

金 属 力 学 性 能 试 验 方 法 国 内 外 先 进 标 准 汇 编
JINSHU LIXUE XINGNENG SHIYAN FANGFA GUONEIWAI XIANJIN
BIAOZHUN HUIBIAN

金属力学性能(机械性能)试验方法 国内外先进标准汇编

国际 **ISQ** 标准 苏联 **ГОСТ** 标准 美国 **ASTM** 标准
日本 **JIS** 标准 西德 **DIN** 标准 国家标准 **GB**

中国金属学会理化检验学术委员会

上海市总工会沪西职工技术交流站

责任编辑:

封面设计: 施 华

美国材料与试验协会(ASTM)标准

ASTM E561—81

R 曲线测定标准方法^①

1. 范围
1.1 本推荐方法适用于以R曲线测定金属材料的断裂抗力,测定时既可采用中央裂纹拉伸板(CCT)或紧凑拉伸试样(CCS),也可采用裂纹线楔形加荷试样(CLWL),对材料施加裂纹扩展力。R曲线乃是当裂纹在连续增大的应力强度因子K的驱动下,通过 K_R 表示的材料的韧性变化对裂纹扩展量绘图而得到的连续记录。

1.2 只要试样具有足够大的尺寸,使其在整个试验过程中总是弹性占优势,则用来试验R曲线发展的材料,并不受强度、厚度和韧性的限制。

1.3 试样须符合标准比例,但其尺寸则可按照材料的屈服强度和韧性不同而改变。

1.4 在本方法中,只包括可用测定R曲线的多种试样的三种。

2. 适用文件

2.1 ASTM标准:

E338 高强度板材的尖缺口抗拉试验^②

E399 金属材料的平面应变断裂韧性试验^②。

E616 断裂试验相关术语的定义^②。

3. 方法概述

3.1 在缓慢稳态断裂过程中,发展着的裂纹长大抗力 K_Q ,等于施加试样上的裂纹

扩展力(注1)。裂纹随负荷或位移的增加而向前扩展。负荷每增加一次即进行测量,计算出 K_Q 值,作为材料的R曲线上的各个数据点。
注1:倘若利用下列换算式: $G = K^2/E$,则扩展力可用G表示。目前大多数用K表示。

3.2 引发裂纹是一条应力水平的疲劳裂纹。

3.3 叙述了测量裂纹长大的方法和对物理裂纹长度进行塑性区修正的方法。裂出了裂纹扩展力的计算式。

4. 意义

4.1 R曲线乃表征当裂纹不断缓慢稳态扩展时和裂纹从尖缺口扩展时,塑性区增长结果而显示的材料断裂抗力。R曲线是裂纹在不断增大的裂纹扩展力作用下稳态扩展时韧性发展的记录。这种曲线与试样厚度、温度和应变速率有关。

4.2 对于未经试验的一定几何形状的试样,R曲线可以与裂纹扩展力曲线配合来估算引起裂纹失稳扩展所需的负荷(见图1,文献[1]³)。这样估计时,认为R曲线与初始裂纹长度 a_0 无关,也与测定R曲线所用试样的形状无关。R曲线似乎只是裂纹扩展量 Δa 的函数[2]。为了预计构件中裂纹失

① 本方法属ASTM E—24断裂试验委员会管辖,并且直接由E—24.01断裂力学试验方法分委员会负责。

现版1981年4月24日审订,1981年8月颁布。初版为1974年提出的推荐方法。前一版为E561—80。

② ASTM标准年鉴1983年第02.02和03.01卷。

③ ASTM标准年鉴1983年第03.01卷。

④ 括弧中的数字系指本推荐方法所附参考文献的编目。

稳扩展,可如图1所示,使R曲线原点与假定的初始裂纹长度 a_0 重合。对于一定外形构件的裂纹—扩展力曲线,可通过假定外加负荷或应力,并计算作为裂纹长度函数的裂纹扩展力 K 而得到;计算 K 时要采用与其几何形状相应的适宜表达式。与R—曲线相切的一条线,确定开始引起失稳断裂的临界负荷或应力。

4.3 如果选用测定R曲线的试样的 K 梯度(裂纹扩展力曲线的斜率)具有负的特性(注2),如同本方法中所用的裂纹线楔形加荷试样那样,则可使裂纹不断扩展直到最大韧性或平台韧性水平为止〔3〕〔4〕。当采用具有正的 K 梯度特性的试样时(注3),R曲线延伸的范围将在裂纹失稳时结束。

注2:裂纹线加荷试样中因固定的位移导致裂纹扩展时 K 值减小。

注3:进行负荷控制时,通常 K 随裂纹扩展而增大。

5. 术语

5.1 定义

5.1.1 裂纹尺寸, $a(L)$ ——裂纹的主要平面尺寸的线性度量。这种度量通常用于定量表述应力和位移场的计算,而且往往也称为裂纹长度。

注4:实际上,按照所考虑的情况, a 值可从物理裂纹尺寸 a_P 、原始裂纹尺寸 a_0 及有效裂纹尺寸 a_e 的测量过程得到。

5.1.1.1 物理裂纹尺寸, $a_P(L)$ ——从观察的裂纹前缘至参考位置的距离。该距离可代表沿裂纹前缘几次测量的平均值。参考位置取决于试样形状,通常将边界、加荷线、试样或平板的中心线取作参考位置。

5.1.1.2 原始裂纹尺寸, $a_0(L)$ ——试验开始时的物理裂纹尺寸。

5.1.1.3 有效裂纹尺寸, $a_e(l)$ 考虑裂纹尖端塑性变形效应而得出的物理裂纹尺寸。

注5:有效裂纹尺寸 a_e 。往往是由物理

裂纹尺寸 a_P 的测量值加上塑性区修正 r_y 的计算求得。一种可取的计算 a_e 的方法,是将由负荷—挠度曲线的切线得到的柔度与由据试样型式标定而得的柔度比较求得。

