

文章编号: 1001-4888(2009)06-0545-13

# 在役设备材料断裂力学参数测定方法综述 ——小冲杆实验力学研究进展之二\*

丁克勤<sup>1</sup>, 吴永礼<sup>2</sup>

(1. 中国特种设备检测研究院, 北京 100013; 2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

**摘要:** 20 多年以来, 用小型试件的小冲杆实验技术来测量在役设备材料的各种力学参数已经取得了很大进展。小冲杆实验的试样虽然还没有标准, 但一般均采用直径为 3 ~ 10mm, 厚度为 0.1 ~ 0.5mm 的圆片试样。这个方法已经用来确定材料的弹性模量、屈服强度、塑性性能、抗拉强度、断裂形态转变温度、断裂韧性、蠕变性能以及表示塑性硬化和韧性损伤的微观力学参数和黏塑性性能等各种力学性能。该方法兼具取样方便和几乎无损的优点, 非常适用于那些无法取出传统试样或取样不经济的场合, 因此引起科技界和工业界的关注。本文综述了小冲杆试验的测量技术及从测量数据来确定材料断裂形态转变温度、断裂韧性和主曲线的移动温度的各种计算方法研究进展。

**关键词:** 小冲杆试验; 断裂韧性; 断裂形态转变温度; 主曲线; 材料力学性能

**中图分类号:** TB302      **文献标识码:** A

## 0 引言

在役设备材料往往因为环境的影响如中子辐射以及中、高温使用时间长久等原因, 材料的性能一般都会发生相当的变化, 为了确保其使用环境下的安全, 那么能否对服役中的设备材料取微试样, 通过小冲杆试验来确定其韧脆转变温度和断裂韧性呢? 80 年代中期这方面的工作开始时仍然是为了满足核工业领域材料研究的需要, 到了 20 世纪 80 年代后期和 90 年代初研究已经慢慢扩展深入到电厂和石化行业。因为它们都面临着同样的难题: 如何既有效又经济地检验在役设备元件长期中高温服役后可能产生的脆化情况, 例如 CrMo 钢在中高温长期使用后的回火脆化问题, 奥氏体钢高温使用后的碳化物析出或相析出脆化等问题, 小冲杆试验技术无疑是一种相当吸引人的方法。本文将介绍从小冲杆试验的结果确定断裂形态转变温度、断裂韧性和主曲线移动温度的途径和分析方法。

## 1 断裂形态转变温度 (FATT)

断裂形态的转变温度 (FATT) 是材料韧性的一个重要的指标。为了保证设备运转在韧性的范围内, 其工作温度一定要高于其断裂形态转变温度。例如汽轮机的转轴, 需要在 FATT 温度之上才带负荷运行。通常的断裂形态转变温度是用冲击试验来进行的, 即夏比 V 型缺口 (Charpy-V) 试验。人们发现, 当试件的尺寸变小时, 其韧性增加, 断裂形态转变温度向左轴移动。图 1 中给出 Charpy-V 试验, 50% 尺寸 Charpy-V 试验以及小冲杆试验在不同温度下进行冲击试验的能量曲线。从图 1 可以看出,

\* 收稿日期: 2009-05-06; 修订日期: 2009-07-14

通讯作者: 丁克勤 (1968 - ), 男, 中国特种设备检测研究院研发部主任, 博士, 研究员。主要研究领域: 无损检测技术与仪器、结构健康监测与预警以及实验力学等。E-mail: KQDING@SINA.COM

小冲杆试验的断裂形态转变温度  $T_{SP}$  比标准的  $FATT$  低很多。其范围通常在  $-196$  到  $25$  之间。因此,必须建立小冲杆试验的断裂形态转变温度  $T_{SP}$  与标准的  $FATT$  的转换关系。这个关系是随材料的不同而不同的。

Baik 等<sup>[1]</sup> 首先用传统的夏比 V 型缺口试样测出夏比韧脆性转变温度 (DBTT) ( $T_{CVN}$ ) (通常该温度用 50% 结晶断面转变温度  $FATT$  表示); 然后用小冲杆法测出同一材料试件的韧脆性转变温度 ( $T_{SP}$ ); 所采用的小冲杆试验装置如图 2 所示, 该装置与其它小冲杆试验装置不同之处是有一个保温炉, 用来保持试验时的温度。试件取自进行过传统冲击试验的夏比 V 型缺口试样, 试件尺寸为  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$  的正方形, 厚度为  $0.5\text{mm}$ , 加载通过 Instron 材料试验机进行, 小冲杆的下压速度为  $0.02\text{mm/s}$ 。

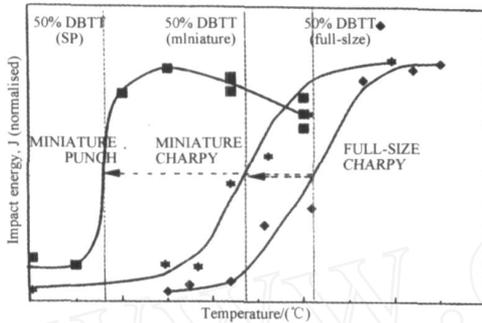


图 1 Charpy-V 试验, 50% 尺寸 Charpy-V 试验以及小冲杆试验

Fig. 1 Charpy-V test, 50% Charpy-V test and small punch test

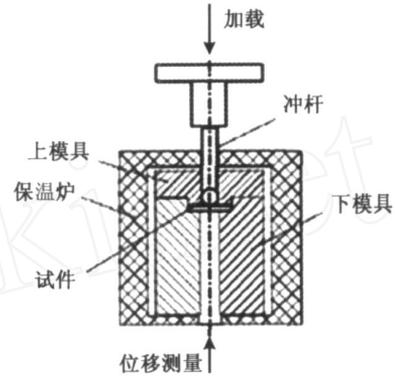


图 2 小冲杆试验装置示意图

Fig. 2 Schematic device for the small punch test

不同温度条件下的小冲杆试验结果表现为图 3 所示的载荷 - 挠度曲线。因为传统的冲击性能通过温度 - 冲击能量的形式来表现, 因此必须将图 3 提供的信息也转化为类似的温度 - 能量曲线。具体方法: 求取各温度下到断裂点为止载荷 - 挠度曲线与横、纵坐标所包围的面积, 并将其视为该温度下的 SP 能量, 从而获得一系列温度 - 能量数据。于是得到图 4 所示的 T-SP 及 T-CVN 能量曲线。

