

# 低屈服钢拉伸试验与数值研究

孙家旺<sup>1,2</sup>, 于培师<sup>1,2\*</sup>, 张超锋<sup>1,2</sup>, 赵军华<sup>1,2</sup>

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;  
2. 江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

**摘要:**为了了解低屈服钢的拉伸性能,开展拉伸试验并进行数值研究:采用圆棒试件进行单轴拉伸试验,分析试件的力-位移曲线、延展性以及断裂模式等;基于幂强化法和加权平均法计算材料颈缩后的真实应力-应变数据;采用扩展有限元方法对圆棒试件的拉伸、颈缩以及断裂过程进行数值模拟。通过与试验数据的对比发现:加权平均法可以得到与实际相吻合的颈缩后的真实应力-应变数据;扩展有限元方法可以对低屈服钢的拉伸、颈缩与断裂过程进行有效的仿真。

**关键词:**低屈服钢;拉伸试验;颈缩;真实应力-应变;断裂;扩展有限元法

中图分类号:TB301 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)02-0006-06

## Tensile Test and Numerical Study of Low Yield Steel

SUN Jiawang<sup>1,2</sup>, YU Peishi<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Chaofeng<sup>1,2</sup>, ZHAO Junhua<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** The mechanical behavior of low yield steel under tensile loading was investigated by test and numerical analysis. First of all, the uniaxial tensile test was carried out with the standard bar specimens, and the force-displacement curve, ductility and fracture mode were analyzed. Secondly, the real stress-strain data of material necking were calculated by the power law and the weighted average method respectively. Finally, the extended finite element method was adopted to simulate the tests including the deformation, necking and the fracture behavior of the specimen. By comparing with the experimental data, the real stress-strain data after necking obtained by the weighted average method is consistent with the actual test, which shows that the extended finite element method would be served as an efficient tool to simulate and predict the whole process of the uniaxial tensile behavior of low yield steel.

**Keywords:** low yield steel; tensile test; necking; true stress-strain; fracture; extended FEM (finite element method)

随着建筑物抗震技术的发展及对抗震机理的深入分析,减震成为抗震技术的一个发展趋势<sup>[1]</sup>。低屈服点钢作为耗能抗震设计中主要部件的制作材料,其研制、发展受到广泛关注,在钢种的研制和工程方面取得了显著进展<sup>[2]</sup>。石永久等<sup>[3]</sup>研究了低屈服点钢材 LYPS100 在不同加载制度下的循环本构模型,利用有限元软件验证了参数的准确性。而现有对低屈服点钢试验的研究,主要考察材料的循环加载性能和循环本构关系<sup>[4]</sup>,缺少对颈缩和断裂的研究。

课题组对低屈服点钢 LYP100 进行了圆棒单轴拉

伸试验和 S4800 扫描电子显微镜断口观察,采用幂强化法和加权平均法对钢材颈缩后的本构关系进行了计算,利用 ABAQUS 有限元软件进行扩展有限元 (extended finite element method, XFEM)<sup>[5]</sup>,模拟验证了 LYP100 钢材颈缩后的本构关系的准确性,为低屈服点钢材应用在工程结构中的分析提供基础。

## 1 拉伸断裂实验

### 1.1 试验概况

为形成对比,本试验采用的 2 种材料分别为 LYP100 和 Q235 钢。试件为厚度 20 mm 的钢板,长度

收稿日期:2017-07-26;修回日期:2018-01-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11302067)。

第一作者简介:孙家旺(1991),男,山东滕州人,硕士研究生,主要研究方向为断裂力学。通信作者:于培师(1982),男,山东章丘人,博士,江南大学副教授,主要从事机械结构强度、疲劳与断裂力学研究。E-mail:ypsnuaa@163.com

沿钢板轧制方向,试件总长为 214 mm,直径 10 mm 段的长度约为 100 mm,夹持端直径为 15 mm,长为 50 mm,过渡段圆弧半径为 10 mm。试件具体尺寸如图 1 所示。