5.1.2 塑性区修正, $r_y(L)$ ——考虑由线弹性应力场所包围的裂纹—尖端的塑性变形而对物理裂纹尺寸的一种补充。

注6:塑性区修正一般可按下列式计算:

对于I型平面应力,

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{K^2}{\sigma_y^2}$$

对于I型平面应变,

$$r_y = \frac{a}{2\pi} \cdot \frac{K^2}{\sigma_y^2}$$

式中 $a \approx 1/3 \sim 1/4 \sigma_y$ 为有效的屈服强度。在本方法中,假定I型平面应力。

5.1.3 裂纹扩展量, $\Delta a(L)$ ——裂纹尺寸的增量。

注7——例如 Δa_P 或 Δa_e ,乃是裂纹尺寸 a_P (物理裂纹尺寸)或 a_e (有效裂纹尺寸)与 a_0 (原始裂纹尺寸)之差。

5.1.4 应力强度因子, $K, K_1, K_2, K_3 (FL^{-3/2})$ ——对于特定的均匀线弹性体中,理想裂纹尖端应力场(应力场的简化)的度量。

注8——对于1.2和3型 K 值按下式确定:

$$K_1 = \lim_{r \rightarrow 0} [\sigma_y (2\pi r)^{1/2}],$$

$$K_2 = \lim_{r \rightarrow 0} [\sigma_y (2\pi r)^{1/2}],$$

$$K_3 = \lim_{r \rightarrow 0} [\sigma_y (2\pi r)^{2/1}].$$

式中 r 等于直接向前从裂纹尖端至计算有效应力 σ_y 处的距离。

讨论——在本方法中,假定为I型平面应力。

5.1.5 裂纹扩展抗力 $K_R (FL^{-3/2})$ 和 G_R 或 $J_R (FL^{-1})$ ——用应力强度因子

K、裂纹扩展力G或由J积分概念所推导的J值表示的裂纹扩展抗力的一种度量。

注9：见R曲线的定义。

5.1.6 R曲线——以裂纹扩展量为函数的裂纹扩展抗力的关系曲线。

注10：对于方法E561所讨论的试样，平面内几何形状的影响似乎可忽略不计，但R曲线通常取决于试样厚度，对某些材料也取决于温度和应变率。

5.1.7 裂纹位移(L)——变形的裂纹表面上两点之间的分离矢量，该两点在未变形条件下理想裂纹表面上是重合的。

讨论——在本方法中，位移V乃是试样上选定的一个测量点在垂直于裂纹平面方向上所移动的距离，用夹式引伸计或其他装置所测得的裂纹间的总位移为 $2V$ 。CLWL和CS试样，试样上的测量点都称为位置 V_1 和 V_2 。

5.2 本方法专用的术语说明

5.2.1 平面应力断裂韧度， K_{Ic} ——在E561方法中，裂纹失稳条件下的 K_R 值，由试样的R——曲线和临界裂纹扩展力曲线之间的相切来确定。

注11：见E616术语中平面应变断裂韧度的讨论。

5.2.2 固定负荷或固定位移的裂纹扩展力曲线——试验一定几何形状试样时进行断裂力学分析所得曲线，分析时假定外加负荷或位移固定，并绘出K与作为自变量的有效裂纹尺寸的关系曲线。

6. 装置

6.1 CCT试样的夹具——在中心裂纹试样的抗拉试验中，设计的夹具应能在试样上产生均匀分布的负荷。为了保证裂纹平面上应力均匀分布，试样的最内侧加荷销之间的长度至少应为试样宽度的一倍 $2W$ 。对于宽度大于12英寸(305毫米)的板，必须采用多销夹具，而要求可放松到 $1.5W$ 。图2所示的典型夹具装置已证明很有用。夹头和

加荷机构之间用销钉或万向接头连接，以便使负荷对称。当试验超重规格的超高强度材料时，可利用AISC钢结构手册校核夹具是否适用。

6.2 紧凑拉伸试样的夹具——用CS试样以拉伸加荷测定R曲线时，建议采用E399方法中所叙述的夹具。

6.3 裂纹线楔形加荷用夹具(CLWL)：

6.3.1 采用楔形加荷时，可使用图3所示的抛光的小锥度楔块和分开销。为了保持负荷线不受试样两臂转动的影响，实践证明采用分段的分开销系统最有效，其草图如图4所示。使用包容角为 3° 的楔块较为方便。在润滑适当和系统对正中心的情况下，机械增益可达5。因此，采用产生五分之一最大予计试验负荷的加荷机构比较合适。楔块必须足够长，以便能产生予计的最大裂纹张开位移。所需最大行程可以从予计最大位移 $2V$ (用表2中查得的 $EB2V/\rho$ 值)、试验中予计的最大K值和楔块角度计算求得。

6.3.2 推动分开销加荷的楔形加荷块的顶部(图上未示出)和底部都受约束，限制它在平行于试样的平面内运动。这样就可以不从试样孔中取出加荷块及分开销而能方便地加荷或卸荷。设计楔形加荷块时要使他与分开销之间在试样加荷线上某一点存在线接触。这样，当楔形块嵌入时，可使分开销转动，原始负荷线保持不变。楔块和楔形加荷块非常适于用气冷或油淬工具钢制造。分开销应采用300号马氏体时效钢制造。分开销的直径应比试样上钻孔的直径略小(标称值为 $1/32$ 英寸，即0.79毫米)。

6.4 防止试样翘曲的面板——未经支承的试样可能发生翘曲，这取决于试样厚度、材料韧性、裂纹长度和试样尺寸。翘曲严重影响K值分析的有效性，特别会干扰用柔度法测定有效裂纹长度。因此，需要在CCT、CS和CLWL试样的临界区附加刚性面

