

# 不规则裂纹角度对渗透深度的影响

李桂英

(吉林省白城 89872 部队, 吉林白城 137001)

**摘要** 从渗透检测原理和规则裂纹渗透深度公式入手, 推导出不规则裂纹渗透深度的公式。

**关键词** 渗透检验 裂纹 原理

## EFFECT OF IRREGULAR CRACK ANGLE ON PENETRATING DEPTH

Li Guiying

(The PLA Unit 89872, Baicheng Jilin Province)

**Abstract** The formulae for penetrating depths of irregular cracks were derived from the principle of penetrant inspection and the formulae for the penetrating depths of regular cracks.

**Keywords** Penetrant Inspection Crack Principle

无损检测技术五大常规检测方法之一的渗透检测, 不受工件形状、大小和缺陷方向的限制, 设备和操作简单, 缺陷显示直观, 因此, 应用很广泛。我室自1991年至今, 已在试验中多次使用了渗透探伤技术, 并收到了其它探伤方法无法达到的效果。一般对检测技术的研究, 重点是研究其检测灵敏度。所谓灵敏度就是发现缺陷的能力, 渗透检测灵敏度主要由渗透检测材料的性能、操作的正确性、缺陷本身的性质以及渗透时的温度、压力和振动等因素决定。影响渗透检测灵敏度最重要的是缺陷本身的性质, 即缺陷的开口宽度、深度及长度等。目前, 对规则裂纹的渗透作用已有研究报道, 而对不规则裂纹的探讨还未见报道。本文首先从介绍渗透检测的原理及规则裂纹的渗透深度公式入手, 推导出不规则裂纹的渗透深度公式, 并对其进行讨论。

### 1 渗透检测原理简介

渗透检测是利用毛细管现象<sup>[1]</sup>, 使渗透液渗入缺陷, 去除表面多余渗透液后, 缺陷中的渗透液仍然保留, 再利用显象剂的毛细管吸附作用, 将缺陷中的渗透液吸附至工件表面, 从而达到检测的目的。这种方法适用于检查试件表面开口缺陷。对渗透检测的进一步研究, 是了解渗透液在开口缺陷中的渗透情况。以表面开口裂纹为例, 对其渗透原理加以讨论。

#### 1.1 毛细现象

润湿液体在毛细管中呈凹月面并上升, 不润湿

液体在毛细管中呈凸月面并下降的现象, 称为毛细现象。能够发生毛细现象的管子叫作毛细管, 一般指直径 $<1\text{mm}$ 的管子。

液固界面经液体内部到液气界面之间的夹角称接触角, 以 $\theta$ 表示(图1)。

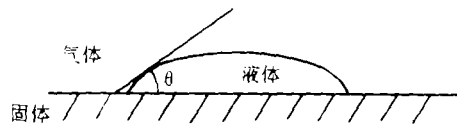


图1 接触角

在以接触角 $\theta$ 表示润湿性能时, 习惯上将 $\theta=90^\circ$ 定为润湿与否的判定标准。当 $\theta<90^\circ$ 时, 液体不呈球形, 且能覆盖固体表面, 此现象称润湿现象, 表明液体能润湿这种固体。 $\theta>90^\circ$ 时, 液体呈球形, 产生不润湿现象, 表示液体不能润湿这种固体,  $\theta$ 角越小, 润湿性能越好。

渗透检测中, 渗透液如果不能润湿被检工件, 就不可能进入被检工件的裂纹中, 检测也就失去了意义。所以, 渗透液都是润湿液体, 并且当 $\theta\leq 5^\circ$ 时,  $\cos\theta\approx 1$ 。用此类渗透液进行渗透检测, 可以得到较满意的检验结果。

