

文章编号: 1000-582X(2012)01-070-06

# 焊接对热轧 H 型钢高应变低周疲劳行为的影响

盛光敏<sup>1</sup>, 林振邨<sup>1</sup>, 樊良中<sup>1</sup>, 吴结才<sup>2</sup>, 龚庆华<sup>2</sup>

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2. 马鞍山钢铁股份有限公司, 安徽 马鞍山 243002)

**摘要:** 对热轧 H 型钢热轧和焊接后的高应变低周疲劳循环应力响应曲线、循环应力-应变关系和应变-寿命关系进行了分析, 通过 Coffin-Manson 公式得到疲劳寿命计算公式, 计算出  $N_f=100$  周时的循环韧度值  $\sigma_a \cdot \Delta \epsilon_f$ 。结果表明, H 型钢焊接试样的循环韧度比热轧试样的循环韧度降低 38%。热轧试样表现出明显的循环稳定特性, 焊接试样表现出循环软化-直接断裂的应力响应特征。焊接试样的断口扫描电镜观察发现, 疲劳裂纹在焊接接头的粗晶区表面处萌生, 断口瞬断区具有明显的韧窝特征, 表明材料焊接后保持较高的韧性。

**关键词:** H 型钢; 热轧; 焊接; 疲劳

**中图分类号:** TG405

**文献标志码:** A

## Effect of welding on high strain and low cycle fatigue behavior of hot-rolled H-beam

SHENG Guang-min<sup>1</sup>, LIN Zhen-ye<sup>1</sup>, FAN Liang-zhong<sup>1</sup>, WU Jie-cai<sup>2</sup>, GONG Qing-hua<sup>2</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;  
2. Maanshan Iron & Steel Company Ltd, Maanshan, Anhui 243002, P. R. China)

**Abstract:** Low cycle fatigue(LCF) properties of H-beam as hot-rolled and welded are studied, and the cyclic stress-strain relationship and cyclic response characterization are determined. Based on the Coffin-Manson formula, the strain-fatigue life relationship is obtained. Finally, the cyclic toughness, which is the product of strain range at LCF life of 100 cycles and the stress amplitude, are calculated. The test results show that the cyclic toughness as welded H-beam is 62% of that as hot-rolled. Hot-rolled materials exhibit cyclic stability, and welded materials show cyclic softening followed by fracture. The scanning electron microscope(SEM) micrograph of fracture surfaces reveals that the fatigue crack initiates from the coarse grain area of welding joint, and the fine dimple is observed in the fracture surface, which indicates the welding joint remains a good ductility.

**Key words:** H-beam; hot-rolling; welding; fatigue

热轧 H 型钢作为一种多用途的经济断面型材, 已在发达国家的钢结构领域得到广泛使用。我国的热轧 H 型钢主要有马鞍山钢铁公司、莱芜钢铁公司和津西钢铁公司三个大的生产线<sup>[1]</sup>。

随着社会经济的发展和人类生活水平的不断提高, 特别是汶川 8.0 级地震后, 热轧 H 型钢的抗震性能问题引起社会各界的高度重视。研发一种抗震性能良好的 H 型钢并应用于建筑结构中, 对于提高建

收稿日期: 2011-07-25

基金项目: 国家科技攻关资助项目(2007BAE30B015); 重庆大学大型仪器设备开放基金资助项目(2010063010)

作者简介: 盛光敏(1958-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事合金化和新材料的研究;

(E-mail) gmsheng@cqu.edu.cn。

筑结构的安全性和保证地震时的生命和财产安全具有重大意义<sup>[2]</sup>。在交变地震载荷的作用下,建筑结构的破坏形式属于高应变低周疲劳<sup>[3-5]</sup>,因此,抗震性能指标应该以高应变低周疲劳性能为主,具体包括<sup>[6-7]</sup>: 1)高应变低周疲劳性能;2)应变时效敏感性;3)韧脆转变温度;4)可焊性;5)强度和塑性的配合。

H 型钢在实际的使用过程中会遇到焊接的问题,焊接后接头处的组织和性能都发生了改变。焊接对 H 型钢高应变低周疲劳性能的影响至今尚未见报道。笔者通过焊接前后 H 型钢的高应变低周疲劳性能的对比试验,研究了焊接对 H 型钢高应变低周疲劳性能的影响,并对疲劳机理进行了初步探索。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 试验材料与试样

