

基于钢材真实应力应变关系的研究

王元清¹,关 阳²,刘 明²,石永久¹

(1. 清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室,北京 100084;

2. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究钢材真实应力应变的关系,验证微观断裂机理的适用性和有效性。

方法 利用 Q235B、Q345B 两种型号钢材,选取母材、焊缝及其热影响区位置的圆棒,进行室温单轴拉伸试验,并进行本构关系的拟合与断口形貌的分析。**结果** 利用全自动引伸计对试件进行全程跟踪,采集到的应力应变曲线可以较好地反映试件的力学性能,经有限元计算能更准确的模拟钢材的真实应力应变关系;两种钢材的破坏形式为韧性断裂且延伸率均较大,Q235B 钢材的断面收缩率大于 Q345B 钢材,Q235B 表现出更好的延性。**结论** 利用 Q235B、Q345B 母材、焊缝金属和热影响区的单拉加载结果,可应用于后期标定钢材断裂韧性参数的研究中。

关键词 Q235B 钢材;Q345B 钢材;真实应力应变;有限元;断裂韧性

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Research on the Relationship between Real Stress and Strain of Steel

WANG Yuanqing¹, GUAN Yang², LIU Ming², SHI Yongjiu¹

(1. China Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing, China, 100084; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to verify the applicability and effectiveness of microscopic fracture mechanism, the relationship between the real stress and strain of steel were studied in this paper. The Q235B and Q345B steels were used to select the base metal, the weld and the round bar in the heat-affected zone. The uniaxial tensile tests were carried out at room temperature. The analysis of the fracture morphology shows that the full curve of stress-strain curve can fully reflect the mechanical properties of the test piece by using full automatic extensometer to track the test piece. The finite element method can accurately simulate the stress-strain relationship. The failure modes of the two steels are ductile fracture with large elongation, the reduction of area of Q235B steel is larger than that of Q345B steel, and Q235B shows better ductility. In this paper, single load results of Q235B, Q345B base metal, weld metal and heat affected zone can be applied to the research of the fracture toughness parameters of post-calibration steel.

收稿日期:2018-03-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51678339)

作者简介:王元清(1963—),男,教授,博士研究生导师,主要从事钢结构方面研究。

Key words: Q235B steel; Q345B steel; real stress and strain; finite element; fracture toughness

随着钢材产量的提升和经济环境的改善,各类钢结构在我国得到了异常迅速的发展,常用 Q235B、Q345B 钢材已被广泛应用于各种民用建筑、工业厂房以及桥梁等领域. 钢结构构件在加工制造、施工和使用过程中不可避免地会产生宏观裂纹、类裂纹缺陷或者重大缺陷^[1-2]. 近年来,钢材的破坏模式有断裂、整体失稳以及疲劳破坏等多种模式,威胁着人们的人身安全和财产安全. 国内外曾经发生过一些钢结构破坏的实例,其中不乏由钢材断裂引起的事故,引起了工程界的高度关注^[3],如 1886 年,美国纽约的一次静承压力验收实验中,在水塔下边 25.4 mm 的厚板处,沿 6.1 m 长的竖向裂缝裂开,这是世界首次有记载的钢结构断裂破坏事故^[4];1935 年,比利时 Albert 运河上 Hasselt 桥、Herenthals - Oolen 桥和 Kaulille 桥等^[5-6]断裂;1973 年,我国沈阳至大连铁路线上辽阳附近的太子河桥桁架梁的一根斜拉杆在低温下发生断裂^[7-8];2011 年,我国新疆孔雀河大桥吊杆断裂导致桥面塌落^[9].

已有研究^[10-14]表明,金属材料的断裂过程大多与微孔成核、扩张和聚合有关,且对于大部分金属,微孔扩张和聚合通常是其断裂过程的控制阶段^[15],在工程实际中,应用材料拉力试验机采集工程应力应变曲线,由于拉力机默认横截面积为定值,由于试件发生颈缩后,荷载值变小,因此工程应力应变经过

抗拉强度之后会下降,而真实应力应变考虑试件颈缩效应,随着横截面积减小,真实应力会增大,与工程应力应变相反会呈现上升趋势. 为了更加准确的验证微观断裂机理的适用性和有效性,笔者选取普通钢 Q235B、Q345B 及其对接焊缝,基于材料断裂的微观机理与局部应力、应变,分别对其母材,焊缝金属及热影响区材料进行系列标准圆棒单向拉伸试验,拟合本构关系,以期为钢结构断裂性能研究提供参考.

1 室温拉伸试验

1.1 试验材料

研究 Q235B、Q345B 钢材及其焊缝微观断裂试验,主要分析标准圆棒的单向拉伸,通过建立普通钢材和焊缝材料在单调拉伸作用下的本构模型,观察棒材断后截面的微观形貌. 试验材料采用国产普通钢材 Q235B、Q345B,板厚为 24 mm,材料主要化学成分如表 1、表 2 所示. 采用全熔透对接焊缝工艺,对应的焊接工艺参数如表 3 所示. 笔者分别对母材、焊缝熔敷金属、热影响区材料进行取样,焊缝形状及取样如图 1 所示.