#### 1.2 附加压强

液体表面存在着有使液体表面收缩的力, 称为液体表面张力, 它与液体表面相切, 是液体的一种特性。这种力使液体表面对其下的液体产生压强, 称附

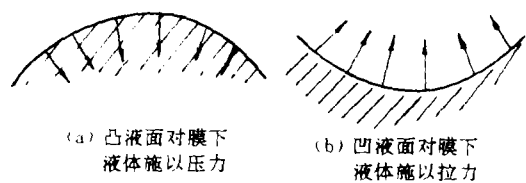


图2 液体的附加压强

加压强,如图2所示。

对于任意弯曲液面<sup>[2]</sup>(图3), $O$ 点是曲面上的任一点,过 $O$ 点作曲面法线 $ON$ ,包含 $ON$ 的 $P_1$ 面在曲面上截出的曲线 $A_1B_1$ 称正切口。对任意的球面来说,正切口都是一个圆,半径即为球的半径。对任意曲面,通过同一点 $O$ 的各个不同的正切口,是不同的几何曲线,曲率半径也不同。微分几何证明,任一对相互垂直的正切口的曲率之和 $C=1/R_1+1/R_2$ 都是相同的, $C$ 称为曲面在 $O$ 点的平均曲率。曲率中心在液面内时, $R_1$ 和 $R_2$ 取正值,在液面外时则取负值。计算结果证明任意弯曲液面下的附加压强为

$$P = \alpha \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

式中  $\alpha$ ——表面张力系数

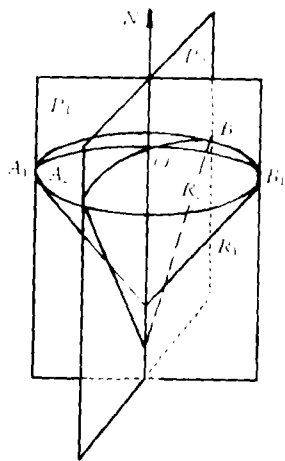


图3 任意弯曲液面

上式称拉普拉斯公式,若 $R_1=R_2$ ,即为球形液面;对于柱形液面, $R_1=R, R_2=\infty$ ,则 $P=\alpha/R$ 。

## 2 渗透液在规则裂纹中的渗透深度与裂纹的关系

如图4所示,试件表面在开口的裂纹上方喷涂渗透液,假设裂纹是规则的几何图形,渗透时,由于毛细管作用原理,渗透液渗入裂纹,裂纹中的空气的体积由原来的 $V_1$ 压缩成 $V_2$ ,高度由 $h_1$ 变为 $h_2$ ,达

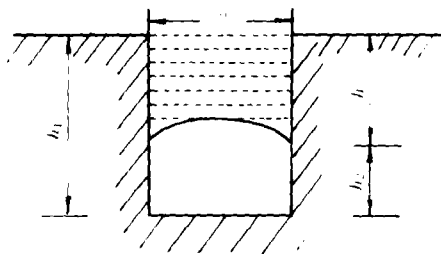


图4 规则裂纹中的渗透情况

到平衡时,由于渗透液是润湿液体,所以液面呈凹形。设裂纹中空气的压强由 $P_1$ 变为 $P_2$ ,则有

$$P_2 = P + P_0 + P' \quad (1)$$

式中  $P$ ——凹液面的附加压强

$P_0$ ——大气压强

$P'$ ——高度为 $h$ 的渗透液产生的压强

$$P' = \rho gh$$

$\rho$ ——渗透液的密度,与水相当

$g$ ——重力加速度

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

在实际检测中,裂纹的深度很小,仅几厘米甚至几毫米。渗透液中主要的液体是煤油和其它有机溶剂,因此,一般 $\rho_{\text{油}} < \rho_{\text{水}}$ ,即 $< 1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。取渗透液渗入裂纹的深度 $h=2\text{cm}$ ,有

$$P' = \rho gh = 1 \times 10^3 \times 9.8 \times 0.02 =$$

$$196 \text{ kg/m} \cdot \text{s}^2 = 0.00196 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

而 $P_0 \approx 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ,可以看出 $P_0 \gg P'$ ,因此,式(1)中完全可以不考虑 $P'$ 的影响,式(1)可写为

$$P_2 = P + P_0 \quad (2)$$

根据拉普拉斯定律 $P=\alpha/R$ ,如图5所示,凹液面的接触角是 $\angle OAO'$ ,在直角三角形 $OAO'$ 中, $R=r/\cos\theta$ ,如果把裂纹中的空气看成理想气体,且环境温度保持不变,根据理想气体状态方程,裂纹中的空气应满足