试验材料包括两种,第一种材料是在马钢技术中心试验轧机上进行模拟翼缘轧制,其力学性能如表 1 所示。热轧后的钢板依据 GB3075—82(金属轴向疲劳试验方法),沿轧制方向切割成钢坯并加工成高应变低周疲劳试样,如图 1 所示。第二种材料是将模拟翼缘轧制的钢板切割成 150 mm×150 mm×30 mm 形状的钢坯,进行焊接后,沿垂直于轧制方向开 X 型坡口,进行焊接后,参照 GB2649—88(焊接接头机械性能试验取样方法),沿着垂直于焊缝方向(轧制方向),用电火花线切割的方法截取试样坯料,加工成如图 1 所示的高应变低周疲劳试样。坡口形状见图 2 所示。焊接采用手工电弧焊的方式进行,焊接设备型号为 JASIC ARC ZX7-500 直流焊机。热轧材料记为 H,焊接材料记为 W。

表 1 材料的力学性能

试样状态	室温拉伸性能			
	$R_{el}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$	$A/\%$	$R_{el}/R_m$
热轧 H	470	650	25	0.72
焊接 W	472	645	23	0.73

### 1.2 实验设备及方法

试验所用设备为 Instron Model1342 型电液伺服疲劳试验机,控制方式为应变控制,大气环境,试验波形为正弦波,应力比  $R = -1$ ,试验加载频率为 0.1~0.3 Hz。

鉴于建筑结构钢在交变地震载荷下的失效模式,本试验设定应变范围为  $\Delta\epsilon_t = 2\%, 3\%, 4\%$  和  $5\%$ ,且在每一个应变范围内都进行多组试验,高应

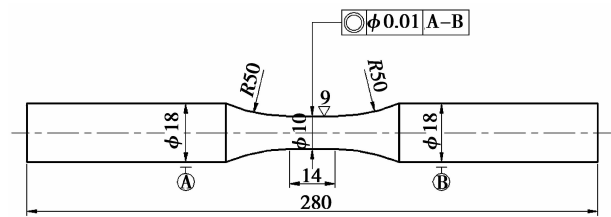


图 1 高应变低周疲劳试样

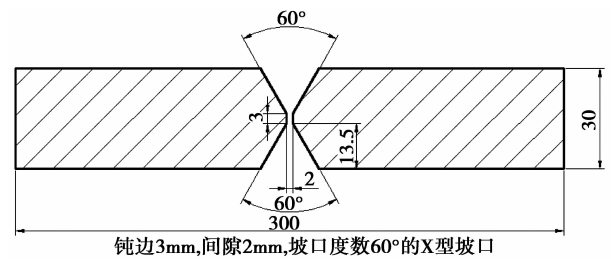


图 2 焊接材料坡口试样

变低周疲劳试验按照 GB3075—82(金属轴向疲劳试验方法)进行。

为分析材料的疲劳断裂机理,取应变范围  $\Delta\epsilon_t = 3\%$  的疲劳断口,在 VOYAGER-2 型扫描电子显微镜下,对其疲劳断口进行观察。

## 2 实验结果与分析

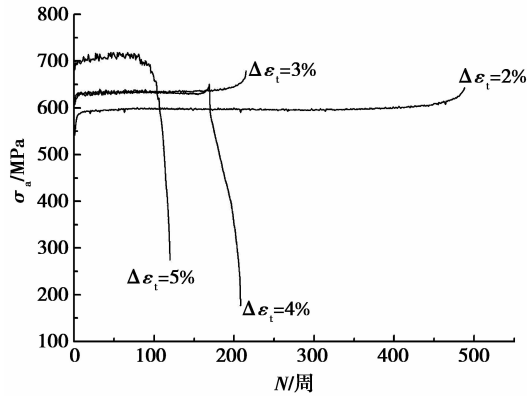
### 2.1 循环应力响应特征

在各循环加载应变范围内,通过取每一个试样相应循环周次  $N$  下取得稳定的循环滞后环的最大应力平均值,绘制成热轧和焊接试样在不同应变幅下的循环应力响应特征曲线,如图 3 所示。

