

团 体 标 准

T/CMES XXXX—202X

代替 T/CMES XXXX—201X

极低温条件金属材料断裂韧性试验数据 处理方法

Data processing method for fracture toughness tests of
metallic materials under cryogenic condition

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国机械工程学会 发布

中国机械工程学会（英文简称 CMES）是具备开展国内、国际标准化活动资质的全国性社会团体。制定中国机械工程学会团体标准，以满足企业需要和市场需求，推动机械工业创新发展，是中国机械工程学会团体标准的工作内容之一。中国境内的团体和个人，均可提出制、修订中国机械工程学会团体标准的建议并参与有关工作。

中国机械工程学会团体标准按《中国机械工程学会标准化管理办法》进行制定和管理。

中国机械工程学会团体标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议的 3/4 以上的专家、成员的投票赞同，方可作为中国机械工程学会团体标准予以发布。

在本标准实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料寄给中国机械工程学会，以便修订时参考。

本标准版权为中国机械工程学会所有。除了用于国家法律或事先得到中国机械工程学会正式许可外，不许以任何形式复制、传播该标准或用于其他商业目的。

中国机械工程学会地址：北京市海淀区首体南路 9 号主语国际 4 座 11 层

邮政编码：100048 电话：010-68799027 传真：010-68799050

网址：www.cmes.org 联系人：袁俊瑞 电子信箱：yuanjr@cmes.org

目 次

前 言 III

引 言 IV

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 极低温条件金属材料断裂韧性试验数据处理方法 2

 4.1 测试准则 2

 4.2 流程图 2

 4.3 材料拉伸性能参数的确定 2

 4.4 柔度的计算与修正 3

 4.5 裂纹长度的计算 4

 4.6 J 积分的计算 5

 4.7 钝化线的构造 6

 4.8 初始裂纹长度的修正 7

 4.9 拟合点有效区域的确定 7

 4.10 J-R 曲线的拟合与临界点的计算 8

 4.11 断裂韧性 K_{Ic} 的换算 9

附 录 A （资料性附录） 316LN 奥氏体不锈钢极低温条件断裂韧性试验数据处理方法 10

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国机械工程学会提出并归口。

本文件起草单位：华东理工大学、上海电气核电设备有限公司、松山湖材料实验室、中国科学院等离子体物理研究所。

本文件主要起草人：朱明亮、张茂龙、轩福贞、夏海鑫、吕映宾、信纪军、李子昕、王晓琪、陈蓉等。

本文件首次制定。

中国机械工程学会标准征求意见稿

引 言

与室温或高温等常规试验条件相比，极低温条件（如 77 K 或 4.2 K）下的断裂韧性试验数据在 J-R 数据点与有效拟合点两方面存在显著差异。在常规条件下，J-R 数据点通常呈现单调递增趋势，即 J 积分增大时裂纹扩展量随之增加，但在极低温环境中，大部分 J-R 数据点在初期出现裂纹扩展量随 J 积分增大而减小的反常现象（即“裂纹闭合”），且此类数据点数量较多，明显不符合物理预期。若将这些反常数据点纳入拟合，将严重影响 J-R 曲线的准确性。

针对有效拟合点，不同国家标准对数据点的数量与分布有不同要求。在常规条件下，由于 J-R 数据点单调递增且材料韧性较好，通常能够满足测试标准要求。而在极低温条件下，初期反常 J-R 数据点的存在以及材料韧性的大幅度下降，导致位于有效区域的数据点显著减少，使得大部分极低温试验所得有效拟合点数量难以满足标准要求，从而影响 J-R 曲线拟合的准确性与可靠性。

综上所述，极低温条件下存在部分数据点规律异常与有效拟合点数量不足的特点，这将显著影响 J-R 曲线的准确性与可靠性，导致试验数据不能真实反映材料的断裂性能。因此，为了获得材料的真实断裂韧性水平，有必要进行相应的优化改进，以减小上述因素对断裂韧性测量结果准确性的不利影响，为极端工况下材料性能评价和制造工艺优化提供数据支撑。

基于极低温条件的特殊性，主要优化目标包括：1）避免初期反常 J-R 数据点参与拟合；2）在保证有效区域位于裂纹稳定扩展区的前提下，扩大其范围；3）保证 J 积分与裂纹扩展量的匹配程度，降低极低温条件下匹配性不足带来的影响。围绕上述优化目标，以国内外使用最广泛的 ASTM E1820 标准作为基本模板，针对极低温测试条件，进行相应的优化改进（具体优化内容如表 1 所示），以形成适合我国材料与工艺条件的自主技术标准。