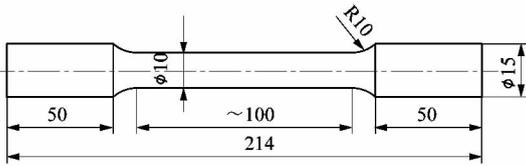


图 1 试件尺寸示意图

Figure 1 Dimension of specimens

室温条件下,试验在 20 t 微机控制电子方式万能试验机上进行,加载速度为 5 mm/min,感应器采样速率为 10 次/min,试验直至试件断裂失效为止。试验机的夹具是手动装置,实验过程中产生微小的误差可以忽略不计,试验机和夹具装置具体如图 2 所示。



图 2 加载装置

Figure 2 Test setup

## 1.2 试验结果

对试件进行单轴拉伸加载,LYP100 试件断裂时无明显响声,而 Q235 试件发出很大响声。单轴拉伸试验得到的力-位移曲线如图 3 所示。

由图 3 数据可知,LYP100 的变形能力约为 Q235 材料的 2 倍,说明 LYP100 材料具有更好的延展性能。

试验前后的试件实物如图 4 所示。为了更清楚地观察失效断裂的部位,课题组通过扫描电镜对 LYP100 试件的断口进行了表征,如图 5 所示。

单轴拉伸下材料失效的 4 个阶段分别为:弹性变形、塑性变形、颈缩及断裂。LYP100 钢材圆棒试件的

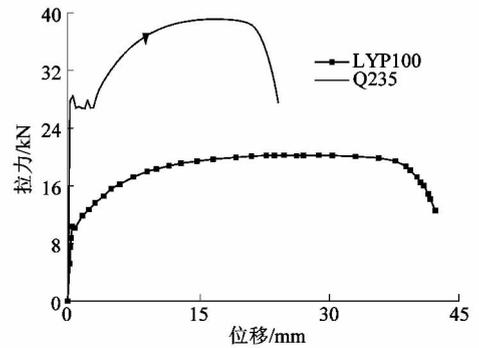


图 3 试验力-位移曲线

Figure 3 Force-displacement curve of test



图 4 试件试验前后图

Figure 4 Images of specimens before and after tests

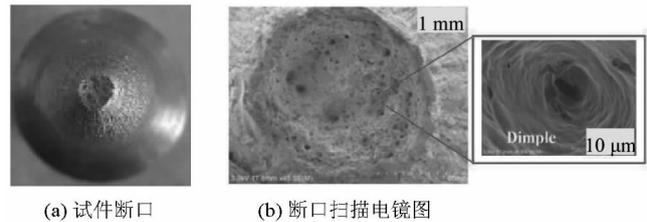


图 5 LYP100 试件断口图

Figure 5 Fracture section of LYP100 specimens

断口横截面积直径约为 3 mm,试件的断面收缩率较大;此外,由断口扫描电镜图可见,断口上分布着大量形状相同的韧窝,韧窝大且深。以上 2 种现象表明试件的断裂模式为韧性断裂,说明 LYP100 钢材具有很好的延展性<sup>[6]</sup>。

## 2 真实应力-应变

### 2.1 工程应力-应变

试件的原始标距和平行长度段的横截面积分别为  $l_0$  和  $A_0$ ,对应试件断裂后的长度和横截面积分别为  $l$  和  $A$ ,则工程应力有

$$s = \frac{P}{A_0} \quad (1)$$

工程应变

$$e = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2)$$

式中  $P$  为轴向加载力。

工程应力-应变只适用于弹性变形或小变形情况,对于大变形的情况没有意义。单轴拉伸状态下,假设应力在横截面积上分布均匀,体积固定不变<sup>[7]3</sup>,即  $A_0 l_0 = Al$ ,真实应力  $\sigma$  与真实应变  $\varepsilon$  的关系为:

$$\sigma = s(1 + e); \quad (3)$$

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (4)$$

工程应力-应变和真实应力-应变曲线如图6所示。

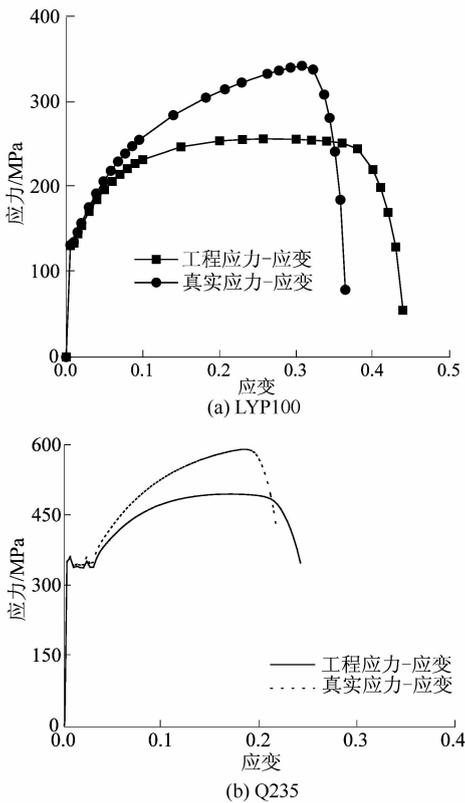


图6 工程和真实应力-应变的关系

Figure 6 Curves of engineering and true stress-strain

## 2.2 颈缩后的应力-应变关系

颈缩是典型的局部化现象,由于其特殊性和重要性,一直受到研究者的重视。当材料发生颈缩时,通过公式(3)和(4)难以获得真实应力-应变之间的关系。为获得材料颈缩后准确的真实应力-应变的函数关系, Bridgman<sup>[8]</sup>第1个提出了适用圆棒试件拉伸的理论模型。由于这种方法比较复杂难以应用于实际情况中,且不适用于矩形截面的试件,所以文中采用了幂强化法和加权平均法。

幂强化曲线经常被用来代表颈缩后的真实应力-应变曲线<sup>[9]</sup>,且有

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (5)$$

式中:  $K, n$  为常数。

假定颈缩在试验力最大的时候发生,定义颈缩起始时的真实应力为  $\sigma_{neck}$ , 对应的真实应变  $\varepsilon_{neck}$ 。真实应力和应变可以通过公式(3)和(4),用抗拉强度  $s_u$  和相应的工程应变  $e_u$  求得。常数  $K$  和  $n$  有

$$K = \sigma_{neck} / \varepsilon_{neck}^n; \quad (6)$$

$$n = \varepsilon_{neck} \quad (7)$$

将公式(6)和公式7代入公式(5)可得

$$\sigma = (\sigma_{neck} / \varepsilon_{neck}^{\varepsilon_{neck}}) \varepsilon^{\varepsilon_{neck}} \quad (8)$$

根据 LYP100 单轴试验结果得  $\sigma_{neck} = 323.5$  MPa,  $n = \varepsilon_{neck} = 0.229, K = 453.4$ , 则公式(5)可表示为

$$\sigma = 453.4 \cdot \varepsilon^{0.229}$$

颈缩后,真实应力-应变曲线几乎是线性的,这意味着强化模量近似常数<sup>[10]42</sup>。为了准确地描述真实应力-应变的关系, Jia<sup>[7]4</sup> 在 Ling<sup>[10]47</sup> 的基础上提出了修正后的加权平均法,其表达式为

$$\sigma = \sigma_{neck} + w \cdot \sigma_{neck} (\varepsilon - \varepsilon_{neck}) \quad (9)$$

式中:  $w$  为加权平均因子;  $\varepsilon$  为颈缩发生后的真实应变。

为了获得仿真和试验最佳的拟合结果,首先根据公式(3)和(4)计算真实应力应变和  $\sigma_{neck}, \varepsilon_{neck}$ ; 然后给定  $w$  初始值,调试到真实应力大于  $\sigma_{neck}$ 。因为 LYP100 的变形大于 Q235, 所以课题组给定 LYP100 的初始值为 0.7, Q235 的初始值为 0.5。