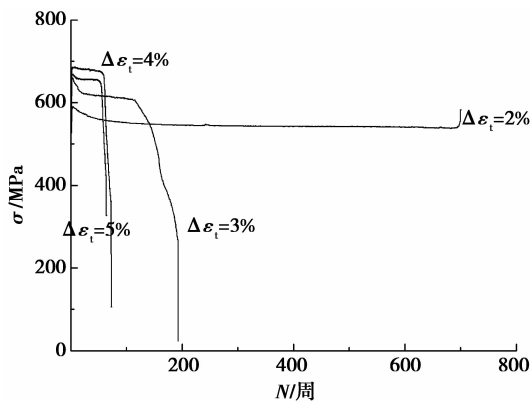
如图 3(a)所示,对于热轧材料而言,在全部应变范围内,材料在初始加载阶段都表现出一定的循环硬化,随着循环次数的增加,循环应力幅值基本保持不变,材料表现为循环稳定状态。在循环应变范围较大时( $\Delta\epsilon_t = 4\%$  和  $\Delta\epsilon_t = 5\%$ ),循环次数达到一定数值后,循环应力开始迅速下降,直到最后断裂。总体来说材料表现出循环稳定的特性,这有利于材料在承受大应力循环载荷时保持较长的寿命而不至于过早的破坏或失效<sup>[8-9]</sup>。

如图 3(b)所示,对于焊接后的材料而言,在开始加载时,材料都表现出循环软化的现象,这是由于在焊接时,焊缝和热影响区内形成了与母材不同的组织,且存在焊接内应力和孔洞,在疲劳试验开始时,由于应力的作用,在焊缝中的缺陷处很快产生裂

纹,随着试验的进行裂纹迅速扩展,材料的承受能力也迅速下降,导致材料出现急速的循环软化现象。由于裂纹的快速扩展,材料很快断裂,其寿命相对于热轧材料较低。可见在应变范围较大(4%和5%)时,焊接后试样的寿命相对于热轧试样较低。



(a) 热轧材料



(b) 焊接材料

图 3 材料的循环应力响应特征曲线

## 2.2 循环应力-应变滞回曲线

材料的循环应力-应变曲线反映材料在受高应变低周疲劳时,稳定应力与应变的影响特性。反映了在稳定状态下,应力与应变之间的关系,是衡量材料低周疲劳性能的一个重要方面。图 4 给出了热轧和焊接材料在半寿命周期时的应力-应变滞回曲线。

在循环的一周内,材料的应变包括弹性应变  $\epsilon_e$  和塑性应变  $\epsilon_p$  两个部分。在高应变幅时,塑性应变分量起主要作用,随着应变幅的增大,塑性应变分量所占的比例逐渐增加。从图 4 中可以看出,在应变范围为  $\Delta\epsilon_i = 5\%$  时,试样主要发生塑性应变,材料的损伤也主要以塑性变形引起。材料在循环载荷下,大部分的变形功以应变能的形式被材料吸收。试验材料的应力-应变滞后曲线包围的面积很大,若将此材料用于抗震结构体中,能吸收较多的地震能,这对于

提高建筑物的抗震能力是非常有利的。

## 2.3 循环应力-应变关系

根据 Hollomon 公式有:

$$\sigma_a = h\epsilon_{pa}^m, \quad (1)$$

或

$$\sigma_a = k\epsilon_a^n, \quad (2)$$

其中式(1)、(2)中的  $m, n$  为应变硬化指数; $h, k$  为应变硬化系数。对(1)、(2)两式取双对数,并将实验所采集的数据整理带入计算,得到如表 2 所示的 Hollomon 关系式。

表 2 试验材料的应力-应变关系式

试样编号	$\sigma_a - \epsilon_{pa}$	$\sigma_a - \epsilon_a$
热轧态试样 H	$\sigma_a = 1\ 084\epsilon_{pa}^{0.120\ 9}$	$\sigma_a = 1\ 181\epsilon_a^{0.149\ 6}$
焊接态试样 W	$\sigma_a = 1\ 430\epsilon_{pa}^{0.193\ 2}$	$\sigma_a = 1\ 611\epsilon_a^{0.233\ 0}$

