

# 微剪试验及对焊接接头力学性能的评价<sup>\*</sup>

史耀武 周宁宁<sup>\*\*</sup> 张新平 唐伟 雷永平

(西安交通大学)

**摘要** 采用系列加载中止试验法, 对微剪试验过程中试样的变形和断裂进行了研究, 并提出了微剪韧性的概念, 它代表剪切过程中试样的吸收能。另外, 对 API X65钢埋弧焊管接头的评价试验表明, 微剪试验能方便地给出实际焊接接头局部力学性能及其变化规律。而且试验成本低, 为焊接工艺的制定及焊接接头的断裂分析提供更充分的依据。

**关键词** 微剪试验; 力学性能, 焊管

## 0 序 言

微剪试验方法是从试验材料或焊接接头中取出微形试样, 逐点剪切, 并确定各点的力学性能<sup>[1]</sup>。该试验方法特别适宜焊接接头等材料的组织和力学性能有剧烈变化的场合, 为制定焊接及热处理工艺, 保证焊接接头的质量提供依据。同时, 也可为断裂分析提供焊接接头局部力学性能的实验数据<sup>[2]</sup>。

## 1 微剪试验

本研究所开发的微剪试验机, 包括加载系统, 剪切刀具及夹具, 试样逐点剪切等距离送进机构, 传感器及记录系统等。

试样为  $1.5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$  正方截面, 长度 30 至 50mm, 试验在常温进行, 微剪速度  $0.05\text{mm/s}$ , 试验过程中记录剪切力  $P$  和位移  $S$ , 进而求出材料的剪切强度、剪切塑性及剪切韧性。经逐点剪切, 可得沿试样长度方向材料力学性能的变化规律。

## 2 微剪试样的变形与断裂

图 1 是微剪试验过程中记录的典型  $P-S$  曲线。整个剪切过程大致分以下阶段:

(1) 弹性变形阶段。刀口向试样施加剪切载荷, 对应  $P-S$  曲线的  $OA$  直线段。卸除载荷, 试样弹性变形恢复。

\* 本研究得到德国大众汽车基金会资助。

\*\* 周宁宁现在清华大学核研究院工作。

# I. II 節的問題(填空)的解題方法

## 問題 1. 例題(第一題)

Int D A E B Interrupted pd

8 0.373 00390.386.2520.390.368 0.3

20.087 10110.140 20.3101 0.8

問題 2. 第二題的題目

此題的題目是關於一個由四個點所構成的四邊形。

問題 3. 第三題的題目

材料的开裂点往往位于峰值载荷后, 脆性材料的开裂点一般位于峰值载荷之前<sup>[3]</sup>。

### 3 微剪试验的特征值

基于以前的研究<sup>[1, 4, 5]</sup>, 微剪强度  $\tau_b$ , 微剪屈服强度  $\tau_y$ , 及微剪塑性  $\alpha$  可定义如下:

$$\tau_b = \frac{P_{\max}}{A_0} \quad (1)$$

$$\tau_y = \frac{P_y}{A_0} \quad (2)$$

$$\alpha = 1 - \frac{S_f}{b} \quad (3)$$

式中  $A_0$  是试样初始横截面积,  $P_{\max}$  是最大剪切力,  $P_y$  是剪切屈服力,  $b$  为试样原始宽度,  $S_f$  为断裂点的剪切位移。剪切屈服力定义为试样发生 0.2% $b$  塑性位移的剪切力  $P_{0.2}$ 。

本研究提出微剪韧性的概念, 并定义微剪韧性  $W_s$  为

$$W_s = \frac{W}{A_0} \quad (4)$$

$$W = \int_0^{S_f} P(S) dS \quad (5)$$

根据  $P-S$  记录, 微剪特征值  $W$  是试样断裂前剪切力和位移曲线下的面积。显然, 微剪韧性代表试样剪断的吸收能。

为了建立常规拉伸力学性能和微剪特征值的关系, 采用前面标题 1 的试验条件, 对屈服极限 302MPa 至 841MPa, 抗拉强度 450MPa 至 1150MPa 的焊接结构钢进行微剪试验, 并和标准拉伸试验的结果进行对比, 获得以下相关关系<sup>[6]</sup>:

$$\sigma_b = 2.18\tau_b - 308.43 \quad (\text{MPa}) \quad (6)$$

$$\sigma_y = 1.83\tau_y - 13.62 \quad (\text{MPa}) \quad (7)$$

式中  $\sigma_y$  是拉伸屈服极限,  $\sigma_b$  是抗拉强度。式(6)和式(7)的相关系数分别为 0.998 和 0.984。在所试验的材料范围内,  $\sigma_y/\tau_y = 1.738$  至 1.808, 接近 Von Mises 屈服准则的  $\sigma_y/\tau_y = \sqrt{3}$ 。由此可见, 微剪试验能准确地预测材料的拉伸屈服极限和抗拉强度。