表 1 Q235B 钢材化学成分

Table 1 Chemical components of Q235B steel %					
w(C)	w(Mn)	w(Si)	w(P)	w(S)	w(Ni)
≤0.2	0.3~0.7	≤0.35	≤0.045	≤0.045	≤0.80

表 2 Q345B 钢材化学成分

Table 2 Chemical components of Q345B steel %							
w(C)	w(Mn)	w(Si)	w(P)	w(S)	w(V)	w(Nb)	w(Ti)
≤0.2	1.00~1.60	≤0.55	≤0.035	≤0.035	0.02~0.15	0.015~0.06	0.02~0.20

表 3 焊接工艺参数

Table 3 Welding parameters							
焊接方法	焊接位置	焊丝型号	焊丝直径/mm	气体	电流/A	电压/V	预热温度/℃
气体保护焊	平焊	E4303/ER50-6	φ1.2	CO ₂	260	30	60

焊接速度/
(cm·min⁻¹)

20~35

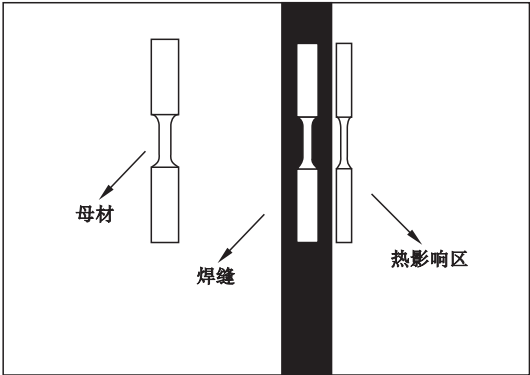


图1 对接焊缝示意及取样

Fig. 1 Butt weld schematic and sampling

1.2 标准圆棒试验及材料本构模型建立

1.2.1 标准圆棒试验

试验中对圆棒取样;母材取自于钢板的板材,焊缝金属取自于全焊缝,热影响区取自于焊缝边缘 10 mm 内(见图 1).从图 1 可知,钢板对接焊接件中取样并加工母材、焊缝区以及热影响区材料试件各 2 个,试件个数及编号如表 4 所示,试件尺寸如图 2、3 所示.

表 4 试件主要几何参数

Table 4 Dimension of specimens				
钢材种类	钢材型号	编号	标距段长度/mm	数量/个
母材	Q235B	BML	12.5	2
	Q345B	BMH	12.5	2
焊缝	Q235B	WML	12.5	2
	Q345B	WMH	12.5	2
热影响区	Q235B	HML	12.5	2
	Q345B	HMH	12.5	2

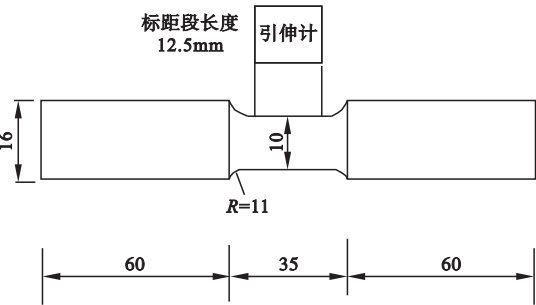


图2 母材、焊缝标准圆棒试件几何尺寸

Fig. 2 Dimensions of round bar tensile specimen for base and weld metal

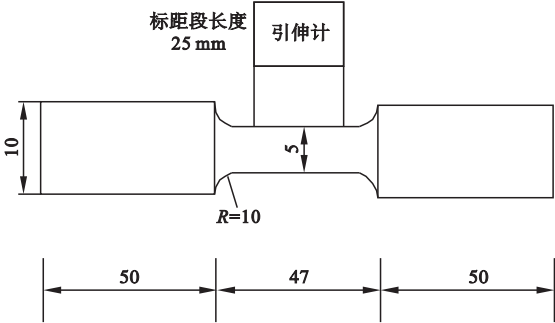
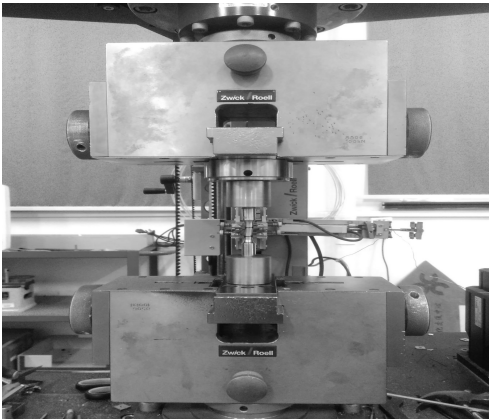


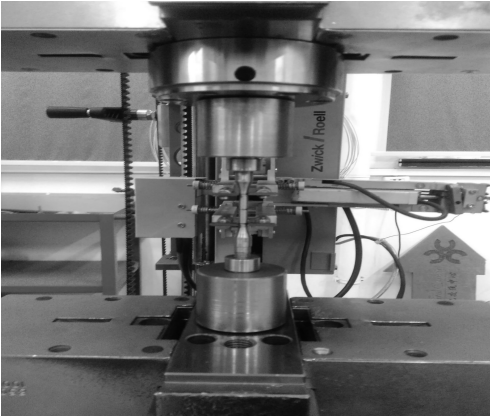
图3 热影响区标准圆棒试件几何尺寸

Fig. 3 Dimensions of round bar tensile specimen for heat-affected zone

试验在上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室进行,加载装置为万能材料试验机,采用位移控制加载,加载速率为屈服前加载速率为 0.5 mm/min,屈服后变形较大,加载速率取 1 mm/min. 所用引伸计标距为 12.5 mm,试验加载装置及量测见图 4.