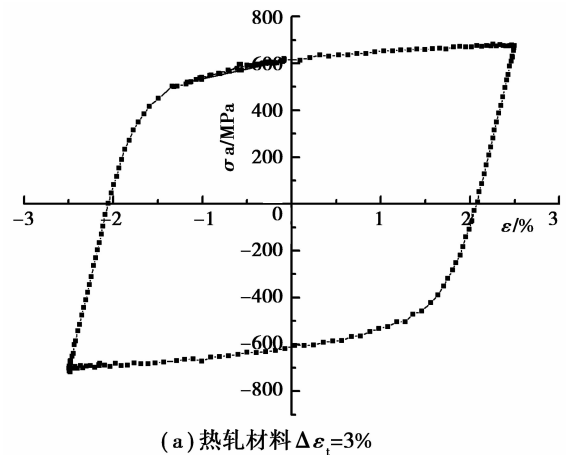
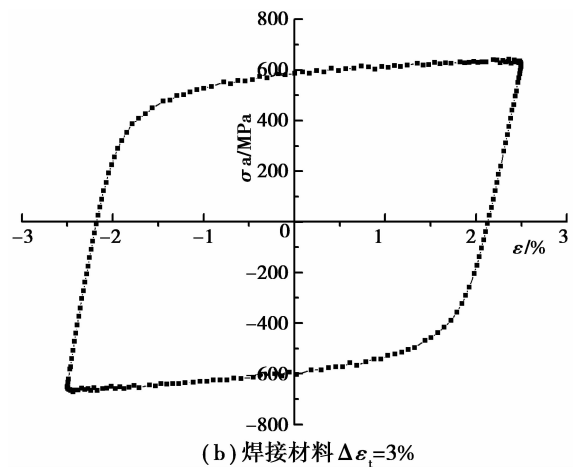
(a) 热轧材料  $\Delta\epsilon_i = 3\%$ (b) 焊接材料  $\Delta\epsilon_i = 3\%$ 

图 4 试验材料的应力-应变滞回曲线

## 2.4 基于 Coffin-Manson 公式下的疲劳寿命

高应变低周疲劳的应变范围与断裂寿命密切相关。目前,经典的用以表征两者之间关系的是

Coffin-Manson 公式,即式(3)。工程上为了计算疲劳损伤的方便,将式(4)在数值上做了修正,得到目前的应变疲劳寿命公式(4)。

$$\Delta\epsilon_t = \Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_p = \frac{\sigma'_f}{E} N_f^b + \epsilon'_f N_f^c, \quad (3)$$

$$\Delta\epsilon_t = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c, \quad (4)$$

式中: $\sigma'_f$ ,  $b$  分别为疲劳强度系数和疲劳强度指数; $\epsilon'_f$ ,  $c$  分别为疲劳塑性系数和疲劳塑性指数; $N_f$  为疲劳寿命; $E$  为弹性模量。

以应变疲劳所得的实验数据  $2N_f$  为自变量,  $\Delta\epsilon_e$ 、 $\Delta\epsilon_p$  为因变量,通过  $\Delta\epsilon_e = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b$  和  $\Delta\epsilon_p = \epsilon'_f (2N_f)^c$  进行非线性回归拟合,得到试验材料的低周疲劳疲劳寿命公式如表 3 所示。

表 3 试验材料的低周疲劳寿命公式

试样编号	Coffin-Manson 公式拟合结果
热轧态试样 H	$\Delta\epsilon_t = 0.0258(2N_f)^{-0.2036} + 3.5180(2N_f)^{-0.8064}$
焊接态试样 W	$\Delta\epsilon_t = 0.0095(2N_f)^{-0.0688} + 0.3051(2N_f)^{-0.4256}$

## 2.5 循环韧度

根据钢结构抗震设计理论能量设计法的基本思想,地震对结构及其内部设施的破坏取决于输入的能量和结构所消耗的能量<sup>[5]</sup>。建筑结构钢材在地震时失效的本质是承受非谐振波造成的高应变低周疲劳,可以是直接断裂或者过量的塑性变形。衡量钢的抗低周疲劳性能主要体现在快速抵御和吸收过载循环的能量,即循环韧度值  $\sigma_a \cdot \Delta\epsilon_t$ 。材料的循环韧度值  $\sigma_a \cdot \Delta\epsilon_t$  越大,则材料能够吸收过载循环的能量就越多,材料的抗震性能就越好。根据地震时强震频率和强震持续时间,大概在 100 周时,是最容易发生建筑物破坏的阶段。因此,将疲劳寿命  $N_f = 100$  带入表 3 中的到  $\Delta\epsilon_t$  值,再把  $\epsilon_a \left( \epsilon_a = \frac{\Delta\epsilon_t}{2} \right)$ , 带入表 2 中的公式,计算出  $\sigma_a$  的值。最后可以计算出循环韧度值  $\sigma_a \cdot \Delta\epsilon_t$ , 结果如表 4 所示。

