



中华人民共和国国家标准化指导性技术文件

GB/Z XXXX.3—202X

金属材料焊缝破坏性试验 焊件的热裂纹试验 弧焊方法 第3部分：外载荷试验

Destructive tests on welds in metallic materials—
Hot cracking tests for weldments—
Arc welding processes—Part 3:Externally loaded tests

(ISO/TR 17641-3:2005, MOD)

(征求意见稿)

(本稿完成日期 2020 年 10 月 13 日)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

国家市场监督管理总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 符号和缩略语.....	1
5 通则.....	1
6 试验.....	4
7 试验报告.....	11

前 言

本指导性技术文件按照 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。

本指导性技术文件与 GB/T ××××.1《金属材料焊缝破坏性试验 焊件的热裂纹试验 弧焊方法 第1部分：总则》和 GB/T ××××.2《金属材料焊缝破坏性试验 焊件的热裂纹试验 弧焊方法 第2部分：自拘束试验》共同构成《金属材料焊缝破坏性试验 焊件的热裂纹试验 弧焊方法》系列标准化文件。

本指导性技术文件使用重新起草法修改采用 ISO/TR 17641-3:2005《金属材料焊缝破坏性试验 焊件的热裂纹试验 弧焊方法 第3部分：外载荷试验》。

本指导性技术文件与 ISO/TR 17641-3:2005 的技术性差异及其原因如下：

- 增加了弯曲应变的符号和说明（见第4章）；
- 删除了 S_s 和 S_v 的符号及说明（见第4章）；
- 为与试验相符，将“ V_{crit} ”的说明由“产生热裂纹的临界应变”更改为“产生热裂纹的临界拉伸速度”（见第4章）；
- 为与试验方法 GB/T ××××.1 的表述一致，将试验名称“平板拉伸试验”更改为“程控平板拉伸试验”（见第4、5章、6.3）；
- 将图1中试样长度符号由“ a ”更改为“ l ”（见6.1.2）；
- 增加了辅助弯曲板的相关规定和示意图3c)、d)（见6.2.2）；
- 增加了熄弧前、后操作细节（见6.2.3）；
- 增加了弯曲应变的公式及相关说明（见6.2.3）；
- 增加了关于裂纹检查的示例图4b)（见6.2.4）；
- 增加了关于获得BTR的说明（见6.2.4）；
- 将符号由“ V_{cr} ”更改为“ V_{crit} ”（见6.3.3、6.3.4）。

本指导性技术文件还做了下列编辑性修改：

- 用修改采用国际标准的 GB/T ××××.1 代替 ISO 17641-1（见第3章）；
- 将表1“BTR”说明中“NST与DTR之差值”更改为“NST与DRT之差值”（见第4章）；
- 为与试验相符，焊接速度符号由“ v_s ”更改为“ v_w ”（见第4章）；
- 将图2中“ R_m ”单位由“N/mm²”更改为“MPa”（见6.1.5）。

本指导性技术文件由全国焊接标准化技术委员会（SAC/TC 55）提出并归口。

本指导性技术文件起草单位：

本指导性技术文件主要起草人：

金属材料焊缝破坏性试验 焊件的热裂纹试验

弧焊方法 第3部分:外载荷试验

1 范围

本指导性技术文件规定了热拉伸试验、可调拘束试验和横向可调拘束试验、程控平板拉伸试验的试样尺寸、试样制备、试验步骤和评定方法。

本指导性技术文件适用于奥氏体不锈钢、镍及镍基合金、镍铜合金焊件和焊接材料热裂纹敏感性评定，铝合金和高强钢等其他材料也可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本指导性技术文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本指导性技术文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本指导性技术文件。

GB/T ××××.1—202× 金属材料焊缝破坏性试验 焊件的热裂纹试验 弧焊方法 第1部分：总则（GB/T ××××.1—202×，ISO 17641-1:2004，MOD）

3 术语和定义

GB/T ××××.1 界定的术语和定义适用于本指导性技术文件。

4 符号和缩略语

下列符号和缩略语适用于本指导性技术文件（见表1）。

5 通则

外载荷热裂纹试验可用于母材、焊件和焊缝金属的凝固裂纹、液化裂纹和失延裂纹敏感性的定量评定，见表2。由于热裂纹机理尚未明确，本指导性技术文件描述的几种外载荷试验使用了不同的热裂纹敏感性评定指标，均没有精确重现广泛制造领域中易出现热裂纹问题时相关的温度、冷却速度、拘束和外加应变等条件，尽管不断完善，目前这些试验只能用于对材料、焊接材料和焊接条件分级，将结果与相关数据库比较以判断是否适用，因而不能明确某一特定试验最适合某一特定要求。试验人员应根据经验或初试选定最适用的试验。