(a)加载装置



(b)引伸计量测

图4 标准圆棒试验加载及量测

Fig. 4 Tensile test equipment and measurement

1.2.2 平滑圆棒试件试验结果与分析

平滑圆棒试件单轴拉伸试验所获取的工程应力-应变曲线如图5所示,各圆棒试件获得的钢材材性见表6所示.其中, f_y 为屈服

强度; f_u 为抗拉强度; E 为弹性模量; d_f 为试件断口直径; P_f 为断裂荷载; σ_f, ε_f 分别为断裂时的应力及其对应应变.选用了工具显微镜来测量断口直径(见图6).

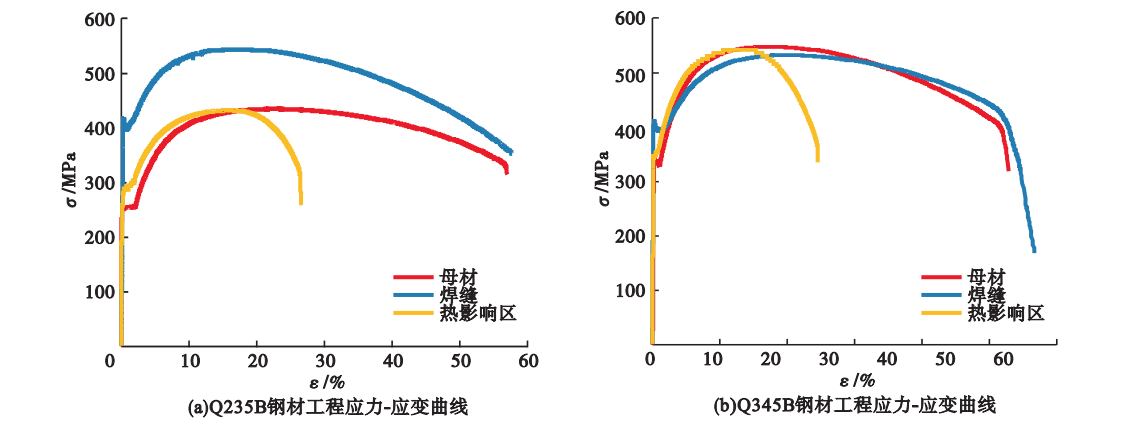


图5 钢材工程应力-应变本构关系

Fig.5 Stress-strain relation of steel

表6 Q235B和Q345B钢材、焊缝及其热影响区单调拉伸下的本构关系参数

Table 6 Constitutive relationship parameters of Q235B、Q345B steel,weld and its heat affected zone under monotonic stretching									
钢材型号	材料	试件	σ_y /MPa	σ_u /MPa	E /MPa	d_f /mm	P_f /N	σ_f /MPa	ε_f
Q235B	母材	BML-1	258.03	437.96	219 164	6.339	25 103	795.42	0.903
		BML-2	253.78	427.16	217 251	5.966	26 199	937.19	1.031
		平均值	255.91	432.56	218 208	6.153	25 651	866.31	0.967
	焊缝金属	WML-1	396.64	544.59	208 176	5.410	27 700	1 205.02	1.227
		WML-2	398.40	547.35	203 673	5.407	28 400	1 237.08	1.230
		平均值	397.52	545.97	205 924	5.559	28 050	1 159.35	1.170
	热影响区	HML-1	287.58	433.40	115 861	3.047	6 360	872.50	1.000
		HML-2	301.10	448.57	114 105	3.044	6 480	890.66	0.967
		平均值	295.09	437.95	114 983	3.058	6 321	860.80	0.976
Q345B	母材	BMH-1	346.64	558.30	184 330	6.023	31 005	1 088.18	0.994
		BMH-2	342.57	560.22	196 011	5.991	31 300	1 110.38	1.002
		平均值	344.61	559.26	190 171	6.007	31 153	1 099.28	0.998
	焊缝金属母材	WMH-2	390.10	526.10	212 135	6.209	31 900	1 053.50	0.955
		WMH-3	394.60	535.54	205 078	6.340	32 598	1 032.74	0.905
		平均值	392.35	530.82	208 607	6.275	32 249	1 043.12	0.930
	焊缝金属	HMH-1	353.06	541.30	112 120	2.729	7 179	1 227.60	1.218
		HMH-2	358.42	559.24	118 395	2.928	7 694	1 142.67	1.070
		平均值	355.74	550.27	115 258	2.829	7 437	1 185.14	1.144

由试验测得数据得到名义应力 σ_{eng} 和名义应变 ε_{eng} , 其计算式为

$$\varepsilon_{eng} = \Delta l / l_0.$$

(1)

$$\sigma_{eng} = P / A_0.$$

(2)

式中: Δl 为引伸计测得标距段伸长量; l_0 为标距段长度; A_0 为试件初始截面面积.