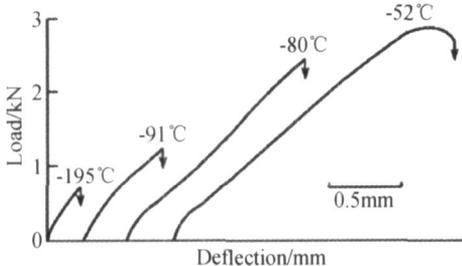


图 3 不同温度条件下的小冲杆载荷 - 挠度试验曲线

Fig. 3 The load-deflection curves of small punch test at different temperature

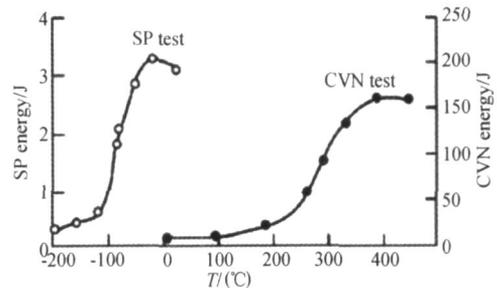


图 4 CVN 试验和 SP 试验的能量 - 温度曲线的比较

Fig. 4 Comparison for energy-temperature curves of CVN test and SP test

由图 4 可见, 虽然 SP 曲线在 CVN 曲线的左边偏上, 但两者在外形上是相似的, 都有上、下平台和明显的转变区, 因此可以认为两者一定存在某种联系。如果以韧脆性转变温度 (DBTT) 作为联系点, 以  $T_{SP}$  代表 SP 曲线上的 DBTT, 一般指 SP 上下平台的中间值; 以  $T_{CVN}$  代表 CVN 曲线上的 DBTT (即 50%  $FATT$ ), 有时也直接用  $FATT$ , 即表示与 50% 韧性 - 50% 解理断裂形貌相应的转变温度, 则可以得到:

$$FATT = T_{SP} + \quad (1)$$

式 (1) 中  $\alpha$  和  $\beta$  均为试验确定的常数。  $\beta$  是与应力状态有关的力学参数,  $\alpha$  是补偿的转变温度。这样的经验关系式说明, 可以通过小冲杆试验来获取本该由传统试样得到的冲击性能。

Baik 等<sup>[2]</sup> 还通过一系列试验表明:

- (1) 记录所确定的  $FATT$  值明显地高于相应的  $T_{SP}$ ;
- (2) 引入缺口或加快试验的应变速率均能提高  $T_{SP}$  的值;

(3) 材料的颗粒越大,  $T_{SP}$  的数据分散性越大。

Misawa 等<sup>[3]</sup>用聚变反应堆的结构材料 HT-9 和 JFMS 两种铁素体钢进行小杆冲压试验,进一步证明标准夏比 V 型缺口冲击试验和小冲杆试验所得的韧脆转变温度(DBTT)之间的关系可以用式(1)表示。

Foulds 等<sup>[4]</sup>对 CrMoV 钢进行了测试,得到式(1)的两个系数值,结果为:

$$FA TT( ) = 3.15( T_{SP} ) + 500 \tag{2}$$

Bulloch 等<sup>[5,6]</sup>也进行了小冲杆的试验研究,他们认为用下面的非线性关系能更好地描述 FA TT 与  $T_{SP}$  之间的关系:

$$FA TT = C / T_{SP}^2 \tag{3}$$

式中 C 为比例常数,根据试验数据来确定。

对于 CrMoV 钢,将一系列测试结果进行分析,认为式(2)比较合理地反映 100 ~ 300 范围内的数据,而下式则相当好地描述整个试验温度范围内的数据:

$$FA TT = 1.92 \times 10^6 / T_{SP}^2 \tag{4}$$

Foulds 等<sup>[7]</sup>对 CrMoV 转子钢的 17 个转子进行了一系列大量的试验研究,并进行回归分析,最后得到 FA TT 的最佳拟合方程:

$$FA TT( ) = 457.61 + 2.536 T_{SP}( ) \tag{5}$$

## 2 断裂韧性

目前提出的确定断裂韧性的分析方法有 6 个,下面分别介绍这些成果。

### 2.1 断裂形态转变温度(FA TT)和断裂韧性

在一些文献中将此方法称为两步法,第一步确定断裂形态转变温度,这一点已在前面介绍了;第二步寻找断裂形态转变温度和断裂韧性  $K_{IC}$  的关系,由此确定  $K_{IC}$ 。

Viswanathan 和 Gehl<sup>[8]</sup>应用 Begley 和 Logsdon<sup>[9]</sup>提出的公式来计算断裂韧性  $K_{IC}$ :

$$K_{IC}^2 = 5( CVN - 0.05 \sigma_y ) \tag{6}$$

式中  $\sigma_y$  为屈服强度(ksi);CVN 为夏比缺口试验上平台的冲击能(Ft-lbs);  $K_{IC}$  为断裂韧性(ksi  $\sqrt{in}$ )。此式用英制单位,在应用时要注意。在下平台温度时,右边括号中的第二项要用  $0.5 \sigma_y$ ,而取上平台和下平台断裂韧性的平均值作为在 FA TT 温度时的  $K_{IC}$ 。这样,在三个不同的温度,有三个不同的断裂韧性值。于是可得到断裂韧性  $K_{IC}$  和温度的曲线图 5。从此图可以看出,式(6)预测的断裂韧性  $K_{IC}$  高于实际的值。

此外,他们还用 Jones<sup>[10]</sup>提出的断裂韧性  $K_{IC}$  和超出温度(T-FA TT)的关系式计算提出的断裂韧性  $K_{IC}$ :

$$K_{IC} = \frac{10800}{108 - ( T - FA TT )} \tag{7}$$

式中 T-FA TT 称为超出温度(excess temperature),单位是 °F;断裂韧性  $K_{IC}$  也用英制单位。图 6 给出了断裂韧性和超出温度的曲线,可以看出式(7)的结果与下限线比较接近。

Schwant 和 Timo<sup>[11]</sup>提出的转换关系如图 7 所示。

Shekhter 等<sup>[12]</sup>总结了文献[13 - 15]所给出的一些 CVN 冲击试验数据和断裂韧性  $K_{IC}$  之间的关联方程,列于表 1。他们将式(5)和表 1 中的公式结合起来,建立小冲杆试验和断裂韧性  $K_{IC}$  之间的关联方程。

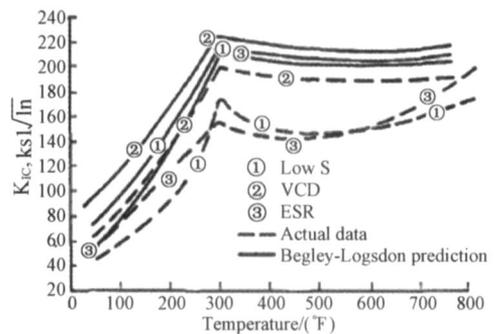


图 5 高纯 CrMoV 转子钢的  $K_{IC}$  和温度关联曲线

Fig. 5  $K_{IC}$  versus temperature correlation for high purity CrMoV rotors

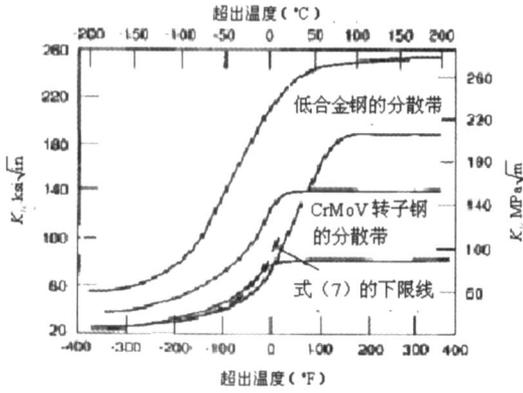


图6 CrMoV 转子钢的  $K_{IC}$  和超出温度关联曲线  
Fig. 6  $K_{IC}$  versus excess temperature correlation for high purity CrMoV rotors

