

# 焊接接头热影响区表面裂纹疲劳扩展速率

林 盛 柳春图

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 给出了数据处理的方法, 通过对试验数据的分析, 给出了裂纹扩展速率与  $\Delta K$  的关系, 为油田的安全生产提供了依据。

**关键词** 焊接接头, 表面裂纹, 疲劳扩展

## 1 引 言

研究含裂纹的构件在交变载荷下裂纹扩展的规律, 对于定量估计构件的疲劳寿命, 以便安全又有效地利用构件, 具有重要的意义。然而以前大多数的工作是针对穿透裂纹而做的, 构件中大量存在的缺陷实际上多属于表面裂纹类型的缺陷。特别是对于厚板构件, 在一般情况下, 其初始的表面裂纹通常受多次疲劳循环后才发展成为穿透裂纹。因此, 研究表面裂纹在疲劳载荷下的扩展规律成为一个迫切需要解决的课题。但由于表面裂纹扩展前缘形状较复杂, 又不易于直接观测, 所以比起穿透裂纹来要困难。因此, 国内外许多学者多采用“沟线法”对钢材的表面裂纹扩展规律进行试验研究。例如 Truchon<sup>[1]</sup> 和 Scholte<sup>[2]</sup> 等都做过钢板中表面裂纹扩展特性的试验研究, 并取得了较好的成果。而对于沙漠环境中油田用高压注气管用钢(20#)焊接接头, 国内从事表面裂纹扩展特性的研究工作几乎没有, 本文探讨了高压注气管用钢焊接接头的表面裂纹扩展特性。

## 2 试 样

试样几何尺寸和初始缺陷见图 1 所示, 其中试样所用材料为 20# 钢, 中间部分为 V 型焊缝, 采用 J506 型焊条进行焊接, 表 1、表 2 分别列出了这两种材料的化学成分及力学性能。另外, 试样表面缺陷系由电火花切割的方法加工的, 初始形状为半径大约 1 mm 的半圆形, 然后在疲劳试验中预制裂纹, 即预制裂纹和

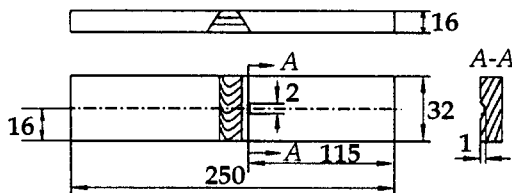


图 1 焊板试样

表 1 20# 钢及 J506 焊条的化学成分 (重量 %)

	S	C	Mn	P	Si	Cr	Ni	Cu
20# 钢	0.013	0.21	0.47	0.018	0.29	0.04	0.04	0.02
J506 焊条	0.019	0.069	0.40	0.017	0.134	0.00	0.00	0.00

表 2 20# 钢及 J506 焊条的力学性能

	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	EL / %
20# 钢	$\geq 500$	$\geq 400$	$\geq 26$
J506 焊条	$\geq 590$	$\geq 425$	25

疲劳扩展试验是连续完成的。

## 3 试验方案简述

本试验在 Amsler 高频疲劳试验机上进行, 试验频率为 70 Hz。

疲劳裂纹长度用沟线法测量, 即在试验过程中当裂纹扩展到一定长度时, 降低载荷幅值, 从而在断口表面留下裂纹前沿的痕迹。当试验结束后, 用显微镜观察断口, 并测量裂纹深度和表面裂纹长度。

一般来说, 沟线的方法有以下几种: (1) 平均应力不变, 降低幅值为疲劳循环载荷幅值的  $1/2 \sim 1/3$ ; (2) 最大载荷不变, 降低幅值为  $1/2$ ; (3) 最小载荷不变, 降低幅值为  $1/2$ 。试验表明以上几种变载方法对沟线的清晰度影响不大。因而本试验采用平均载荷不变, 载荷幅值减小一半的变载法。

## 4 试验数据分析与处理

### 4.1 由 $a-N$ 、 $c-N$ 数据获取 $da/dN$ 和 $dc/dN$ 的方法

目前处理所测数据的方法有: (1) 切比雪夫多项式拟合法; (2) 割线法; (3) 七点递增多项式拟合法。我们采用了七点递增多项式拟合法确定各点的裂纹扩展速率。但由于直接读数所得表面裂纹扩展数据量较少, 我们就将所测的试验数据拟合成一条光滑的曲线, 然后从该曲线上读取裂纹长度和循环周次, 从而得到扩充的数据点。

七点递增多项式拟合法局部拟合方程的形式为

$$a = b_0 + b_1((N - C_1)/C_2) + b_2((N - C_1)/C_2)^2 \quad (1)$$

1999-11-09 收到第 1 稿, 2000-01-05 收到修改稿。

式中  $a$  为裂纹长度,  $N$  为循环周次.