在有限元分析中, 当输入材料本构关系应延伸到材料断裂时, 试件断裂时的应力 - 应变很难准确测定. 如果假定材料体积不变, 断裂时的应力、应变的计算过程可由式 (3)、(4) 得出.

$$\sigma_f = P_f / (\pi d_f^2 / 4).$$

(3)

$$\varepsilon_f = \ln [(d_0 / d_f)^2].$$

(4)

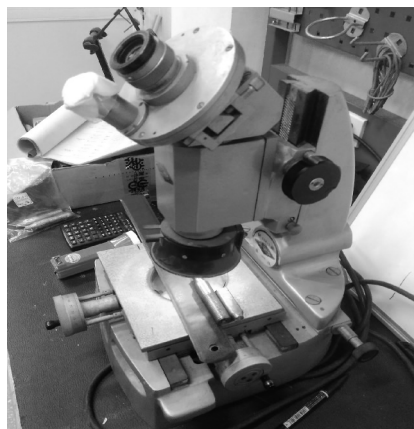
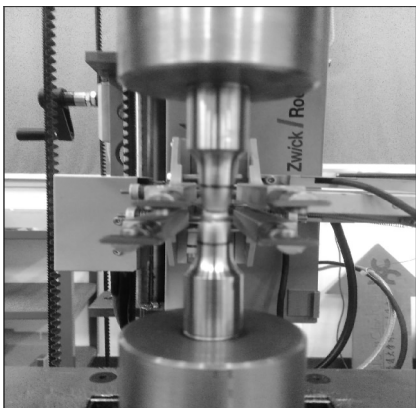


图6 工具显微镜

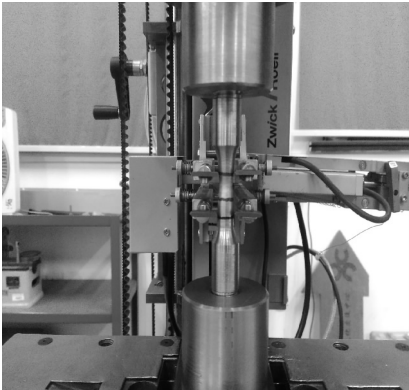
Fig. 6 Microscope

1.2.3 破坏模式

试件破坏形态如图 7 所示.



(a)试件发生破坏



(b)试件发生颈缩

图7 破坏模式

Fig. 7 Failure mode

从图 7 中可以看出, 所有试件的典型破坏模式主要是韧性破坏 (见图 7(a)), 有较大的延伸率, 其中 Q235B、Q345B 焊缝试件, 由于强度较大, 韧性较好, 圆棒在最后破坏前会发生颈缩现象 (见图 7(b)), 在断裂的时候有明显声音, 并且断裂应变接近 60%, 截面收缩程度也较高, 说明结构钢材具有较好的延性.

在传统单调拉伸试验中, 试件在最后断裂时刻往往会发生脆性断裂, 从而易对引伸计造成震动破坏, 为保护引伸计, 通常在拉伸过程中, 当达到试件抗拉强度时会提前将引伸计摘下, 无法全程跟踪直到断裂时刻, 通过引伸计和横梁数据对比发现 (见图 8), 横梁数据可造成较大误差, 断裂位移可相差 175%. 为监测到断裂时刻, 采用了上海交通大学的电子万能引伸计.

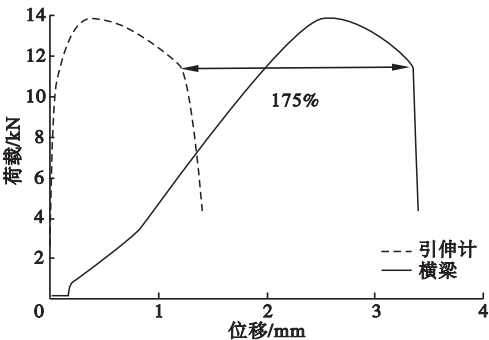


图8 引伸计与横梁测量对比

Fig. 8 Comparison of extensometer and beam measurements

有限元分析的基础是材料的应力-应变关系,在对细观力学模型中韧性参数的进行标定时,需要的应力-应变全曲线是准确的.在试件加载的过程中,当随着荷载的增大,而试件截面积却减小,工程应力应变已不能准确地反映材料的实际应力应变情况(见图 5),因此假定体积不变情况^[15],采用式(5)、(6)计算材料实际应力应变:

$$\varepsilon_{\text{true}} = \ln(1 + \varepsilon_{\text{eng}}).$$
 (5)

$$\sigma_{\text{true}} = \sigma_{\text{eng}}(1 + \varepsilon_{\text{eng}}).$$
 (6)

对式(5)、(6)进行转化,真实应力与塑性应变之间关系可按式(7)进行拟合^[15],图 9 反映了经过拟合得到的真实应力-塑性应变关系曲线.

$$\sigma = K_n(\varepsilon_p)^n.$$
 (7)

