

单试样三点柔度法测金属材料 J_R 曲线及其条件起裂值

孟晓梅, 张继祥, 马杭

(甘肃工业大学材料工程系, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 在单试样卸载柔度法及单试样三曲线法基础上, 提出了一种更简便的测定金属材料 J_R 曲线及其条件起裂值的单试样三点柔度法, 并用该方法测定了1Cr1/2Mo钢、16MnR钢和WCF62钢的 J_R 曲线及其条件起裂值, 与标准的多试样法相比, 误差均在工程许可范围内。

关键词: 断裂韧度; J积分; 阻力曲线; 单试样; 扩展曲线

中图分类号: TG407;0346.12 文献标识码: A 文章编号: 1004-4620(2000)02-0040-03

The Measurement of J-resistance Curves and Their Proof Values at Crack Initiations with Unloading Compliance at Three Positions Using Single Specimen

MENG Xiao mei, ZHANG Ji xiang, MA Hang

(Dept. of Materials Engineering, Gansu Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: Based on the method of three curves and unloading compliance, a simple new method is proposed for measuring J-resistance curves of metallic materials. The measurement of J-resistance curves and their proofs values at crack initiations were carried out using 1Cr1/2Mo, WCF62 and 16MnR steels. The results of the single specimen are in agreement with those of the standard multi-specimen method. The errors are within the allowable range in engineering.

Keywords: fracture toughness; J-integral; resistance curve; single specimen; extension curve; compliance

J_R 曲线是表征金属材料断裂行为的一项重要指标, 通常采用多试样法测定, 测试过程复杂, 经济性较差, 特别是进行缺陷评定及事故分析时, 不易从结构的特定部位取得足够数量的试样。目前, 国际上提出的单试样测试方法主要有三种, 即卸载柔度法⁽¹⁾、标定曲线法⁽²⁾和三曲线法⁽³⁾。本文结合上述三种方法的优点, 提出了一种卸载次数少, 而又不必测量裂纹长度和裂纹扩展量的单试样三点柔度法。

1 基本原理

通过对三曲线法⁽³⁾的研究, 我们知道金属材料延性裂纹扩展曲线近似符合幂函数规律:

$$\Delta l = \Delta l_0 + K_p (\Delta_p)^\beta \quad (1)$$

$$\Delta l_0 = \delta/2$$

式中 Δl ——裂纹扩展量, mm;

Δl_0 ——裂纹顶端钝化对 Δl 的贡献, mm;

δ ——裂纹顶端钝化的COD值, mm;

Δ_p ——加载点位移的塑性部分, mm;

K_p 、 β —— 常数。

可见, 由三个已知裂纹扩展量的点即可确定扩展曲线。而在卸载柔度法⁽¹⁾中, 我们知道试样的卸载柔度 C 与裂纹扩展量 l 间存在定量关系:

$$dEC = F(l/W) \quad (2)$$

式中 d ——试样厚度, mm;

W ——试样宽度, mm;

E ——弹性模量, MPa;

C ——试样卸载柔度, mm;

l ——裂纹长度, mm。

由式(1)和(2), 若已知三点的柔度值, 就可确定扩展曲线。本实验采用在试样初始加载线位置与最终卸载线位置之间进行一次中间卸载的方式, 来获得加载过程中的三点柔度值。实验记录的载荷-加载点位移曲线如图1所示。根据式(2), 由最初加载线的柔度计算初始裂纹长度 l_0 , 再由后两次卸载柔度计算出对应的 l 值和 Δl 值, 即可确定扩展曲线, 进而得出 J_R 曲线。

2 实验

2.1 材料

用三种钢材验证了方法的可行性, 三种材料分别为1Cr1/2Mo、16MnR和WCF62。它们的化学成分列于表1, 机械性能及试样的取样方式列于表2。

表1 试验材料的化学成分 $w_t\%$

材料	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V
1Cr1/2Mo	0.150	0.59	0.67	0.014	0.005	1.20	—	0.65	—
16MnR	0.170	1.38	0.36	0.018	0.006	0.10	—	<0.01	—
WCF62	0.085	1.24	0.16	0.027	0.010	0.24	0.36	0.21	0.018