$$C_1 = [N(7) + N(1)]/2, \quad C_2 = [N(7) - N(1)]/2$$

式中  $N(1)$  为局部第一点的循环周次,  $N(7)$  为局部第七点的循环周次,  $b_0, b_1, b_2$  为待定系数, 对 7 个数据点用最小二乘法回归确定, 裂纹扩展速率由对式 (1) 进行微分确定

$$da/dN = b_1/C_2 + 2b_2(N - C_1)/C_2^2 \quad (2)$$

#### 4.2 应力强度因子范围 $\Delta K$ 计算

三点弯曲试件表面裂纹的应力强度因子范围  $\Delta K$  按下列公式计算

$$\Delta K_a = \Delta\sigma_b \sqrt{\pi a} (M/\varphi) H_2, \quad \text{表面裂纹最深点} \quad (3)$$

$$\Delta K_c = \Delta\sigma_b \sqrt{\pi a} (M/\varphi) S H_1, \quad \text{近表面点} \quad (4)$$

其中

$$M = \{1.13 - 0.09(a/c)\} + \{-0.54 + 0.89[0.2 + (a/c)]^{-1}\}(a/B)^2 + \{0.5 - [0.65 + (a/c)]^{-1} + 14(1 - a/c)^{24}\}(a/B)^4$$

$$\varphi^2 = 1 + 1.464(a/c)^{1.65}$$

$$S = [1.1 + 0.35(a/B)^2] \sqrt{a/c}$$

$$H_1 = 1 - [0.34 + 0.11(a/c)](a/B)$$

$$H_2 = 1 - [1.22 + 0.12(a/c)](a/B) + [0.55 - 1.05(a/c)^{0.75} + 0.47(a/c)^{1.5}](a/B)^2$$

$\Delta\sigma_b = 1.5\Delta PL/(WB^2)$  为弯曲应力范围.

#### 4.3 试验结果与分析

疲劳裂纹扩展速率的测定试验共有 15 个试件, 测得的裂纹深度范围是 0.7 mm~6.0 mm; 通过将测得的裂纹深度  $a$ 、裂纹长度  $2c$  和循环加载次数  $N$  采用七点递增多项式拟合合成  $a-N$ 、 $2c-N$  曲线, 并计算得到裂纹扩展速率  $da/dN$  和  $d(2c)/dN$ , 并以与之相对应的裂纹深度  $a$ 、裂纹长度  $2c$  来计算应力强度因子范围  $\Delta K_a$ 、 $\Delta K_c$ .

通常裂纹扩展速率与应力强度因子范围之间的关系遵从 Paris 公式

$$da/dN = C\Delta K_a^m \quad (5)$$

$$d(2c)/dN = C\Delta K_c^m \quad (6)$$

由试验结果经回归分析计算确定  $C$  和  $m$ . 于是得到

$(da/dN)-\Delta K_a$  曲线

$$\left. \begin{aligned} \text{上限为: } da/dN &= 3.740 \times 10^{-11} (\Delta K_a)^{2.178} \\ \text{下限为: } da/dN &= 1.349 \times 10^{-11} (\Delta K_a)^{2.178} \end{aligned} \right\} (7)$$

$(d(2c)/dN)-\Delta K_c$  曲线

$$\left. \begin{aligned} \text{上限为: } d(2c)/dN &= 4.001 \times 10^{-13} (\Delta K_c)^{3.757} \\ \text{下限为: } d(2c)/dN &= 3.970 \times 10^{-11} (\Delta K_c)^{3.757} \end{aligned} \right\} (8)$$

图 2 和图 3 中分别给出了焊接接头热影响区裂纹扩展速率测量的试验结果. 试验结果表明, 表面裂纹的扩展规律与穿透裂纹扩展规律相类似, 即都是指数型关系, 这与文 [1] 等的结论一致.