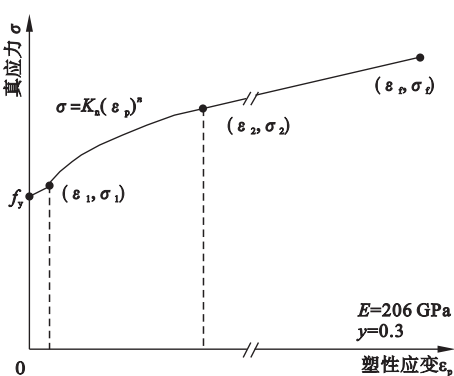
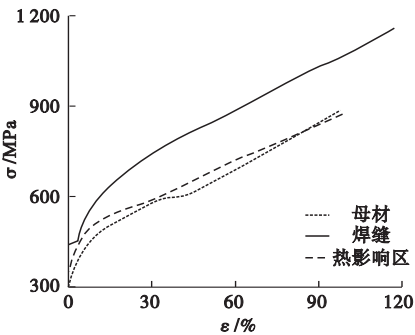


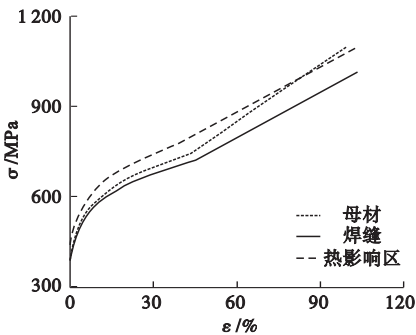
图 9 真实应力-塑性应变关系曲线

Fig. 9 Real stress-shaping strain curve

基于标准圆棒拉伸试验数据,拟合确定了有限元分析中 Q235B 和 Q345B 钢材母材、焊缝和热影响区材料的真实应力-塑形应变关系曲线如图 10 所示,关键数据点,如表 7 所示.



(a)Q235B 钢材真实应力-塑性应变关系曲线



(b)Q345B 钢材真实应力-塑性应变关系曲线

图 10 真实应力应变本构关系

Fig. 10 Real stress-strain constitutive relation

表 7 Q235B、Q345B 钢材、焊缝及其热影响区单调拉伸下的本构关系参数

Table 7 Constitutive relationship parameters of Q235B、Q345B steel,weld and its heat affected zone under monotonic stretching

钢材型号	材料	σ_y /MPa	ε_1	σ_1 /MPa	ε_2	σ_2 /MPa	ε_f	σ_f /MPa	K_n	n
Q235B	母材	258.03	0.1	436.15	0.3	540.81	0.903	795.42	692.09	0.200
		253.78	0.1	436.15	0.3	540.81	1.031	937.19	692.60	0.200
		255.91	0.1	436.15	0.3	540.81	0.967	866.31	692.35	0.200
	焊缝	396.64	0.1	543.45	0.3	720.69	1.227	1 205.02	983.81	0.260
		398.40	0.1	543.45	0.3	720.69	1.230	1 237.08	983.81	0.260
		397.52	0.1	572.18	0.3	695.23	1.229	1 221.05	983.81	0.260
	热影响区	287.58	0.1	460.11	0.3	554.35	1.000	872.5	669.5	0.160
		301.10	0.1	464.46	0.3	553.55	0.967	890.66	672.81	0.160
		295.09	0.1	462.29	0.3	553.95	0.984	881.58	671.16	0.160

续表										
钢材型号	材料	σ_y /MPa	ε_1	σ_1 /MPa	ε_2	σ_2 /MPa	ε_f	σ_f /MPa	Kn	n
Q345B	母材	346.64	0.1	563.47	0.3	682.41	0.994	1 088.18	844.44	0.180
		342.57	0.1	570.73	0.3	670.30	1.002	1 110.38	800.37	0.150
	平均值	344.61	0.1	567.1	0.3	676.36	0.998	1 099.28	822.41	0.165
	焊缝	390.10	0.1	546.26	0.3	637.52	0.955	1 053.50	755.57	0.140
		394.60	0.1	551.86	0.3	649.30	0.905	1 032.74	776.19	0.150
	平均值	392.35	0.1	549.06	0.3	643.41	0.930	1 043.12	765.88	0.145
	热影响区	353.06	0.1	558.26	0.3	648.95	1.218	1 227.60	764.70	0.137
		358.42	0.1	606.58	0.3	719.35	0.758	913.34	875.12	0.163
		355.74	0.1	582.42	0.3	684.15	0.988	1 070.47	819.91	0.150
	平均值	355.74	0.1	582.42	0.3	684.15	0.988	1 070.47	819.91	0.150

2 有限元分析

充分利用对称性,建立了平滑缺口圆棒试样标距段的二维轴对称有限元模型,单元类型选用 CAX4. 如图 11 所示,缺口区域的单元尺寸约为 0.2 mm,相当于材料特征长度 l_0 的平均值^[16]. 根据试验加载情况,对每个试样均进行了有限元模拟试验. 结果表明,有限元计算得出的荷载-位移曲线与试验实际测试结果吻合性良好,其中部分试样的对比结果如图 12 所示.