表 1 针对极低温条件的数据处理方法优化方案

序号	优化对象	优化内容	优化效果
1	塑性 J 积分计算	$J_{pl(i)} = \frac{\eta_{pl} A_{pl(i)}}{B_N b_0} \frac{1}{1 + \left(\frac{\alpha - 0.5}{\alpha + 0.5} \right) \frac{\Delta a_i}{b_0}}$	获得更准确的塑性 J 积分，避免迭代误差的影响
2	初始裂纹长度修正	保持 J 积分不变，沿裂纹扩展量轴方向平移 J-R 数据点，直至最小裂纹扩展量对应数据点位于钝化线上，此时的初始裂纹长度作为其修正值	提高裂纹扩展量的准确度，增强 J-R 数据点与拟合模型的匹配度
3	有效区域右边界	与钝化线相距 0.10(W - a ₀)的平行线	在保证位于裂纹稳定扩展区的前提下扩大有效区域范围
4	J 积分上极限值	采用 GB/T 21143 标准所规定的 J 积分上极限值；若所得有效拟合点数量或分布不满足要求，改用 JIS Z 2284 标准或 ASTM E1820 标准	保证裂纹扩展行为受 J 积分约束，并根据拟合点数量进行灵活调整
5	拟合点选取范围	仅在裂纹扩展量随 J 积分单调递增的阶段，按有效区域选择数据点进行曲线拟合	避免反常数据点对曲线拟合的影响
6	有效拟合点数量要求	改用 JIS Z 2284 标准规定的需至少存在 4 个有效拟合点	在保证曲线拟合可靠度的前提下降低有效拟合点数量要求

极低温条件金属材料断裂韧性试验数据处理方法

1 范围

本文件规定了在极低温条件下，针对紧凑拉伸型试样与单试样法断裂韧性试验的数据处理方法，包括材料拉伸性能参数的确定、柔度的计算与修正、裂纹长度的计算、J 积分的计算、初始裂纹长度的修正、钝化线的构造、拟合点有效区域的确定、J-R 曲线的拟合与临界点的计算、以及断裂韧性 K_{IC} 的换算。

本文件适用于金属材料在极低温条件下进行弹塑性断裂韧性试验的数据处理，试验方法为单试样法，试样类型为紧凑拉伸型试样。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 228 金属材料 拉伸试验

GB/T 21143 金属材料 准静态断裂韧度的统一试验方法

GB/T 28896 金属材料 焊接接头准静态断裂韧度测定的试验方法

ASTM E1820 Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness

JIS Z 2284 Method of Elastic-Plastic Fracture Toughness J_{IC} Testing for Metallic Materials in Liquid Helium

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

断裂韧性试验 Fracture toughness test

用于测定材料抵抗裂纹扩展能力的试验方法。

3.2

应力强度因子(K) Stress intensity factor (K)

当满足小尺度屈服条件时，描述裂纹尖端附近局部应力应变场的动态参数。

3.3

平面应变断裂韧性(K_{IC}) Plane strain fracture toughness (K_{IC})

在满足平面应变和小尺度屈服条件的情况下，当模式 I 的断裂从预裂纹处开始时的断裂抗力。

此外，从 J_{IC} 转化而来的 K_{IC} 代表的是韧性断裂对应的值。

3.4

J 积分 J-integral

围绕裂纹前缘从裂纹的一侧表面到另一侧表面的线积分或面积分，用以表征裂纹前缘地区的应力-应变场。

3.5

弹塑性断裂韧性(J_{IC}) Elastic-plastic fracture toughness (J_{IC})

在发生平面应变型 I 型延性断裂开始时的抗断裂能力。不考虑屈服程度大小的影响，是一种不依赖于试样形状和尺寸以及拉伸和弯曲加载方式的材料常数。

3.6

稳定裂纹扩展 Stable crack extension

在位移控制的试验条件下，位移保持恒定时，裂纹扩展停止或将停止时的裂纹扩展量。

3.7

非稳定裂纹扩展 Unstable crack extension

失稳的裂纹扩展，之前可能有或者没有稳定裂纹扩展。

3.8

裂纹扩展阻力曲线(J-R 曲线) Crack extension resistance curve (J-R curves)