根据文献[5], 拉伸断面收缩率  $\psi$  和微剪塑性  $\alpha$  有以下关系:

$$\psi = 1.35\alpha + 4.42 \quad (8)$$

其  $\psi$  的变化范围为 45% 至 75%。

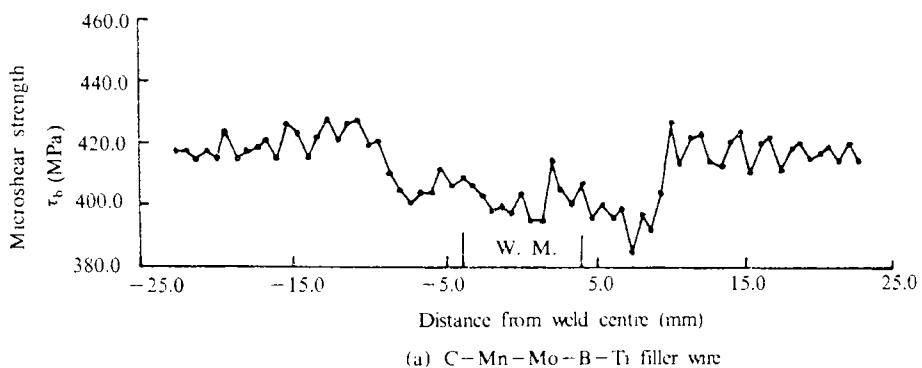
应该指出的是, 式(8)在用于具有明显各向异性的材料时应慎重<sup>[6]</sup>。因为拉伸塑性  $\psi$  呈现明显的各向异性, 而微剪塑性  $\alpha$  对试样的取向并不敏感。类似的情况也存在于材料的微剪韧性和冲击韧性和断裂韧性的相关关系中。

## 4 微剪试验在焊管接头性能评价上的应用

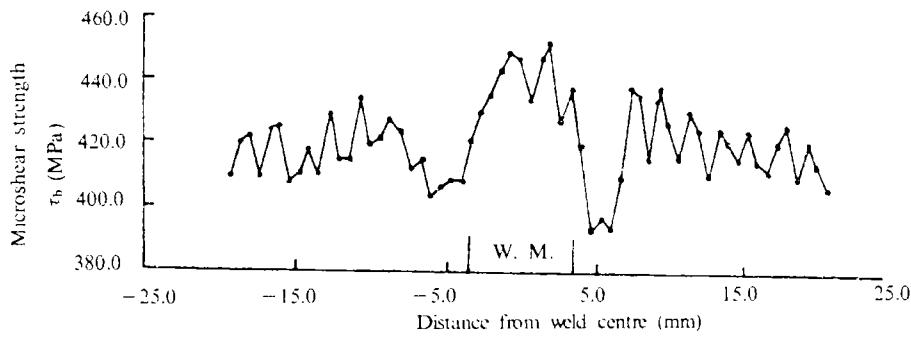
试验采用德国 Thyssen 公司生产 API X65 高韧性控轧管线钢, 板厚 7mm。化学成分 (wt%): C=0.07, Si=0.35, Mn=1.30, P=0.016, S=0.003, Nb=0.047, V=0.025。力学性能  $\sigma_y=496\text{MPa}$ ,  $\sigma_b=578\text{MPa}$ 。双面高速埋弧焊, 内外焊道线能量分别为 6.2 和 10.1kJ/cm。两种焊丝分别为 C-Mn-Si-Mo-Ti 型和 C-Mn-Mo-B-Ti 型, 配锦州产烧结焊剂 SJ101, 焊管由宝鸡石油钢管厂提供。