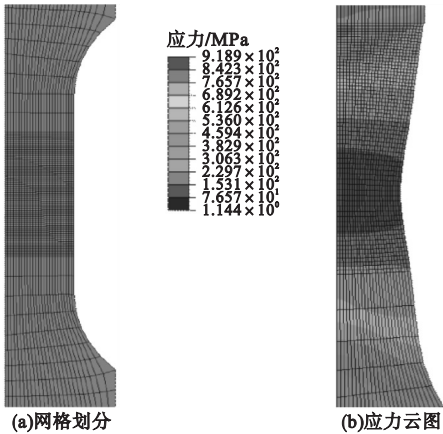
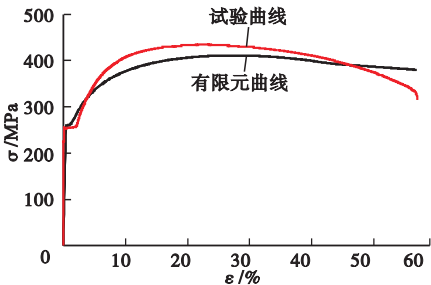
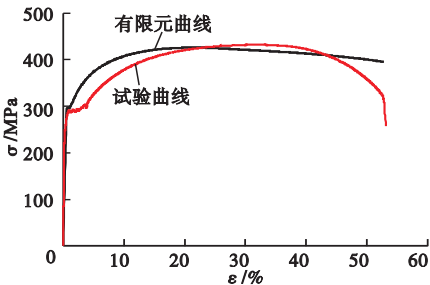


图 11 有限元模型

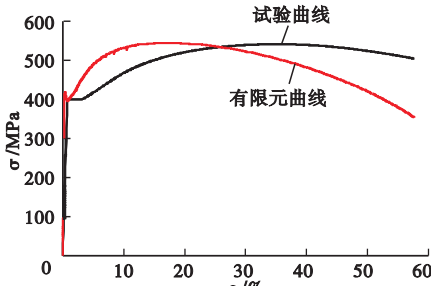
Fig. 11 Finite element model



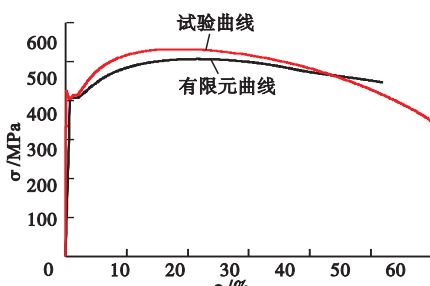
(a)BML-1有限元试验对比



(b)BMH-1有限元试验对比



(c)WML-1有限元试验对比



(d)WMH-1有限元试验对比

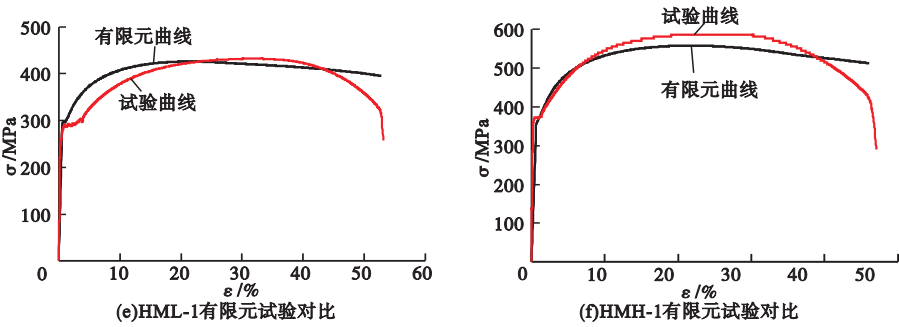


图 12 Q235B 和 Q345B 钢材试验有限元对比

Fig. 12 Experimental finite element comparison between Q235B and Q345B steel

3 断口分析

电镜扫描试验在清华大学材料学院电镜扫描实验室进行,试验机型号 Quanta FEG 450,对 Q235B、Q345B 钢材母材、焊缝以及热影响区棒材的断口进行断口分析。

3.1 宏观分析

光滑圆棒试样拉伸断口通常可以分为放射区、纤维区及剪切唇三个区域,如图 13(a)所示。纤维区一般位于断口中央,形成裂纹核心区,断口上有显微孔洞形成的锯齿状形貌,其底部的晶粒像纤维一样被拉长,故称纤维

区,如图 13(b)所示。毗邻纤维区的是放射区,两者的交界线标志着裂纹由形成、长大向不稳定扩展转化。断裂过程的最后阶段形成剪切唇,剪切唇表面较光滑,表明裂纹快速不稳定扩展,剪切唇与放射区相毗邻,表面光滑,与拉应力方向成 45°角,形成剪切力,形状如杯,是典型的剪切断裂^[12]。整个断口凹凸不平,并且沿 z 向断面收缩率逐渐降低。断口形状越接近层状如图 13(c)所示,通过断口分析可知,整个圆棒拉伸试验是一个首先由中间纤维区破坏,通过放射区裂纹不断扩张,最后破坏的过程。