四种外载荷热裂纹试验类型及应用示例见表2，需使用合适的试验设备对试样施加外载荷。

外加载荷使试样在脆性温度区间（BTR）内产生可测应变和应变速率，以重现焊接过程中的某种条件。试验结果是定量的，使用规范的步骤和相似的设备时，同一试验的再现性通常较好。

然而不同的实验室采用的设备和试验步骤是非标准化的，实验室间绝对再现性受限；实验室内使用一致的步骤和同样的设备，再现性通常较好。

表 1 符号和缩略语及说明

符号/缩略语	说明	单位
热拉伸试验		
BTR	脆性温度区间，零强度温度（NST）与延性恢复温度（DRT）之差值	°C
DRR	延性恢复率，差值之比 $(\Delta Z_{2-3}) / \Delta Z_{1-3}) \times 100$ （见图 2）	%
DRT	延性恢复温度，拉伸试验冷却过程中 Z 恢复到 5% 时的温度	°C
NDR	零延性温度区间，差值 ΔT_{6-9} （见图 2）	°C
NST	零强度温度，即试验的最高温度 T_6 （见图 2）	°C
RDR	延性恢复比例，面积之比 $(S_{234} / S_{135}) \times 100$ （见图 2）	—
R_m	抗拉强度	MPa
T_s	固相温度， T_7 （见图 2）	°C
Z	断面收缩率	%
可调拘束试验和横向可调拘束试验		
L_{tot}	所有检测到的热裂纹的总长度	mm
I	试样长度	mm
R	弯曲模曲率半径	mm
t	试样厚度	mm
w	试样宽度	mm
ϵ	弯曲应变，试样的上表面平行焊缝轴线方向的线应变， $\epsilon = \frac{t}{2R + t} \times 100\%$	%
程控平板拉伸试验		
V_{crit}	产生第一条热裂纹的临界拉伸速度	mm/s
V_w	焊接速度	cm/min

表2 外载荷热裂纹试验及其应用

试验类型	裂纹类型	指 标	应 用
可调拘束试验	凝固裂纹	L_{tot} 、BTR	母材的选用和评定 焊缝金属的选用和评定 焊接工艺
	液化裂纹	L_{tot}	
	失延裂纹	L_{tot}	
横向可调拘束试验	凝固裂纹	L_{tot}	焊缝金属的选用 焊接工艺
程控平板拉伸试验 (PVR 试验)	凝固裂纹	V_{crit}	材料的选用 多道焊 焊接工艺 材料匹配
	液化裂纹	V_{crit}	
	失延裂纹	V_{crit}	
热拉伸试验 (Gleeble™)	凝固裂纹	BTR	材料的选用和评定
	液化裂纹	BTR	

评定母材时，可调拘束试验和程控平板拉伸试验采用 TIG 焊方法加热试样，热拉伸试验采用电阻焊方法加热试样。对形成的热影响区施加应变，从而进行裂纹敏感性评定。

评定焊缝金属裂纹敏感性时，可调拘束试验和程控平板拉伸试验采用适当的电弧焊方法熔敷一条焊缝，在焊缝凝固时施加应变，评定焊缝产生的裂纹；对于从多道焊接头中制取的热拉伸试样，按照 6.1.1 规定的程序通过力学性能检测进行评定。

多道焊焊缝也可使用可调拘束试验和程控平板拉伸试验评定裂纹敏感性，先制备多道焊熔敷金属的试样，然后采用与评定母材试验中类似的 TIG 焊方法再次加热焊缝金属，对形成的热影响区进行评定。

试样中可能存在不止一种类型的热裂纹，但应着重形成单一类型的裂纹，例如将试样的试验应变减小到一定程度，则不再产生凝固裂纹以外类型的裂纹。因而试样中没有某种类型的裂纹，并不意味着在制造中没有产生这种类型裂纹的风险。

