ICS 77.040.01
H 20

团 体 标 准

T/CNS 17—2020

核电厂安全端异种金属焊接接头微观结构表征和力学性能测试方法

Method for microstructure characterization and mechanical property test of safe-end dissimilar metal weld joint in nuclear power plants

2020-04-28 发布　　2020-08-01 实施

中国核学会　发布

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　试件准备 2
5　试样制备和要求 2
6　检测方法 4
7　试验结果观察及评定 5
8　质量保证 5
9　试验报告 6
附录 A（资料性附录）　三种典型核电厂安全端异种金属焊接接头剖面图 7
附录 B（资料性附录）　三种典型核电厂安全端异种金属焊接接头剖面试板上金相分析用取样示意图8
附录 C（资料性附录）　微小尺寸拉伸试样取样示意图……..... 9
附录 D（资料性附录）　微小尺寸拉伸试样尺寸示意图……10

前　言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准由中国核学会提出。

本标准由核工业标准化研究所归口。

本标准起草单位：中国科学院金属研究所、国核电站运行服务技术有限公司。

本标准主要起草人：韩恩厚、王俭秋、明洪亮、张志明、钟志民。

核电厂安全端异种金属焊接接头
微观结构表征和力学性能测试方法

1 范围

本标准规定了核电厂安全端异种金属焊接接头部位常规微观结构表征和力学性能的测试方法，具体包含焊接试件准备、试样制备、检验及测试方法。

本标准适用于核电厂中以不锈钢和镍基合金为填充金属的安全端异种金属焊接接头。

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。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法（GB/T 228.1—2010，ISO 6892-1：2009，MOD）

GB/T 228.2 金属材料 拉伸试验 第2部分：高温试验方法（GB/T 228.2—2015，ISO 6892-2：2011，MOD）

GB/T 229 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法

GB/T 1954 铬镍奥氏体不锈钢焊缝铁素体含量测量方法

GB/T 2650 焊接接头冲击试验方法

GB/T 2651 焊接接头拉伸试验方法

GB/T 2654 焊接接头硬度试验方法

GB/T 3375 焊接术语

GB/T 4340.1 金属材料 维氏硬度试验 第1部分：试验方法

GB/T 4675.5 焊接性能试验焊接热影响区最高硬度试验方法

GB/T 6394 金属平均晶粒度测定方法

GB/T 10561 钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验方法

GB/T 10623 金属材料 力学性能试验术语

GB/T 13298 金属显微组织检验方法

GB/T 13305 不锈钢中α-相面积含量金相测定法

GB/T 19501 电子背散射衍射分析方法通则

GB/T 30834 钢中非金属夹杂物的评定和统计扫描电镜法

GB/T 36165 金属平均晶粒度的测定 电子背散射衍射（EBSD）法

NB/T 47016 承压设备产品焊接试件的力学性能检验

ISO/WD 24173 电子背散射衍射分析方法通则（Microbeam analysis-Guidelines for orientation measurement using electron backscatter diffraction）

3 术语和定义

GB/T 10623、GB/T 228.1、GB/T 3375、GB/T 6394、GB/T 19501和GB/T 36165界定的术语和定义适用于本文件。

4 试件准备

4.1 典型安全端异种金属焊接接头

4.1.1 安全端异种金属焊接接头的剖面形貌主要分为三种，单U坡口且有隔离层的焊接接头、双U坡口且有隔离层的焊接接头和无隔离层的窄间隙焊接接头，参见附录A。

4.1.2 焊接方法主要有手工电弧焊、埋弧焊、钨极氩弧焊（手动、自动）等。

4.1.3 安全端异种金属焊接接头按照填充金属的种类不同，可分为以不锈钢为填充金属的焊接接头和以镍基合金为填充金属的焊接接头。

4.2 试件焊接工艺

4.2.1 试件用材应与所代表的核电厂安全端焊接接头用材同批次，或材料生产标准、代号（牌号、钢号）、规格（限厚度、外径）、热处理状态等相同。

4.2.2 试件推荐采用圆弧状试件，也可为板状试件。

4.2.3 试件（异种金属焊接接头）的焊接工艺（包括焊前预热、焊接过程及焊后热处理的工艺流程）应与所代表的焊接接头相同。

4.2.4 试件按编制的专用焊接工艺文件制备或应按有效的焊接工艺文件制备。

4.2.5 焊接工艺应包括焊前准备、焊接材料、接头形式、焊接设备、辅助工艺、焊接技术、规范参数、焊后处理和焊接检验等一整套规定。

4.2.6 试件焊接过程中采用的焊接设备与工艺参数应与其代表的安全端异种金属焊接接头焊接时采用的焊接设备和工艺参数相同。

4.2.7 试件应有施焊记录。

5 试样制备和要求

5.1 金相检测用试样

5.1.1 取样位置及数量：

a) 在垂直于焊接接头剖面的方向上切取一定厚度的试板，推荐试板厚度为10 mm，参见附录B。
b) 在试板不同位置处切取试样，试样位置应包括焊缝的顶部、中部及根部区域。
c) 对于单U坡口且有隔离层的焊接接头推荐切取6个试样；双U坡口且有隔离层的焊接接头推荐切取5个试样，其中中间试样需在双U交界位置；无隔离层的窄间隙焊接接头推荐在顶部、中部及根部分别切取1个试样，参见附录B。
d) 试样高度不宜小于10 mm，试样中含有的母材区域宽度不宜小于10 mm。
e) 每个试样均应标识并记录其在试板中的具体位置。

