

# 用电阻法确定裂纹扩展的开裂点\* 1)

北京钢铁学院金属物理专业 1973 级二班断裂韧性组

近几年来,为了解决弹塑性体的断裂判据,提出了“COD”方法和 J 积分方法等.用实验测量其临界值的关键是需要确切地判断裂纹开始扩展的开裂点.

目前已发展了多种方法(如声发射、电位法、柔度法和金相法)以确定开裂点.我们研究了一种比较能确切判断开裂点的电阻法.

## 1. 实验装置与调试

实验装置如图 1. 实验所用双电桥为 RFT 型,精度为 0.1 级,输出电阻约 50 欧;配用一 Kipp A 53 型双线圈光点检流计,其自由振荡周期为 4 秒,内阻为 50 欧,仪表所需外阻

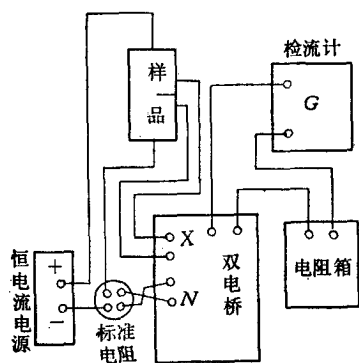


图 1 试验装置

为 1—600 欧,电压灵敏度为 0.5 伏/毫米/米;恒电流取自 JWL-30 型稳流电源,样品流经的电流密度为 2.5—6 安/厘米<sup>2</sup>. 试验前,对检流计光标偏转量与电桥不平衡量的线性关系进行了校核,在光标变化  $\pm 20$  厘米的范围内,线性是令人满意的.为了保护检流计及调配所需外阻,以保证最大的输出功率与仪表的临界阻尼状态,我们在检流计线路中串联了一个十进位电阻箱(测量时用 10 欧).在整个试验过程中,应使试样和底座以及压头之间保持绝缘,为此在这些部位上加垫了一层塑料绝缘纸.

在预备性实验中(加载周期约 1 分钟),观察到在动态加载下光标偏转有一些滞后现象.我们认为这不会对由电阻曲线确定开裂点有明显影响.因为我们不需测定电阻的绝对值,只需要各点电阻的同一相对量即可,因而在检流计的阻尼状态已定的条件下,只要在整个实验过程中保证变形速度均匀的前提下,这一点是可以接近满足的.

## 2. 开裂点的确定

(1) 强度级别不同的高强度钢 45 Si<sub>2</sub>Mn 调质钢筋,热轧后取样. 8 号炉试样,经 900℃ 油淬,480℃ 回火,  $H_B = 409$  ( $\sigma_s = 144$  千克/毫米<sup>2</sup>),试样尺寸 10 × 20 × 100 毫米,全部是深裂纹 ( $\frac{a}{w} > 0.55$ ). 试样加载过程中同时测量电阻变化. 8-1 号试样一直加载到负载下跌. 当  $P-\delta$  曲线刚偏离直线不久,电阻相对变化曲线上就出现了一个明显的转折点(图 2),用氧化法(300—340℃, 1—2 小时)使裂纹染色,由于疲劳裂纹与加载过程

\* 1975 年 12 月 26 日收到.

1) 本工作是在北京第二通用机械厂和工人师傅一起搞科学研究的一部分成果.