横向可调拘束试验主要通过施加与焊缝长度方向垂直的横向应变来评定焊缝金属凝固裂纹的敏感性。试验中如产生其他类型热裂纹，应在试验报告中说明。

6 试验

6.1 热拉伸试验

6.1.1 概述

试验使用圆形横截面拉伸试样，在模拟焊接热循环条件下进行拉伸试验，以测定材料热裂纹敏感性，试样可能在焊接热循环中任一时刻突然断裂。

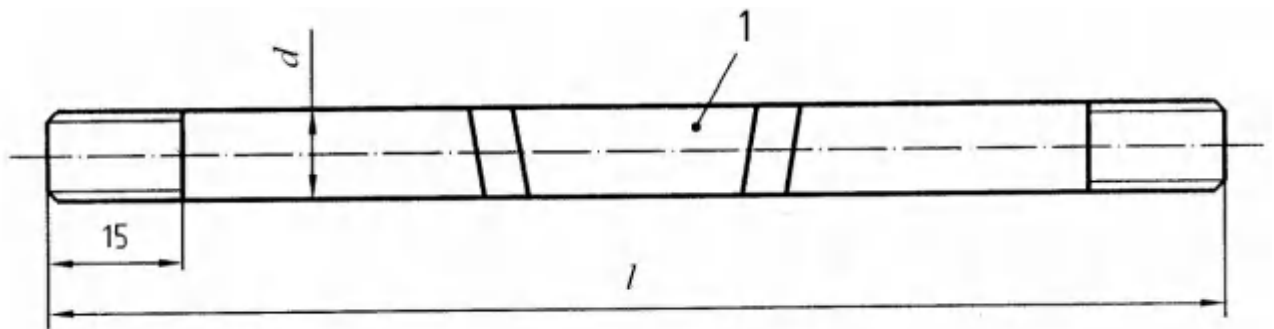
程序 A 是模拟焊接熔化热循环，将拉伸试样加热至熔化温度，试验加载使试样在预先确定点失效。

程序 B 模拟热影响区液化裂纹，仅需要将试样加热到零强度温度（NST），母材热影响区液化裂纹和多道焊道间热影响区液化裂纹的试验程序相同。试验程序主要用于焊缝金属热裂纹研究，再现性好。

6.1.2 试样尺寸

试样尺寸及焊接接头的位置见图 1。

单位为毫米



试验程序	试样直径 d	试样长度 l
A（评定凝固裂纹）	10	130
B（评定液化裂纹）	6	110

标引序号说明：
1——焊缝金属。

图 1 热拉伸试验的试样尺寸

6.1.3 保护气氛

试样应在密闭室内加热。加热室先抽真空，再用任何适宜的方法填充氩气以避免试样在高温时过度氧化，确保试验开始时气氛中氧气含量不超过 0.1%。

6.1.4 试验步骤

6.1.4.1 概述

试样温度测量应选用直径为 0.2 mm/0.25 mm 的 Pt-PtRh 热电偶，用储能点焊将热电偶固定在试样长度的中间位置并垂直于试样直径。

6.1.4.2 程序 A-评定凝固裂纹

将直径为 10 mm 试样安装在水冷铜钳口中，使用可控电阻将试样加热至熔点。采用紧配合的石英管防止试样中心部分在接近熔点时坍塌。在凝固和进一步冷却过程中钳口应保持固定，以使试样在收缩应变/拘束条件下诱发裂纹。

在随后的试验中，在热循环后施加可控压缩以避免开裂。

6.1.4.3 程序 B-评定液化裂纹

为测定零强度温度 (NST)，将直径为 6 mm 试样以约 50 °C/s 的速率（对于某些合金可升至 250 °C/s）加热至低于固相线温度 50 °C~100 °C 后，以约 2 °C/s 的速率继续加热，同时施加约 100 N 的恒定载荷拉伸至试样断裂。

热延性通过加热和冷却两个过程可以测定。对于冷却过程，试样应加热至 NST，然后冷却至试验温度进行拉伸试验。对于加热过程，试样仅需加热至试验温度，然后以 50 mm/s 的应变速率施加拉伸载荷。加热和冷却速率应与模拟的焊缝金属经历的热循环相对应。

在加热过程中，应允许试样自由膨胀。然而，如果实践中的数据可用，使用设备程序能模拟焊接应变。在冷却过程中，应允许试样自由收缩，或可以施加可控压力至达到延性恢复温度 (DRT)。对试样轴向收缩的补偿，可作为防止试样开裂所需应变的定量测量。