表2 试验材料的机械性能及试样的取样方式

材料	屈服强度 σ_s , MPa	抗拉强度 σ_b , MPa	延伸率 δ , %	断面收缩率 φ , %	冲击韧性 C_v , J	弯曲试样 取样方式	冲击试样 取样方式
1Cr1/2Mo	511	662	36.1	78.1	288	L-T	L-T
16MnR	345	542	34.1	71.1	76.6	L-T	L-T
WCF62	578	629	29.0	74.5	185	L-S	L-S

2.2 实验步骤

(1) 分别用三种材料制成20mm×24mm的带疲劳裂纹的三点弯曲试样, 每种材料准备约10块试样, 预制裂纹尺寸为12mm。

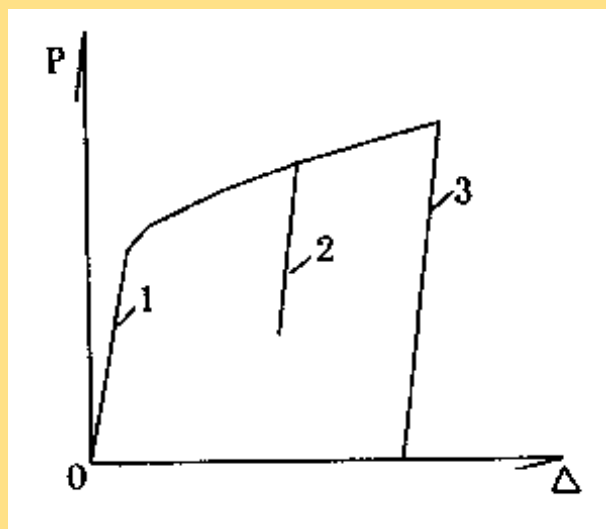


图1 载荷-加载点位移曲线

1 计算最初卸载柔度 C_0 2 计算中间卸载柔度 C_1 3 计算最后卸载柔度 C_2

(2) 加载-卸载试验, 记录 $P-\Delta$ 曲线。因为材料不是理想弹性体, 弹性变形时加载线与卸载线并不重合, 存在着弹性滞后、Bauschinger效应等。为了避免由这些效应带来的回程误差, 每次都取卸载再加载线的柔度作为卸载柔度。每种材料取三块用做单试样, 其余试样按多试样法进行试验。每块单试样要得到三个柔度值, 并更好的控制卸载点, 应按以下步骤进行: 先取一块试样加载, 估计加载至裂纹即将发生塑性变形时部分卸载, 稍作停留后重新加载; 估计加载至最终卸载塑性变形的一半部分卸载, 稍作停留后重新加载; 继续加载至载荷开始下降时部分卸载, 稍作停留后重新加载至最初卸载点, 全部卸载。第二、第三块试样的最终卸载位移应依次比第一块稍小, 根据第一块的加载情况, 确定后两块试样的最初卸载、中间卸载及最后卸载的最佳时机。

(3) 形成数据文件。将 $P-\Delta$ 曲线用数字化仪输入计算机, 并把材料、试样参数输入计算机, 形成数据文件。

2.3 实验数据处理 由于条件所限, 实验中只记录了载荷-加载点位移 ($P-\Delta$) 曲线, 由这一曲线计算出的测量柔度 C_c 并不等于实际柔度 C_s 。分析发现测量柔度 C_c 中有两个干扰因素, 一为实验机加载系统的弹性位移引起的柔度 C_x , 一为试样压痕引起的柔度 C_y 。由以上两因素产生的附加柔度 C_{ex} 为

$$C_{ex} = C_x + C_y \quad (3)$$

若直接用测量柔度 C_c 计算裂纹长度, 则会引起较大的误差。因此计算时必须扣除附加柔度的干扰, 用实际柔度计算裂纹长度。Jung⁽⁴⁾等人的研究得出, 随卸载点载荷 P 增大, 附加柔度 C_{ex} 减小, 且二者近似符合下式:

$$C_{ex} = B_1 + B_2 \times P \quad (4)$$

采用边界元法计算系统柔度,发现系统弹性柔度 C_x 较小,且为一常数,附加柔度的变化主要由压痕引起的柔度产生。而压痕之所以能使柔度发生变化,主要是因为进行三点弯曲实验时,由于压痕的存在,使得压头与试样由线接触变为面接触。因此这个变化量只与材料的屈服强度和抗拉强度有关,本文通过回归分析,建立了系数 B_1 、 B_2 与材料有效屈服强度间的线性关系:

$$B_1 = 9.403176 \times 10^{-6} - 1.36048 \times 10^{-8} \times \sigma_y$$

$$B_2 = -8.060322 \times 10^{-10} + 1.092909 \times 10^{-12} \times \sigma_y$$

这样,已知试样的有效屈服强度和卸载点载荷,就可求出对应的试样的实际卸载柔度:

$$C_s = C_c - (B_1 + B_2 \times P) \quad (5)$$

对于屈服强度介于本文给出的三种材料之间的金属,在测量其断裂韧性时,可直接套用此公式。当然,试验时若能同时记录载荷-加载点位移($P-\Delta$)曲线和载荷-刀口张开位移($P-V$)曲线,由 $P-V$ 曲线计算的柔度 C_c (即 $\Delta V/\Delta P$)就等于实际柔度 C_s ,就不用考虑附加柔度的影响了。

对每块单试样来说,由记录的 $P-\Delta$ 曲线可计算出三个柔度,分别为最初卸载柔度 C_0 、中间卸载柔度 C_1 和最终卸载柔度 C_2 ,按上述分析求出对应的实际柔度后,由陈箴公式⁽⁵⁾($C=\Delta/\Delta P$)或GB2038-91提供的公式($C=\Delta V/\Delta P$)计算裂纹长度,进而确定扩展曲线和 J_R 曲线。根据上述分析,本文编制了相应的计算机应用程序,分别计算单试样法和多试样法的 J_R 曲线。