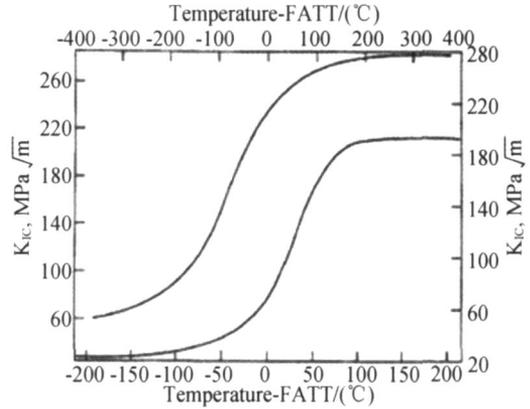


图7 FATT 与断裂韧性  $K_{IC}$  的关系  
Fig. 7 FATT versus fracture toughness  $K_{IC}$

表2 给出在役、脱脆和再脆化试件在室温下的断裂韧性的试验结果。应用 CrMoV 钢的关联方程(5)和表1的各个关联方程均可计算断裂韧性。可以看出,表1的各个关联方程模型给出相同的倾向,只有 Begley-Logsdon 法有些不同。而 Jones 的方法最接近于试验所得的值。表2中最后一列的断裂韧性是从关联式(5)和 Jones 法得到的。

表1 CVN 冲击试验数据和断裂韧性  $K_{IC}$  之间的关联方程

Tab. 1 Correlation equation of CVN test data and fracture toughness  $K_{IC}$

提出者	关联方程	适用的范围(CVN 的能量)	参考文献
Barsom-Rolfe	$K_{IC}^2 = 0.22(CVN)^{3/2}$	3 ~ 82 J	[14]
Sailors-Cortens	$K_{IC} = 14.6(CVN)^{1/2}$	7 ~ 68 J	[14]
Thorby-Ferguson	$K_{IC} = 18.2(CVN)^{1/2}$	6 ~ 55 J	[14]
Marandet-Sanz	$K_{IC} = 20(CVN)^{1/2}$	下面的平台	[14]
Begley-Logsdon	$K_{IC-Ls} = 0.093 \cdot 0.2$	下面的平台	[13]
Jones	$K_{IC} = 6600/60(T-FATT)$	下面的平台	[15]

表2 断裂韧性的关联性

Tab. 2 Correlation of the fracture toughness

级	条件	CVN FATT ( )	SPTT ( )	$K_{IC}$ (MPa·m <sup>1/2</sup> )	从式(5)预测的 SPTT( )	计算得到的 $K_{IC}$ (MPa·m <sup>1/2</sup> )
1	在役	125	- 133	35.8	120.3	42.5
3	在役	150	- 120	30	153.2	35.1
12	在役	100	- 145	49	89.8	52.8
1	脱脆	100	- 148	57	82.2	56.3
3	脱脆	110	- 135	55.5	115.2	43.9
12	脱脆	100	- 145	49	89.8	52.83
3	再脆化	145	- 125	52	140.6	37.6
12	再脆化	95	- 132	53	122.8	41.8

## 2.2 等效断裂应变和断裂应力与断裂韧性的经验公式

Mao<sup>[16]</sup> 等用 HT-9 等 5 种材料进行了小冲杆试验,材料室温下的力学性能列于表 3,使用的试件为 10mm × 10mm 的正方形,厚度为 0.5mm,冲压试验时下模具的小孔半径为 2.0mm,冲压的钢珠直径为 2.4mm。表 3 中的  $J_{IC}$  是单试件技术确定的<sup>[17,18]</sup>。

为了研究小冲杆试验的变形过程,先进行一次小冲杆试验,记录载荷 - 位移 ( $P - w$ ) 曲线,然后用一组试件进行小冲杆试验,这一组试件的各个试件在加载到载荷 - 位移曲线上的不同载荷时就卸载,在卸载后,用显微镜可观察到这些卸载试件表面上有圆形的接触区,这个圆形区的半径就定义为接触区半径。

表 3 室温下的力学性能 ( $J_{IC}$  由单试件技术测定)

Tab. 3 Mechanics Behaviour at room temperature ( $J_{IC}$  is determined by single Specimen technique)

材料	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$J_{IC}$ (kJ · m <sup>-2</sup> )
HT-9	725	896	60
9CR	-	666	325
A533B	495	620	219
A508	450	590	275
Cr-BE-Co	600	800	22

此外,他们还用光学显微镜测量了各个试件的厚度  $t$ ,并将各个试件的  $t/t_0$  和  $w/r_0$  数据进行回归分析,得到如下的拟合公式:

$$t/t_0 = \exp[-(w/r_0)^{3/2}] \quad (8)$$

式中  $t_0$  和  $r_0$  为试件的初始厚度和半径(即下模具的小孔半径);  $t$  和  $w$  为实验所测的厚度和中心点位移;  $\beta = 0.15$ , 为根据实验数据回归分析而定的参数。

引用 Chakrabarthy<sup>[20]</sup> 提出的薄膜理论来计算等效应变  $\bar{\epsilon}$ :

$$\bar{\epsilon} = (w/t)^{3/2} \quad (9)$$

若用  $w_{\max}$  表示试件断裂时的位移,  $\bar{\epsilon}_c$  表示试件的等效断裂应变,则有:

$$\bar{\epsilon}_c = (w_{\max}/t)^{3/2} \quad (10)$$

上式是根据测量结果和塑性理论结合而得的,所以可称为半分析法。Mao 等将半分析法的等效应变和重结晶蚀刻法所得的等效应变进行了比较,两者沿径向的分布相当一致。

根据 Bayoumi 等<sup>[21]</sup> 的研究,在平面应变条件下,弹塑性区的断裂韧性  $J_{IC}$  和等效断裂应变  $\bar{\epsilon}_f$  满足下面的关系:

$$J_{IC} = C_1 \bar{\epsilon}_f + C_2 \quad (11)$$

式中  $C_1$  和  $C_2$  是材料力学性能和微结构相关的参数。

Mao 等根据小冲杆试验结果和回归分析得到线性关系式:

$$J_{IC} = k \bar{\epsilon}_c - J_0 \quad (12)$$

其中

$$k = 280 \text{ kJ/m}^2, J_0 = 50 \text{ kJ/m}^2 \quad (13)$$

Mao 等<sup>[22,23]</sup> 在用小冲杆试验研究受辐照的铁素体钢的损伤时,就是用上述公式来分析材料辐照后的断裂韧度。

为了研究核电站中辐射对材料力学性能的损伤, Mao 等<sup>[24]</sup> 又对直径为 3.0mm, 厚度为 0.25mm 的更小型试件进行了与上面相同的小冲杆试验,这种试件实际上是用于透射电镜 (TEM) 检测用的。所用的材料为 SUS316, PCA 和 HT-60 三种材料,试验表明,这种更小的试件,也能用于小冲杆试验来测得材料的强度性能和断裂韧性  $J_{IC}$ 。得到的等效断裂应变表达式与 (9) 的指数值有些不同:

$$\bar{\epsilon}_c = (w_{\max}/t)^2 \quad (14)$$

所确定的式 (12) 和 (14) 中的参数值为:

$$= 0.09, k = 345 \text{ kJ/m}^2, J_0 = 113 \text{ kJ/m}^2 \quad (15)$$

Kameda 和 Mao<sup>[22]</sup>在研究辐射对材料力学性能的损伤中采用前面所述的两种不同大小的试件进行了小冲杆试验,第一种等效为 SP 试件,第二种称为 TD 试件。试验结果表明,等效应变  $\bar{\epsilon}$  和  $w/t$  之间的指数关系(10)仍然成立,只是指数值有些不同:

$$\bar{\epsilon} = (w/t)^{1.72} \quad (16)$$

根据测量数据拟合得到  $\bar{\epsilon} = 0.12$ 。TD 试件数据的分散性比 SD 试件的大。断裂韧性  $J_{IC}$  的结果为:

$$J_{IC} = 345 \bar{\epsilon} - 113 \quad (\text{kJ/m}^2) \quad (17)$$

表 4 列出了中子辐照对两种材料断裂韧性  $J_{IC}$  的影响。最后一列的  $J_{IC}$  是用紧凑拉伸 (CT) 试验测得的。可以看出,第一种材料的小冲杆试验所估计的  $J_{IC}$  值要比紧凑拉伸试验测得的值低 20% ~ 25%。

表 4 中子辐照对断裂韧性  $J_{IC}$  的影响

Tab. 4 The effect of neutral irradiation on fracture toughness  $J_{IC}$

材料	试件和辐照	$w_{\max}$	$\bar{\epsilon}_{gf}$	测量的 $J_{IC}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$J_{IC}$ (kJ/m <sup>2</sup> )
2.25Cr-1Mo 钢	TD, 无辐照	0.78	0.85	180	245
2.25Cr-1Mo 钢	TD, 辐照	0.68	0.67	117	148
掺铜铁合金	SP, 无辐照	2.07	1.38	363	-
掺铜铁合金	SP, 辐照	1.85	1.14	280	-

Suzuki 等<sup>[26]</sup>对 2.25Cr-1Mo 钢得到下述的线性关系:

$$J_{IC} (\text{kJ/m}^2) = 357 \bar{\epsilon} - 121 \quad (18)$$

Lee 等<sup>[27]</sup>对碳钢得到:

$$J_{IC} (\text{kJ/m}^2) = 370 \bar{\epsilon} - 40 \quad (19)$$

Geary 和 Dutton<sup>[28]</sup>用同类材料则得到:

$$J_{IC} (\text{kJ/m}^2) = 123 \bar{\epsilon} + 135 \quad (20)$$

Mao 等<sup>[29]</sup>根据大量的数据分析后,认为用下式能较好地描述这些数据:

$$J_{IC} (\text{kJ/m}^2) = 339 \bar{\epsilon} - 119 \quad (21)$$

他们根据结果分析后认为,绝大部分韧性材料的断裂韧性和双轴断裂应变之间为线性关系,对于韧性较小的材料,则有非线性倾向,这是由于断裂应变小于 0.2 的原因。

他们将上述研究中得到的  $J_{IC}$  称为延性断裂韧性,在文献[30]中则将研究转向陶瓷和功能梯度材料等材料的断裂韧性  $K_{IC}$ ,并将其称为脆性断裂韧性。这种材料在使用时的零件都比较小,所以一般不宜制成较大试件来测量它们的力学性能,于是,小冲杆试验是合适的方法,他们使用的材料为 SiC, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 等陶瓷材料,从小冲杆试验的载荷 - 位移曲线得到断裂应力  $f_{(SP)}$  的经验公式为:

$$f_{(SP)} = 130 \frac{P_{\max}}{t_0} - 320 \quad (22)$$

式中  $P_{\max}$  和  $t_0$  为试验中的最大载荷和试件的初始厚度,应力单位为 MPa。根据美国 ASTM E399-78 的标准测量这些材料的脆性断裂韧性  $K_{IC}$ ,这些材料的  $K_{IC}$  和  $f_{(SP)}$  数据在双双对数坐标中显示为线性关系,于是得到如下的关系式:

$$K_{IC} = C f_{(SP)} \quad (23)$$

式中  $C$  和  $n$  为两个拟合参数,对这些材料:

$$C = 0.07, n = 2/3 \quad (24)$$

这样 Mao 等成功地实现了用小冲杆试验测量材料断裂韧性  $K_{IC}$  或  $J_{IC}$  的设想。他们认为,在小冲杆试验所得的载荷 - 位移曲线中,若非线性位移  $w_{\text{non}}$  与断裂位移  $w_{\max}$  之比大于 0.6,可认为这种材料为韧性材料,用  $J_{IC}$  的计算式,若这个比值小于 0.2,可认为这种材料为脆性材料,则用  $K_{IC}$ ;若这个比值在

0.2 和 0.6 之间,则材料是脆性还是韧性的问题还有疑问。

### 2.3 应变能密度和断裂韧性

Foulds 等<sup>[31,32]</sup>介绍了美国电力研究院(EPRI)用小冲杆试验确定材料断裂韧性  $J_{IC}$  的方法。他们认为 Mao 等人的  $K_{IC}$  和  $J_{IC}$  估算公式都属于经验式,与材料无关,不符合实际。而用断裂时的等效应变也不合理。他们在小冲杆试验中测定了开裂点相应的载荷和位移,再用有限元法进行计算分析,并用应变能密度准则来确定断裂韧性。这个方法的步骤如下:

(1) 记录载荷 - 位移曲线和开裂点。在进行小冲杆试验时,用带摄像机的管道镜监视凸出的试件表面,以确定裂纹起始点,图像放大倍数约为 50 倍,图像和载荷 - 位移曲线同步记录,所以能确定载荷 - 位移曲线上的裂纹起始点,只要裂纹长度达到 0.05mm 时,管道镜和摄像系统就能确认裂纹起裂。图像也能确定裂纹在试件上的位置(即与冲杆轴的距离),在以后试验结果分析时,裂纹位置和载荷 - 位移曲线上的开裂点是重要的输入数据。

(2) 确定材料弹塑性力学参数:弹性模量、屈服强度、塑性硬化指数和系数。采用变参数的有限元法,即假定若干组材料的弹塑性力学参数,用有限元法对小冲杆试验进行大变形弹塑性计算,计算中考虑冲杆头与试件的接触,最后得到若干条载荷 - 位移曲线,将实测的载荷 - 位移曲线和计算所得的载荷 - 位移曲线进行比较,最接近实测曲线的计算曲线所对应的材料弹塑性力学参数即为试件材料的弹塑性力学参数。

(3) 确定断裂准则,根据获得的材料弹塑性力学参数再进行小冲杆试验的有限元计算,确定开裂时的局部应变能密度,并将此作为材料的开裂临界值,即断裂准则。

(4) 计算紧凑拉伸试件的临界载荷。根据获得的材料弹塑性力学参数,用有限元计算 ASTM 标准的紧凑拉伸试件(CT)加载时的响应,当裂纹尖端的应变能密度达到上一步的应变能密度临界值时,其相应的载荷便是临界载荷。

