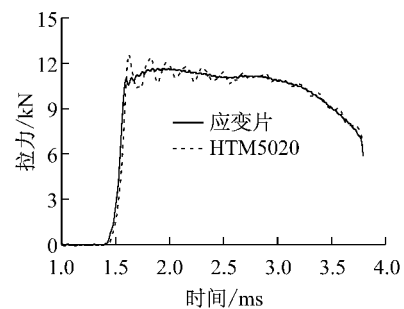


图 3 应变片与力传感器的力信号对比

Fig.3 Comparison of force signals captured by Piezo-load cell and strain gauge

## 2 试验结果分析

每组应变率拉伸试验进行 3 次,以验证试验的可重复性,同一种拉伸速度下开展 3 次拉伸试验,每个应变率下 3 组试样的平均屈服强度和极限抗拉强度列于表 1。由表 1 可知,随着应变率的提高,Q235 钢材屈服强度、极限强度和应变硬化特征均发生显

著变化,屈服强度和极限抗拉强度显著提高,表现出非常明显的应变率敏感特性.选取 3 次重复试验中最接近平均值的名义应力应变曲线,进行光滑处理,得到 Q235 钢在一种应变率下的名义应力应变曲线,不同应变率下 Q235 钢材的名义应力应变曲线见图 4.由图 4 可知,随着应变率的提高,Q235 钢材的屈服强度和极限抗拉强度明显提高,钢材的应变硬化特征发生明显变化,高应变率下钢材的强度硬化段较短,即高应变率下钢材的均匀延伸率明显降低,但断裂延伸率对应变率并不敏感.

表 1 试验结果  
Tab.1 Test results

应变率/ s <sup>-1</sup>	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	均匀延伸率/ %	断裂延伸率/ %
0.001	320.5	488.6	16.50	25.9
4.4	391.9	538.2	15.50	35.6
44	479.2	568.3	15.90	35.8
78	503.2	583.8	16.50	34.6
138	569.0	620.1	6.30	32.0
198	598.7	681.2	6.00	32.0
315	640.4	734.5	7.45	35.0

注:均匀延伸率是指钢材达到名义极限强度时的伸长率.

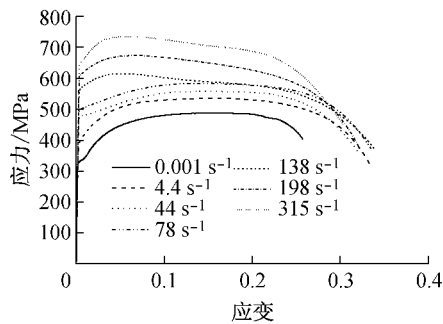


图 4 名义应力应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of Q235 steel at different strain rates

对每组拉伸速度下 3 次重复试验得到的名义屈服强度和极限抗拉强度分别取平均值,关于名义屈服强度和极限抗拉强度的动力放大系数随应变率的变化关系见图 5.从图 5 可以看出,随着应变率的提高,钢材的屈服强度和极限抗拉强度均明显提高,应变率效应对 Q235 钢屈服强度的影响强于其对极限抗拉强度的影响.基于名义屈服强度和名义极限抗拉强度的试验数据,运用 Cowper-Symonds 模型<sup>[9]</sup>(见式(1))对试验数据进行拟合,拟合曲线见图 5,具体参数取值见表 2.从图中可以看出,拟合结果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; $\sigma_d$ 和 $\sigma_s$ 分别为钢材的动强度和静强度; $\dot{\epsilon}$ 为应变率, $s^{-1}$ ;  $D$ 和 $P$ 均为待定的材料参数.

表 2 Cowper-Symonds 模型材料参数

Tab.2 Material constants of the Cowper-Symonds model

屈服强度		抗拉强度	
$D$	$P$	$D$	$P$
305.8	2.751 5	1 047.7	1.724 0

注: $D$ 、 $P$ 为量纲一参数.

