

# 含表面裂纹铝合金焊缝低温断裂性能\*

涂志华 张忠 赵立中

(中国科学院低温技术实验中心,北京,100030)

毛天祥

(中国科学院力学研究所,北京,100036)

夏源明

(中国科学技术大学,合肥,230026)

**摘要** 本文采用表面裂纹法,利用自行研制的低温多试样拉伸装置,研究了一种航天铝合金材料的焊缝在低温下(20K)的断裂性能,并对断口进行了电镜显微分析,为提高质量的焊接提供了依据。

**关键词** 铝合金焊缝,表面裂纹,低温。

## 1 引言

实际应用中,表面裂纹是材料中最常见的一类缺陷,严重危害结构的寿命及可靠性,因此有必要对这类裂纹进行专门研究。本世纪中叶以来,随着断裂力学的发展,表面裂纹技术也不断完善起来。目前人们主要对半椭圆形的表面裂纹进行了研究,因为半椭圆形裂纹(圆形可看作椭圆形的一种)与实际表面裂纹近似,且便于分析。G. R. Irwin<sup>[1]</sup>首先从理论上使半椭圆形表面裂纹分析成为可能,F. W. Smith<sup>[2]</sup>,Thomas A. Cruse<sup>[3]</sup>等探索了有限厚度板半椭圆形表面裂纹问题的数值解法,C. Dale Little 等<sup>[4]</sup>把表面裂纹技术应用到飞机表面缺陷的分析。随着表面裂纹研究的深入,表面裂纹试验技术已发展成一种试验标准,广泛应用到工程实践中。

航天技术的发展推动着材料低温性能的研究,材料在低温下的强度、韧性、断裂等性能受到人们的重视。由于低温实验条件和技术的限制,材料低温性能的研究与低温材料的实际应用很不相称,材料低温断裂性能的研究更少,且已有的工作大都采用紧凑拉伸试验方法<sup>[5,6]</sup>,低温下用表面裂纹法研究材料断裂性能国外尚未见有报道。

本文所研究的是航天器中经常使用的一种铝合金材料,通过焊接而制成容器。宇航容器应用在低温下,并承受很高的内压,这要求容器有较强的耐压性能。而整个容器最薄弱的环节为箱体焊缝,焊缝性能因而倍受关注。铝合金焊接一直是一个难题,由于工艺上的原因,不可

\* 本项目获国家自然科学基金资助

本文于1995年6月5日收到第1稿,1995年12月11日收到修改稿

避免地存在各种焊接缺陷,表面裂纹即为其中之一。容器的破坏往往是由这些细小的表面裂纹引发的,抑制和消除这些表面缺陷是提高焊缝承载能力的有效手段。为了反映焊缝材质,即抵抗表面裂纹失稳扩展的能力,本文采用表面裂纹法,对该种铝合金焊缝的低温断裂特性进行了初步研究,并结合断口的显微分析,力图为焊接工艺的改良提供可靠依据。

## 2 表面裂纹研究方法

图 1 是无限大三维体内的椭圆形裂纹示意图,  $a, c$  分别为短半轴和长半轴, 角  $\psi$  从长半轴开始。根据线弹性断裂力学理论, 无限大三维体内的椭圆形裂纹在均匀拉应力  $\sigma$  拉伸下的应力强度因子精确解为<sup>[7]</sup>:

$$K_I(\psi) = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\Phi} \left( \frac{a^2}{c^2} \cos^2 \psi + \sin^2 \psi \right)^{1/4} \quad (1)$$

其中: 
$$\Phi = \int_0^{\pi/2} \left( \frac{a^2}{c^2} \cos^2 \psi + \sin^2 \psi \right)^{1/2} d\psi \quad (2)$$

当  $\psi=0, \pi/2$  时, 即在椭圆的长、短半轴的顶点,  $K_I$  分别为:

$$K_I(0) = \frac{\sigma a \sqrt{\pi/c}}{\Phi} \quad (3)$$

$$K_I(\pi/2) = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\Phi} \quad (4)$$

沿着椭圆的边缘,  $K_I(0)$  最小,  $K_I(\pi/2)$  最大。

图 2 是置于有限厚平板上的半椭圆形表面裂纹示意图。  $W, B$  分别为板的宽度和厚度,  $L$  为板均匀段长度,  $a, 2c$  分别为裂纹的深度和宽度。点 1 和点 2 分别为裂纹的最深点和表面交界点。