(5) 确定紧凑拉伸试件的  $J_{IC}$ 。根据 ASTM 手册计算 CT 试件的  $J_{IC}$ 。这个断裂韧性  $J_{IC}$  就是实际试件材料的断裂韧性。

这种方法的优点是以计算分析的方式解释了小冲杆载荷 - 挠度曲线,所得结果与材料无关,适用性强。在裂纹尖端的应变能密度具有奇异性,Foulds 在计算应变能密度时,是计算裂纹尖端前一个长度上的平均值来进行分析比较的,这个区域大小,直接影响着计算结果,这是有待改进的地方。此外,寻找其他的断裂准则代替应变能密度准则,也是值得研究的方向。

### 2.4 小冲杆能量和断裂韧性

Bulloch<sup>[33]</sup>对爱尔兰 ESB 的一些小冲杆试验结果<sup>[29]</sup>进行小冲杆能量和等效断裂应变之间的关系研究。小冲杆能量是指小冲杆试验所得的载荷 - 位移曲线下的面积,它等于外力所做的功,用  $E_{SP}$  表示,单位为焦耳(Joules,简称为 J)。因为小冲杆试验时,试件的应力近似于双向应力状态,等效断裂应变也称双轴断裂应变,用  $B$  表示,它与前面  $\bar{\epsilon}$  是相同的。

型号为 IP37 的 CrMoV 螺栓钢试验结果得到小冲杆能量和双轴断裂应变之间存在如下的线性关系:

$$B = 0.535 E_{SP} - 0.024 \quad (25)$$

上式的关联系数为 0.983。

其他三种型号 IP42, IP43 和 HP11 的 CrMoV 螺栓钢试验结果与 IP37 相似,分别可表示为:

$$B = 0.502 E_{SP} - 0.001 \quad (26)$$

$$B = 0.492 E_{SP} - 0.003 \quad (27)$$

$$B = 0.472 E_{SP} - 0.048 \quad (28)$$

上述三式的关联系数分别为 0.997, 0.945 和 0.994。

将这四种材料的 38 个试验数据合在一起后,小冲杆能量和双轴断裂应变之间关系仍可用线性关系来拟合,公式表示如下:

$$B = 0.492 E_{SP} - 0.029 \quad (29)$$

上式的关联系数为 0.973。

随后 Bulloch 分析<sup>[2,7,27,34-40]</sup>中的试验数据,将这些参考文献中的 C-Mn 和低合金钢的 90 个试验结果进行分析。最后认为可以用下式来最好地拟合 90 个数据点:

$$B = 0.58 E_{SP} + 0.052 \quad (30)$$

上述结果表明,对于大量的低合金钢的小冲杆试验,双轴断裂应变和小冲杆能量之间统计地满足线性关系。

Bulloch 接着研究双轴断裂应变与断裂韧性  $J_{IC}$  的关系。实际上,有一些工作已经表明双轴断裂应变和韧性材料的断裂韧性  $J_{IC}$  之间也存在线性关系文献<sup>[17,26,27,28,29,41,42]</sup>,但是,可以看出,不同的材料有不同的线性倾向。另一个特点是双轴断裂应变都在 0.2 以上。

有了双轴断裂应变和能量的关系以及双轴断裂应变和断裂韧性的关系,就可以得到能量和断裂韧性的关系。

例如根据 CrMoV 钢的双轴断裂应变和能量的关系(26)和 Mao<sup>[17]</sup>的双轴断裂应变和断裂韧性的关系式就可得到:

$$J_{IC} (\text{kJ}/\text{m}^2) = 209.3 E_{SP} - 192.6 \quad (31)$$

若改用 Mao 等<sup>[26]</sup>以后的结果,则得到:

$$J_{IC} (\text{kJ}/\text{m}^2) = 166.1 E_{SP} - 109.2 \quad (32)$$

根据 Lee 等<sup>[24]</sup>的关系式,则有

$$J_{IC} (\text{kJ}/\text{m}^2) = 181.3 E_{SP} - 92.3 \quad (33)$$

与 Geary 等<sup>[25]</sup>的公式相结合可得到:

$$J_{IC} (\text{kJ}/\text{m}^2) = 60.3 E_{SP} + 138.6 \quad (34)$$

从最早的对于 CrMoV 螺栓钢的小冲杆能量结果<sup>[34]</sup>已经表明:下平台的能量,转变温度处的能量和上平台能量的值分别相应于 0.3J,0.75J 和 1.4J。

Bulloch<sup>[30]</sup>和 Lee 等<sup>[24]</sup>也分别对 R3NiCrMo 转子钢和 C-Mn 钢报导了类似的情况。

关凯书等<sup>[43]</sup>也应用此法从小冲杆试验确定材料的断裂应变和小冲杆能量之间的关系式,然后再确定断裂韧度和小冲杆能量之间的关系式,对 2.25Cr1Mo 回火脆态、脱脆态、焊缝区及 1.25Cr0.5Mo 钢、20 号钢 5 种材料的断裂韧度和小冲杆能量进行分析,最后得到如下的关系:

$$J_{IC} = 1.97 E_{SP} - 216.16 \quad (\text{kJ}/\text{m}^2) \quad (35)$$

其中  $J_{IC}$  是用三点弯曲试验得到的。

这个方法与前面 2.1 节两步法有些相似,也是通过两个经验关系式来确定断裂韧性,因此,所得的结果误差较大。

## 2.5 用缺口试件测量断裂韧性

断裂韧性毕竟是与裂纹相关的问题,因此,韩国的 Ju 等<sup>[44]</sup>提出用深缺口试件的小冲杆试验来评估断裂韧性(参见图 8)。

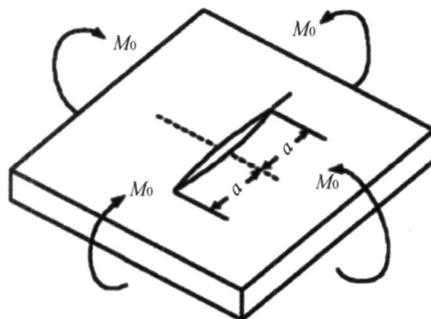


图 8 含裂纹的无限大板受均匀弯矩作用

Fig. 8 Infinite plate containing crack and subject to uniform bending

为了得到基于断裂力学的断裂韧性,必须确定裂纹的起裂点,根据带穿透裂纹的薄板理论<sup>[46]</sup>分析,

再应用裂纹的起裂点载荷  $P_i$ , 得到带穿透裂纹的薄板在弯距作用下的断裂韧性:

$$K_{Ic} = \frac{3}{2} \frac{P_i(1+\nu)}{h^2} \left[ \ln \frac{c}{b} + \frac{b^2}{4c^2} \right] \sqrt{a} \quad (36)$$

下一步就是进行小冲杆试验, 并确定式(35)中的裂纹起始点的载荷  $P_i$ 。试件的材料为 ASME SA 508 级的三种钢: SA508-1, SA508-2 和 SA508-3。小冲杆试验的试件为 10mm × 10mm 的方板, 厚度为 0.5mm, 切取试件后, 用线切割机在试件的中心部分切出椭圆形穿透缺口, 椭圆的长轴 1.0mm, 短轴 0.5mm, 深缺口顶点半径约 2.0mm。