板。利用自动绘图记录来探测翘曲的方法，在8.6中叙述。

6.4.1 对于CCT试样，限制翘曲的部件应附在试样的中心部位。面板的设计方案应能防止试样裂纹平面扭曲和沿试样宽度发生翘曲。

6.4.2 对于CS和CLWL试样，受压的试样臂部和后面，应加以限制以防翘曲。对于板状试样，宜于采用一块基板和一块盖板，在盖板的适当部位应开切口，以便安装夹式引伸计和观察裂纹长度。

6.4.3 在面板与试样之间应予润滑。必须注意不使润滑剂渗入裂纹中，以避免因其浸入可能会使裂纹加速扩展。可采用四氟乙稀碳氟化合物或重油，或二者同时使用。相对面板间的初始加紧力，应在几磅数量级，不得超过。

6.5 位移计——位移计用来在预定位置和跨距上精确测量横跨裂纹的裂纹张开位移。当试验小型CLWL和CS试样时，E399方法中所推荐的引伸计，具有足够的线性工作范围，可供使用。但是，当试验W大于5英寸（127毫米）的较大试样时，位移测量可能需用图5所示类型的具有较大工作范围的引伸计。使用点接触，可以消除CS和CLWL试样因绞型转动而引起的读数误差。各种类型引伸计的精度，应按照E399方法中6.4.1所叙述的标定程序进行校核。此外，用来测定柔度时，引伸计整个工作范围的绝对精度应在2%以内。引伸计须定期重新标定。

6.5.1 所推荐的用于在裂纹中央钻孔NO13的CCT板试样的引伸计，如图6所示〔6〕，其部件的详情见图6.a在E399方法中规定了适当的结构工艺及所需的电子技术。

6.5.2 只要能保证精度和准确度的要求，可以采用不同跨距的其他型式的引伸计。E399方法中的常规夹式引伸计可利用螺钉附在选定的间距 $2y$ 上跨越裂纹进行测量。在CCT试验中，由于位移是 y/W 的函

数，必须仔细选择适当的柔度标定曲线，以便与这些装置相一致。

6.6 光学仪器——如果待试验的材料相当薄，以致从表面到厚度一半处裂纹尖端外形的变化不明显，则可使用光学仪器观察表面来跟踪裂纹的扩展。如果负荷在规定增量下保持而使裂纹稳定化，则使用30到50倍的移动式显微镜可测定裂纹长度到0.01英寸（0.2毫米）。也可采用电影记录系统。通常的方法是用两台同步摄影机同时记录负荷与裂纹长大。

6.7 其他设备——测量裂纹长度也可采用其他方法，如涡流探测器，它对非铁材料最适用，或电阻测量法，此时按照电位差来确定裂纹的扩展。

7. 试样形状、尺寸和制备

7.1 试样尺寸——为使K值分析有效，在所有负荷值作用下，裂纹平面内试样的韧带必须以弹性为主。

7.2 对于CCT试样，基于有效裂纹尺寸而计算的净截面应力，必须小于材料的屈服强度。CCT板的宽度W在满足7.1要求的条件下可任意选定。不使材料屈服所要的宽度，可从最大预计塑性区尺寸 r_p （见9.1.4）估算， r_p 值与材料韧性对屈服强度比值的平方成正比，作为引例，一个宽度为 $27r_p$ 并有1/3缺口的试样，预计其净截面应力等于屈服强度时即破坏〔7〕。因此，希望在设计试样前，应估算试验时预计的最大K值。为此，下表列出了对应于各假定的 K_{max} 与屈服强度的比值所推荐的CCT的最小尺寸。

K_{max}/σ_y	宽度，英寸 (毫米)	$2a_0$ ，英寸 (毫米)	长度，英寸 (毫米) ²
0.5	3.0 (76)	1.0 (25)	9 (229) ^b
1.00	6.0 (152)	2.0 (51)	12 (305)
1.50	12.0 (305)	4.0 (102)	24 (601)
2.00	20.0 (508)	6.7 (170)	30 (762)
3.00	48.0 (1219)	16.0 (406)	72 (1829)

a——CCT试样在夹具间的标称长度，当W小于或等于12英寸（305毫米）时为2W，当W大于12英寸时为1.5W。

b——E399方法中的销钉加荷试样。

7.3 所推荐的CS试样如图7a所示。裂纹张开位移在 $0.1567W \pm 0.0006W$ 处测量比在加荷销的中心线处更好。引伸计也可置于其他位置，但为了利用表2中的数值进行柔度测定，必须将位移值线性外推到加荷线或 $0.1576W$ 。引伸计的跨距只要小于 $W/4$ 即可。

7.4 所推荐的CLWL试样如图7b所示。加荷孔的尺寸与试样尺寸成比例。允许试样在孔洞处有少量刻痕。夹式引伸计的位置限定在加荷线前 $0.1576W \pm 0.0006W$ 处和后面 $0.303W \pm 0.0006W$ 处。所推荐的引伸计跨距随试样尺寸的变化，如图7所示。

7.5 为了使获得的试验结果有效，对于本推荐方法中规定的CS及CLWL试样，要求在试验结束时剩余未开裂的宽带至少等于 $4/\pi (K_{\max}/\sigma_y)^2$ ，式中 $K_{\max}$ 为试验中的最大K值， σ_y 为材料的0.2%偏置屈服强度。CS和CLWL试样中初始裂纹长度应位于试样宽度的0.35~0.45之间。