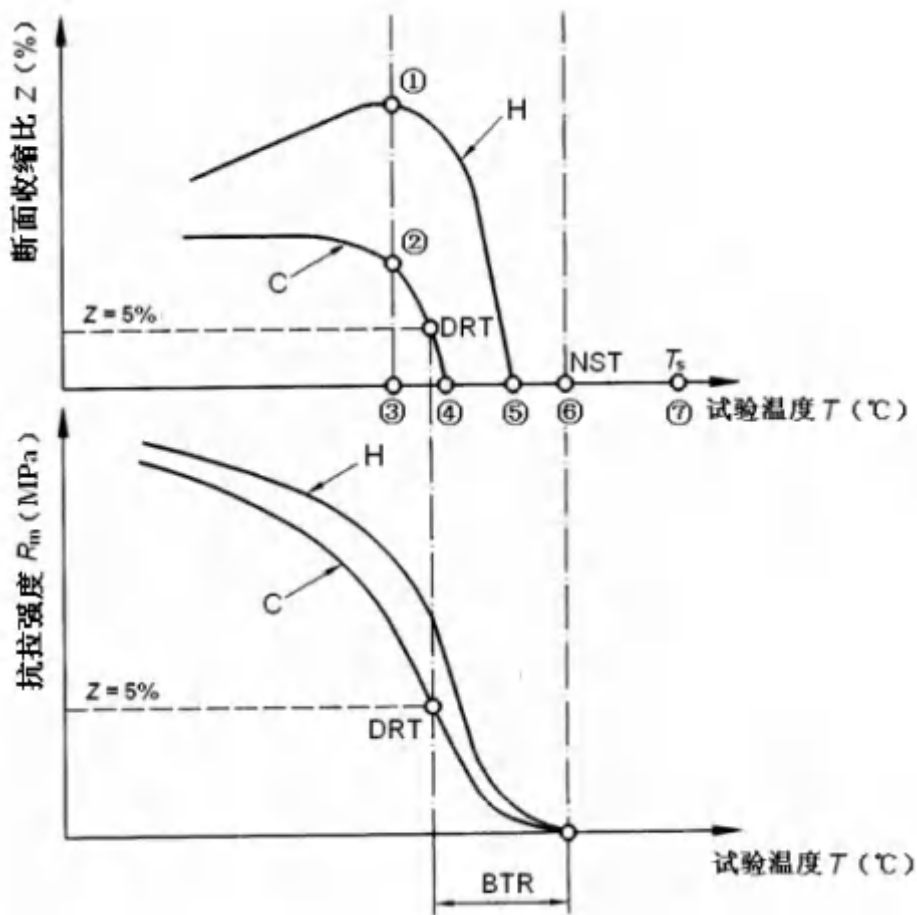
建立可靠的热延性曲线通常至少需要 12 个试样。

6.1.5 试验结果

试验得出断面收缩率 Z 和抗拉强度 R_m 。应绘制加热过程、冷却过程的断面收缩率-试验温度、抗拉强度-试验温度的关系曲线，典型曲线如图 2 所示，符号及说明见 4.1 和图 2。

当材料处于脆性温度区间 (BTR) 时对热裂纹较为敏感。为材料之间对比，定义了延性恢复温度 (DRT)。材料液化裂纹敏感性可以通过延性恢复比例 (RDR)、延性恢复率 (DRR) 和零延性温度区间 (NDR) 表征。

最可靠的判据是延性恢复比例 (RDR)，可用于预测母材热影响区的热裂纹敏感性。



标引序号说明：
 H——加热过程；
 C——冷却过程。

图2 热拉伸试验结果示例

6.2 可调拘束试验和横向可调拘束试验

6.2.1 概述

可调拘束试验和横向可调拘束试验是利用熔敷焊缝凝固同时施加不同的应变来检测母材、焊接材料和焊件的热裂纹敏感性。

可调拘束试验沿试验焊缝纵向施加载荷，能够检测凝固裂纹、液化裂纹和失延裂纹（如表2）。

横向可调拘束试验沿试验焊缝横向施加载荷，主要评定母材、TIG焊再次熔化的熔敷金属、试验过程中焊接的熔敷金属的凝固裂纹敏感性。

两种试验方法的基本原理示意图3a)、图3b)（两侧对称加载），需要专用设备同步给试样施加应变和焊接操作。由于试验设备存在明显差异，所以各实验室间结果再现性可能很差。但在同一实验室内，试验可用于材料分级，并与已知裂纹敏感性的材料进行比较。