小冲杆试验的设备与前面介绍的相同。冲压的钢珠直径为 2.4mm, 硬度大于 HRC50。试验温度为液氮(LN) 温度 77 °K 和室温 298 °K。进行了带缺口和不带缺口的两种试验。

为了确定裂纹起始点, 将声发射(AE) 传感器固定在试验设备的下夹具上。有些试件的试验在中间停止, 用扫描电镜(SEM) 检查试件的开裂, 扫描电镜也用于研究断裂模式和裂纹扩展。

表 5 小冲杆试验和主曲线法(ASTM E1921) 得到的断裂韧性 (MPa · m<sup>1/2</sup>)

Tab.5 Fracture toughness values obtained by SP tests and ASTM E1921 master curves method (MPa · m<sup>1/2</sup>)

材料	小冲杆试验 77 °K	小冲杆试验 298 °K	主曲线 77 °K	主曲线 298 °K	参考温度 $T_0$ ( ° )
SA 508 - 1	38.19	57.03	35.75	245.96	- 64.5
SA 508 - 2	35.03	52.55	33.61	243.99	- 40.0
SA 508 - 3	41.02	59.43	37.02	249.21	- 75.0

表 5 给出了小冲杆试验所得的断裂韧性值, 由于测量的数据有些分散, 表中给出的是平均值。表中还列出了按美国 ASTM 标准<sup>[47]</sup> 中的 SA508 主曲线得到的断裂韧性值。主曲线法就是建议用统计概率模型来确定转变区表示断裂韧性的参考温度(或称特征温度)  $T_0$ , 用主曲线来表示断裂韧性与温度的关系式为:

$$K_{Ic(\text{med})} = 30 + 70e^{(0.019(T - T_0))} \quad (37)$$

式中  $K_{Ic(\text{med})}$  是从主曲线计算得到的平均断裂韧性;  $T_0$  是 25mm 厚试件的断裂韧性为 100MPa · m<sup>1/2</sup> 情况所对应的温度, 这个温度是用带预制裂纹的夏比加载试验来确定的<sup>[48]</sup>。用主曲线法计算的断裂韧性一般用 5% 的回归曲线表示, 在液氮温度和室温下的偏差分别约为 5MPa · m<sup>1/2</sup> 和 120MPa · m<sup>1/2</sup>。

从表 5 可以看出, 在液氮温度下, 小冲杆试验的结果与标准试验的结果相当接近, 在室温下, 小冲杆试验的结果要比主曲线的结果低得多。在室温下, 用主曲线法得到的断裂韧性值包括较大的塑性变形, 从小冲杆试验试样断口可以看出, 即使在深切口顶点的裂纹已经萌生, 随后有塑性变形和裂纹的逐渐扩展, 但是, 小冲杆试验的断裂韧性仍是基于线弹性力学的分析, 因此, 可以考虑用  $J$  积分来分析。

## 2.6 哑铃形小试件和人工神经网络

Partheepan 等<sup>[49]</sup> 提出用如图 9a 所示的哑铃形小试件进行单向拉伸试验, 测量载荷和伸长曲线。这种试件与一般的小冲杆试验试件不同, 在用有限元法分析时, 可用平面应力问题计算, 不必考虑接触问题, 所以比较简单。这个试件是由直径为 10mm 的圆片制成, 上下两个圆孔是加载用的, 图 9b 给出了有限元网格和加载点。研究的 5 种材料为 AR66 铝合金和 D3、H11、LC、MC 钢。

应用哑铃形小试件的拉伸试验结果来分析。将试验所得的载荷 - 伸长曲线离散后得到力向量, 把这个力向量作为神经网络的输入, 应用人工神经网络(ANN) 得到了断裂韧性值, 结果列于表 6, 表中还给出了按照美国 ASTM 标准 E399<sup>[49]</sup> 测量的 AR66Al-alloy 材料的断裂韧性值, 采用的是标准紧凑拉伸试件。对于其他材料, 因没有紧凑拉伸试件这种厚度的材料, 因此, 用裂纹尖端张开位移(CTOD) 来得到断裂韧性, 应用单边缺口(SEM) 的三点弯曲试件, 并预制裂纹用于裂纹尖端张开位移的测量, 根据英国标准<sup>[51]</sup>, 在进行三点弯曲试验时, 用长度仪测量裂纹顶点张开位移( $c$ )。从  $c$  计算等效断裂韧性的公式为:

$$K_{Ic} = \sqrt{2} c E_y / (1 - \nu^2) \quad (38)$$

由表 6 可以看出, 人工神经网络预测的断裂韧性与实验测量的值相当符合。

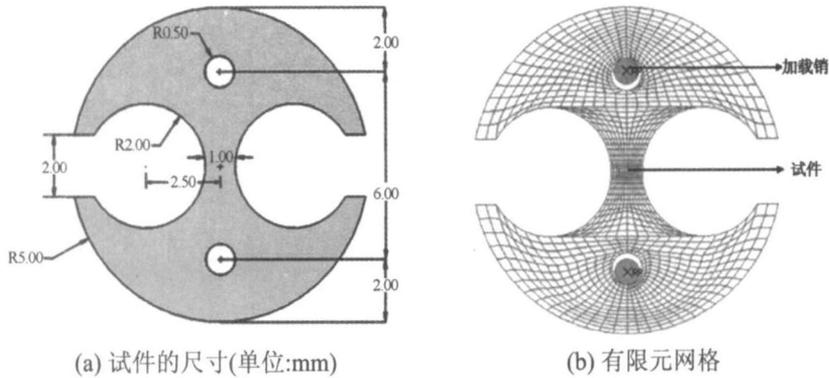


图9 小型哑铃试件

Fig. 9 Miniature dumb-bell specimen (a) Dimension of specimen, (b) Finite element mesh

表6 ANN预测的和实验测量的断裂韧性比较

Tab. 6 Comparison of ANN predicted fracture toughness values with the experimental values

材料	CTOD 韧性 $c$ (mm)	等值 $K_{IC}$ (MPa · m <sup>1/2</sup> )	ANN 预测的断裂韧性 $K_{IC}$ (MPa · m <sup>1/2</sup> )	误差 (%)
AR66-alloy	0.017	37	39.88	7.78
D3 steel	0.015	57	60.17	5.56
H11 steel	0.314	230	234.50	1.95
LC steel	0.302	218	217.5	0.23
MC steel	0.214	168	166.8	0.71

### 3 主曲线的参考温度和转变温度移动

前面已经提到了主曲线公式(37), 美国试验和材料学会(ASTM)制定了确定主曲线公式中的参考温度  $T_0$  的标准试验方法, 文[52]为最近的版本。国际原子能机构也将主曲线法作为确定核电站压力容器材料在韧脆转变区断裂韧性的方法<sup>[53]</sup>。

Kim<sup>[54]</sup>等用小冲杆试验来评估反应堆压力容器在辐照前后的韧 - 脆转变温度和主曲线的转变温度移动。得到了如下三个结果:

(1) 将从小冲杆试验能转变曲线所确定的小冲杆转变温度 ( $T_{SP}$ ) 与根据美国 ASTM 标准的夏比试验所得的标准转变温度相比较, 得到如下的关系:

$$T_{41J} (K) = 2.43 T_{SP} (K) \quad (39)$$

(2) 材料在辐照前后的韧 - 脆转变温度  $T_{SP}$  和主曲线中的参考温度存在一定的关联, 辐照流量的大小对  $T_{SP}$  的值有影响;

(3) 夏比试验的转变温度的移动 ( $T_{41J}$ ) 和小冲杆的能量转变曲线中的转变温度的移动 ( $T_{SP}$ ) 也有一定的关系, 辐照流量的大小对  $T_{SP}$  的值也有影响。

### 4 结束语

小冲杆试验技术最早是用于核电站在役结构材料力学性能的测定, 由于所用的试样相当小, 对结构几乎不造成损伤, 可以广泛地用于其他领域材料力学性能的测定, 所以, 这种测量技术有很好的工程应用前景。但是, 从测量的数据来确定材料断裂力学性能的数学方法比较复杂, 结果的精度尚待进一步提高。

此外, 现有发表的工作所采用的试样尺寸有所不同, 冲压装置的夹具孔径和冲压试验的滚珠的直径也有些差异, 这些因素对试验结果有没有影响, 也需要进一步研究。

## 参考文献:

- [1] Baik J M, Kameda J, Buck O. Small punch test evaluation of intergranular embrittlement of an alloy steel[J]. Script Metallurgica, 1983, 17: 1443 - 1447.
- [2] Baik J M, Kameda J, Buck O. Development of Small Punch Tests for ductile-brittle transition temperature measurement of temper embrittled Ni-Cr steel[C]// In: W. R. Corwin and G. E. Lucas, Editors, ASTM STP 888, ASTM, Philadelphia (USA), 1986:92 - 111.
- [3] Misawa T, Adachi T, Satto M, Hamaguchi Y. Small Punch Tests for evaluating Ductile-Brittle Transition Behavior of Irradiated Ferritic Steels[J]. Journal of Nuclear Materials, 1987, 150:194 - 202.
- [4] Foulds J H, Jewett C W, Viswanathan R. ASME Proc. Inter. Conf. Power Generation, San Diego, USA, Oct. 1991, Paper 91-JPGC-PWR-38.
- [5] Bulloch J H, Hickey J J. Miniature Specimen Testing of Critical Components in Steam Raising Plants[C]// In Service Experience and Reliability Improvement: Nuclear, Fossil and Petrochemical plants. PVP-288, Proceeding of the 1994 Pressure Vessels and Piping Conference, Minneapolis, MN, USA, ASME, 1994:147 - 153.
- [6] Bulloch J H, Fairman A S, Baltica I I. Inter. Conf. Plant Condition and Life Management, vol. 1, Helsinki/Stockholm, June, 1995. p. 179 - 186.
- [7] Foulds J, Viswanathan R. Small punch testing for determining the material toughness of low alloy steel components in service[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1994, 116(4): 457 - 464.
- [8] Viswanathan R, Gehl S. A Method for Estimation of the Fracture Toughness of Cr10V Rotor Steels Based on Composition[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1991, 113: 263 - 270.
- [9] Begley J A, Logsdon W A. Correlation of Fracture Toughness and Charpy Properties of Rotor Steels[R]. Scientific Paper 71-1E7-MSLRF, Westinghouse Research Laboratories, Pittsburgh, 1971.
- [10] Jones G T. Proc. of the Inst. of Mech. Eng., 1972, 186: 22 - 32.
- [11] Schwant R C, Timo D P. Life assessment of general electric large steam turbine rotors[M]// in Life Assessment and Improvement of Turbogenerator Rotors for Fossil Plants, R. Viswanathan, ed., Pergamon Press, New York, 1985:325 - 340.
- [12] Shekhter A, Kim S, Carr D G, Croker A B L, Ringer S P. Assessment of temper embrittlement in an ex-service 1Cr-1Mo-0.25V power generating rotor by Charpy V-Notch testing,  $K_{IC}$  fracture toughness and small punch test [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2002, 79(8 - 10): 611 - 615.
- [13] Iwadata T, Tanaka Y, Takemata H. Prediction of fracture toughness  $K_{IC}$  transition curves of pressure vessel steels from Charpy V-notch impact test results[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1994, 116:353 - 358.
- [14] Roberts R, Newton C. Weld Res Council Bull, 1981, 265:1 - 18.
- [15] Jones G T, Discussion on N. Calderon and J. L. Gray. Proc. Instn. Mech. Engrs. 186, 31 - 32/72 1972, pp. D121 - D123.
- [16] Shekhter A B L, Croker A K, Helier C, et al. Towards the correlation of fracture toughness in an ex-service power generating rotor[J]. International Journal of Pressure Vessel and Piping, 2000, 77:113 - 116.
- [17] Mao X, Shoji T, Takahashi H. Characterization of Fracture Behavior in Small Punch Test by Combined Recrystallization-Etch Method and Rigid Plastic Analysis[J]. Journal of Testing and Evaluation, 1987, 15(1): 30 - 37.
- [18] Takahashi H, Khan M, Suzuki M. A Single Specimen Determination of  $J_{IC}$  for Different Alloy Steels[J]. Journal of Testing and Evaluation, 1980, 8(2): 63 - 67.
- [19] Takahashi H, et al. A Simple Test Method for the Evaluation of Tearing Modulus[J]. Journal of Testing and Evaluation, 1981, 9:14 - 20.
- [20] Chakrabarty J. A Theory of Stretch Forming over Hemispherical Punch Heads[J]. International Journal of Mechanical Science, 1970, 12:315 - 325.
- [21] Bayoumi M R, Bassim M N. Study of the Relationship of Between Fracture Toughness ( $J_{IC}$ ) and Bulge Ductility [J]. International Journal of Fracture, 1983, 23:71 - 79.
- [22] Mao X, Kameda J. Small-punch Technique for Measurement of Material Degradation of irradiated Ferritic Alloys