微剪试样在管子的外焊道沿垂直焊缝的方向取样, 剪切间距 2mm, 每一种接头取 3 根试样, 并变换剪切起始位置, 相当缩小相邻剪切点的间距, 剪切速度 0.05mm/s。试验在常温进行。

图 3~图 5 分别给出了试验所确定的微剪强度、微剪屈服强度和微剪韧性及其分布情况。同时该试验还可给出焊接接头微剪塑性的分布。结果表明, 焊接接头的微剪强度和微剪屈服强度分布与维氏硬度试验结果有很好的对应关系。而且两种焊缝的微剪韧性和 Charpy 冲击韧性也有一致的对应关系, C-Mn-Si-Mo-Ti 焊缝和 C-Mn-Mo-B-Ti 焊缝的 1/2 Charpy 常温冲击韧性分别为 62J 和 42J, 前者的微剪韧性也明显优于后者。另外, 微剪试验和硬度试验均给出控轧钢焊接热影响区存在明显的软化, 但微剪试验显示软化区的韧性仍非常好。而且, 对 C-Mn-Si-Mo-Ti 焊缝来说, 它比母材有较高的强度, 稍低的塑性和较好的韧性, 对 C-Mn-Mo-B-Ti 焊缝来说, 虽然硬度和母材相当, 但强度比母材低, 塑性和韧性也偏低。所以微剪试验可给出焊接接头力学性能分布更多的信息。