J 积分随裂纹稳定扩展量的变化曲线。

3.9

钝化线 Blunting line

在断裂开始之前， $J-\Delta a$ 关系所呈现的近似直线。

4 极低温条件金属材料断裂韧性试验数据处理方法

4.1 测试准则

参考 ASTM E1820 标准中的单试样法对紧凑拉伸型试样进行断裂韧性 J_{IC} 测试，获取原始载荷-位移数据。

4.2 流程图

任意金属材料在通过 4.1 节方法获取原始试验数据后，其极低温状态下的弹塑性断裂韧性可以根据 4.3 至 4.11 所描述的步骤确定，该方法具体流程见图 1。

4.3 材料拉伸性能参数的确定

4.3.1 参数获取方法

按照 GB/T 228 的相关方法，通过极低温拉伸试验，获得材料在极低温条件下完整的工程应力-应变曲线，计算材料相应的弹性模量、泊松比、屈服强度与抗拉强度。

4.3.2 拉伸试验区域

按照 GB/T 28896 的相关规定，若针对焊接接头，当裂纹尖端完全位于焊缝金属时，应采用全焊缝金属拉伸试样测出其拉伸性能；当裂纹尖端位于或部分位于热影响区时，应采用母材或焊缝二者中较高的拉伸性能。

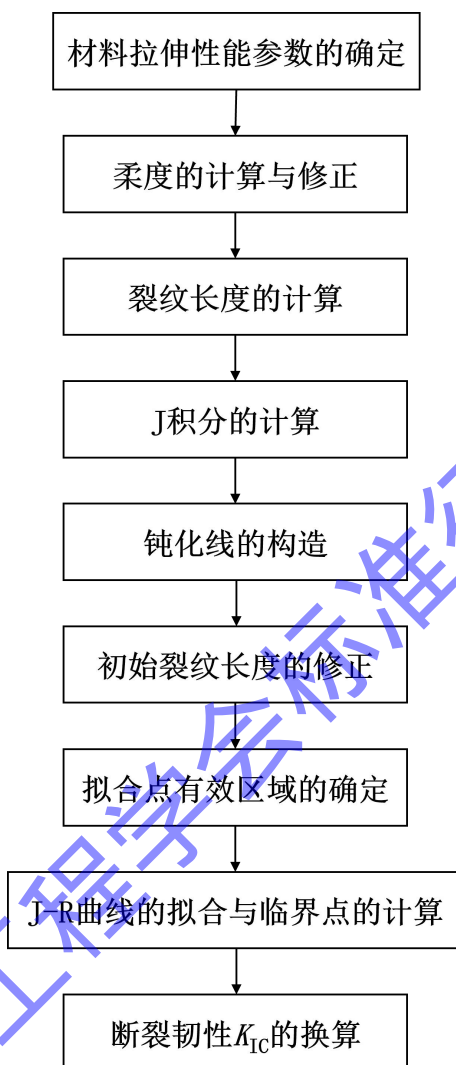


图 1 极低温条件断裂韧性试验数据处理方法流程示意图

4.4 柔度的计算与修正

提取单试样法所得载荷-位移曲线中每条卸载线数据，选取每条卸载线中间 80% 的数据点进行线性拟合，所得斜率倒数作为对应卸载开始点的柔度。

试样在加载过程中，其上下裂纹面将围绕剩余韧带上的转动中心产生刚性转动，为了获得精确的 J-R 阻力曲线，需对所得柔度进行旋转修正，按照公式（1）、（2）、（3）。

$$C_{c(i)} = \frac{C_i}{\left(\frac{H^*}{R_i} \sin \theta_i - \cos \theta_i\right) \left(\frac{D}{R_i} \sin \theta_i - \cos \theta_i\right)} \dots\dots\dots (1)$$

$$\theta_i = \arcsin \left(\frac{D + \frac{v_{m(i)}}{2}}{\sqrt{D^2 + R_i^2}} \right) - \arctan \left(\frac{D}{R_i} \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$R_i = \frac{W + a_i}{2} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$C_{c(i)}$: 修正后柔度, 单位为米每牛(m/N);

C_i : 修正前所得柔度, 单位为米每牛(m/N);

H^* : 两销孔中心原始距离的一半, 单位为米(m), 见图 2;

R_i : 试样旋转半径, 单位为米(m), 见图 2 和图 3;

a_i : 根据 4.4 计算得到的旋转修正前每个卸载开始点处实时裂纹长度, 单位为米(m);