- [J]. *Journal of Materials Science*, 1991, 26:2436 - 2440.
- [23] Mao X, Takahashi H, Sait M. Estimation of Mechanical Properties of Irradiated Nuclear Pressure Steel by Use of Sub-sized CT Specimen and Small Punch Specimen[J]. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1991, 25:2487 - 2490.
- [24] Mao X, Takahashi H. Development of a Further-Miniaturized Specimen of 3mm Diameter for TEM Disk (3mm) Small Punch Tests[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1987, 150:42 - 52.
- [25] Kameda J, Mao X. Small-punch and TEM-disc Testing Techniques and Their Application to Characterization of Radiation Damage[J]. *Journal of Materials Science*, 1992, 27:983 - 989.
- [26] Suzuki M, Eto M, Fukaya K, et al. Evaluation of toughness degradation by small punch (SP) tests for neutron-irradiated 2.25Cr-1Mo steel[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1991, 179 - 181, Part 1, 441 - 444.
- [27] Lee W K, Metzger D R, Donner A, Lepik O E. Small specimen test techniques[G]// In: Corwin, W. R., Rosinski, S. T., van Walle, E. editors, ASTM, STP 1329, Philadelphia (USA): ASTM, 1998:539 - 556.
- [28] Geary W, Dutton J T. Small specimen test techniques[G]// In: Corwin, W. R., Rosinski, S. T., van Walle, E. editors, ASTM, STP 1329, Philadelphia (USA): ASTM, 1998:588 - 601.
- [29] Mao X, Takahashi H, Kodaira T. Supersmall punch test to estimate fracture toughness  $J_{IC}$  and its application to radiation embrittlement of 2.25Cr-1Mo steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, Volume 150, Issue 2, 29 February 1992, Pages 231 - 236.
- [30] Mao X, Sait M, Takahashi H. Small Punch Test to Predict Ductile Fracture Toughness  $J_{IC}$  and Brittle Fracture Toughness  $K_{IC}$ [J]. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1991, 25:2481 - 2485.
- [31] Foulds J, Woytowicz P J. Small Punch Testing of Determining the Material Toughness of Low Steel Components in Service[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1994, 116:457 - 464.
- [32] Foulds J, Woytowicz P J, Parnell T K, Jewett C W. Fracture Toughness by Small Punch Testing[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 1995, 23(1): 3 - 10.
- [33] Bulloch J H. A Study Concerning Material Fracture Toughness and Some Small Punch Test Data for Low Alloy Steels[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2004, 11(4):635 - 653.
- [34] Bulloch J H. Review of ESB small punch test data on various plant components[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2002, 9(5):511 - 534.
- [35] Lyu Y, You H S, Jung H D, Lim J K, Chung S H. Key Eng Mater[G]. 1991, 51 - 52:435 - 440.
- [36] Norris S D, Parker J D. The effect of microstructure on fracture mechanisms of 2.25Cr1Mo low alloy steel, part A: the influence of non-metallic inclusions[J]. *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, 1996, 67:317 - 327.
- [37] Norris S D, Parker J D. The effect of microstructure on fracture mechanisms of 2.25Cr1Mo low alloy steel, part B: the influence of carbides[J]. *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, 1996, 67:329 - 337.
- [38] Norris S D, Parker J D. Key Eng Mater, 1993, 86 - 87:17 - 24.
- [39] Song S H, Faulkner R G, Flewett P E J, Smith R F, Marmy P. Temper embrittlement of a CrMo low-alloy steel evaluated by means of small punch testing[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2000, 281(1 - 2):75 - 81.
- [40] Saucedo-Munoz M L, Matsushita T, Hashida T, Shoji T, Takahashi H. Development of a Multiple Linear Regression Model to Estimate the Ductile-Brittle Transition Temperature of Ferritic Low-Alloy Steels Based on the Relationship between Small Punch and Charpy V-Notch Tests[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2000, 28(5):352 - 358.
- [41] Sinclair A N, Lepik O, Gabbani M, Mukherjee B, Albertini E. Small specimen test techniques applied to nuclear reactor vessel thermal annealing and plant life extension[G]// In: Corwin, W. R., Haggag, F. M. and Server, W. L. editors, ASTM, STP 1204. Philadelphia (USA): AMST, 1993:162 - 181.
- [42] Suzuki M, Eto Y, Nishiyama K, Fukaya K, Isozaki T. In: Corwin, W. R., Haggag, F. M. and Server, W. L. editors, ASTM, STP 1204. Philadelphia (USA) AMST, 1993:21 - 227.
- [43] 关凯书, 李璞, 黄奕昶等. 小冲杆试验评价材料的断裂韧性[J]. *压力容器*, 2007, 24(12):8 - 12 (Guan Kai-shu, Li Pu, Huang Yi-chang, et al. An Assessment to Material Fracture Toughness by Small Punch Test [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2007, 24(12): 8 - 12.
- [44] Ju Jang-Bog, Jang Jae-il, Kwon Dongil. Evaluation of fracture toughness by small-punch testing techniques using

- sharp notched specimens[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2003, 80:221 - 228.
- [45] Joo Y H, Hashida T, Takahashi H, Shimomura K. The Use of Small Punch (Bulge) Tests to Estimate Fracture Stress in the Lower Shelf Regime[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 1992, 20(5):336 - 342.
- [46] Sih G C, Paris P C, Erdogan F. Crack-tip stress-intensity factors for plane extension and plate bending problems [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1962:306 - 312.
- [47] ASTM. E1921-97[S], 1998.
- [48] Lee B S, Yang W J, Huh M J, Hong J H. Evaluation of the fracture toughness transition characteristics for low alloy steels using precracked Charpy specimens[C]. *Proceedings of the 11th conference on mechanical behavior of materials*, 1997, 11:517 - 523.
- [49] Partheepan G, Sehga D K 1, Pandey R K. Fracture toughness evaluation using miniature specimen test and neural network[J]. *Computational Materials Science*, 2008, 44(2):523 - 530.
- [50] ASTM, E399-06, Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness  $K_{IC}$  of Metallic Materials[S]. *Annual book of ASTM Standards*, 2006.
- [51] Fracture mechanics toughness tests. Method for determination of  $K_{IC}$ , critical CTOD and critical values of welds in metallic materials British Standards Institution/ 15[S], August 1997/ 34 pages BS 7448 - 2, 1997.
- [52] ASTM, E1921-08, 2008, Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range[S]. 2008.
- [53] IAEA. Guidelines for Application of the Master Curve Approach to Reactor Pressure Vessel Integrity in Nuclear Power Plants[M]. *Technical Reports Series No. 429*, 2005. International Atomic Energy Agency, 2005.
- [54] Mir-Chul Kim, Yong Jun Oh and Bong Sang Lee. Evaluation of ductile-brittle transition temperature before and after neutron irradiation for RPV steels using small punch tests[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2005, 235 (17-19):1799 - 1805.

## An Overview of Methods for Material Fracture Parameter Measurement of in-Service Equipments ——The Advance of Small Punch in Experimental Mechanics II

DING Ke-qin<sup>1</sup>, WU Yong-li<sup>2</sup>

(1. China Special Equipment Inspection & Research Institute, ACSIQ, Beijing 100013, China;

2. Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Over the past 20 years, small punch experimental technology for testing miniaturized specimens has been developed to evaluate the mechanical properties of materials in service. Although there is no standard for test specimens, but disc specimens with 3~10mm diameter and 0.1~0.5mm thickness are commonly used in practice. It has been used to determinate the elastic modulus, yield strength, plastic properties, tensile strength, ductile-brittle transition temperature, fracture roughness, creep properties, and micro-mechanical material parameters describing plastic hardening and ductile damage and edurance strength so on. It is convenience for sampling and nearly non-destructive, so is very suitable for the situations where conventional sampling is impossible or uneconomic, therefore, attracts attention from academia and industry. An overview of state of the art about empirical and computational methods for determining the ductile-brittle transition temperature, fracture toughness and shift temperature of master curve from measured data of small punch test is presented in this article.

**Keywords:** small punch test; fracture toughness; ductile-brittle transition temperature; master curve; material mechanical properties