7.6 引裂缺口——任一种推荐试样的机械加工引裂缺口，可以用电火花加工、端面铣削或锯切制成。

7.6.1 对于CCT试样，机械加工的缺口应为W的30%到35%，且依试样宽度应对正中心，允许误差在 $0.002W$ 以内。为便于产生疲劳裂纹，建议缺口末端部半径为0.003英寸（0.08毫米）或更小。引缺口上由疲劳裂纹而扩展的长度不得小于0.05英寸（1.3毫米）（见注12）。缺口应位于图8所示的包线之内。

7.6.2 对于CS试样，图9示出了允许的缺口型式和包线尺寸。机械加工缺口由疲劳裂纹而扩展的长度不得小于0.05英寸（1.3毫米）。

注12：只有在机械加工缺口的根部半径等效地模拟疲劳引发裂纹的尖锐性时，才可以略去疲劳裂纹。

7.7 予制疲劳裂纹时，最大对最小负荷之比可凭经验选定。对于CCT试样，净截面的最大应力不得大于屈服应力的50%。对于CS和CLWL试样，疲劳时最大负荷应使按E399方法中9.1.7计算所得的强度比不大于0.5%。作为典型情况，予制疲劳裂纹时最大标称应力应为材料的强度的10%到40%。

8. 操作程序

8.1 测量——在裂纹平面附近于4个部测量材料厚度B，应精确到 $\pm 1\%B$ 。测量试样宽度W应精确到 $\pm 0.5W$ 。

8.2 试验次数——重复测定的R曲线可能会有变化，如在力学试验中测定其他性能（如夏比形缺口冲击能或抗拉性能）时一样。由一次测定结果所绘出的曲线，如果时裂纹扩展的平滑增长函数，则给人的印象表明这次测定是准确的。如果并不尽然，则至少须进行一次附加的验证试验。

8.3 加荷程序——对CCT、CS和CLWL试样应逐级加荷，各级间隔时间应能待裂纹稳定后再测量负荷及裂纹长（见注13）。对多数材料，停止加荷后数秒钟内裂纹即稳定。但是，当临近失稳条件停止后，裂纹可能在停止加荷后数分钟才稳定化，这取决于加荷机构的刚度及其他因素。

注13：如果采用自动绘图仪器，可以监控连续单调加荷条件下负荷与裂纹扩展的关系。加荷速率必须相当低，以免将应变率效应引入R曲线中。当裂纹稳态蠕变或临近失稳加速蠕变时，则不能测定静态 K_R 。

8.3.1 数据点的个数——要获得R曲线至少需四、五个数据点，而十到十五个数据点则能增加可靠性，韧性较好的材料通常需要更多的数据点。

8.4 物理裂纹长度测量——采用6.6和

6.7叙述的适宜测量装置测量每一级的物理裂纹长度时,精度达0.01英寸(0.2毫米)。物理裂纹长度也可用10.4叙述的柔度方法在试样每次加荷后部分卸荷进行测量。用塑性区 r_y 长度进行修正,以便得到用来计算K值的有效裂纹长度。

8.4.1 在测定物理裂纹长度的CLWL试验中,应用表2的关系确定所加负荷或K值,表中数据已经用 r_y 对裂纹长度进行修正。由于 r_y 是K值的函数,因此需要重复计算一次。

8.5 有效裂纹长度测量——试样加荷过程中所进行的 $2V/P$ 柔度测量,可直接用来测定有效裂纹长度 a_e 。这个裂纹已经进行了塑性区修正,可直接用于K的表达式中。

8.5.1 在CLWL试样中,应用双柔度法可直接测定有效裂纹长度。如图7b所示,沿裂纹线的两个不同部位 V_1 和 V_2 测定位移量,再利用表1,从位移比 $2V_1/2V_2$ 可求得有效裂纹长度对宽度的比值 a_e/W 。通常在X—y记录仪上可以很方便地自动记录出 $2V_1$ ($100\times$)对 $2V_2$ 的关系曲线。根据 a_e 和 V_1 点的位移,应用表2中列出的通常用柔度关系即可算出负荷P。在连续的X—y记录中,可在适当的间隔将楔块的方向或负荷反向,以便测定反回斜率 $2\Delta V_1/2\Delta V_2$,再利用表1,可得到与其相应的物理裂纹长度。在楔形加荷系统中,应用一限动夹具以防止分开随楔块退出。

注14:并不强制应用双柔度法于CS试样。该方法与CLWL试样所规定的相同,予计的有效裂纹长度应与用单柔度法所予计的相同。但是,对CS负荷应采用柔度关系,如表1和2所示。

8.6 挠曲的检测——如果采用柔度装置,则可确定试样何时产生不良的挠曲。检测方法包括对试样周期地卸荷,其示意如图10和11所示。试验记录的初始部分应有一个线性段,部分卸荷时可大体上重新描绘出这

一部分。同样,在试验的较后阶段,如发生挠曲或摩擦问题,则卸荷和重新加荷时间曲线的斜率将不一致。如果斜率的差异超过2%,或者一个或两个试验记录无线性范围,则表明存在挠曲或摩擦,这足以导致用柔度法测得的裂纹长度有显著误差。把从反回斜率估算的裂纹长度与用其他更直接的测量方法得到的物理裂纹长度进行比较,便可得到附加的可靠证明。

8.7 如果试验前试样不光滑,或板试样含有一些按厚度平均值不可忽略残余应力的区域,则试验记录的解释将遇到困难。

8.8 CCT试样的试验——试样安装在试验机上应仔细对正中心以消除负荷的偏心。对正中心不准,会在试样中形成无法控制的或虚假的应力分布,这是很麻烦的,特别是用柔度法测定有效裂纹长度时更是如此。测量裂纹长大的夹具,可在施加少量予负荷后即安装在试样上。按照7.6.1规定,CCT试样的初始裂纹长度的标称值应为W的30%到35%,测量时读数要精确到0.01英寸(0.2毫米)。