D : 测量点原始距离的一半, 单位为米(m), 见图 2 和图 3;

θ_i : 试样绕旋转中心旋转角度, 单位为弧度(rad), 见图 3;

$v_{m(i)}$: 每个卸载开始点处的位移测量值, 单位为米(m)。

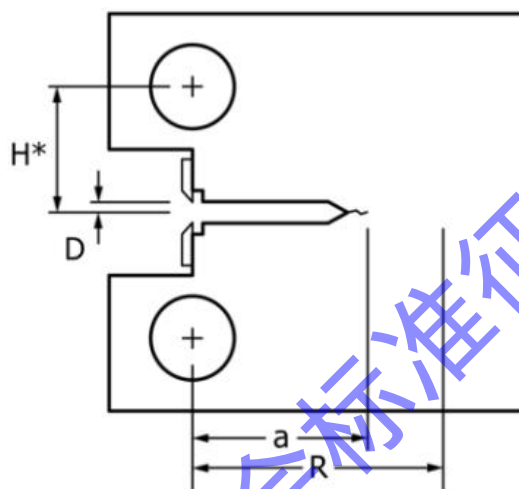


图 2 柔度修正试样尺寸参数示意图

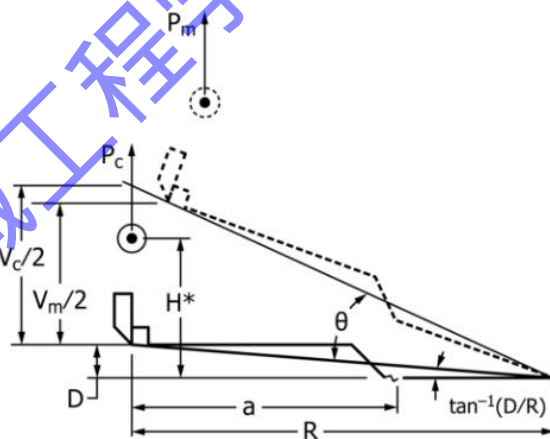


图 3 柔度旋转修正示意图

4.5 裂纹长度的计算

对于采用单试样法进行测试的紧凑拉伸型试样, 每个卸载开始点处的裂纹长度的计算按公式(4)和公式(5)。

$$\frac{a_i}{W} = 1.000196 - 4.06319u + 11.242u^2 - 106.043u^3 + 464.335u^4 - 650.677u^5 \dots\dots\dots(4)$$

$$u = \frac{1}{[B_e E C_i]^{1/2} + 1} \dots\dots\dots(5)$$

式中：

a_i ：每个卸载开始点处的裂纹长度计算值，单位为米(m)；

W ：试样销孔中心距底部距离，单位为米(m)，见图 4；

B_e ：试样有效厚度，单位为米(m)， $B_e = B - (B - B_N)^2/B$ ， B 为试样厚度（见图 4）， B_N 为试样净厚度（若试样未开侧槽， $B_N = B$ ；若开侧槽，净厚度为两侧槽底部间距）；

