

预应变下焊接接头冲击韧度及韧—脆转变的分析

卢庆华， 张玉凤， 霍立兴， 张 莉
(天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072)

摘 要: 以常用建筑结构钢(16Mn 和 Q235B)为研究对象, 通过不同温度下的夏比冲击试验研究预应变对其母材和焊缝冲击性能的影响。结果表明, 材料在预应变下无论是母材还是焊缝夏比冲击韧度均有所降低, 韧—脆转变温度有所提高。5% 预应变后的 16Mn 母材和焊缝其韧—脆转变温度均低于室温(20 ℃), 因此仍可在室温下安全使用; Q235B 钢室温下冲击韧度较 16Mn 钢低, 且预应变对母材影响更大, 和未经预应变冲击值相比, 降低了三倍有余。可以看出, Q235B 钢的抗震性能较 16Mn 差。研究发现: 为建立客观的材料韧度指标和进行更有效的安全分析时, 预应变也应该作为一个考虑因素。

关键词: 预应变; 冲击韧度; 韧—脆转变温度; 焊接接头

中图分类号: TG407 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2003)06-43-04



卢庆华

0 序 言

近 20 年来, 全球发生了多次破坏性极大的地震, 如 1994 年美国 Northridge 地震^[1~3] 以及 1995 年日本阪神大地震^[4~6] 等。在这几次大地震中, 许多抗弯钢结构的梁柱焊接节点并未像设计时所预期的那样发挥良好的延性性能, 而是出现了脆性破坏, 可以看出有一个潜在的安全系数没有考虑。地震时, 地质运动可对建筑结构产生水平或垂直方向的

剧烈冲击。实际上许多破坏的发生是在材料发生塑性变形后产生的, 即在破坏前, 结构已经经过了一定预应变。中国是个多地震的国家, 目前钢结构的应用正日益广泛, 研究预应变对结构的影响, 提高焊接钢结构的抗震性能显得异常重要。文中对 16Mn 和 Q235B 钢母材和焊缝在未经预应变和 5% 预应变下不同温度的夏比 V 型缺口冲击试样进行对比研究, 分析了在不同温度下预应变对冲击韧度及韧—脆转变的影响。

表 1 试验材料的化学成分(质量分数, %)和力学性能
Table 1 Chemical composition and mechanical properties of tested materials

Material	Chemical composition					Mechanical properties		
	C	Mn	Si	S	P	σ_s /MPa	σ_b /MPa	α (%)
16Mn	0.15	1.54	0.42	0.04	0.45	390.5	591.0	24.4
Q235B	0.15	0.46	0.19	0.03	0.02	267.4	435.5	26.0

1 试验材料及方法

试验用材取自建筑结构中常用材料 16Mn 和 Q235B, 厚度分别为 16 mm 和 20 mm, 其化学成分和力学性能见表 1。对两种材料的钢板开双 V 型坡口进行焊接, 其工艺参数见表 2。

对焊好的试板在 1 000 kN 液压万能试验机上进行 5% 的拉伸预应变处理, 沿焊缝纵向方向静态加载, 温度为 20 ℃。在预应变后的焊接试板中分别

表 2 焊接工艺参数
Table 2 Welding parameters

Material	Weld layer	Arc voltage U/V	Welding current I/A	Type of electrode	Diameter of electrode ϕ /mm
16Mn	First pass	24~25	175	E5016	3.2
	Other passes	23~24	220		4.0
Q235B	First pass	25~26	160	E4303	3.2
	Other passes	24~25	220		4.0

加工母材、焊缝金属的夏比 V 型缺口冲击试样^[7, 8], 其分布位置如图 1 所示, 试样尺寸为 10 mm×10 mm

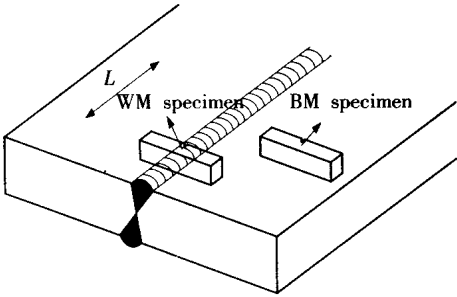


图 1 冲击试件取样位置及缺口方向

Fig. 1 Position and notch orientation of Charpy impact specimen

×55 mm, 横向取样, 缺口沿板厚度方向, 对于焊缝金属试样, 缺口部位位于焊缝中部。在未经预应变的焊好试板上用同样的方法取出两种材料的母材和

焊缝试样。机加工方法加工, 符合 GB/T299—1994 “金属夏比缺口冲击试验方法”^[9] 的规定。分别进行-40℃、-20℃、-10℃、0℃、20℃的冲击试验。用酒精作为冷却介质, 用干冰作制冷剂, 温控误差为±2℃, 在规定温度溶液中保持足够长的时间以保证试样表面与内部温度一致。测温用热电偶温度计, 试样从液体介质中移至打击的时间小于2s, 试验机型号为JB-30A。