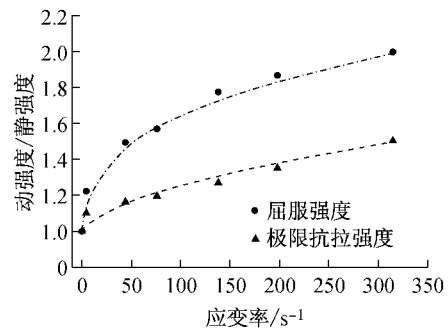


图 5 钢材动力放大系数与应变率的关系

Fig.5 Variation of dynamic increasing factors with strain rates

### 3 钢材的动力本构模型

工程上应用的名义应力应变曲线,可以近似反映钢材在弹性阶段的应力应变关系,但不能真实反映钢材在塑性阶段的本构关系.钢材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,是采用精细化有限元单元对结构进行数值模拟的基础,可以通过式(2)和(3)由试样发生颈缩前的工程应力应变曲线转化得到.

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng}(1 + \epsilon_{eng}) \quad (2)$$

$$\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon_{eng}) \quad (3)$$

式中: $\sigma_{eng}$ 和 $\sigma_{true}$ 分别为工程应力和真实应力; $\epsilon_{eng}$ 和 $\epsilon_{true}$ 分别为工程应变和真实应变.

钢材的经验型本构模型是指通过对试验结果的总结归纳,得到的能描述钢材在不同应变率、不同温度下真实应力与应变之间变化关系的数学模型.Johnson-Cook 模型<sup>[10]</sup>因形式简单而被广泛嵌入各种有限元软件的材料库中,该模型假设应变率效应和应变硬化效应的相互独立性,通过 3 个互不相关的组成部分考虑钢材的应变硬化效应、应变率效应和温度软化效应,见式(4).为验证 Johnson-Cook 模型用于描述 Q235 钢动力力学性能的有效性,根据不

同应变率下的试验数据拟合确定了模型表达式中的各参数值,如表 3 所示, Johnson-Cook 模型拟合结果与试验数据关系如图 6 所示. 从图中可以看出, Johnson-Cook 模型的拟合曲线与试验结果差距很大,这主要是由于 Johnson-Cook 模型无法描述钢材应变硬化特征随应变率的改变而变化的现象,模型中关于应变率的表达式不能对 Q235 钢的应变率效应作出较准确的描述.

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*)) (1 - T^{*m}) \quad (4)$$

式中: $\epsilon$  为真实塑性应变,  $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$  为相对于基准应变率  $\dot{\epsilon}_0 = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  的归一化应变率;  $T^*$  为量纲一温度,本文不考虑温度软化效应而将其设为 0;材料参数  $A$  为静态拉伸下的屈服强度;  $B$  和  $n$  是钢材的应变硬化参数;  $C$  是与钢材应变率效应相关的常量;  $m$  是考虑温度软化效应的参数.

表 3 Johnson-Cook 模型材料参数

Tab.3 Material constants of the Johnson-Cook model

A/MPa	B/MPa	n	C
321.0	675.74	0.510 1	0.027 6

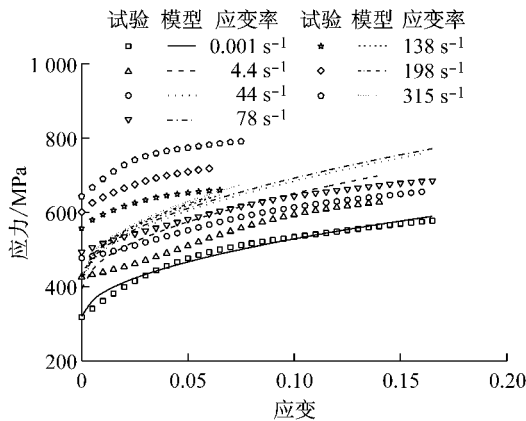


图 6 Johnson-Cook 模型拟合试验结果

Fig.6 Experimental data fitting with the Johnson-Cook model

针对钢材在动荷载作用下所存在的应变率效应与应变硬化效应相互耦合的现象,许多学者提出了在钢材应变硬化的表达式中加入应变率效应影响的经验型本构模型,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 Khan-Huang-Liang 模型<sup>[11-12]</sup>、H/V-R 模型<sup>[13]</sup>等. 本文根据试验数据的分布特征,在 Johnson-Cook 模型的基础上,通过多次拟合结果的对比分析,得到修正 Johnson-Cook 模型,见式(5). 该修正模型与 Johnson-Cook 模型的不同之处在于其一方面假设钢材的应变硬化特征会随应变率的变化而变化,另一方面采用 Cowper-Symonds 模型更准确地表示 Q235 钢强度对应变率