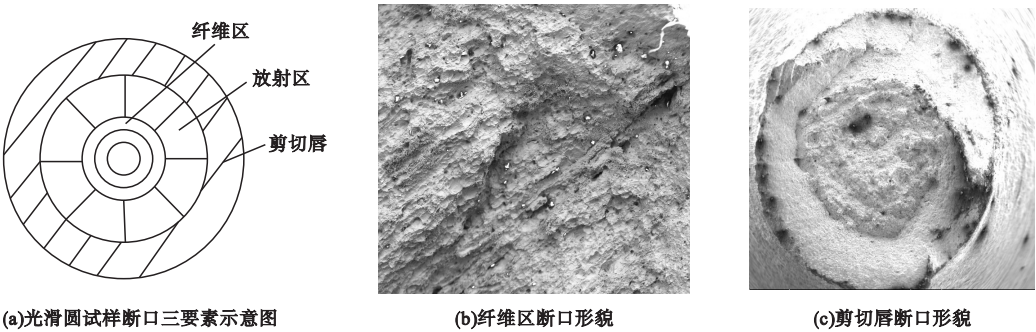


图 13 宏观断口示意图

Fig. 13 Macrofracture diagram

3.2 微孔聚集性断裂

结构工程中普遍采用中、低强度等级的钢材,在拉伸荷载下常发生韧性断裂且伴有显著的塑性变形。这类断裂形式在微观过程上可大致分为微孔成核、扩张和聚合等几个阶段,如图 14 所示,称之为微孔聚合型断裂

机理。显微观察断口上分布着许多不同形状、大小和深浅的微坑称为韧窝,如图 15 所示。微坑中有二相粒子。韧窝的大小和深浅与材料断裂时孔隙核心的数量及塑性有关,由于 Q235B、Q345B 有较好的塑性,韧窝尺寸较大、较深,具有较少的韧窝形核位置^[17-18]。

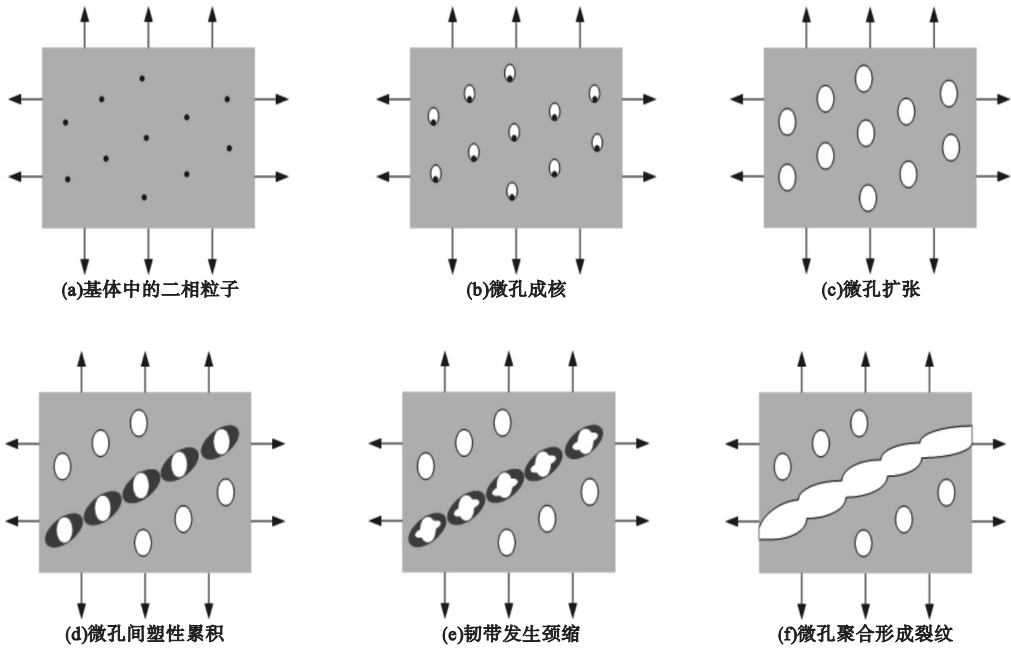


图 14 钢材的微孔聚合型微观断裂机理

Fig. 14 Microporous polymerization of steel micro-fracture mechanism

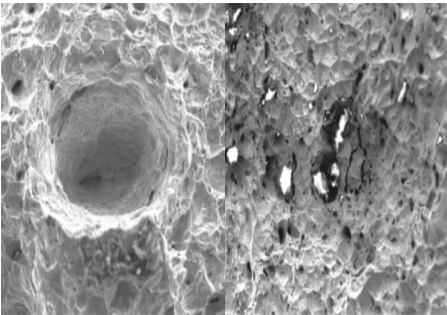


图 15 钢材室温拉伸试样断口扫描电镜照片

Fig. 15 Scanning electron micrograph of steel tensile specimen at room temperature

4 结 论

(1)Q235B 钢材比 Q345B 钢材表现出较好的塑形,工程应变分别可以达到 54.2%、53.32%,且断面收缩率较高于 Q345B。

(2)利用引伸计全程跟踪可以更好地获取钢材力学性能,获取钢材本构关系,避免因横梁加载导致较大误差,经有限元计算结果与试验较吻合。

(3)从断口形貌观察,Q235B、Q345B 断裂形式均属于微孔聚集型断裂,有较多的韧窝,且韧窝尺寸较大、较深,韧窝形核位置较

少断口边缘发生剪切破坏,通过力学分析,可判断静载作用下试件由中间先破坏,不断扩展到表面致整体破坏。

(4)通过对 Q235B、Q345B 母材及其焊缝、热影响区力学性能和本构关系的建立,以及微观断口形貌的分析,以期应用于后期标定钢材断裂韧性参数的研究中。

参考文献

[1] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
(CHEN Chuanyao. Fatigue and fracture[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2001.)