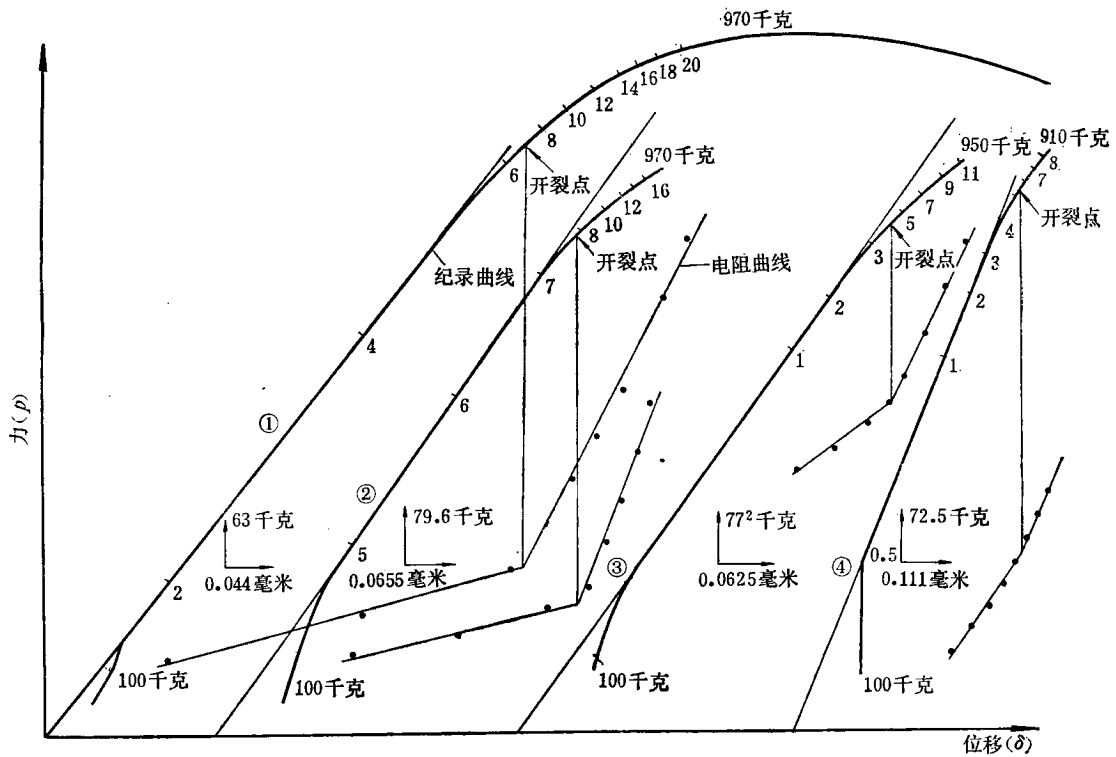


图2 45 Si<sub>2</sub>Mn 调质钢筋 480℃ 回火,电阻曲线出现一个转折点,即为开裂点

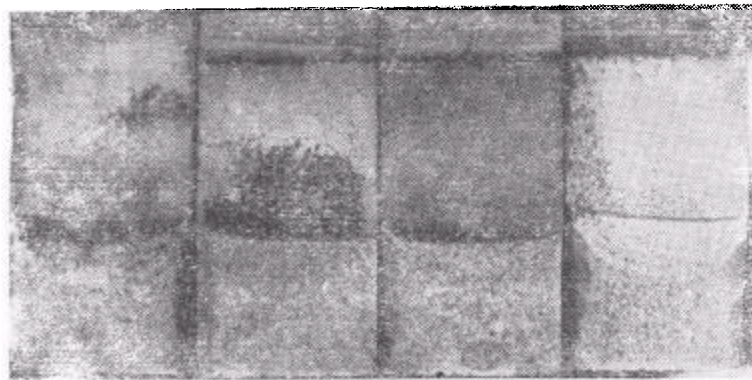


图3 调质钢筋 480℃ 回火,电阻曲线出现转折点后卸载,氧化染色处理的断口,自左至右 8-1, 8-2, 8-3, 8-4 号试样 ×2.5

中新扩展的裂纹颜色不同<sup>1)</sup>(见图3),二者可以清楚地区别。测量发现,压断的8-1号试样,裂纹扩展量已达1.4毫米。为了确切证明在电阻曲线发生转折时,裂纹就失稳而真实扩展,把8-2,8-3,8-4号试样加载到电阻曲线出现转折点后不同位置(即P-δ曲线偏离直线后不同位置)即卸载,氧化染色,再把样品压断。实验表明,过了电阻转折点后,裂纹确有不同程度的真实扩展。离转折点愈远,扩展量就愈大。8-2,8-3,8-4号试样裂纹扩展