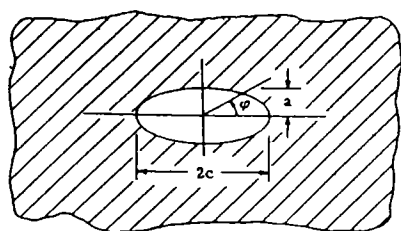


图 1 无限体内的椭圆形裂纹

Fig. 1 Elliptical crack in infinite solid

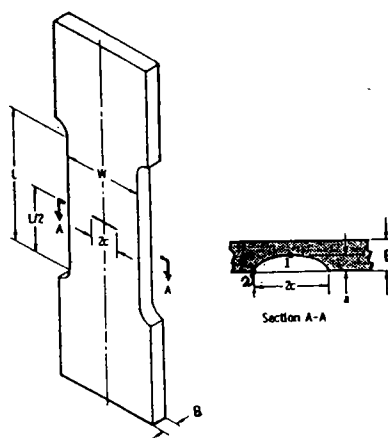


图 2 表面裂纹试样及裂纹形状

Fig. 2 Shapes of specimen and surface crack

有限厚板的半椭圆形表面裂纹尚无严格解。图 2 中 1 点的应力强度因子是通过式(4)进行修正而近似得到的<sup>[8]</sup>。其形式为:

$$K_I = M \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\Phi} \quad (5)$$

$M$  为修正因子,它体现着板前后两个表面的影响。

对于  $K_I$  的修正有多种方式,中国国家标准(GB7732-87)与美国标准(E740-88)均选用:

$$M = \{1.13 - 0.09(a/c)\} + \{-0.54 + 0.89[0.2 + (a/c)]^{-1}\}(a/B)^2 + \{0.5 - [0.65 + (a/c)]^{-1} + 14(1 - a/c)^{24}\}(a/B)^4 \quad (6)$$

并把  $\Phi$  近似为:

$$\Phi^2 = 1 + 1.464(a/c)^{1.65} \quad (7)$$

其中  $a/c < 1$ 。将  $M$ 、 $\Phi$  代入式(5)即得裂纹边缘最深点处(图2中1点)的  $K_I$  值,把该值乘一系数  $S$  可得裂纹边缘与表面交界处(图2中2点)的应力强度因子:

$$K_I' = K_I \cdot S \quad (8)$$

$$S = [1.1 + 0.35(a/B)^2](a/c)^{0.5} \quad (9)$$

当  $\sigma$  为拉伸曲线应变2%处的应力  $\sigma^*$  (相当于无缺口试样屈服应力  $\sigma_{0.2}$ ) 时,通常把1点的  $K_I$  作为板的断裂韧性  $K_{IB}$ 。要得到稳定有效的  $K_{IB}$  值,上述经验公式对试件尺寸有如下要求:

$$W/B = 6 \sim 10, \quad L/W = 1.5 \sim 2, \quad W/2c \geq 3, \quad a \text{ 和 } B - a \geq 0.50(K_{IB}/\sigma^*)^2.$$

对脆性材料,由于不能得到  $\sigma^*$ ,可用破坏应力  $\sigma_b$  代替进行断裂韧性的计算。

### 3 试件及实验系统

#### 3.1 试件

试件为航天铝合金板材焊缝试样,基体和焊体成分见表1,无裂纹焊缝试样的低温(20K)拉伸性能见表2。焊缝在试样中部,表面裂纹预制在焊缝中央。表面裂纹的预制方法为:先在试件表面置一半椭圆形缺口,再进行疲劳,通过控制疲劳过程,可得到合适尺寸的半椭圆形表面裂纹。图3为焊缝表面裂纹试样(阴影带为焊缝区)。

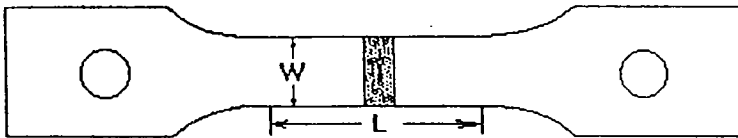


图3 焊缝表面裂纹试样

Fig. 3 Shape of welding specimen

表1 基体与焊体化学成分(%)

材料	Cu	Mg	Si	Mn	Ti	Zr	Al
基体	3.9-4.8	0.4-0.8	0.6-1.2	0.4-1.0	-	-	余量
焊体	4.1-4.8	-	1.3-1.7	-	0.2-0.3	0.22-0.35	余量

表2 无表面裂纹焊缝试样20K时拉伸性能

	$\sigma_b$ (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\delta_5$ (%)	备注
无裂纹焊缝试样	400-440	-	2.0-3.0	脆断

### 3.2 试验系统

低温试验在自行研制的多试样拉伸试验装置上进行,该装置包括加载、控温、采集等几部分,具有以下特点:

(1)试件及控温部分置于一密闭的低温容器中,试验过程中不能开启,观察;