根据上述4种方法,得到的2种材料真实应力-应变曲线如图7所示。

图7中力最大值点为试件开始颈缩的起点。由于 LYP100 变形较大,所以采用幂强化法和加权平均法2种方法,其加权平均因子取值分别为 0.7, 0.8, 0.9 和 1.0; Q235 材料相对 LYP100 材料变形较小,所以只采用加权平均法,其加权平均因子取值分别为 0.5, 0.7, 0.9 和 1.0。颈缩发生后,材料内部分离形成空洞,横截面积不断减小,因此应力随着应变的增加逐渐变大。

## 3 扩展有限元模拟

### 3.1 扩展有限元模型的建立

扩展有限元的基础是单位分解<sup>[11]</sup>,其单元内部的不间断是用扩充的带有不连续性质的形函数基来代表。利用扩展有限元法,裂纹完全独立于网格,可以从单元内部开裂,不再依赖单元边界,因此裂纹的扩展过程无需考虑扩展路径,实现裂纹自动扩展。

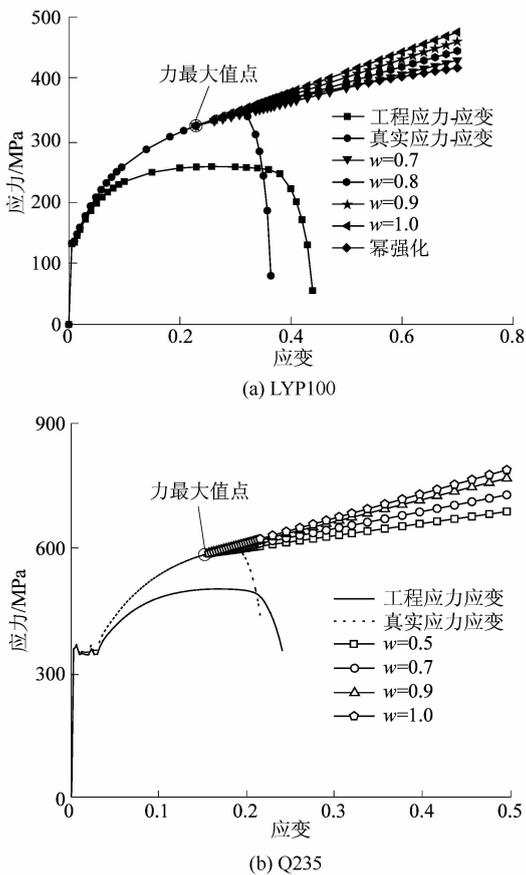


图7 2种材料应力-应变曲线

Figure 7 Stress-strain curves of LYP100 and Q235

XFEM 需要定义材料的弹性模量、损伤准则以及破坏准则。有限元软件提供了6种初始损伤准则,分别为:最大名义应力、最大名义应变、二次名义应力、二次名义应变、最大主应力和最大主应变准则。在试件无预制裂纹的前提下,只有最大主应力损伤初始准则能够实现裂纹的自然扩展。所以课题组采用最大主应力准则,即

$$f = \frac{\langle \sigma_{\max} \rangle}{\sigma_{\max}^0} \text{ 且 } 1.0 \leq f \leq 1.0 + f_{\text{tol}} \quad (9)$$

式中: $\sigma_{\max}$ 为最大主应力,若 $\sigma_{\max} > 0$ ,则 $\langle \sigma_{\max} \rangle = \sigma_{\max}$ ;若 $\sigma_{\max} < 0$ ,则 $\langle \sigma_{\max} \rangle = 0$ ;  $\sigma_{\max}^0$ 为最大许用应力(抗拉强度); $f_{\text{tol}}$ 用于时间增量步的调整以保证在某一增量步内满足收敛条件,其默认值是0.05。