表 4 试验材料的循环韧度

试样编号	$N_f$	$\Delta\epsilon_t$	$\sigma_a / \text{MPa}$	$\sigma_a \cdot \Delta\epsilon_t / (\text{J} \cdot \text{cm}^{-3})$
热轧 H	100	0.05784	695	40.2
焊接 W	100	0.03860	642	24.8

从表 4 可以看出,当疲劳寿命  $N_f = 100$  时,焊接材料的应力幅值  $\sigma_a$  和对应的总应变范围  $\Delta\epsilon_t$  均比热轧材料的低,焊接后的循环韧度是热轧材料的 62%,即焊接使试验钢的循环韧度降低了 38%。

## 2.6 低周疲劳断口分析

为了分析焊接试样高应变低周疲劳性能降低的原因,取应变范围为 3% 的疲劳断口,用 VOYAGER-2 型扫描电镜对其进行了断口观察,如图 5 所示。焊接接头在焊接时出现了组织和性能的改变,钢板焊接接头韧度的控制极为重要<sup>[10-12]</sup>。

根据 Kanvinde<sup>[13]</sup> 等提出的循环空位增长模型,焊接材料的疲劳裂纹从表面萌生,见图 5(a) 中的 A 区。焊接热影响区的强度与晶粒尺寸平均值的  $\frac{1}{2}$  次方成比例变化<sup>[14]</sup>,疲劳裂纹萌生的位置为焊接接头中的粗晶区,粗晶区中组织较粗大,晶粒半径值较大,加之存在一些聚集分布的非金属夹杂物(图 5(e)),塑性变形能力较差,承受一定的外加应变后便形成裂纹。裂纹萌生后,沿着热影响区向细晶区和母材方向扩展。将图 5(a) 中的 A 区放大后,在疲劳裂纹扩展路径上可见明显的疲劳辉纹和轮胎花样等疲劳裂纹扩展痕迹,同时也存在一些孔洞和二次裂纹,见图 5(b)。当疲劳裂纹扩展至图 5(a) 中的 B 区时,开始失稳扩展。B 区的位置正好是粗晶区和细晶区的过渡区,将 B 区放大,在断口上可见许多微孔洞(图 5(c))和夹杂物(图 5(d)),经能谱分析,这些夹杂物中含有较高的 Si(质量百分比 21.9%)和 Mn(质量百分比 25.9%),见图 6。疲劳断口上的微孔洞是焊接过程中形成的,在热轧疲劳断口上没有观察到微孔洞的存在。正是这种微孔洞的存在,加速了疲劳裂纹的萌生和扩展速度,降低了高应变低周疲劳寿命。微孔洞的形成与焊接过程中反复的加热、冷却有关。对于高强钢的滞后断裂性能<sup>[15]</sup>,最后观察瞬断区(图 5(a) 中的 C 区)位于细晶区,将其放大后可见细小的等轴韧窝(图 5(f))。可见,材料仍有较好的塑性。

通过以上分析可以判定,焊接热影响区是材料中的薄弱环节,高应变低周疲劳裂纹优先在焊接热影响区萌生和扩展。为了进一步提高高应变低周疲劳性能,应该控制热影响区的组织,特别是细化粗晶区的晶粒尺寸,通过瞬断区的韧窝形貌,可以发现,焊接后的材料仍然具有良好的塑性。