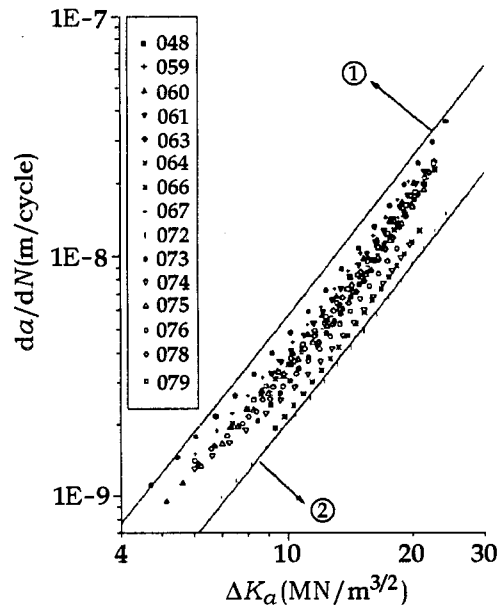


图 2  $(da/dN)-\Delta K_a$

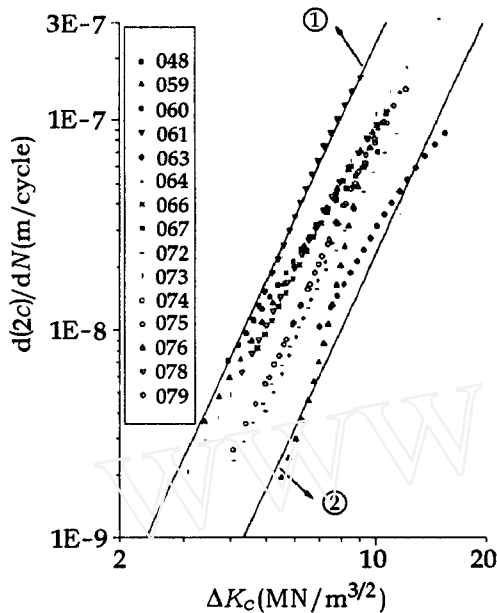
$$\textcircled{1} da/dN = 1.349 \times 10^{-11} \times (\Delta K_a)^{2.178}$$

$$\textcircled{2} da/dN = 3.740 \times 10^{-11} \times (\Delta K_a)^{2.178}$$

#### 5 结论

(1) 在试验数据较少时, 利用扩充的数据点, 采用七点递增多项式拟合法处理数据具有较高精度, 且运算比较简单.

(2) 高压注气管焊接接头热影响区表面裂纹疲劳扩展规律与穿透裂纹扩展规律相类似, 均符合指数型关系.

图 3  $d(2c)/dN-\Delta K_c$ 

$$\textcircled{1} \quad d(2c)/dN = 3.970 \times 10^{-11} \times (\Delta K_c)^{3.757}$$

$$\textcircled{2} \quad d(2c)/dN = 4.001 \times 10^{-12} \times (\Delta K_c)^{3.757}$$

(3) 从拉断后的试样断口上可以明显地看出, 初始的半圆形裂纹在拉-拉疲劳循环过程中逐渐趋于半椭圆形。

(4) 通过试验数据处理与分析, 得到了高压注气管焊接接头热影响区表面裂纹疲劳扩展速率, 为油田

现场施工提供了理论依据。

### 参 考 文 献

- 1 Truchon M, Lieurade H P. Experimental study of surface crack propagation in an E36 steel. 5<sup>th</sup> Inter. Conf. On Fracture: Advances in Fracture Research, 1981, 1: 33~39
- 2 Scholte H G, Wildschut H. Fatigue crack propagation tests on welded specimens in air and sea water. Inter Conf, Steel in Marine Structures, Paris, France, 1981
- 3 高镇同. 疲劳应用统计学. 北京: 国防工业出版社, 1986

## THE FATIGUE CRACK PROPAGATION OF WELDED JOINTS' SURFACE CRACK

LIN Sheng LIU Chuntu

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** This paper presents a method of treating the fatigue experimental data. Through the analysis of these data, the relationship between the crack propagating rate and  $\Delta K$  is obtained.

**Key words** welded joints, surface crack, fatigue propagation

## “吕”字形巷道布置的卸压机理分析<sup>1)</sup>

茅献彪 缪协兴 钱鸣高

(中国矿业大学, 江苏徐州 221008)

**摘要** 利用有限元法分析了综放采场瓦斯巷和回风巷或运输巷采用“吕”字形布置后的卸压机理, 得到了上部瓦斯巷宽度对下部回风巷或运输巷卸压效果的定量关系, 为改革综放采场巷道布置并提高瓦斯巷抽放效果提供了新的设计思路和可靠依据。

**关键词** 巷道, 卸压, 有限元

### 1 引 言

在放顶煤开采时, 为排放瓦斯或顺采需要, 除工作

面两端运输和通风需要沿采场底板布置 2 条巷道外, 常在工作面中部 (或偏两端) 沿顶板布置 1~2 条巷道, 称为瓦斯巷 (或辅助运输巷)。瓦斯巷的位置越靠近回风巷或运输巷, 抽排瓦斯的效果越好, 但对回风巷或运输巷的支护影响较大。鉴于放顶煤开采较厚, 我们设计将瓦斯巷布置在回风巷正上方, 形成“吕”字形巷道布置, 这样既提高了抽排瓦斯的效果, 又对下部巷道起到卸压作用。当然, 由于两条巷道要叠加在

1) 国家自然科学基金重点项目资助 (59734090)。

2000-02-01 收到第 1 稿, 2000-03-22 收到修改稿。