数值计算时需要定义 LYP100 材料的弹性模量、泊松比、抗拉强度和断裂能等参数。由单轴拉伸试验可得到抗拉强度,而弹性模量等参数参照张超峰<sup>[12]</sup>的研究,具体参数的数值如表1所示。

扩展有限元模型尺寸与试件实际尺寸是1:1的比例,扩展有限元模型如图8所示。

表1 XFEM 模型参数

Table 1 Parameters of XFEM model

弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa
206	0.3	275



图8 扩展有限元模型

Figure 8 Extended finite element model

### 3.2 模拟结果与验证

在扩展有限元法计算裂纹扩展过程中,由于单元尺寸对数值研究结果精度和计算效率的影响较大,所以,课题组研究了单元精度对无预制裂纹试件自然断裂结果的影响。单元宽度取值分别为2和4 mm,网格划分如图9所示;扩展有限元模拟单元宽度对计算精度的影响结果如图10所示。

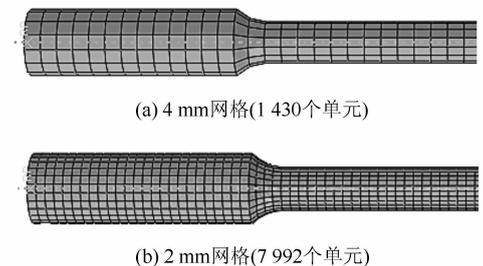


图9 不同单元宽度网格划分

Figure 9 Mesh of different element size

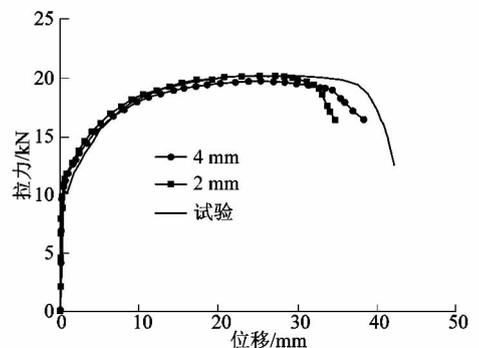


图10 不同单元尺寸计算结果的比较

Figure 10 Comparison of calculation results of different element sizes

从结果可以得到,线弹性阶段单元宽度取值对计算结果的影响可以忽略不计。塑性变形阶段,单元宽度为4 mm时的计算结果优于2 mm,且单元宽度为2 mm时,计算用时明显增加,甚至达到前者的3倍。扩展有限元法不同于传统有限元法的单元尺寸越小精确

越高,反而单元尺寸越小越不容易收敛。因此,课题组选取单元宽度为 4 mm,后续计算也采用这一单元尺寸。

将弹性模量及泊松比等参数及图 7 获得的真实应力-应变数据结果写入扩展有限元模型中,扩展有限元模拟 LYP100 试件断裂过程的 Mises 应力云图如图 11 所示。

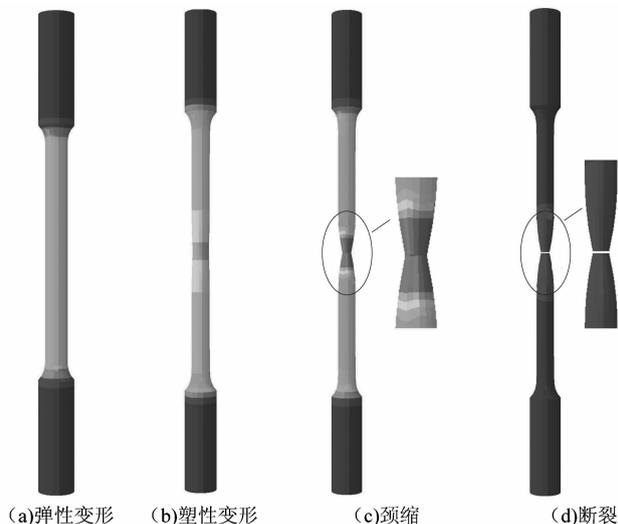


图 11 LYP100 试件断裂过程 Mises 应力云图

Figure 11 Mises stress nephogram of fracture

图 11 中,扩展有限元法模拟试件失效的 4 个阶段分别为弹性变形、塑性变形、颈缩及断裂阶段。由图 11(c)和(d)可以看出,当试件发生颈缩时,颈缩部位产生应力集中,并在颈缩部位断裂;断裂后应力减小,但断口处有残余应力。