试验方法的优点是试验简单和结果评价快捷，在使用同一试验设备时试验结果离散度低、再现性好。试验能够辨别试验材料成分和/或焊接条件的微小变化。在给定试验条件下，少量试验即可获得有用的数据，通常为图4a)中的1区到3区。

6.2.2 试样尺寸

试样尺寸不做规定，取决于试验材料、试验的确切性质和试验设备的承载能力。

可调拘束试验：

——常用的平板试样尺寸，长度 l 为 80 mm~300 mm，宽度 w 为 40 mm~100 mm，厚度 t 取决于试验材料和试验设备的承载能力。

横向可调拘束试验：

——典型试样尺寸，长度 l 为 100 mm，宽度 w 为 40 mm，厚度 t 为 10 mm。

注 1：除了薄板材料和管材以外，也可选用其他试样尺寸，能够进行纵向、横向焊缝试验。

注 2：为避免焊接熔池附近发生局部弯曲，可使用辅助弯曲板推动试样贴合弯曲模，见图 3c)、图 3d) 示意（悬臂单侧加载）。

6.2.3 试验步骤

标准试验程序是在母材或焊接熔敷金属上用 TIG 焊重熔一条焊道，焊接速度保持恒定。

焊接参数可根据特定的应用进行选择，标准的焊接参数为：

——电弧电压 12.5 V，焊接电流 85 A，焊接速度 18 cm/min（低热输入）；

——电弧电压 13.5 V，焊接电流 205 A，焊接速度 11 cm/min（高热输入）。

使用的焊接参数应做记录。

在 TIG 焊电弧稳定运行到达设定点（通常是试样中心）时，将试样在曲率半径为 R 的弯曲模上弯曲变形，见图 3。弯曲力通常由液压悬臂以大于 1.8 mm/s 的可控速度施加，弯曲力施加程序自动与焊接操作同步。电弧继续行进长度应保证设定点处变形已完全结束，熄灭电弧。弯曲力和保护气体（若使用）在熄弧后应保持 5 分钟，然后从夹具中移出试样进行检查。

弯曲应变由公式（1）计算：

$$\varepsilon = \frac{t}{2R + t} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

典型的弯曲应变选取范围为 0~4%，如图 4a)。推荐选取 3 个应变水平（例如 0~1%，1%~2%和 2%~4%），并根据公式（1）选取弯曲模的曲率半径。

6.2.4 试验结果

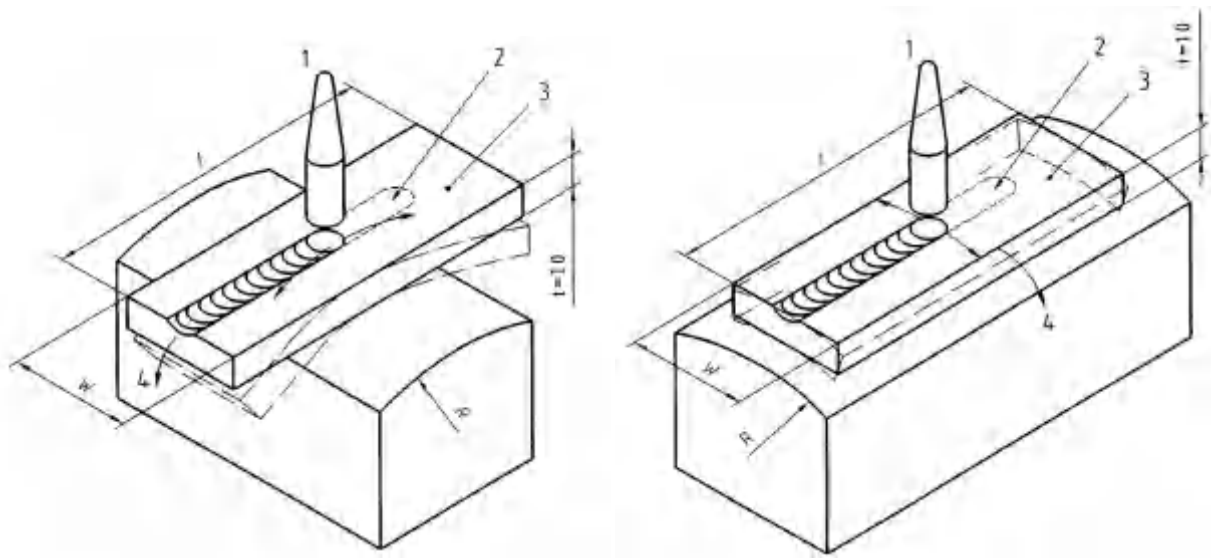
每一次试验完成后，按图 4b) 截取试样并在 25 倍的放大倍数下检查，测定所有可见的裂纹总长度 (L_{tot})，并绘出裂纹总长度 L_{tot} 与弯曲应变 ε 的关系曲线。裂纹总长度/表面应变曲线的相对位置可以评定热裂纹敏感性，见图 4a)。通过最大裂纹长度和焊道中央的凝固温度分布曲线可得出 BTR 和在此温度区间的塑性值。