8.9 CS和CLWL试验——如前面7.5中所述,CS和CLWL试样的起始裂纹长度的标称值为W的35%到45%。在裂纹线加荷形式的试样中,应力分布的方式使裂纹扩展时会偏离原始缺口的方向〔8〕。在具有显著的各向异性的材料中和裂纹沿韧性较大的方向扩展时,通常可见到这种情况。弹性位移关系的精确性,随着对裂纹线的偏离而减小,当偏离度大于 10° 时,数据无效。

9. 计算和说明

9.1 为了获得R曲线,须求出和应用裂纹长度及负荷数据以计算 K_R 。

9.1.1 对于中心裂纹拉伸试样,可选用下列两个同等近似表达式之一。

$$K_R = (P/WB) \sqrt{a} [1.77 - 0.177 (2a/W) + 1.77 (2a/W)^2]$$

或

面，奥氏体转变试验材料于1/2

$K_{R1} = (P/WB) [\pi a \sec(\pi a/W)]^{1/2}$

式中：P——所加负荷；

B——材料厚度；

W——试样宽度；

a——塑性区修正后的半裂纹长度。

9.1.2 对于CS和CLWL试样，按下式

确定 K_{R1}

$K_{R1} = (P/B\sqrt{W}) \times f(a/W)$

式中：

$f(a/W) = [(a + a/W)/(1 -$

$a/W)^{3/2}] [0.886 + 4.64(a/W) -$

$-13.32(a/W)^2 + 14.72(a/W)^3 -$

$-5.6(a/W)^4]$

对任何 $a/W \geq 0.35$ 均适用。

a——从加荷线测量的经塑性区修正的

裂纹长度；

W——从加荷线测量的裂纹宽度。

9.1.3 此外，也可采用表2中列出的数

值来计算 K_{R1} 。

9.1.4 在9.1.1和9.1.2的表达式中所使

用的裂纹长度为有效裂纹长度，它是总的物

理裂纹长度加上塑性区 r_y 修正值。对所测量

的裂纹长度在物理上的修正如下：

$a_e = (a_0 + \Delta a + r_y)$

式中：

a_0 ——CCT试验中的初始裂纹的半

长，或CS和CLWL试验中的初始裂纹长

度；

Δa ——在一个裂纹尖端的物理裂纹的

扩展量；

r_y ——塑性区修正

$r_y = (1 + 2\pi)(K_{R1}^2/\sigma_y^2)$

9.1.5 9.1.4中 r_y 的表达式，对于屈

服强度与密度的比值大于700000 磅/英寸²/

磅·英寸⁻³ (174千帕/公斤米⁻³) 的高强度

材料，是最准确的。对于强度较低的高韧性

材料，为了进行塑性区修正，须更加依赖于

柔度法。

10. 柔度法

10.1 有效裂纹长度的测定——柔度法

系利用依不同裂纹长度而标定的试样的弹性

—弹簧特性[9]。可通过实验获得标定

曲线，利用对具有不同裂纹长度的试样弹性

加荷，并测定弹性弹簧常数的倒数，将这些

斜率的倒数对材料的厚度和弹性模量归一

化，并按裂纹长度对试样宽度的比值绘图。

对于CCT试样，推导出一个柔度的解析表

达如下，可用以代替实验得到的标定曲线

[10]。

$\frac{E[2\gamma]}{\sigma W} = 2 \left\{ \left(\frac{\pi a}{W} \right) / \sin \left(\frac{\pi a}{W} \right) \right\}^{1/3}$

$\left\{ \frac{2W}{\pi y} \cosh^{-1} \left(\frac{\cosh \pi y / W}{\cos \pi a / W} \right) \right\}^{1/3}$

$\left\{ 1 + \left(\frac{\sin \pi a / W}{\sinh \pi y / W} \right)^2 \right\}^{1/3}$

$+ \mu \left\{ y / W \right\}$

(适用范围：0.2 < 2a/W < 0.8，

y/W ≤ 0.5)

式中：

E——弹性模量；

2V——在中心孔处的中心张开位移；

σ ——总应力P/BW；

P——负荷；

B——板厚；

W——板宽；

y——引伸计的半跨距；

a——有效半裂纹厚度；

μ ——泊桑位。

10.2 对于16英寸(405毫米)宽的CC

T板试样，应用近零引伸计跨距而得到的柔

度标定曲线,如图12所示。应该注意,所附的柔度解析曲线,是为特定的 y/W (引伸计半跨距对试样宽度之比)而求得的。

10.3 在为获得R曲线而进行的试验中,无论是CCT和CS试验时负荷对夹式引伸计位移的试验记录,还是CLWL试验时 $2V_1$ 对 $2V_2$ 的记录,都具有一段初始线性部分,其斜率即相当于试样中的初始裂纹长度。

10.3.1 在CCT和CS试验中,应将试验中记录的初始斜率所估计的裂纹长度与初始裂纹长度对比,如其他差异大长 $0.003W$,则将初始斜率和真实裂纹长度当作单一的柔度标定点,利用一张具有标定曲线形状的轮廓纸,垂直地调整柔度标定曲线的位置,使其通过单一的柔度标定点。这种操作也可通过学术计算完成。从这一条调整过的曲线测定所有连续的裂纹长度。

10.3.2 无论是为了获得CCT试验还是CS试验的R曲线,都要如图3所示,在试验记录(负荷对位移关系曲线)上,从原点到任意选定点画试验曲线的割线。这些割线斜率的倒数对弹性模量及材料厚度归一化,并列入标定记录以确定 a_e/W 。

10.4 在CCT和CS试验中,试验时在任何给定点的部分卸荷,都将产生与10.3.2中所讨论的割线不同的反回斜率。卸荷斜率即相当于物理裂纹长度。卸荷量只要足以获得准确的反回斜率,而能据此确定物理裂纹长度即可。如果卸荷时试验记录并不线性反回,表明除材料行为以外的因素影响了试验记录,则反回斜率的测量是不可靠的。