C_i ：每个卸载开始点处对应柔度，单位为米每牛(m/N)，由 4.3 计算得到；

E ：材料弹性模量，单位为帕(Pa)。

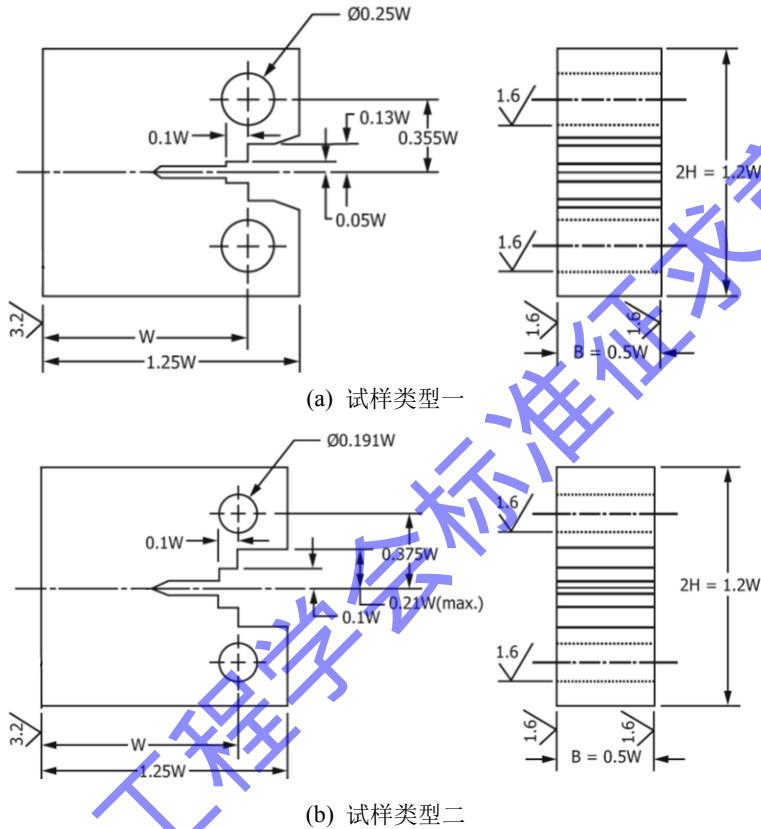


图 4 紧凑拉伸型试样尺寸示意图

通常情况下，紧凑拉伸型试样尺寸需满足 $2 \leq W/B \leq 4$ ，具体请参考 ASTM E1820 标准中的相关规定。

针对柔度修正与裂纹长度计算，先使用初始柔度计算得到裂纹长度计算初始值，再代入 4.3 节中修正柔度，最后将修正后柔度再代入裂纹长度计算公式得到裂纹长度最终值。

试样初始裂纹长度可参考 GB/T 21143 标准中所规定的九点测量方法。

4.6 J 积分的计算

每个卸载开始点处对应 J 积分由弹性 J 积分与塑性 J 积分组成，按公式 (6)、(7)、(8) 计算弹性 J 积分。

$$J_{el(i)} = \frac{(K_{(i)})^2(1-\nu^2)}{E} \dots\dots\dots(6)$$

$$K_{(i)} = \frac{P_{(i)}}{[BB_NW]^{\frac{1}{2}}} f\left(\frac{a_i}{W}\right) \dots\dots\dots(7)$$

$$f\left(\frac{a_i}{W}\right) = \frac{\left\{\left(2+\frac{a_i}{W}\right)\left[0.886+4.64\left(\frac{a_i}{W}\right)-13.32\left(\frac{a_i}{W}\right)^2+14.72\left(\frac{a_i}{W}\right)^3-5.6\frac{a_i^4}{W^4}\right]\right\}}{\left(1-\frac{a_i}{W}\right)^{3/2}} \quad (8)$$

式中:

$J_{el(i)}$: 每个卸载开始点对应弹性 J 积分, 单位为焦耳每平方米(J/m²);

ν : 材料泊松比;

$P_{(i)}$: 每个卸载开始点对应载荷测量值, 单位为牛(N)。

塑性 J 积分按公式 (9)、(10)、(11) 计算。

$$J_{pl(i)} = \frac{\eta_{pl} A_{pl(i)}}{B_N b_0} \frac{1}{1 + \left(\frac{\alpha - 0.5}{\alpha + 0.5}\right) \frac{\Delta a_i}{b_0}} \quad (9)$$

$$\eta_{pl} = 2 + 0.522 \frac{b_0}{W} \quad (10)$$

$$b_0 = W - a_0 \quad (11)$$

式中:

$A_{pl(i)}$: 每个卸载开始点对应的载荷-位移曲线面积中塑性部分, 单位为焦耳(J), 见图 5;

b_0 : 初始韧带尺寸, 单位为米(m);

α : 与试样类型相关的系数, 当试样为紧凑拉伸型试样时, $\alpha = 0.9$;

Δa_i : 每个卸载开始点裂纹扩展量, 单位为米(m), $\Delta a_i = a_i - a_0$;