对于横向可调拘束试验，可以绘制类似的裂纹总长度 L_{tot} 与表面弯曲应变 ε 的曲线图。

图 4a) 仅示例如何将热裂纹数据与已知焊接性相关联，说明可划分出裂纹敏感性“低”、“中”、“高”三区，并不表示任何对材料焊接性或热裂纹敏感性的绝对评定。

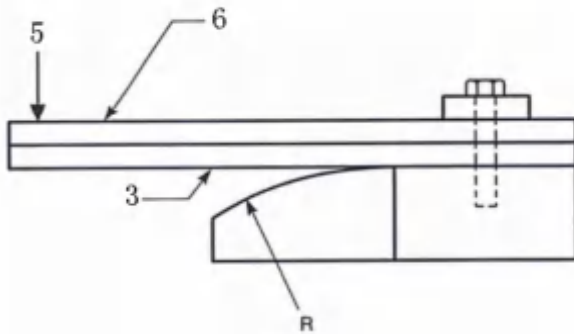
试验施加的应变与实际制造中焊接接头经受的应变难以对应，因而强烈建议试验应用于新材料或焊缝与实际工况中已知裂纹敏感性的材料进行对比。

单位为毫米

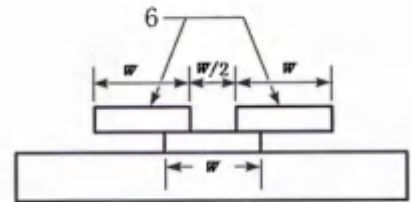


a) 可调拘束试验

b) 横向可调拘束试验



c) 使用辅助弯曲板主视图

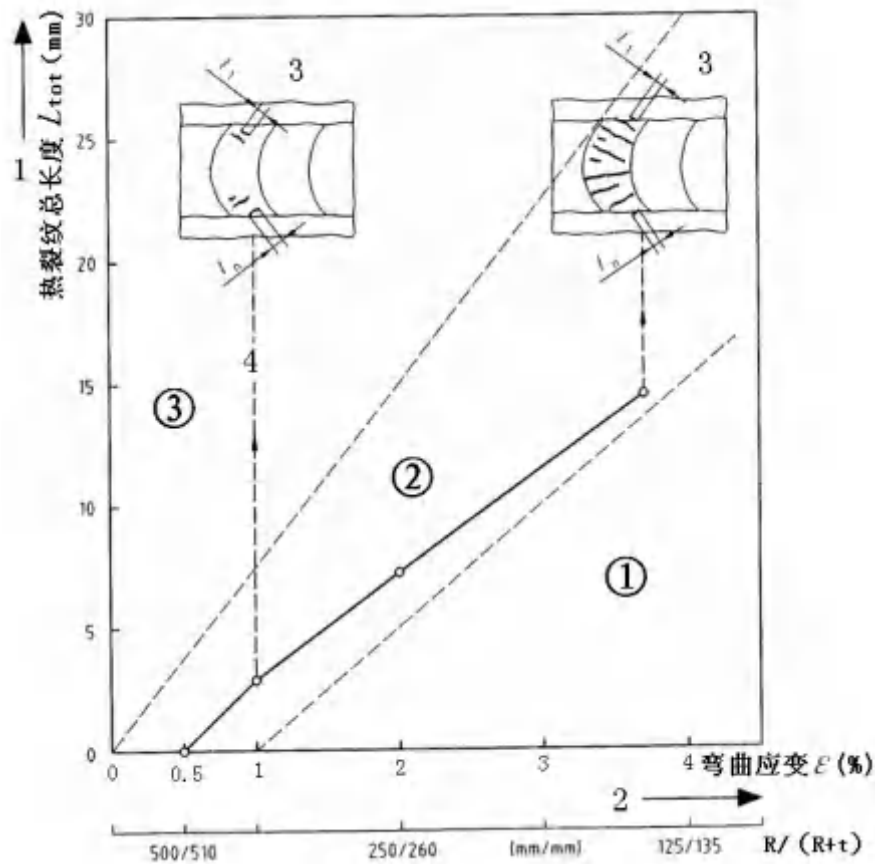


d) 使用辅助弯曲板左视图

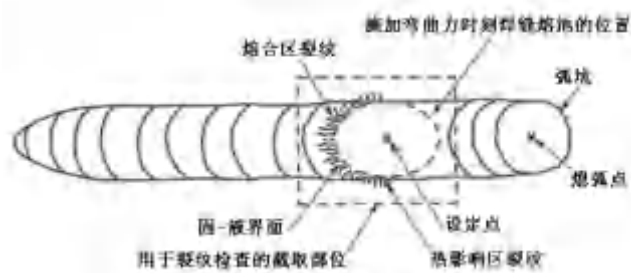
标引序号说明:

- 1——开始弯曲时的焊枪位置;
- 2——焊接停止点;
- 3——试样;
- 4——弯曲速度由液压系统控制;
- 5——弯曲力;
- 6——辅助弯曲板。

图3 可调拘束试验和横向可调拘束试验示例



a) 试验结果示例



b) 检查结果示例

标引序号说明：

- 1——热裂纹总长度；
- 2——弯曲模曲率半径/（弯曲模曲率半径 + 试样厚度），即 $R/(R+t)$ ；