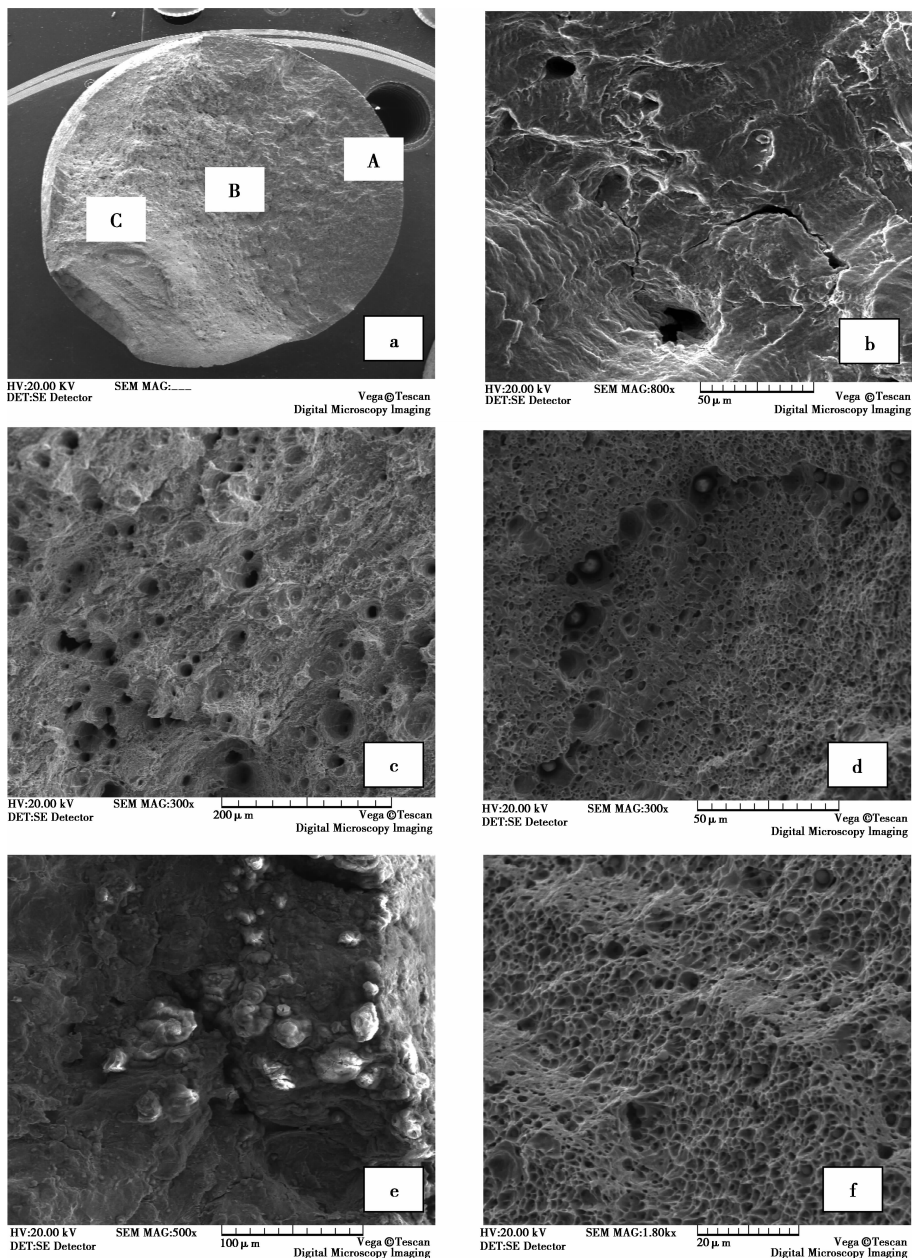


图 5 疲劳断口的微观形貌

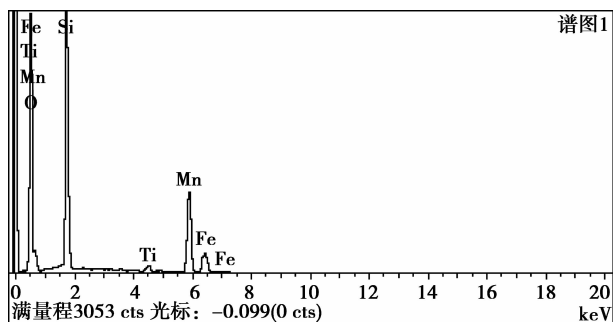
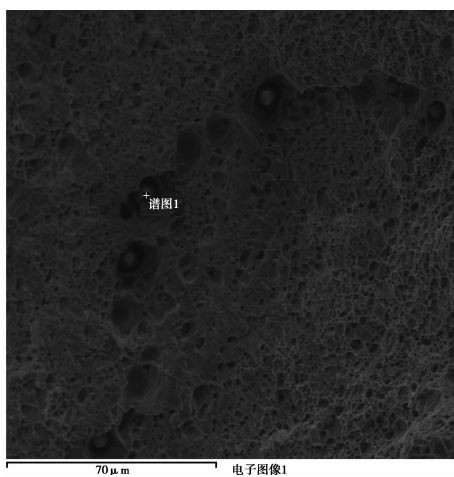