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (3)$$

上式中 $P_1=P_0$ ,设裂纹长为 $L$ ,宽为 $b$ ,深为 $h_1$ ,则

$$V_1 = h_1 \cdot b \cdot L \quad V_2 = h_2 \cdot b \cdot L$$

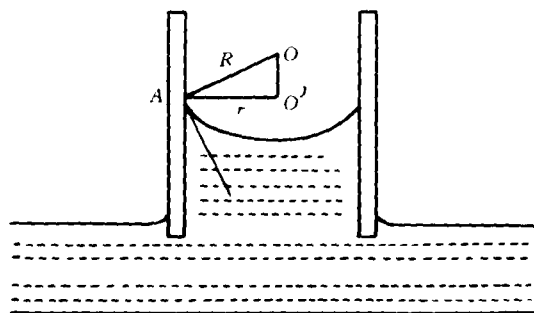


图5 毛细管插在润湿液体中

$$\therefore P_1 \cdot h_1 \cdot b \cdot L = P_2 \cdot h_2 \cdot b \cdot L$$

由式(2)和式(3)组成方程组,解得

$$\frac{h_1}{b} = h \left( \frac{P_0}{2a \cos \theta} + \frac{1}{b} \right) \quad (4)$$

目前,渗透检测机理主要基于对规则形状截面毛细管的研究<sup>[3]</sup>,而在实际检测中,碰到的表面开口裂纹几乎都是非规则形状截面毛细管,所以有必要对不规则形状的裂纹进行讨论,这也更接近于检测中的真实本质。

### 3 渗透液在不规则裂纹中的渗透深度与裂纹的关系

现讨论有角度裂纹的情况,如图6所示,G为EF上任意一点,把裂纹分为A和B两部分,且附加压强在液面任意处大小相等。

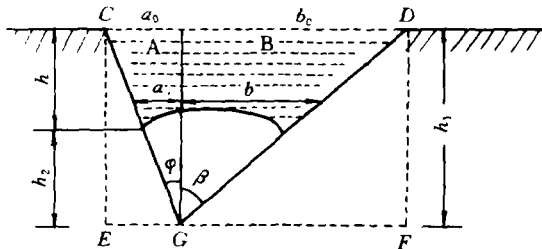


图6 不规则裂纹中的渗透

A部分:

$$P_1 V_{A1} = P_2 V_{A2} \quad P_1 = P_0$$

$$V_{A1} = \frac{1}{2} a_0 \cdot h_1 \cdot L = \frac{1}{2} a_0^2 \cdot \cot \varphi \cdot L$$

$$P_2 = P_0 + P = P_0 + \frac{\alpha}{R} =$$

$$P_0 + \frac{\alpha \cos \theta}{r} = P_0 + \frac{2\alpha \cos \theta}{a+b}$$

$$V_{A2} = \frac{1}{2} a \cdot h_2 \cdot L = \frac{1}{2} a^2 \cdot \cot \varphi \cdot L$$

$$\therefore P_0 \cdot \frac{1}{2} a_0^2 \cdot \cot \varphi =$$

$$\left( P_0 + \frac{2\alpha \cos \theta}{a+b} \right) \cdot \frac{1}{2} a^2 \cdot \cot \varphi$$

$$\text{即} \quad a_0^2 P_0 = a^2 \left( P_0 + \frac{2\alpha \cos \theta}{a+b} \right) \quad (5)$$

B部分:

$$P_1 V_{B1} = P_2 V_{B2} \quad P_1 = P_0$$

$$V_{B1} = \frac{1}{2} b_0 \cdot h_1 \cdot L = \frac{1}{2} b_0^2 \cdot \cot \beta \cdot L$$

$$P_2 = P_0 + P = P_0 + \frac{2\alpha \cos \theta}{a+b}$$

$$V_{B2} = \frac{1}{2} b \cdot h_2 \cdot L = \frac{1}{2} b^2 \cdot \cot \beta \cdot L$$

$$\text{即} \quad b_0^2 P_0 = b^2 \left( P_0 + \frac{2\alpha \cos \theta}{a+b} \right) \quad (6)$$