- 3——可调拘束试样；
- 4——长度测量，体视显微镜（25×）： $L_{tot} = L_1 + L_2 + \dots + L_n$ 。
- 1区：抗热裂纹（低敏感性）；
- 2区：热裂纹风险上升（中敏感性）；
- 3区：热裂纹风险高（高敏感性）。

图4 可调拘束试验和横向可调拘束试验结果示例

6.3 程控平板拉伸试验

6.3.1 概述

程控平板拉伸试验（例如程控变形裂纹试验）能够定量评定母材、焊缝金属和一套焊接工艺的热裂纹敏感性。

试验采用平板拉伸试样，通过可编程线性加速度的水平拉伸试验设备对试样施加应变。程控变形裂纹试验（PVR 试验）特点是试样焊接过程中与焊接相同方向施加线性加速度拉伸，使试样产生程控的变形。原则上，试验有无填充材料均可进行。

母材评定可采用标准化焊接参数的 TIG 焊进行。

焊接材料评定可以使用制造商推荐的焊接条件，或使用实际焊接条件以再现实际工况。

焊接工艺优化可以通过改变焊接条件（如焊接参数、焊接材料种类、保护气体组成，焊剂-焊丝成分等），使降低热裂纹敏感性。

三种热裂纹（凝固裂纹、液化裂纹、失延裂纹）可以在单次试验中诱发成功，这取决于材料的敏感性。

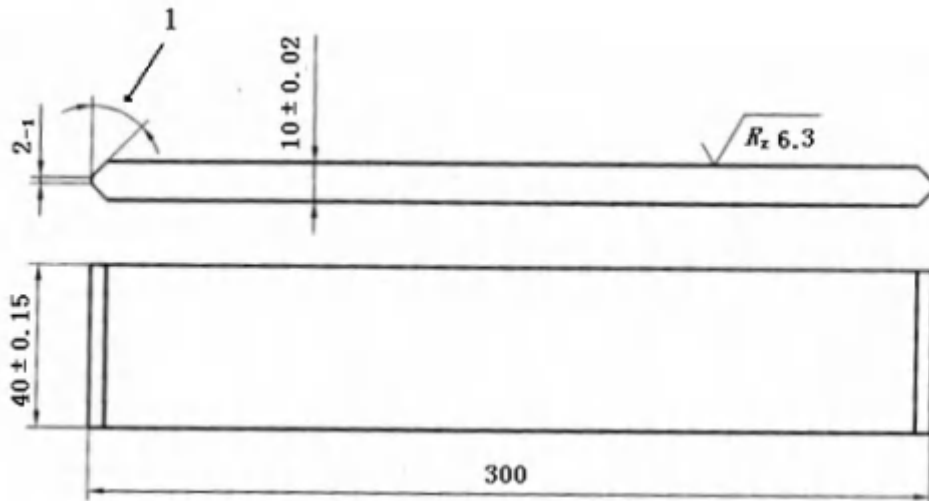
若有参考数据可做有效比较，原则上母材或焊缝金属的热裂纹敏感性只需单次试验即可确定。