1) 对于不同钢种,不同氧化条件,裂纹颜色可能不同,疲劳裂纹和新扩展裂纹的相对深浅程度也可能变化,但总可以将二者区分开来。

量分别为 0.45, 0.65, 0.26 毫米. 在  $P-\delta$  图上卸载点离转折点的距离分别为 0.045, 0.090, 0.10 毫米. 在电阻曲线转折点之前卸载的 8-5, 8-6 号试样, 氧化后没有发现裂纹扩展. 图 3 自右至左分别对应 8-1, 8-2, 8-3, 8-4 号试样. 深色月牙区就是裂纹扩展区. 由此可知, 对强度级别较高的 45  $\text{Si}_2\text{Mn}$  钢筋来说, 电阻曲线只有一个转折点, 它就对应裂纹开始扩展的开裂点.

7 号炉的 45  $\text{Si}_2\text{Mn}$  钢筋, 高温回火 ( $530^\circ\text{C}$  30 分钟), 强度级别大为降低 ( $H_B = 356$ ). 7-1, 7-2 号试样加载到断裂, 发现电阻曲线有两个转折点. 氧化后, 裂纹扩展量已长达 3 毫米. 故 7-3, 7-4 号试样加载到第二个转折点后不同位置卸载, 氧化染色, 7-4 号试样在氧化后又再疲劳. 压断后, 断口上明显有五个区域 (见图 4): 1) 线切割区; 2) 原疲劳区; 3) 卸载前裂纹失稳而扩展的区域 (此区域最大宽度  $\Delta a = 0.85$  毫米, 前缘不光滑, 氧化颜色比疲劳裂纹深, 色彩也不同); 4) 卸载后再疲劳区 (白色); 5) 压断区. 这充分说明, 第二个转折点就是裂纹扩展的开裂点. 在 7-3 号试样电阻曲线的第二个转折点处, 听到了开裂声. 氧化后, 也发现有少量裂纹扩展,  $\Delta a = 0.15$  毫米.

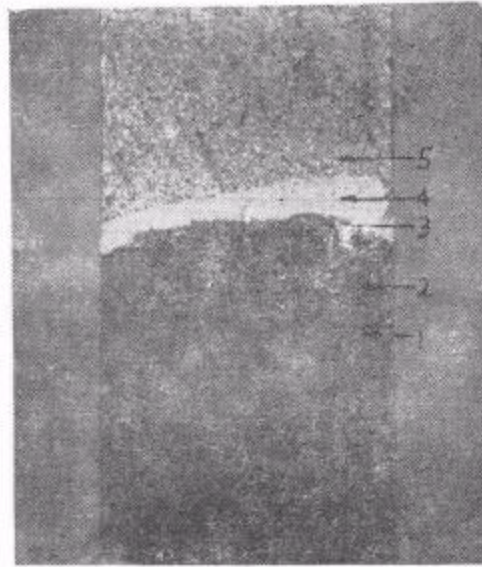


图 4 调质钢筋  $530^\circ\text{C}$  回火, 电阻曲线第二个转折点后  
卸载氧化处理, 再疲劳的断口  $\times 4$

1——线切割区; 2——疲劳裂纹区; 3——裂纹扩展区;  
4——再疲劳区; 5——压断区

这表明, 回火温度升高, 强度级别降低, 裂纹前端塑性区增大, 宏观塑性变形能充分发展. 随着塑性变形增加, 电阻随位移的变化量远比弹性区要大, 故导致电阻曲线上出现一个明显的转折点 (图 5), 它对应大范围塑性变形的开始. 第二个转折点才是裂纹失稳而开始扩展的点.