(a) C-Mn-Mo-B-Ti filler wire



(b) C-Mn-Si-Mo-Ti filler wire

图 3 焊接接头的微剪强度

Fig.3 Microshear strength of welds

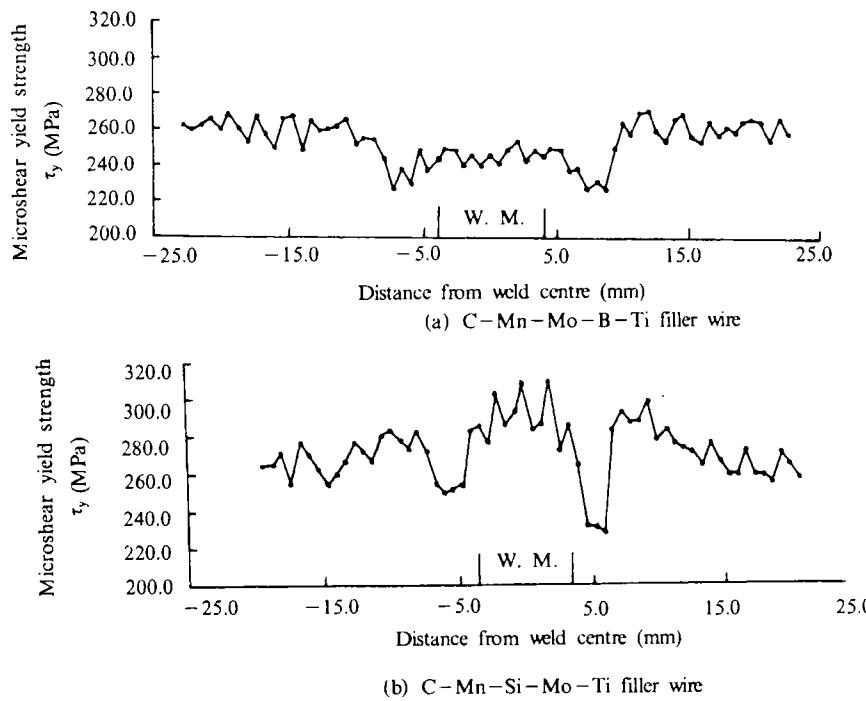


图4 焊接接头的微剪屈服强度

Fig.4 Microshear yield strength of welds

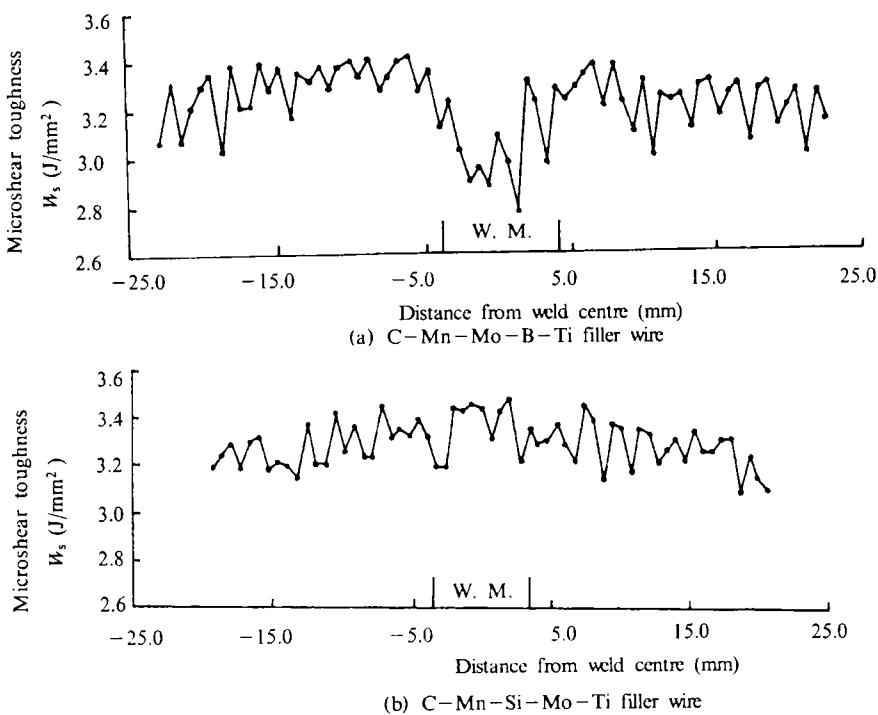


图5 焊接接头的微剪韧性

Fig.5 Microshear toughness of welds

由于微剪试验可直接给出焊接接头的强度分布数值,尤其是实际接头的屈服极限分布数值,对焊接接头的断裂韧性试验和裂纹扩展驱动力的计算是十分重要的基础数据。可以设想,这种方法也可能用于确定异种材料接头的界面接合强度,或重要在役设备材料性能退化的监测上。由于试样尺寸小,又和标准拉伸试验结果有很好的相关性,不仅试验结果可信,试验成本低,而且有其它方法无法替代的优点。

## 5 结 论

(1) 试样的微剪过程由弹性变形、弹塑性变形及裂纹萌生扩展到断裂各阶段组成。对焊接结构钢试样,裂纹萌生在最大载荷或稍过最大载荷处。

(2) 微剪韧性代表试样剪断的吸收能,有明确的物理意义。

(3) 焊管接头的试验表明,微剪试验可为焊接接头提供丰富的力学性能数据,试验成本低,结果可信。

(1994年7月6日收到修改稿)

## 参 考 文 献

- 1 Dorn L, Niebuhr G, and Wawer G. Information of micro-tensile and micro-shear tests concerning strength and ductility of steel, Schweissen und Schneiden, 1977, 29(7): 246 ~ 249
- 2 史耀武. 焊接断裂力学. 西安: 西安交通大学, 1991.
- 3 Atkins A G. On cropping and related processes, International Journal of Mechanical Science, 1980, 22(4): 215 ~ 231
- 4 Dorn L. Determination of weld structure properties by means of the microshear test, Proceedings of the International Conference on Quality and Reliability in Welding, The Welding Institution of the Chinese Mechanical Engineering Society, 6 ~ 8 September, 1984, Hangzhou, PP. (B21) 1 ~ 6
- 5 Lei B, and Dorn L. Derivation of the characteristic values of the tensile and fracture mechanics test from the results of the microshear test, Schweissen und Schneiden, 1992, 44(8): E145 ~ 147
- 6 周宁宁. 微型剪切试验特征值的研究. 硕士学位论文. 西安交通大学, 1993.

### Microshear test and its evaluation to mechanical properties of welded joints

Shi Yaowu, Zhou Ningning, Zhang Xinping, Tang Wei and Lei Yongping  
(Xi'an Jiaotong University)

**Abstract** In the present paper, deformation and fracture of specimen during the microshear test have been investigated by using a series of interrupted loading method. A concept on microshear toughness has been proposed and it represents the absorbed energy of sheared specimen. Moreover, it is indicated from the evaluation of an API X65 steel welds that the microshear test may be conveniently used to study the local mechanical properties and their distribution in practical welds with low expense. More informations given by the microshear test are available for the compilation of welding procedure and fracture analysis of welds.

**Key words** microshear test; mechanical property; welded pipe