10.5 在CLWL试验记录中〔11〕, V_1 和 V_2 位置的位移之间的初始线性关系,相

应于试样中起始物理裂纹长度,而且应准确到 $0.005W$ 以内。 V_1/V_2 双柔度标定曲线,并不能象CCT及CS试样的单柔度关系曲线那样位移。虽然在判断初始裂纹长度 a_0 时可能有误,但确定裂纹长裂增量的能力并没有消减。但是,如果起始裂纹长度的误差超过 a_0 的3%,则试验数据应予作废,并校验试验设备是否符合本推荐方法的要求。从按连续增量所确定的裂纹长度减去按柔度法测定的初始裂纹长度,即得到裂纹扩展的增量。

10.6 把用柔度法确定的有效裂纹长度代入9.1.1或9.1.2的关系式中,即可计算出 K_{R} 值。

11. 报告

11.1 报告应包括以下内容:

- 11.1.1 所用试样的类型和尺寸;
- 11.1.2 裂纹扩展方向(见E399方法中符号系统);
- 11.1.3 材料厚度;
- 11.1.4 屈服强度;
- 11.1.5 预制疲劳裂纹数据
- 11.1.6 斜断口百分比(仅作为补充数据)。

11.2 R曲线可按照物理裂纹长度或有效裂纹长度来绘制。图例中应包括下列说明:

(a) 对物理裂纹长度进行塑性区修正的方法;

(b) 横坐标为物理裂纹长度还是有裂纹长度。只有按有效裂纹长度绘制的曲线才能予计失稳。

参考文献从略

表1 双柔度弹性标定曲线—CS和CLWL试样[12]

注—仅适用于图7 (a) 和图7 (b) 所示的 V_1 和 V_2 位置

a/w $2v1/2v2^A$			a/w $2v1/2v2^A$			a/w $2v1/2v2^A$			a/w $2v1/2v2^A$		
CLWL CS			CLWL CS			CLWL CS			CLWL CS		
0.350	4.74	5.56	0.415	3.27	3.67	0.480	2.72	2.96	0.545	2.42	2.56
0.355	4.54	5.25	0.420	3.22	3.59	0.485	2.70	2.92	0.550	2.40	2.53
0.360	4.36	5.00	0.425	3.16	3.53	0.490	2.67	2.88	0.555	2.38	2.50
0.365	4.24	4.78	0.430	3.11	3.46	0.495	2.64	2.85	0.560	2.36	2.48
0.370	4.09	4.62	0.435	3.06	3.39	0.500	2.62	2.81	0.565	2.34	2.46
0.375	3.97	4.47	0.440	3.02	3.33	0.505	2.59	2.78	0.570	2.32	2.44
0.380	3.85	4.33	0.445	2.97	3.27	0.510	2.57	2.74	0.575	2.31	2.42
0.385	3.74	4.22	0.450	2.93	3.22	0.515	2.54	2.71	0.580	2.29	2.40
0.390	3.64	4.11	0.455	2.89	3.17	0.520	2.52	2.68	0.585	2.27	2.38
0.395	3.55	4.01	0.460	2.85	3.13	0.525	2.50	2.66	0.590	2.25	2.36
0.400	3.47	3.91	0.465	2.82	3.08	0.530	2.48	2.63	0.595	2.24	2.35
0.405	3.39	3.82	0.470	2.79	3.04	0.535	2.46	2.60	0.600	2.23	2.33
0.410	3.33	3.75	0.475	2.76	3.00	0.540	2.44	2.58			

A——不在裂纹线上测量时, $2V_1/2V_2$ 受夹式引伸计的影响, 采用0.8英寸(20.3毫米)跨距所引起的误差小于0.5%。

表2 推荐的CS和CLWL试样在平面应力状态下的无量纲应力强度因子和柔度值

注— $H/W=0.6$, V_1 在0.1576W处。

a/w $KBW^{1/2}/P$				a/w $KBW^{1/2}/P$			
		EB $2v1/P$				EB $2v1/P$	
		CLWL	CS			CLWL	CS
0.350	6.392	22.83	25.82	0.480	9.093	41.52	44.31
0.355	6.475	23.35	26.33	0.485	9.230	42.52	45.30
0.360	6.558	23.88	26.85	0.490	9.369	43.55	46.33
0.365	6.644	24.43	27.38	0.495	9.512	44.61	47.38
0.370	6.730	24.99	27.94	0.500	9.659	45.70	48.48
0.375	6.818	25.57	28.50	0.505	9.810	46.83	49.60
0.380	6.906	26.16	29.08	0.510	9.964	47.99	50.76
0.385	6.998	26.76	29.68	0.515	10.123	49.18	51.95
0.390	7.090	27.38	30.29	0.520	10.286	50.42	53.19
0.395	7.183	28.02	30.91	0.525	10.453	51.70	54.47
0.400	7.279	28.67	31.55	0.530	10.625	53.02	55.78
0.405	7.376	29.33	32.21	0.535	10.802	54.38	57.15
0.410	7.475	30.01	32.88	0.540	10.984	55.79	58.56
0.415	7.576	30.71	33.57	0.545	11.172	57.24	60.01
0.420	7.678	31.42	34.27	0.550	11.364	58.75	61.52
0.425	7.783	32.15	34.99	0.555	11.563	60.31	63.08
0.430	7.890	32.90	35.73	0.560	11.767	61.92	64.70
0.435	7.999	33.67	36.49	0.565	11.978	63.60	66.37
0.440	8.110	34.45	37.27	0.570	12.1955	65.32	68.10
0.445	8.223	35.25	38.07	0.575	12.420	67.12	69.89
0.450	8.340	36.08	38.89	0.580	12.651	68.97	71.74
0.455	8.458	36.93	39.73	0.585	12.890	70.89	73.66
0.460	8.580	37.80	40.60	0.590	13.136	72.88	75.65
0.465	8.704	38.69	41.49	0.595	13.391	74.94	77.72
0.470	8.830	39.61	42.40	0.600	13.654	77.07	79.85
0.475	8.960	40.55	43.34				