(2) 试样厚度不同的中强度钢 发电机转子钢 34  $\text{CrMo}_7\text{A}$  由北京第二通用机械厂冶炼, 用大锻件料头做成厚为 68 毫米的紧凑拉伸  $K_{Ic}$  试样, 不同尺寸的 J 积分试样是从拉断后的  $K_{Ic}$  试样上取出的, 全部是深裂纹,  $\frac{a}{w} = 0.6$ .

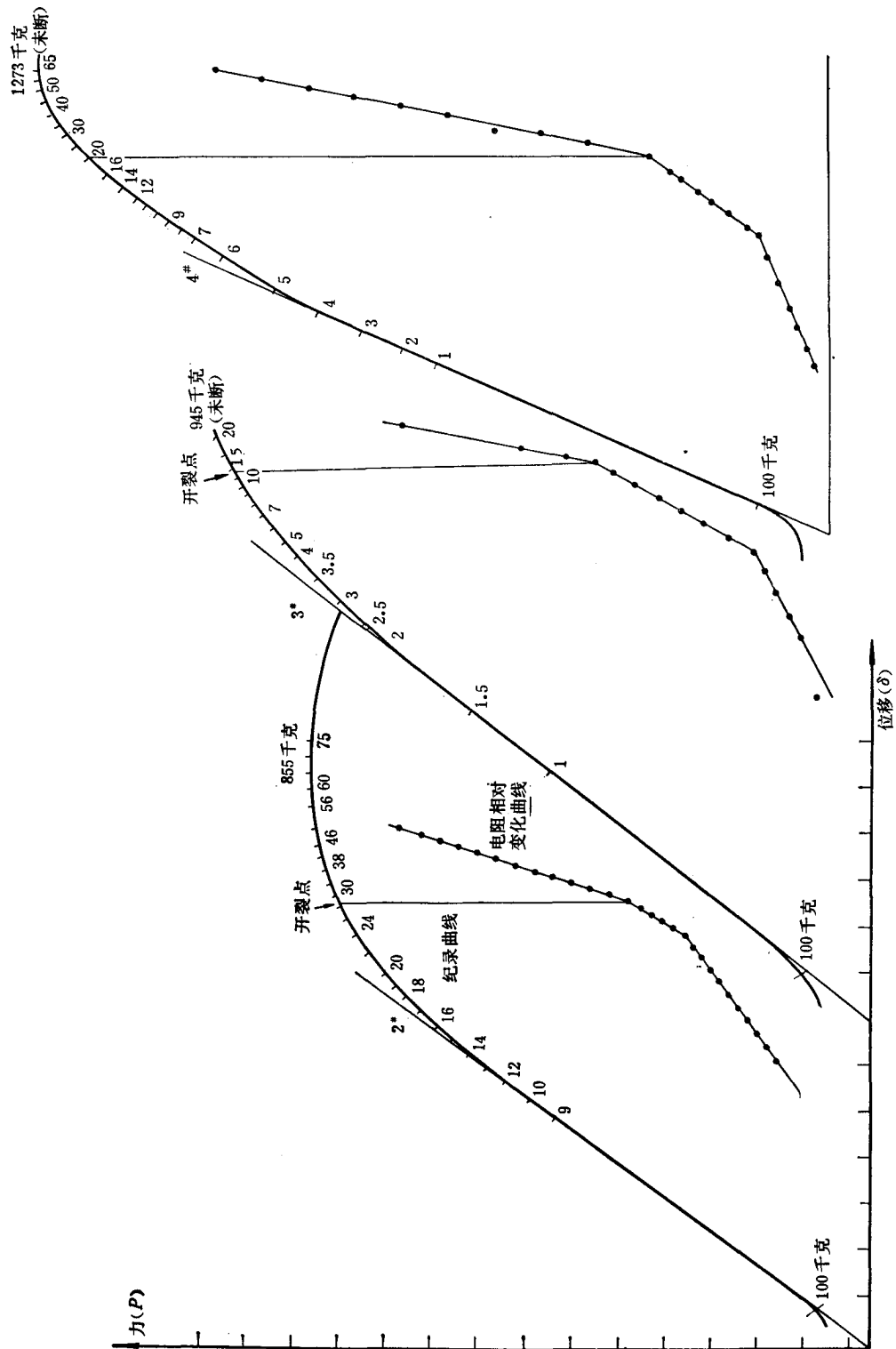


图 5 45Si<sub>2</sub>Mn 调质钢筋高温回火, 电阻曲线有两个转折点, 后者为开裂点

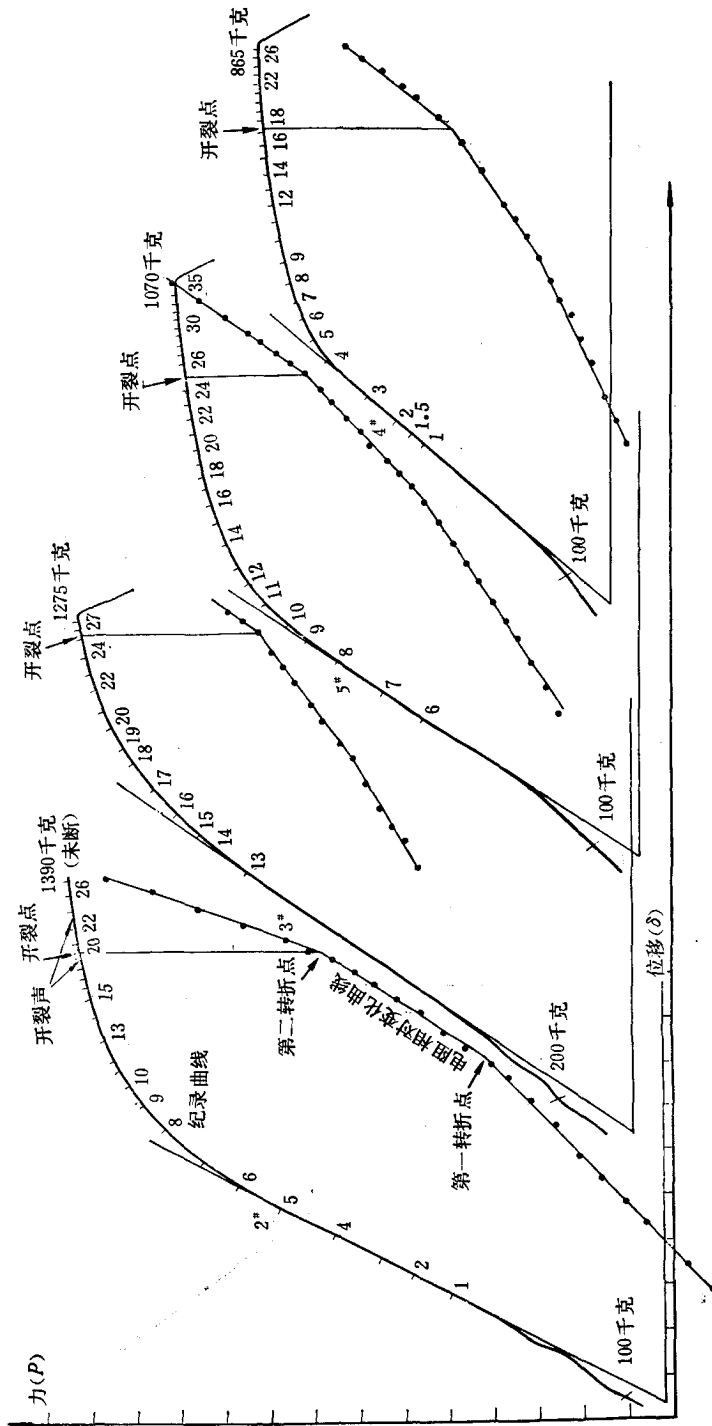


图 6 34CrMo<sub>1</sub>A 18×18 方形试样电阻曲线两个转折点,第二个转折点对应开裂点

1)  $18 \times 18$  方形试样 3, 4, 5 号试样加载到负载下跌时,电阻曲线上出现了两个转折点(图 6)。2 号试样加载到出现第二个转折点后就卸载(负载尚未达到最大),氧化染色后再疲劳,压断后,断口同样出现五个区域(图 7),显示出明显的扩展( $\Delta a = 0.3$  毫米,个别“脉冲”达 0.75 毫米,前缘不光滑)。在第二个转折点处听到开裂声,这些都表明第二个转折点就是开裂点。