a_0 : 试样初始裂纹长度, 单位为米(m)。

总 J 积分由公式 (12) 计算得到。

$$J_{(i)} = J_{el(i)} + J_{pl(i)} \quad (12)$$

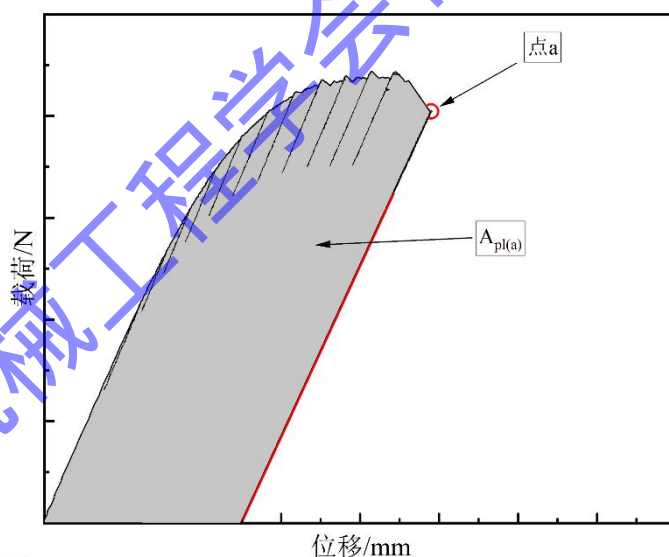


图 5 $A_{pl(i)}$ 示意图

4.7 钝化线的构造

采用 Landes 等人针对理想弹塑性材料, 通过理论理想模型推导得到的钝化线模型, 如公式 (13)。

$$J = 2\sigma_Y \Delta a \quad (13)$$

式中:

σ_Y : 材料在测试温度下的有效屈服强度, 其值等于测试温度下屈服强度与抗拉强度的平均值, 单位为帕(Pa);

Δa : 裂纹扩展量, 单位为米(m)。

4.8 初始裂纹长度的修正

若 J-R 数据点存在位于钝化线左侧的情况,为使数据点与 J-R 曲线模型更匹配,需在 J-R 图中将所有数据点沿裂纹扩展量坐标轴方向进行平移,直至最小裂纹扩展量对应数据点位于钝化线上,如图 6 所示,此时对应的初始裂纹长度值为修正后初始裂纹长度。若所有 J-R 数据点均位于钝化线右侧,则可不进行初始裂纹长度的修正。

在极低温条件下,由于裂纹长度对 J 积分极其敏感,因此为保证裂纹扩展量与 J 积分的匹配程度,在初始裂纹长度修正后,需将修正值代入 4.5 节中重新计算 J 积分。

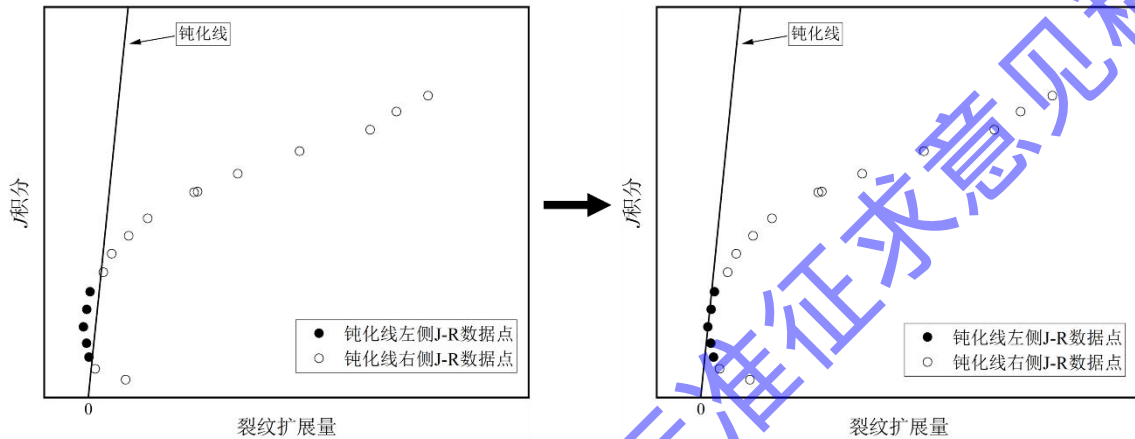


图 6 初始裂纹长度修正示意图

4.9 拟合点有效区域的确定

4.9.1 有效区域左边界

过 $\Delta a = 0.15 \text{ mm}$ 处作钝化线的平行线,定义为有效区域的左边界线,见图 7。

4.9.2 有效区域右边界

按公式 (14) 定义 Δa_{limit} , 过该点作钝化线的平行线,定义为有效区域的右边界,见图 7。

$$\Delta a_{limit} = 0.10(W - a_0) \dots \dots \dots (14)$$

4.9.3 有效区域上边界

按公式 (15)、(16)、(17) 中最小值定义 J_{limit} , 过该点作横坐标轴的平行线,定义为有效区域的上边界,见图 7。

$$J_{limit} = a_0(\sigma_Y/20) \dots \dots \dots (15)$$

$$J_{limit} = B(\sigma_Y/20) \dots \dots \dots (16)$$

$$J_{limit} = b_0(\sigma_Y/20) \dots \dots \dots (17)$$

注: 应优先采用上述公式确定阻力曲线拟合点有效区域上边界, 若范围内数据点数量不满足要求, 也可使用 $J_{limit} = b_0(\sigma_Y/15)$ 。若仍无法满足, 也可使用 $J_{limit} = b_0(\sigma_Y/7.5)$ 。