适用于上述柔度值的多项式表达式: 对紧凑拉伸试样:

$$EB_2 V_1/P = 103.8 - 930.4(a/W) + 3610(d/W)^2 - 5930.5(a/W)^3 + 3979(a/W)^4$$

对CLWL试样:

$$EB_2 V_1/P = 101.9 - 948.9(a/W) + 3691.5(a/W)^2 - 6064.0(a/W)^3 + 4054(a/W)^4$$

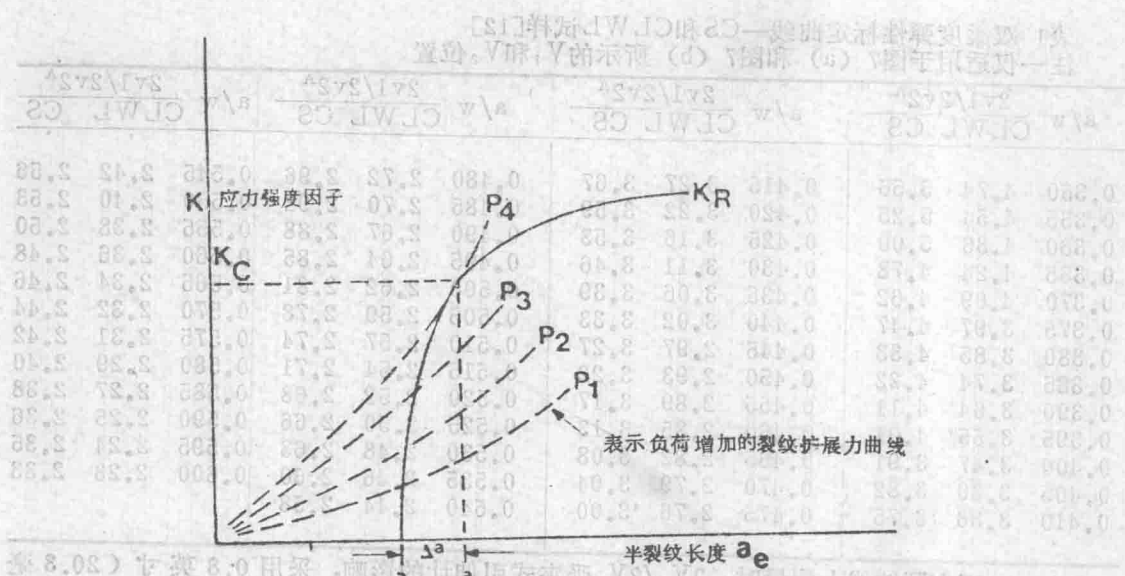


图1 R曲线与裂纹扩展力曲线表示在一起的示意图

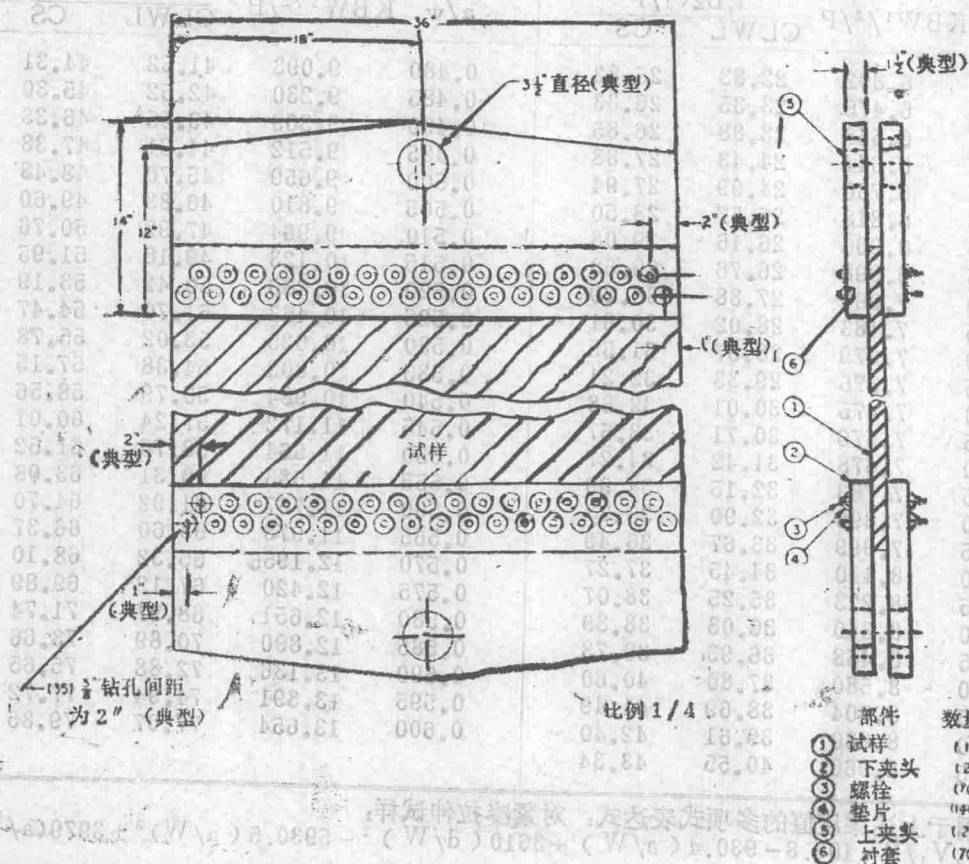