为了说明第一个转折点不是开裂点,1 号试样加载到第一个转折点后,在第二个转折点尚未出现时卸载,氧化和再疲劳都表明裂纹没有扩展。

2)  $28 \times 28$  方形试样  $P-\delta$  曲线(图 8)与  $18 \times 18$  方形试样的  $P-\delta$  曲线不同,1, 2, 4 号试样的  $P-\delta$  曲线刚偏离直线一点就脆断。电阻曲线也只有一个转折点。3 号试样在电阻曲线刚过转折点就卸载,氧化染色,再疲劳。发现裂纹刚开始扩展, $\Delta a = 0.02$  毫米。由于裂纹扩展不均匀,这就导致出现一个个“脉冲”,最大值为 0.18 毫米(图 9),再疲劳区沿“脉冲”边界延伸。这充分说明,这些小脉冲就是裂纹扩展区。

以上表明,对条件完全相同的中强钢,试样尺寸增大;相对塑性区减小,电阻曲线也由两个转折点变为一个转折点。对  $10 \times 10$  和  $15 \times 15$  方形试样, $P-\delta$  曲线和  $18 \times 18$  的相似;平台很大,电阻曲线却只有一个转折点。用氧化法和再疲劳法表明,这个转折点是塑性变形开始点。这说明试样尺寸变小,直至负载下跌前裂纹都不扩展,开裂点可能和负载下跌点重合。