4.9.4 拟合点数量与分布要求

过 $\Delta a = 0.5 \text{ mm}$ 处作钝化线的平行线, 见图 7。在 0.15 mm 与 0.5 mm 钝化线平行线之间需至少存在 1 个拟合点; 在 0.5 mm 与 Δa_{limit} 钝化线平行线之间需至少存在 1 个拟合点; 在整个有效区域内, 需至少存在 4 个拟合点。

4.9.5 拟合点选取要求

从最小裂纹扩展量对应数据点往后的 J-R 数据点中选择有效拟合点。

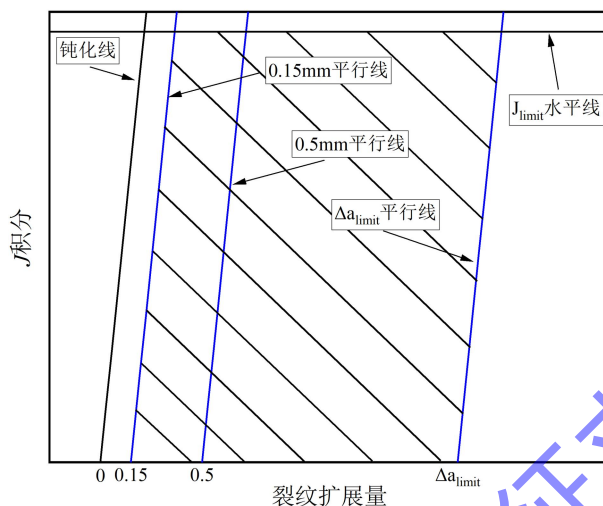


图 7 拟合点有效区域示意图

注：图 7 中阴影部分为拟合点有效区域。

4.10 J-R 曲线的拟合与临界点的计算

4.10.1 拟合模型

取位于 4.8 节有效区域内的 J-R 数据点，按公式 (18) 作为拟合模型进行 J-R 曲线的拟合。

$$J = C_1 \Delta a^{C_2} \dots\dots\dots (18)$$

注： $C_1 > 0$ ； $C_2 \leq 1$ 。

4.10.2 有效区域左边界更新

拟合曲线与 0.15 mm 钝化线平行线的交点横坐标记为 Δa_{min} ，与 0.15 mm 钝化线平行线共同组成新的有效区域左边界，见图 8。

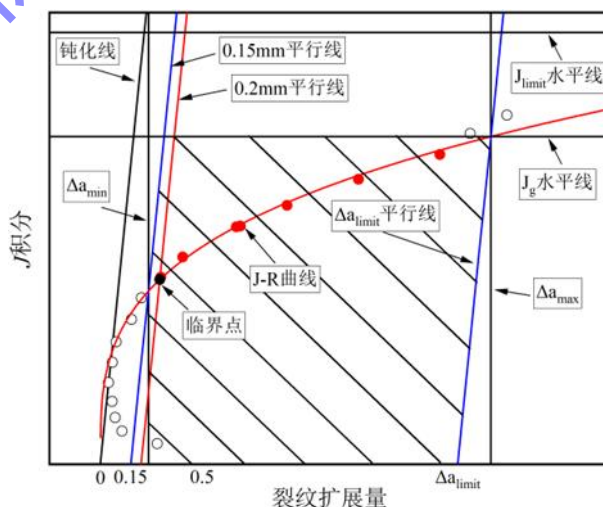


图 8 拟合与新有效区域示意图

4.10.3 有效区域右边界更新

拟合曲线与 Δa_{limit} 钝化线平行线的交点横坐标记为 Δa_{max} ，与 Δa_{limit} 钝化线平行线共同组成新的有效区域右边界，见图 8。

4.10.4 有效区域上边界更新

拟合曲线与 Δa_{limit} 钝化线平行线的交点纵坐标记为 J_g ， J_g 与 J_{limit} 中较小值作为新的有效区域上边界，见图 8。

4.10.5 拟合点更新

若参与拟合的数据点存在位于新有效区域之外的情况，需去除位于新有效区域之外的数据点，重新拟合，重新构建新有效区域，直至参与拟合的数据点均位于新有效区域内。