的敏感性. 运用该模型对  $0.001 \sim 4.4 \text{ s}^{-1}$  低应变率范围内和  $4.4 \sim 315 \text{ s}^{-1}$  高应变率范围内的真实应力应变曲线进行数据拟合,得到可表征 Q235 钢在 2 种应变率范围下动力力学性能的模型材料参数,如表 4 所示,拟合曲线见图 7. 由图 7 可知,修正的 Johnson-Cook 模型对不同应变率下钢材动力力学性能的预测结果与试验结果吻合良好,能较可靠地反映 Q235 钢应变硬化特征随应变率的变化.

$$\sigma = (A + B(1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*))\epsilon^n) \left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{P}} \quad (5)$$

其中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $n$ 、 $D$  和  $P$  均为模型中的材料参数.

表 4 修正 Johnson-Cook 模型材料参数

Tab.4 Material constants of the modified Johnson-Cook model

应变率/ $\text{s}^{-1}$	A/MPa	B/MPa	C	n	D	P
0.001~4.4	317.0	668.1	-0.027 24	0.498 6	12.640	0.708
4.4~315	363.9	1 415.2	-0.063 84	0.523 9	401.96	1.495

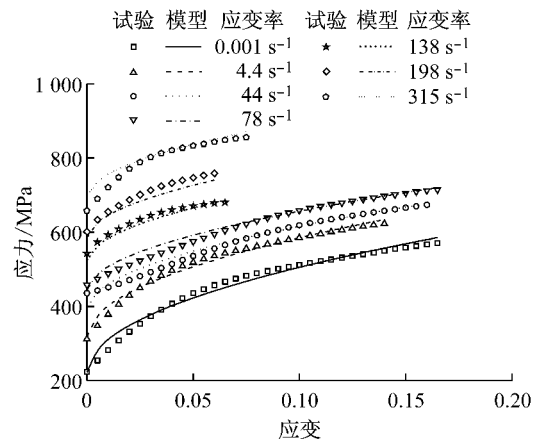


图 7 修正 Johnson-Cook 模型拟合试验结果

Fig.7 Experimental data fitting with the modified Johnson-Cook model

## 4 结论

- (1) Q235 钢属于应变率敏感型材料,随着应变率的提高,钢材的名义屈服强度和名义抗拉强度均提高,且屈服强度对应变率更为敏感.
- (2) 应变率效应对 Q235 钢的应变硬化效应产生影响,高应变率下 Q235 钢的强化段明显缩短.
- (3) 根据 Cowper-Symonds 模型,得到了 Q235 钢名义屈服强度和名义抗拉强度与应变率之间的数学关系,可为工程设计提供参考.
- (4) 基于不同应变率下钢材的真实应力应变关系,对 Johnson-Cook 本构模型进行修正,得到了能

考虑应变硬化效应与应变率效应耦合作用的修正 Johnson-Cook 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] Xu S, Ruan D, Beynon J H, *et al.* Dynamic tensile behaviour of TWIP steel under intermediate strain rate loading [J]. *Materials Science and Engineering, A*, 2013, 573: 132.
- [2] Singh N K, Cadoni E, Singha M K, *et al.* Dynamic tensile behavior of multi phase high yield strength steel [J]. *Materials & Design*, 2011, 32(10): 5091.
- [3] Huh H, Lee H J, Song J H. Dynamic hardening equation of the auto-body steel sheet with the variation of temperature [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2012, 13(1): 43.
- [4] 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.
- [5] Yu W, Zhao J, Shi J. Dynamic mechanical behavior of Q345 steel at elevated temperatures: experimental study [J]. *Materials at High Temperatures*, 2010, 27(4): 285.
- [6] 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.
- [7] The International Organization for Standardization. ISO 26203-2 Metallic material; tensile testing at high strain rates. Part 2: servo-hydraulic and other test systems [S]. Geneva: The International Organization for Standardization, 2011.
- [8] Wood P 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] // *International Conference on the Mechanical and Physical Behavior of Materials under Dynamic Loading*. Brussels: EDP Sciences, 2009: 265-273.
- [9] Cowper G R, Symonds P S. Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams [R]. Providence: Brown University, 1957.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Khan A S, Liang R. Behaviors of three BCC metals during non-proportional multi-axial loadings; experiments and modeling [J]. *International Journal of Plasticity*, 2000, 16(12): 1443.
- [13] Kim J H, 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.