对于  $34\text{CrNi}_3\text{Mo}$  转子钢 ( $J_{1c}$  试样取自拉断的 95 毫米厚的紧凑拉伸试样),尺寸为  $20 \times 30$  毫米,电阻曲线也出现两个转折点。过了第二个转折点后即卸载氧化,也发现有明显的裂纹扩展(1 号试样的  $\Delta a_{\max} = 0.85$  毫米,见图 10)。

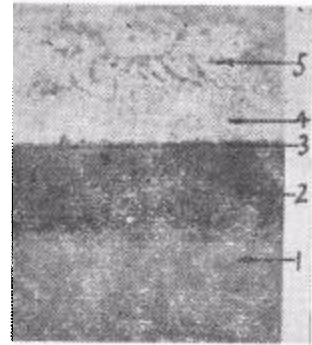


图 7  $34\text{CrMo}_1\text{A}$   $18 \times 18$  方形试样电阻曲线第二个转折点后卸载,氧化再疲劳的断口(五个区域同图 4)  $\times 2$

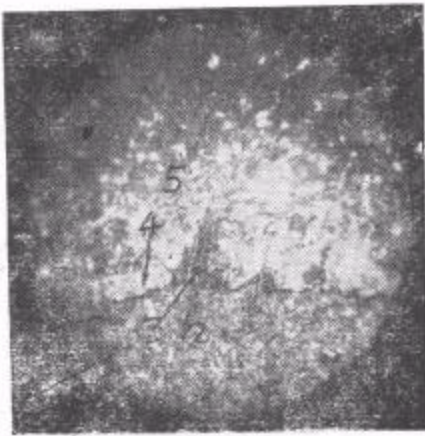


图 9  $34\text{CrMo}_1\text{A}$   $28 \times 28$  方形试样刚过电阻转折点即卸载,氧化,再疲劳的断口,黑色边缘及脉冲是裂纹扩展区  $\times 15$