3 实验结果及讨论

以1Cr1/2Mo钢为例,图2和图3中, (Δ)为多试样计算结果,细实线为单试样计算的 J_R 曲线,可见单试样测试结果与多试样结果符合较好。

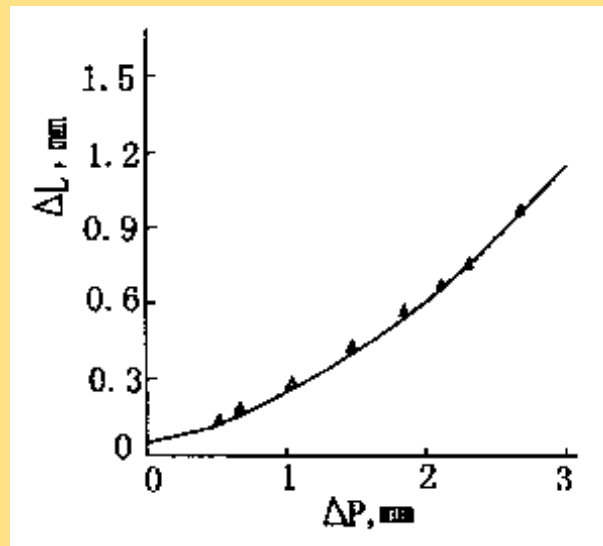


图2 1Cr1/2Mo钢单试样法得到的扩展曲线与多试样法结果的比较

Δ 多试样结果— 单试样结果

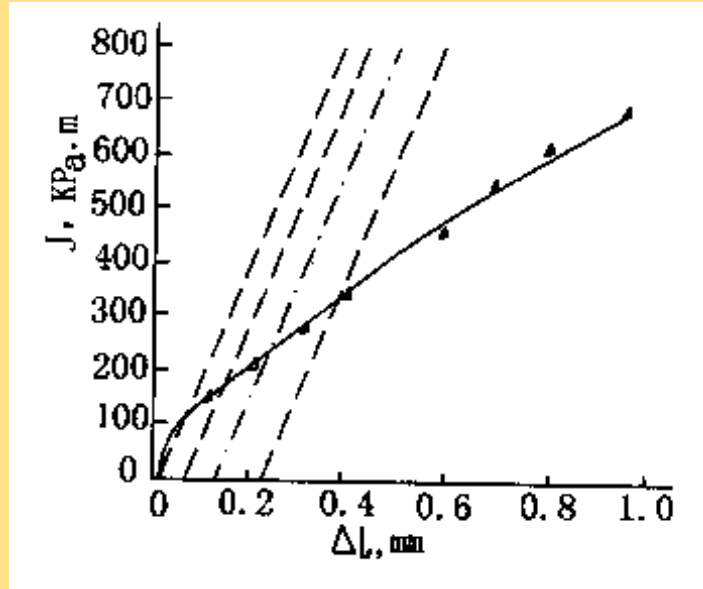


图3 1Cr1/2Mo钢单试样法J积分阻力曲线和多试样法结果的比较

△ 多试样结果 ··· 钝化线 — 单试样结果 - · - 偏置线

表3和表4中 $J_{0.05}$ 、 $J_{0.1}$ 和 $J_{0.2}$ 分别为三种材料单试样计算结果的平均值, $J_{0.05}$ 、 $J_{0.1}$ 和 $J_{0.2}$ 是多试样测试结果。 ϵ (%)是单试样计算结果的平均值与多试样结果的相对误差,可见误差均在工程许可范围内。这个误差除了与测试方式有关外,还与材料性能的波动有关。多试样测定的条件起裂值相当于多块试样的平均值,而单试样测定的条件起裂值只是一块试样的数值。

表3 单试样法测得的J积分条件起裂值(KPa·m)

材料	$J_{0.05}$			$J_{0.1}$			$J_{0.2}$		
16MnR	76	84	72	110	116	106	163	163	160
1Cr1/2Mo	260	243	269	348	338	352	487	491	484
WCF62	130		119	189		181	281		281

表4 单试样J积分条件起裂值的平均值与多试样比较(KPa·m)

材料	$J_{0.05}$	$J_{0.05}$	ϵ /%	$J_{0.1}$	$J_{0.1}$	ϵ /%	$J_{0.2}$	$J_{0.2}$	ϵ /%
16MnR	83	77	7.2	116	111	4.3	167	162	3.0
1Cr1/2Mo	263	257	2.2	355	346	2.6	502	487	2.9
WCF62	132	125	5.3	194	185	4.6	292	281	3.8

4 结论

4.1 在单试样三曲线法与单试样卸载柔度法的基础上,提出了一种新的测定 J_R 曲线及其条件起裂值的方法。

4.2 用多试样法验证了方法的可行性,并给出了附加柔度与材料有效屈服强度间的经验公式。

参考文献:

(1) GB2038-91。金属材料延性断裂韧度 J_{Ic} 试验方法,1991

(2) J A Joyce. Static and Dynamic J_R Curve Testing of A533B Steel Using the Key Curve Analysis Technique. Fracture Mechanics: Fourteenth Symposium Vol. I: Theory and Analysis, ASTM STP 791, 1983, I-543-I-560

(3) 马杭, 王政, 朱亮。 J_R 曲线的单试样三曲线分析法 [J] 。实验力学, 1992, 7(3) : 257~262

(4) Y H Jung et al. A Personal Computer Based System to Evaluate J-integral by a Single Specimen Unloading Compliance Method-I [J] . Engineering Fracture Mechanics, 1988, 29(1) : 1~18

(5) 陈箴, 姚蘅, 邓枝生, 邓其源。 J积分与应变能U间的关系 [J] 。科技通报, 1975, 5: 329~333

[返回上页](#)