由式(5),(6)组成方程组,解得

$$a = \frac{a_0}{b_0} b$$

$$b = \frac{b_0^2}{2P_0 \cdot b_0(a_0 + b_0)} \left[ -2\alpha \cos \theta + 2\sqrt{\alpha^2 \cos^2 \theta + P_0^2(a_0 + b_0)^2} \right] = \frac{b_0}{P_0(a_0 + b_0)} \cdot$$

$$\left[ -\alpha \cos \theta + \sqrt{\alpha^2 \cos^2 \theta + P_0^2(a_0 + b_0)^2} \right]$$

渗透液的表面张力系数  $\alpha$  与水相当,  $\alpha = 0.073 \text{ N/m}$ ,  $\cos \theta \approx 1$ ,  $P_0 = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ , 设  $a_0 + b_0 = 0.1 \text{ mm}$ , 则

$$\alpha^2 \cos^2 \theta \approx 0.0053 \text{ N}^2/\text{m}^2$$

$$P_0^2(a_0 + b_0)^2 = 100 \text{ N}^2/\text{m}^2$$

$$\therefore \alpha^2 \cos^2 \theta \ll P_0^2(a_0 + b_0)^2$$

$$\therefore b = -\frac{b_0 \alpha \cos \theta}{P_0(a_0 + b_0)} + b_0$$

又由于在B部分中,  $h = (b_0 - b) \cot \beta$ , 于是

$$h = \frac{b_0}{a_0 + b_0} \cdot \frac{\alpha \cos \theta}{P_0} \cdot \cot \beta \quad (7)$$

同样在A部分中也可得到

$$h = \frac{a_0}{a_0 + b_0} \cdot \frac{\alpha \cos \theta}{P_0} \cdot \cot \varphi \quad (8)$$

式(7),(8)联立,得

$$h = \frac{1}{\text{tg} \varphi + \text{tg} \beta} \cdot \frac{\alpha \cos \theta}{P_0}$$

而在实际检测过程中,裂纹都是很尖锐的,  $(\varphi + \beta)$  很小, 所以  $\text{tg} \varphi \cdot \text{tg} \beta \ll 1$ ,  $\cot(\varphi + \beta) \approx 1/(\text{tg} \varphi + \text{tg} \beta)$

$$\therefore h = \frac{\alpha \cos \theta}{P_0} \cdot \cot(\varphi + \beta)$$

令裂纹的角度为  $\gamma$ ,  $\gamma = \varphi + \beta$ , 则

$$h = \frac{\alpha \cos \theta}{P_0} \cot \gamma \quad (9)$$

设  $a_0 + b_0 = c$  为裂纹开口宽度,  $h_1$  为裂纹深度, 则上式可转换成

$$h = \frac{h_1}{a_0 + b_0} (1 - \text{tg} \varphi \cdot \text{tg} \beta) = \frac{h_1}{c} (1 - \text{tg} \varphi \cdot \text{tg} \beta) \quad (10)$$

在以上讨论的矩形截面的裂纹中

$$\frac{h_1}{c} = h \left( \frac{P_0}{2\alpha \cos \theta} + \frac{1}{c} \right)$$

$$\therefore h = \frac{h_1}{c} \cdot \frac{1}{\frac{P_0}{2\alpha \cos \theta} + \frac{1}{c}}$$

设  $c = 0.01 \text{ mm}$ ,  $P_0 = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ,  $\alpha = 0.073 \text{ N/m}$ , 代入上式,得

## 第七届全国无损检测学术会议、展览会及国际无损检测技术交流研讨会 预交会议费用通知

中国机械工程学会无损检测分会委员会讨论决定,于1999年10月19~23日在广东省汕头市举办中国机械工程学会无损检测分会成立20周年纪念活动和召开第七届全国无损检测学术会议、展览会及国际无损检测技术交流研讨会(具体征文及参展等事项见《无损检测》杂志1998年第8期)。会议由中国机械工程学会无损检测分会主办、汕头超声仪器研究所承办、上海材料研究所协办。