4.10.6 临界候选点确定

最终拟合曲线与 0.2 mm 钝化线平行线的交点对应横纵坐标分别记为 Δa_Q 与 J_Q 。

4.10.7 临界点检验

按公式 (19)、(20)、(21) 对临界点进行检验，若满足要求，则该交点作为临界点，对应横纵坐标记为 Δa_{IC} 与 J_{IC} 。

$$B > 10J_Q/\sigma_Y \dots\dots\dots (19)$$

$$b_0 > 10J_Q/\sigma_Y \dots\dots\dots (20)$$

$$\left(\frac{dJ}{da}\right)_{\Delta a_Q} < \sigma_Y \dots\dots\dots (21)$$

4.11 断裂韧性 K_{IC} 的换算

按公式 (22) 将 J_{IC} 换算为平面应变断裂韧性 K_{IC} 。

$$K_{IC} = \left[\frac{J_{IC}E}{(1-\nu^2)}\right]^{1/2} \dots\dots\dots (22)$$

附 录 A
(资料性附录)

316LN 奥氏体不锈钢极低温条件断裂韧性试验数据处理方法

对 10 组 316LN 奥氏体不锈钢试样进行 4.2 K 极低温断裂韧性试验,分别采用 GB/T 21143、ASTM E1820、JIS Z 2284 以及本文件所规定的方法进行数据处理,所得结果如图 A.1 所示。显然,使用本文件的方法处理数据得到的结果位于有效且合理的范围内。而根据过程中 J 积分计算、初始裂纹长度修正以及有效区域规定等多个环节的对比,本文件的方法更适用于极低温工况下的断裂韧性试验数据处理,一是由于本文件的方法得到的 J-R 数据点更精准;二是由于本文件的方法能较为有效地解决极低温工况下有效拟合点数量较少的问题,使得 J-R 曲线拟合更可靠。

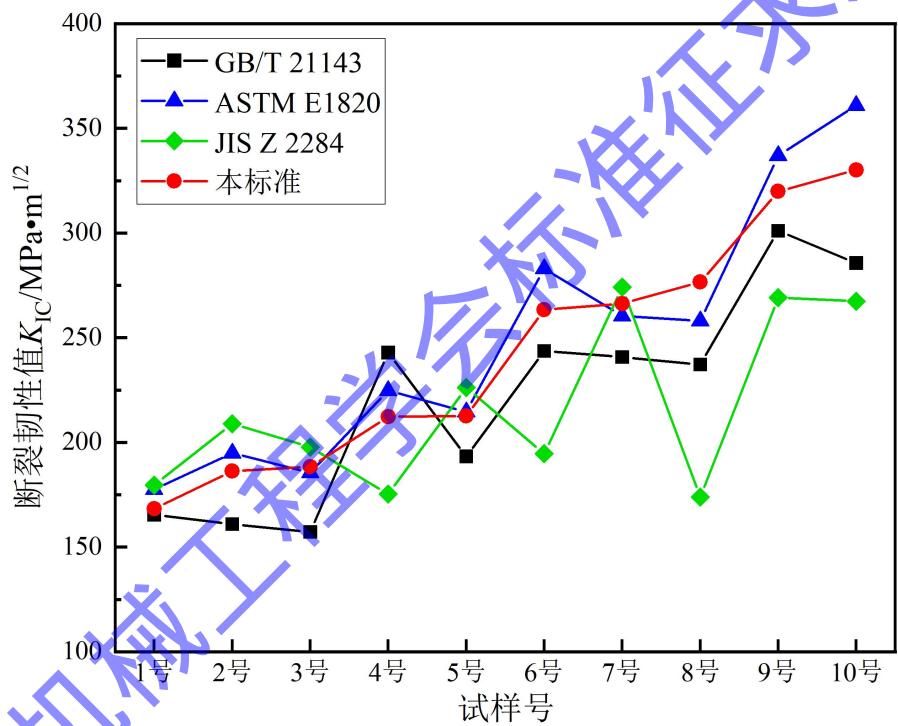


图 A.1 316LN 奥氏体不锈钢极低温断裂韧性试验数据处理结果图