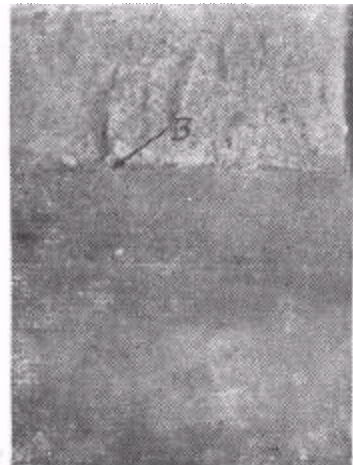


图 10  $34\text{CrNi}_3\text{Mo}$   $20 \times 30$  毫米试样电阻曲线第二个转折点后卸载,再氧化的断口,3 是裂纹扩展区  $\times 2$

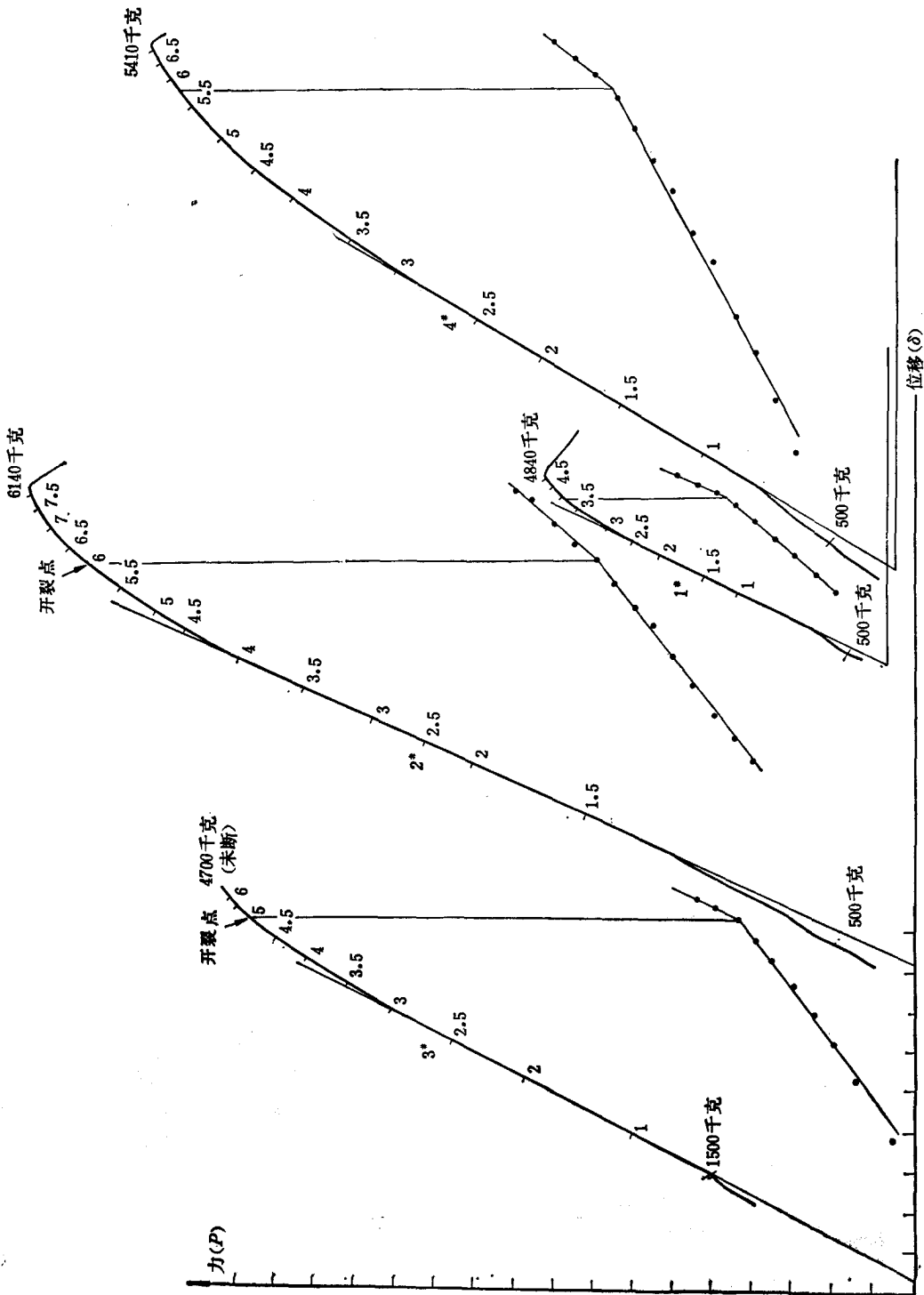


图 8 34CrMo<sub>1</sub>A 28×28 方形试样只有一个转折点,即为开裂点

对于同一类试样,用电阻曲线转折点对应的开裂点算出的  $J_{Ic}$  值,分散度是很小的(相对误差  $< 10\%$ ),考虑到  $J_{Ic}$  的测试误差,这个结果是较满意的(见表1)。

表1 由开裂点所确定的  $J_{Ic}$  值

钢 种	尺 寸 $B \times W$ (毫米)	$\frac{a}{W}$	$J_{Ic}$ (千克/毫米)	$\bar{J}_{Ic}$ (千克/毫米)	相对误差
45 Si <sub>2</sub> Mn 8 号炉	10×20	=0.55	4.00, 4.23, 3.98, 4.38	4.15±0.16	<5%
45 Si <sub>2</sub> Mn 7 号炉	10×20	=0.55	3.92, 4.08, 4.09	4.03±0.10	<3%
34 CrMo <sub>1</sub> A <sup>1)</sup>	18×18	=0.6	6.23, 6.41, 6.34, 6.37	6.34±0.08	<2%
	28×28	=0.6	3.41, 3.46, 3.18, 3.50	3.38±0.15	<5%