欢迎广大无损检测同行参加会议,交流成果,获得信息,讨论无损检测的应用现状和发展趋势,促进我国无损检测事业的发展和科技进步,促进与世界各国、各地区无损检测同仁间的相互了解和合作,增进友谊。

请将撰写的第七届年会论文全文(5000字内,包括中、英文题目、摘要及单位名称,作者姓名用汉语拼音)于1999年3月31日前寄学会秘书处。打算在国际无损检测技术交流研讨会上用英文交流者,请在论文上注明“国际交流论文”,欢迎踊跃参加。

会议期间同时举办无损检测仪器设备展览会,欢迎无损检测厂商前往参加。

欲参加会议和展览会的单位和个人,请与学会秘书处联系,索取邀请函。

为了顺利地搞好这次活动,并把代表的服务工作做好(包括会议安排、住宿预订及膳食等方面),经

讨论决定,参加会议的代表,凡是在1999年7月31日前预交500元或全部交清者,会务费为900元人民币(含住宿、餐费、资料等费用);在1999年8月1日以后注册交费者,会务费为1200元人民币。务请会议代表积极配合,支持会议成功举办。付款请汇

开户行:工商银行汕头分行

户名:汕头超声仪器研究所

帐号:200-221036-26

欢迎广大从事无损检测的单位和个人对会议的召开积极提供赞助(资金或纪念品等方式),并提前通知学会秘书处及汕头超声仪器研究所。

有关会议、展览会事宜请与学会秘书处或汕头超声仪器研究所联系。

### 学会秘书处

地址:上海市辉河路100号 邮编:200437

联系人:朱亚青女士 展览会:王为纲先生

电话:021-65440277 传真:021-65440277

E-Mail:chsndt@public2.sta.net.cn

### 汕头超声仪器研究所

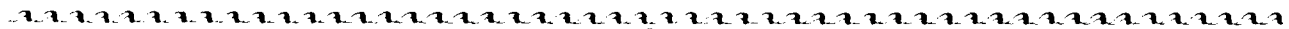
地址:汕头金砂中路 邮编:515041

联系人:谭大基先生

电话:0754-8250150 传真:0754-8251499

E-Mail:siui@siui.com

(无损检测学会秘书处)



$$h = \frac{h_1}{c} \times \frac{1}{69.5 \times 10^4} \quad (11)$$

比较(10)、(11)两式的大小,因为 $\frac{1}{69.5 \times 10^4} \ll 1$ ,且 $1 - \text{tg}\varphi \cdot \text{tg}\beta \approx 1$ ,而两式中的深宽比是一样的,所以式(11)的值小于式(10)的值。

## 4 结论

当裂纹宽度和深度都相同时,渗透液在有角度的裂纹中渗透得深。而在图6中,从式(9)可知,渗透液在裂纹中的渗透深度取决于渗透液的表面张力系数 $\alpha$ 、渗透液和工件的接触角 $\theta$ 、大气压 $P$ 以及裂纹的角度大小。在一般检测中,前面三个条件都是确定的,所以渗透液在裂纹中的渗透深度主要取决于裂纹的角度大小。从公式的推导过程中可以看出,渗透

深度与裂纹的长度无关。对于开口宽度相同的两个裂纹来说,裂纹越尖锐检测灵敏度越高。

对于渗透检测原理的研究,目前还远远不够,其理论也是远不能用上述情形所能完全阐述清楚的,还有待于无损检测人员继续探索。

## 参 考 文 献

- 1 全国锅炉压力容器无损检测人员资格鉴定委员会编写,渗透探伤,北京:劳动人事出版社,1989.
- 2 苏和,王文亮,基础物理手册,内蒙古:内蒙古人民出版社,1982.
- 3 杨诚成,蔡振岩,裂纹的渗透机理研究,无损探伤,1995(5):46-47

收稿日期:1997-05-15