图 6 夹杂物的能谱分析结果

### 3 结 论

1) 在室温条件下,热轧材料表现出循环稳定的特性,直到最后断裂;焊接材料出现较明显的循环软化,其疲劳寿命相对于热轧材料低。

2) 焊接材料的循环韧度是热轧材料的 62%,即焊接使试验钢的循环韧度降低了 38%。

3) 焊接热影响区是焊接材料的薄弱环节,疲劳裂纹优先在焊接热影响区萌生和扩展。

4) 焊接材料的瞬断区存在明显的韧窝,材料具有较好的塑性。

#### 参考文献:

- [1] YUJI M K, BRAIN G T. Modeling of inclusion removal in a tundish [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1999, 30(4): 639-654.
- [2] 邹勇, 张希俊, 郭华. 抗地震 H 型钢在建筑行业的发展前景[J]. 工业建筑, 2008, 22(1): 22-23.  
ZOU YONG, ZHANG XI-JUN, GUO HUA. Resistance to earthquake H-beam in construction industry development prospects [J]. Industrial Buildings, 2008, 22(1): 22-23.
- [3] APOSTOLOPOULOS C A, MICHALOPOULOS D. Corrosion of reinforcing steel and low cycle fatigue behaviour[J]. Materials and Corrosion, 2007, 58(6): 438-446.
- [4] KIM K S, KIM B O, KIM Y K, et al. A study on the low cycle fatigue behavior of the steel for shipbuilding industry[J]. Key Engineering Materials, 2005, 297-300: 10-15.
- [5] BROWN J, KUNNATH S K. Low-cycle fatigue failure of reinforcing steel bars [J]. Acimaterials Journal, 2004, 101(6): 457-466.
- [6] 龚士弘, 盛光敏. 抗震设计用钢探讨[J]. 工程抗震, 1995(2): 4-5.  
GONG SHI-HONG, SHENG GUANG-MIN. Explore aseismic design with steel [J]. Engineering Anti-seismic, 1995(2): 4-5.
- [7] 龚士弘, 盛光敏. 对“钢筋混凝土结构构件抗震设计”(GBJ10-89)材料部分的意见[J]. 工程建设标准化, 1996(1): 44-48.  
GONG SHI-HONG, SHENG GUANG -MIN. Some suggestion for reinforced concrete structures, "Seismic Design" (GBJ10-89) material part [J]. Engineering Construction Standardization, 1996(1): 44-48.
- [8] NIP K H, GARDNER L, DAVIES C M, et al. Extremely low cycle fatigue tests on structural carbon steel and stainless steel [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(1): 96-110.
- [9] YANG X. Low cycle fatigue and cyclic stress ratcheting failure behavior of carbon steel 45 under uniaxial cyclic loading [J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(5): 1124-1132.
- [10] 苗张木, 吴卫国, 李书学, 等. 港深西部通道钢箱梁低温 CTOD 试验[J]. 钢结构, 2005, 20(3): 35-38.  
MIAO ZHANG-MU, WU WEI-GUO, LI SHU-XUE, et al. The channel steel temperature CTOD test [J]. Steel Structure, 2005, 20(3): 35-38.
- [11] 苗张木, 陶德馨, 吴卫国, 等. 裂纹尖端张开位移试验在导管架建造中的应用[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2006, 30(2): 29-33.  
MIAO ZHANG-MU, TAO DE-XIN, WU WEI-GUO, et al. The crack tip opening displacement experiment on the jacket to build applications [J]. Wuhan University of Science and Technology Journal: Traffic Science and Engineering Board, 2006, 30(2): 29-33.
- [12] 苗张木. 厚钢板焊接接头韧度 CTOD 评定研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
- [13] KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. Cyclic void growth model to assess ductile fracture initiation in structural steels due to ultra low cycle fatigue [J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133(6): 701-712.
- [14] QIU H, ITO R, HIRAOKA K Z. Role of grain size on the strength and ductile-brittle transition temperature in the dual-size ferrite region of the heat-affected zone of ultra-fine grained steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 435-436: 684-652.
- [15] OI K J. High tensile strength steel material having excellent delayed fracture resistance property, and method of manufacturing the same: United States, 20080110535[P]. 2008-05-15.

(编辑 王维朗)