2 试验结果及分析

2.1 夏比试验结果及分析

两种材料的母材和焊缝在不同预应变下的冲击吸收功见表3。

表 3 不同预应变下的夏比试验结果 (A_{kv}/J)

Table 3 Results of Charpy tests under different prestrains

Temp. $T/^{\circ}\text{C}$	Impact absorbing energy of base metal and weld metal of 16Mn			
	Base metal		Weld metal	
	$\epsilon_p=0$	$\epsilon_p=5\%$	$\epsilon_p=0$	$\epsilon_p=5\%$
−40	12	5	20	12
−40	23	6	18	13
−40	12	6	24	26
−20	26	10	48	32
−20	30	14	43	18
−20	26	16	42	22
−10	45	30	111	38.5
−10	42	28	108	28
−10	42	33	67	49
0	63	31	127	81.5
0	61	26	127	100
0	64	26	126	76
20	80	67	154	118
20	76	57	166	114
20	76	70	146	117

Temp. $T/^{\circ}\text{C}$	Impact absorbing energy of base metal and weld metal of Q235B			
	Base metal		Weld metal	
	$\epsilon_p=0$	$\epsilon_p=5\%$	$\epsilon_p=0$	$\epsilon_p=5\%$
−40	6	5	13	11
−40	5	4	29	13
−40	5	4	27	14
−20	8	8	36	15
−20	10	8	36	14
−20	10	7	36	16
−10	17	9	36	15
−10	17	6	46	18
−10	13	9	51	15
0	27	13	53	29
0	35	16	68	20
0	28	10	50	25
20	66	16	70	62
20	54	24	80	66
20	59	21	78	51

从不同预应变下 16Mn、Q235B 钢母材和焊缝的冲击吸收功与温度关系(图 2)可见, 随着预应变的增加, 相应的曲线向高温侧移动; 随着温度的升高, 冲击吸收功升高, 冲击韧性提高。随着温度的降低, 材料的脆性增加, 在-40℃时, 全部断口为典型脆性破坏断口。可以看出, 在-40℃时经过预应变的两种材料的冲击韧性都较低, 其中 16Mn 和 Q235B 焊缝处冲击吸收功平均值为 17 J 和 12.7 J, 而母材则分别为 5.7 J 和 4.3 J。

对于 16Mn 和 Q235B 钢来说, 预应变后冲击韧性均有所降低, 韧-脆转变温度有了一定的提高, 但提高的幅度有大小之分。从图 2 可以看出在温度较低时(-40℃), 无论是否经过预应变, 16Mn 母材和焊缝的冲击韧性 with 相同条件下 Q235B 的冲击韧性基本相同, 说明在低温时预应变对两种材料的影响不是很大。但随着温度的提高, 不管是否经过预应变, 16Mn 母材和焊缝的冲击韧性基本都要高于相同温度下的 Q235B 的母材和焊缝, 说明 16Mn 冲击韧