(2)试验夹具采用滑槽结构,一次可以进行4个试样的拉伸试验。前一试样拉断后,后续试样通过自身重力滑进拉伸加载处,方便经济;

(3)试验所需温度通过控温部分调节。控温部分采用红外电炉进行控制,铂铑-金铁热电偶测量和显示温度,控温精度小于 $\pm 1\text{K}$ 。

(4)采用液氮(4.2K)或液氮(77K)作致冷剂,可控温度范围为4.2K-300K。

(5)试验过程中微机自动连续采集测量数据,并显示拉伸曲线。

## 4 实验结果及断口显微分析

### 4.1 实验结果

试验中,用液氮作致冷剂,调节温度到20K。图4为试验中采集到的典型的拉伸曲线(由于实验技术的限制,得到的是试件伸长量与应力的关系曲线,而不能直接得到裂纹张开位移与应力的关系曲线)。可以看到,拉伸曲线没有明显的塑性段,整个试样宏观上表现为脆性断裂。表3为多个试样的试验结果,所得到的 $K_{IB}$ 比较稳定。

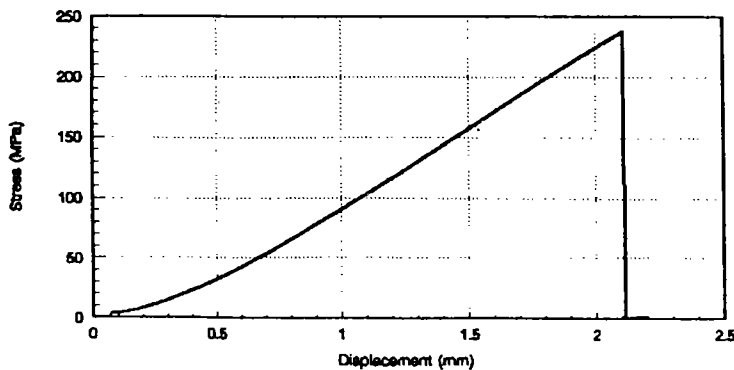


图4 典型的试件伸长量与应力关系曲线

Fig. 4 Typical tensile curve

表3 表面裂纹试样试验结果

试样编号	$W$ (mm)	$B$ (mm)	$a$ (mm)	$2c$ (mm)	$\sigma_s$ (MPa)	$K_{IB}$ (MPa $\cdot$ m $^{1/2}$ )
1	20.04	2.62	1.54	6.50	234.0	17.86
2	20.10	2.59	1.40	6.45	231.1	17.12
3	20.20	2.62	1.20	5.00	263.1	16.59
4	20.10	2.57	1.10	4.60	310.9	18.55
5	20.00	2.68	1.20	5.10	279.9	17.72