[2] 王元清, 林云, 周晖, 等. 高强度钢材及其焊缝脆性断裂与疲劳性能的研究进展[J]. 建筑钢结构进展, 2012, 14(5): 21 - 28.
(WANG Yuanqing, LIN Yun, ZHOU Hui, et al. Progress in the brittle fracture and fatigue of high strength steels and their welds[J]. Progress in steel building structures, 2012, 14(5): 21 - 28.)

[3] 关阳, 王元清. 钢结构脆性断裂的安全性评定技术及其研究现状[C] // 全国现代结构工程学术研讨会学术委员会论文集. 天津: 全国现代结构工程学术研讨会学术委员会, 2017: 545 - 554.
(GUAN Yang, WANG Yuanqing. Safety as-

- essment technology and research status of brittle fracture of steel structure[C]//Proceedings of the academic committee of the national symposium on modern structural engineering. Tianjin: Academic Committee of the National Symposium on Modern Structural Engineering, 2017: 545 – 554.)
- [4] 李志强, 孟志山, 房东升. 钢结构构件脆性断裂的分析及控制措施[J]. 河北建筑工程学院学报, 2004, 22(1): 28 – 32.
(LI Zhiqiang, MENG Zhishan, FANG Dongsheng. Analysis and control measures of brittle fracture of steel structural members[J]. Journal of Hebei institute of civil engineering and architecture, 2004, 22(1): 28 – 32.)
- [5] ÅKESSON B. Understanding bridge collapses [M]. London, UK: Taylor & Francis Group, 2008.
- [6] MIECZYŚLAW S, GRZEGORZ L. Algorithms for the estimation of fatigue crack growth using energy method[J]. Archives of civil & mechanical engineering, 2009, 9(1): 119 – 134.
- [7] 胡宗文, 王元清, 石永久, 等. 应力集中对钢结构厚板脆性破坏的影响分析[J]. 低温建筑技术, 2010, 32(1): 1 – 4.
(HU Zongwen, WANG Yuanqing, SHI Yongjiu, et al. Effect of stress concentration on brittle damage of thick steel plate[J]. Low temperature architecture technology, 2010, 32(1): 1 – 4.)
- [8] 叶梅新, 黄琼. 钢结构事故研究[J]. 长沙铁道学院学报, 2002, 20(4): 6 – 10.
(YE Meixin, HUANG Qiong. Steel structure accident research[J]. Journal of Changsha railway university, 2002, 20(4): 6 – 10.)
- [9] ANDRADE F X C, FEUCHT M, HAUFÉ A, et al. An incremental stress state dependent damage model for ductile failure prediction[J]. International journal of fracture, 2016, 200(1/2): 127 – 150.
- [10] LOU Y, HUH H, LIM S, et al. New ductile fracture criterion for prediction of fracture forming limit diagrams of sheet metals[J]. International journal of solids & structures, 2012, 49(25): 3605 – 3615.
- [11] YE C, CHEN J, XIA C, et al. Study of curvature and pre-damage effects on the edge stretchability of advanced high strength steel based on a new simulation model[J]. International journal of material forming, 2016, 9(3): 269 – 276.
- [12] HANCOCK J W, MACKENZIE A C. On the mechanics of ductile failure in high-strength steel subjected to multi-axial stress-states[J]. Journal of mechanics and physics of solids, 1976, 24(3): 147 – 160.
- [13] KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. Void growth model and stress modified critical strain model to predict ductile fracture in structural steels[J]. Journal of structural engineering, 2006, 132(12): 1907 – 1918.
- [14] CHI W M, KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. Prediction of ductile fracture in steel connections using SMCS criterion[J]. Journal of structural engineering, 2006, 132(2): 171 – 181.
- [15] 刘希月. 基于微观机理的高强度钢材及其焊缝断裂预测模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
(LIU Xiyue. High-strength steel based on microscopic mechanism and its fracture prediction model [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.)
- [16] 王伟, 廖芳芳, 陈以一. 基于微观机制的钢结构节点延性断裂预测与裂后路径分析[J]. 工程力学, 2014, 31(3): 101 – 108.
(WANG Wei, LIAO Fangfang, CHEN Yiyi. Ductile fracture prediction and post-fracture path tracing of steel connections based on micromechanics-based fracture criteria[J]. Engineering mechanics, 2014, 31(3): 101 – 108.)
- [17] 李红英. 金属拉伸试样的断口分析[J]. 山西大同大学学报, 2011, 27(1): 76 – 79.
(LI Hongying. Fracture analysis of metal tensile specimens[J]. Journal of Shanxi Datong university, 2011, 27(1): 76 – 79.)
- [18] ANDERSON T L. Fracture mechanics: fundamentals and applications [M]. 3rd ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2005.