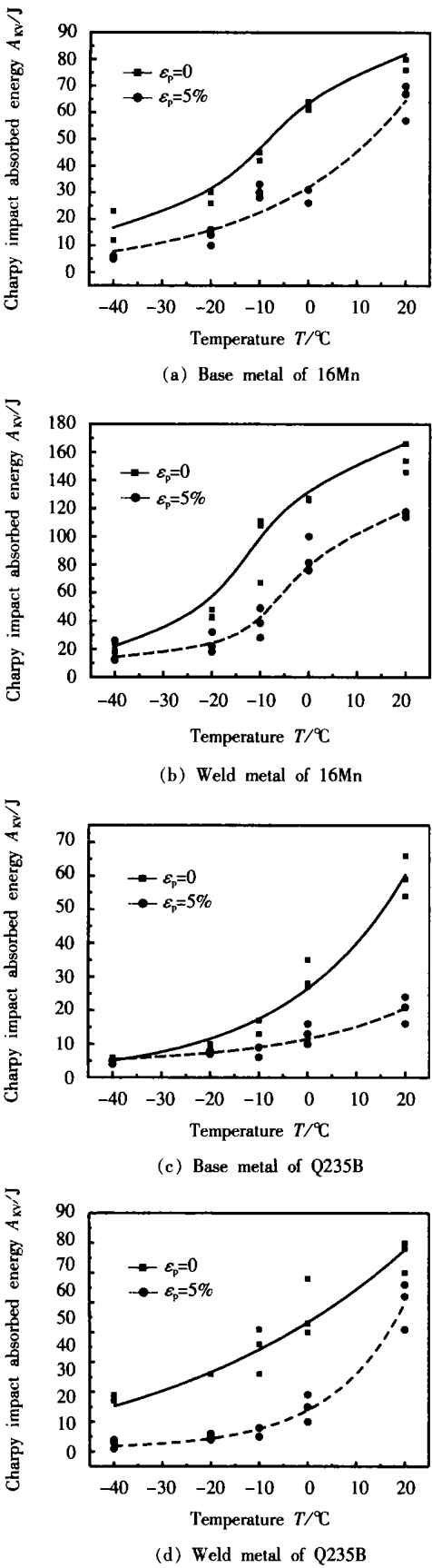


图 2 预应变与冲击吸收功关系

Fig. 2 Effect of prestrain on impact absorbing energy

度较好。在室温下,预应变后的 16Mn 母材和焊缝的冲击韧度分别为 Q235B 的 3.5 倍和 2 倍。预应

变后,16Mn 焊缝的韧-脆转变温度低于 $0^\circ C$,说明在室温下其冲击韧度仍较高。而对于 Q235B,无论是否经过预应变,母材和焊缝的韧-脆转变温度均要高于 16Mn 钢。以上结果表明:在地震中承受较大预应变的重要焊接梁柱节点处要慎用 Q235B 钢。

同时,从表 3 可以看出两种材料不论是否经过预应变,焊缝的冲击韧度均要高于相同条件下母材的冲击韧度。在室温下 16Mn 焊缝的冲击韧度达到 160 J,为母材的 2 倍;其韧-脆转变温度与母材相当为 $-10^\circ C$ 左右。而预应变后,室温下焊缝冲击韧度达 115 J,是母材的 1.7 倍。焊缝韧-脆转变温度低于 $0^\circ C$,而母材则较高,说明预应变对 16Mn 母材的韧-脆转变温度有着显著的影响。室温下预应变后 Q235B 焊缝的冲击韧度略低于 60 J 但却是母材的 3 倍,由此可见 Q235B 的冲击韧度低于相同条件下的 16Mn。

2.2 冲击韧度与预应变的关系

众所周知,预应变提高了材料的屈服强度和抗拉强度,但却使材料的断裂韧度降低。例如,10%的预应变使结构钢的脆性转变温度提高了 $30^\circ C^{[10]}$ 。预应变对材料力学性能的影响可根据预加载荷的作用来解释^[11]。经过预加载,在屈服点以上,材料真应力-应变曲线几乎与原来的应力-应变曲线相重合,如图 3。预应变后的结果,随着预应变量向后平移。因此,预应变后的屈服强度 $\sigma_s(\epsilon_p)$ 等于原始材料对应真应变 ϵ_p 时的真应力,抗拉强度 $\sigma_b(\epsilon_p)$ 可近似用以下公式表示,即

$$\sigma_b(\epsilon_p)=\frac{1+\epsilon_b}{1+\epsilon_b-\epsilon_p}\cdot\sigma_b,$$

式中: ϵ_p 、 ϵ_b 分别为材料的预应变水平和伸长率, σ_b 为原始材料的抗拉强度。可以看出,高的预应变将使材料的脆性断裂危险性增加。随着预应变增大,

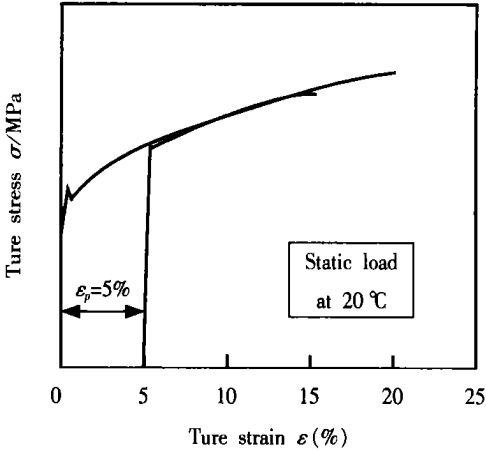


图 3 预应变与应力-应变曲线关系

Fig. 3 Prestraining effect on stress-strain curve

材料屈服强度将提高,这是由于材料来不及进行塑性变形和滑移,位错摆脱束缚进行滑移所需的热激活时间减少,使脆性转变温度升高,因而易于脆断,故可认为预应变的影响和降低温度相当。当试件上有缺口时,预应变的影响更明显。此外,脆性裂纹一经产生,由于裂纹尖端出现严重的应力集中,此一急剧增大的应力也相当于一个加载速率很高的载荷,使裂纹迅速失稳扩展,整个结构发生脆性断裂。