34 CrNi <sub>3</sub> Mo	20×30	=0.6	20.0, 22.8, 21.8	21.5±1.5	<8%
45 号 钢	15×15		6.25, 6.03, 6.23, 5.30, 6.28	6.02±0.41	<7%

1) 对于这一结果的讨论见“论  $J_{Ic}$  和  $K_{Ic}$  相一致的条件”(待发表)。

### 3. 结论

(1) 实验表明,通过测量加载过程中深裂纹试样两侧的电阻变化,可以较为满意地确定裂纹开始扩展的开裂点。这个方法的缺点是不能自动记录。

(2) 在小范围屈服条件下(强度级别高,或尺寸增大的中强度钢),电阻曲线只有一个转折点。它就是裂纹失稳开始扩展的开裂点。

(3) 在近乎整体屈服条件下(强度级别低,或尺寸变小),能反映出宏观范性变形引起的电阻变化,电阻曲线有两个转折点,第二个转折点是开裂点。当尺寸不足时,将不出现第二个转折点。在负载下跌前,裂纹没有扩展。

(4) 对同一类试样,用电阻曲线转折点所对应的开裂点算出的  $J_{Ic}$  值,分散度很小。

## MEASUREMENT OF THE INITIATION OF CRACK PROPAGATION BY AN ELECTRICAL RESISTANCE METHOD

FRACTURE AND TOUGHNESS GROUP, 1973-2 CLASS, METAL PHYSICS  
SPECIALTY, BEIJING INSTITUTE OF IRON AND STEEL TECHNOLOGY