## 4.2 断口显微分析

为从微观上分析断裂特征,对试样断口进行了扫描电镜分析。

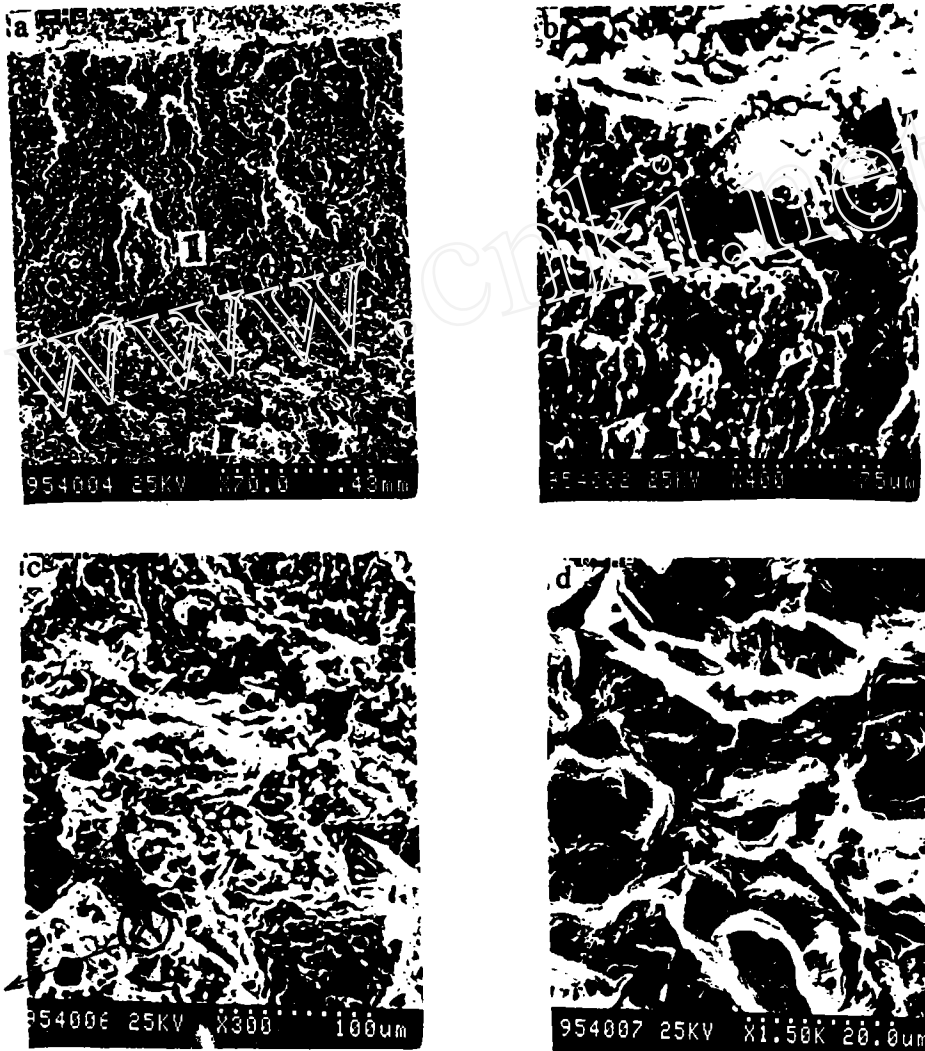


图5 断口扫描电镜照片

Fig. 5 SEM pictures of the fractured surfaces

图5为断口扫描电镜照片。a为低倍照片,从中可明显看出三个区域,I区为人工预制缺口区,II区为疲劳裂纹预制区,III区为裂纹破断区(无裂纹韧带区)。I区II区外貌平整,并能看出大大小小的孔洞,III区则很不规则。在照片b中可看到许多球状的小颗粒和气孔,这些小颗粒分布在气孔的周围,是在焊接过程中,熔融的金属遇气冷却凝结而成的共晶相,都属于焊接缺陷;在照片c中还可看到一类焊接缺陷:焊接裂纹(箭头处)。上述焊接缺陷严重影响了焊缝的力学性能。更高倍数照片d显示出断口外貌的撕裂岭,呈准解理断裂特征。表明焊缝断裂主要为脆性断裂,但也有一定的韧性。

## 5 结论

表面裂纹法研究铝合金焊缝的断裂性能是一种行之有效的方法,能很好的模拟焊缝中的实际裂纹。由于气孔、裂纹等焊接缺陷的存在,大大影响了焊缝的断裂性能,要提高焊缝的质量,就应改进焊接工艺,最大限度地减少各类焊接缺陷。

## 参 考 文 献

- [1] Irwin G R. *Journal of Applied Mechanics*, 1962, 29(4): 651—654
- [2] Smith F W. *The Surface Crack; Physical Problems and Computational Solutions*. ASME, New York, 1972, pp. 125—152
- [3] Thomas A. Cruse. *The Surface Crack; Physical Problems and Computational Solutions*. ASME, New York, 1972, 153—170
- [4] Dale Little C, Phillip M. Bunting. *The Surface Crack; Physical Problems and Computational Solutions*. ASME, New York, 1972, pp. 43—61
- [5] Cheng Y W, et al. *Advanced in Cryogenic Engineering*, 1984, 30: 303—318
- [6] Masao Shinada. *Advanced in Cryogenic Engineering*, 1990, 36B: 1095—1102
- [7] Newman J C. *Engineering Fracture Mechanics*, 1973, 5: 667—689
- [8] Orange T W. *JTEVA*, 1975, 3(5): 335—342

# Fracture Toughness of Surface Cracked Welding Seam of Al-alloy at Low Temperature

Tu Zhihua Zhang Zhong Zhao Lizhong

*(Cryogenic Laboratory, Chinese Academy of Sciences)*

Mao Tianxiang

*(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)*

Xia Yuanming

*(University of Sciences and Technology of China)*

**Abstract** In this paper, surface crack test method (SCTM) was used to study fracture toughness of surface cracked welding seam of Al-alloy at low temperature (20K). Tests were performed on a multi-specimen tensile apparatus and fractured surfaces were observed by scanning electron microscope (SEM). This study may provide a basis for high quality welding.

**Key words** Al-alloy weldment, surface crack, low temperature.

## 作 者 简 介

涂志华,男,1970年5月生。学士,助理工程师。在中国科学院低温中心从事材料低温力学性能的研究。现承担和参加了多项国家自然科学基金任务以及航天部部分课题。发表论文10余篇。