2.3 冲击韧度与温度的关系

有关工作温度和应力状态对于脆性断裂的影响,可利用传统的强度理论说明^[12]。如图 4 所示,材料的屈服强度 σ_s 随温度的降低而提高,而其正断应力 σ_F 则基本上不受温度变化的影响。 σ_s 曲线与 σ_F 曲线的交点所对应的温度即为脆性转变温度 T_r 。当 $T > T_r$ 时,材料先屈服,而后正断,属于延性断裂;反之,当 $T < T_r$ 时,则在低于屈服应力的情况下发生低应力断裂,即脆性断裂。若试样上开尖锐缺口,则在受力时缺口尖端处于三向应力状态,在拘束状态下的屈服强度将提高至 $\sigma_{s,max}$,并使 τ_{max} 降低而与 σ_F 曲线(图 4 中水平虚线)相交于 T_r' 温度,即脆性转变温度提高,表明材料脆性增强。与前面分析相类似,如材料受冲击载荷作用,其变形速度增加,也会使 T_r 提高,从而增强材料脆性。

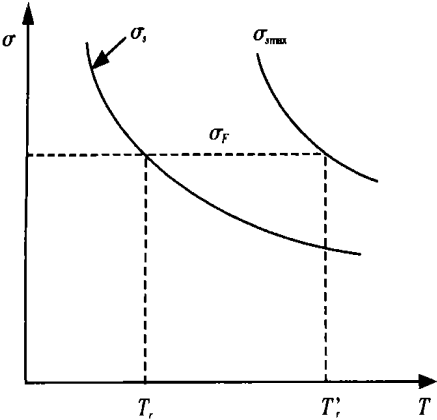


图 4 温度对脆断的影响

Fig. 4 Effect of temperature on brittle fracture

人们已熟知,低温是导致焊接结构脆断一失效的重要原因;另一方面,使用温度进入了该钢的脆性区是产生结构脆性开裂的主要原因。

3 结 论

(1)材料在预应变下无论是母材还是焊缝,其

韧—脆转变温度和屈服强度均有一定的提高。因此,在重要结构用钢选材和安全分析时,预应变也应作为一个考虑因素。

(2)室温下,5%预应变后的 16Mn 钢母材和焊缝仍可以安全使用。

(3)Q235B 钢室温下冲击韧度较 16Mn 低,对预应变很敏感,尤其是母材的冲击韧度受其影响更大,和未经预应变下冲击韧度值相比,降低了 3 倍有余。可以看出 Q235B 钢的抗震性能较 16Mn 差,在地震时,对于承受较大预应变的重要焊接梁柱节点要慎用。

(4)除结构设计和制造因素外,结构工作过程受到过强烈撞击以及使用温度进入了该钢的脆性区是产生结构脆性开裂的主要原因。

参考文献:

[1] Duane K. Miller. Lessons learned from the north ridge earthquake [J]. Engineering Structures, 1998, 20(4—6): 249~260.

[2] John L. Gross. A connection model for the seismic analysis of welded steel moment frames[J]. Engineering Structures, 1998, 20(4—6): 390~397.

[3] Jianlin Song, Bruce R, Ellingwood. Seismic reliability of special moment steel frames with welded connection: I[J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(4): 357~371.

[4] 黄南翼, 张锡云. 日本阪神地震中的钢结构震害[J]. 钢结构, 1995, 10(28): 112~127.

[5] 叶耀先, 韩毓芬. 1995 年日本兵库县南部钢筋混凝土建筑物震害[J]. 建筑结构, 1996, (12): 41~45.

[6] 崔鸿超. 日本兵库县南部地震震害综述[J]. 建筑结构学报, 1996, 17(1): 2~11.

[7] 石德珂, 金志浩. 材料力学性能[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.

[8] 姜伟之, 赵时熙, 王春生, 等. 工程材料的力学性能[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000.

[9] GB/T 299—1994. 金属夏比缺口冲击实验方法[S]. 1994.

[10] APD Committee. Strength and fracture toughness of weld connections in steel framed structures, proc. of semina on seismic damage to steel framed structures and steel properties[R]. Tokyo: 1997.

[11] Fumiyoshi Minami, Takao Ochiai. Evaluation of prestraining and dynamic loading effects on fracture toughness of structural steels by the local approach[J]. ASME, 2000, 404(1172): 81~92.

[12] 孙志雄. 焊接断裂力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1994.

作者简介: 卢庆华, 女, 1978 年 10 月出生, 天津大学硕士生, 主要从事焊接结构强度及断裂方面的研究, 已发表论文 1 篇。

Email: auroma@eyou.com