图2 中央裂纹拉伸板试验装置

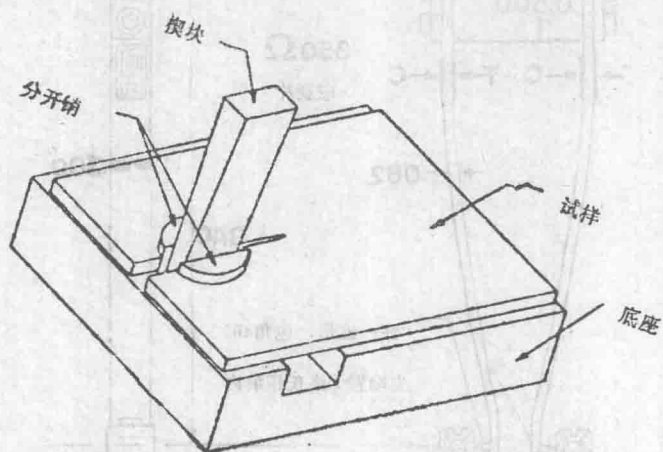


图3 用位移控制楔块加荷的裂纹线加荷试样

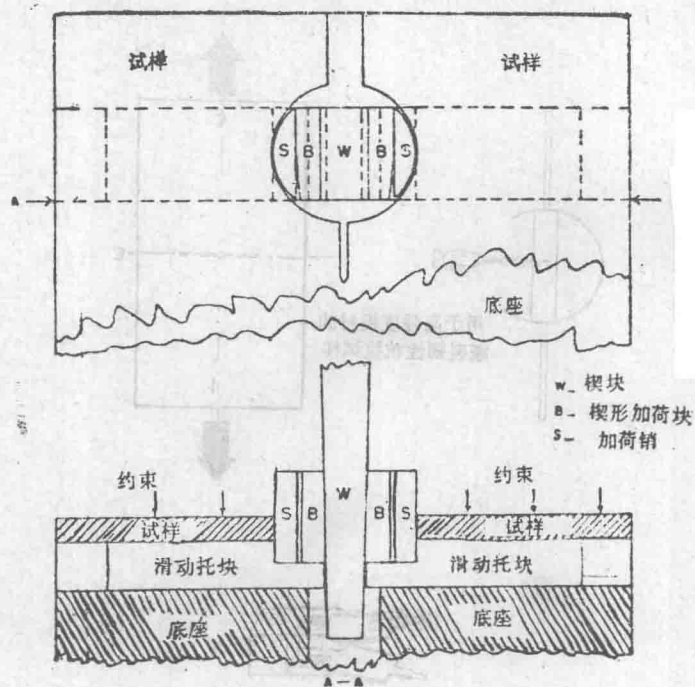


图4 为防止加荷线偏移而设计的特种楔块和分开销装置详图

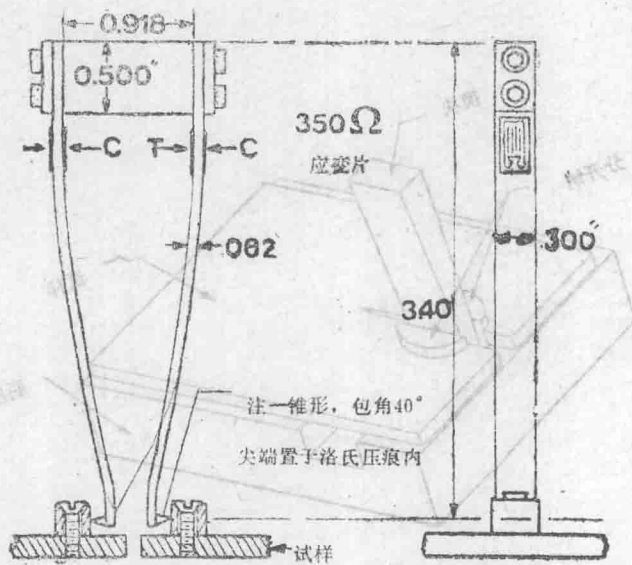


图5 大型双柔度夹式引伸计

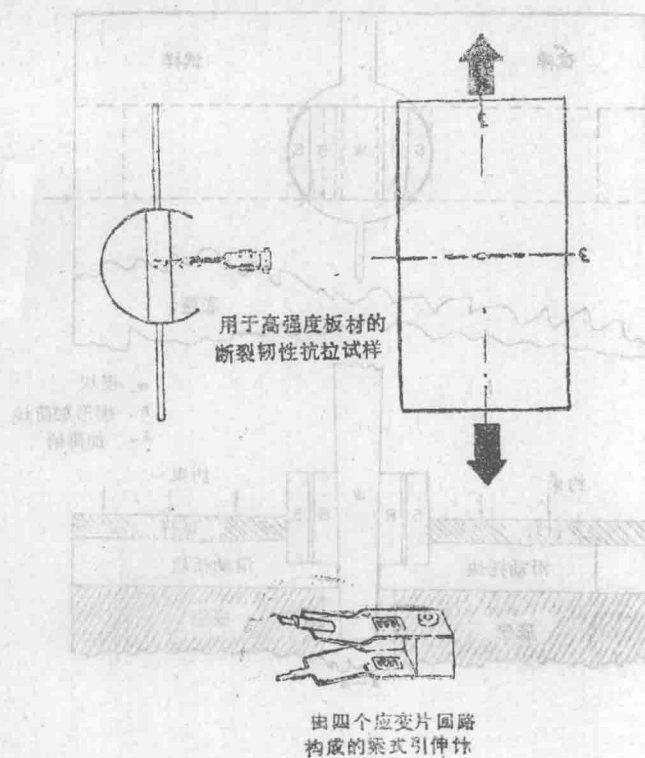


图6 用于中心裂纹拉伸板的夹式引伸计