试验再现性好，离散度低，能够很好地辨别三种热裂纹。

6.3.2 试样尺寸

平板拉伸试样尺寸根据试验机容量选定，常用尺寸为 300 mm×40 mm×10 mm，见图 5。试样表面沿纵向机械加工和磨削，表面粗糙度应不大于 6.3 μm。表面应没有垂直于焊接方向的划痕，以免诱发伪裂纹。将平板拉伸试样焊接到一个专用夹具中，以确保拉伸试验设备实现试样程控变形。

单位为毫米



标引序号说明：

1——表面纵端锐化。

图 5 程控变形裂纹试验（PVR 试验）试样

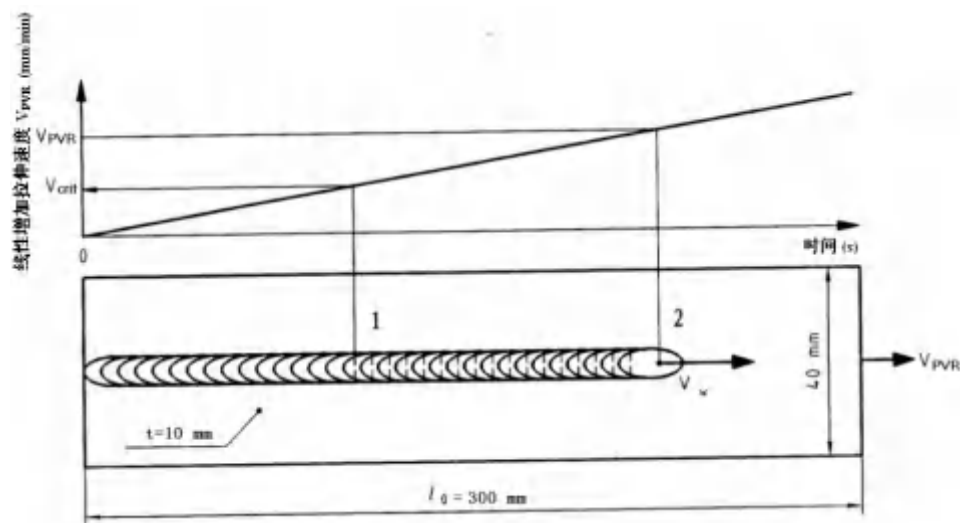
6.3.3 试验步骤

试验包括焊接和拉伸程序，采用恒定速度焊接，拉伸速度（ V_{PVR} ）从零开始线性增加，达到 70 mm/min 时结束试验。尽管标准形式是焊缝平行于应变方向，也可评定垂直于应变方向的焊缝。

试验结束后，试样上的焊道在 25 倍的显微镜下检查，确定与每种类型的第一条热裂纹对应的临界拉伸速度 V_{crit} ，见图 6。

6.3.4 试验结果

临界拉伸速度 V_{crit} 作为 PVR 试验的判据，定量评定热裂纹敏感性。每种类型的热裂纹都对应一个 V_{crit} 判据。



标引序号说明：

- 1——第一条热裂纹；
- 2——焊接速度。

图 6 程控变形裂纹试验（PVR 试验）

7 试验报告

试验报告应至少包括以下内容：

- a) 标准编号；
- b) 试验类型；
- c) 母材类组、牌号，焊接材料型号/牌号；
- d) 试件/试样标识；
- e) 试件/试样尺寸；
- f) 焊接条件；
- g) 任何特殊的试验条件；
- h) 试验结果（针对进行的试验）。