2 种材料圆棒试验拉伸断裂过程的模拟结果如图 12 所示。

由图 12(a)可知真实应力-应变的模拟结果在载荷达到最大值时就开始直线下下降,此方法只能模拟试件颈缩发生前的状态;对于 LYP100 材料加权平均因子  $w$  取值为 0.7,0.8 和幂强化法的模拟结果在载荷达到峰值时,开始逐渐下降,这与试验结果也有一定的区别;当  $w$  取值为 1.0 时,数值模拟计算结果的线弹性阶段、拉力最大值点和断裂过程都与试验结果基本一致。由图 12(b)可知,对于 Q235 材料,当  $w$  取值为 0.9 时,数值模拟计算结果的线弹性阶段、拉力最大值点和断裂过程都与试验结果基本一致。

### 4 结论

1) 对单轴拉伸下试件断裂的数值研究表明:计算得到的力-位移曲线与试验数据基本一致,说明扩展有

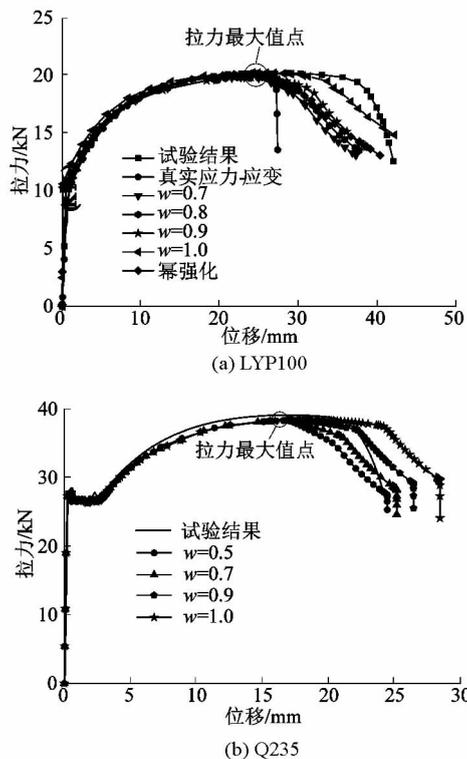


图 12 试验结果与扩展有限元结果比较

Figure 12 Comparison between test results and XFEM results

限元方法是模拟低屈服点钢等韧性金属材料的颈缩断裂过程的有效方法。

2) 对于应变较大的低屈服点钢材料,当  $w$  取值为 1.0 时,加权平均法得到的结果同幂强化法相比,加权平均法数值模拟的结果与试验结果的较吻合;对于 Q235 钢材当  $w$  取值为 0.9 时,加权平均法数值模拟的结果与试验结果的较吻合。

### 参考文献:

- [1] 管述哲,包耳,纪淑媛,等.锻造半钢及其应用[J].材料科学与工艺,1986(1):56.
- [2] OTANI K. Recent trend of technology for steel plates used in building construction[J]. Nippon steel technicareport,1992(2):27.
- [3] 王筱姣,石永久,王元清,等.低屈服点钢材 LYP100 循环加载试验[J].浙江大学学报(工学版),2015,49(8):1401.
- [4] SAEKI E, SUGISAWA M, YAMAGUCHI T, et al. Mechanical properties of low yield point steels[J]. Journal of materials in civil engineering,1998,10(3):143.
- [5] AREIAS P M A, BELYTSCHKO T. Analysis of three-dimensional crack initiation and propagation using the extended finite element method [J]. International journal for numerical methods in engineering,2005,63(5):761.