5.1.2 试样制备：

a) 试样制备应按照GB/T 13298执行。
b) 宜采用电火花线切割等对材质影响小的加工方法从焊接试件上取样。
c) 本标准推荐的试样制备方法：将采用电火花线切割得到的试样进行超声清洗除油；然后用水砂纸将试样表面依次磨到2000号，确保最终去除样品表面加工影响层，最后用2.5 μm粒径的金刚石抛光膏机械抛光至镜面；酒精清洗、冷风吹干后，采用光学显微镜观察试样表面；确认表面无可见的明显划痕后，进行刻蚀。试样磨抛时需用水冷却，防止试样的组织因受热而发生变化。
d) 推荐的刻蚀方法：

—— 采用 4%硝酸酒精刻蚀低合金钢母材推荐，刻蚀时间以 3 s～5 s 为宜；

——采用 10%草酸溶液电解刻蚀不锈钢母材及不锈钢焊缝金属，刻蚀电压一般为 3 V～5 V，刻蚀时间一般为 20 s～45 s, 宜采用短时、多次的电解刻蚀方法；

——采用 10%草酸溶液电解刻蚀镍基合金焊缝金属，刻蚀电压一般为 3 V～5 V，刻蚀时间一般为 15 s～30 s；也可采用 16 g FeCl3 + 80 mL HCl + 2 mL HNO3 + 11 m L H2O 配制的溶液刻蚀，刻蚀时间以 4 s～10 s 为宜；

——当需要同时观察低合金钢与镍基合金焊缝熔合线界面两侧的金相组织时，推荐试样首先在 10% CrO3 + 90% H2O 溶液中进行电解刻蚀，然后再用 4%硝酸酒精刻蚀.

e) 所有试样刻蚀后均应立即用自来水冲洗，并用酒精擦干、备用。

5.2 熔合线区域成分检测用试样

5.2.1 取样位置及数量：

a) 取样位置及数量与金相检测用试样的取样位置及数量相同。

b) 试样高度不宜小于 10 mm，试样中含有的母材区域宽度不宜小于 5 mm。

c) 可直接用 5.1 中的金相检测用试样。

d) 每个试样均应标识并记录其在试板中的具体位置。

5.2.2 试样制备：

a) 试样最终表面为机械抛光态，制备过程可按 GB/T 13298 进行，也可参考本标准中 5.1.2b)的试样制备方法。

b) 为了能在检测过程中确定熔合线界面（焊接接头剖面上的焊缝轮廓线）的精确位置，对待检测试样选用相应的刻蚀剂进行轻微刻蚀，刻蚀剂的选择按照 5.1.2 的要求。

5.3 电子背散射衍射检测用试样

5.3.1 取样位置及数量：

a) 取样位置及数量同金相检测取样位置及数量相同。

b) 试样尺寸：高度不宜大于 10 mm；试样中含有母材区域时，母材区宽度宜大于等于 10 mm；试样厚度不宜大于 1 mm；在满足上述尺寸要求的条件下，试样尺寸（质量）应尽量小，以降低电子背散射衍射检测时试样发生漂移的概率。

c) 每个试样均应标识并记录其在试板中的具体位置。

5.3.2 试样制备：

a) 宜采用电火花线切割等对材质影响小的加工方法从焊接试件上取样。

b) 试样制备可按照 GB/T 19501 或 ISO/WD 24173 执行。

c) 本标准推荐的试样制备方法：

——首先将采用电火花线切割得到的试样进行超声清洗除油，然后用水砂纸将试样表面依次磨到 5000 号，确保最终去除样品表面加工影响层后，依次用 2.5 μm、1.5 μm、1.0 μm 粒径的金刚石抛光膏进行机械抛光至镜面；酒精清洗、冷风吹干后，光学显微镜观察试样表面无可见的明显划痕；

——当试样中不含低合金钢材质时，采用粒度为 20 nm 的非晶硅胶悬浮液，对机械抛光后的试样进行手动抛光 4 h 后，先用超纯水冲洗，再用酒精、丙酮双相溶液超声清洗，清洗时间不宜小于 30 min；

——当试样中含低合金钢材质时，推荐对机械抛光后的试样进行振动抛光，推荐的振动强度为 60%，振动抛光时间不宜小于 8 h。

d) 当熔合线界面（焊接接头剖面上的焊缝轮廓线）难以确定时，试样磨抛处理之前推荐采用显微硬度计打点标记熔合线的具体位置，载荷不宜大于 0.98 N，以降低标记点对检测结果的影响。

5.4 硬度试验用试样

5.4.1 取样位置及数量：

a) 取样位置及数量与金相检测用试样的取样位置及数量相同。
b) 试样高度不宜小于 10 mm，试样中含有的母材区域宽度不宜小于 10 mm。
c) 可直接用 5.1 中的金相检测用刻蚀后试样。
d) 每个试样均应标识并记录其在试板中的具体位置。

5.4.2 试样制备：

a) 试样最终表面为机械抛光态，制备过程可按照 GB/T 13298 执行，也可按照本标准中 5.1.2 的试样制备方法。
b) 为了能在检测过程中确定熔合线界面的精确位置，选用相应的刻蚀剂对待检测试样进行轻微刻蚀，刻蚀剂的选择按照 5.1.2 要求。

5.5 拉伸试验用试样

5.5.1 常规拉伸试样：

a) 试样的形状及尺寸参照 GB/T 228.1、GB/T 2651、NB/T 47016 执行，推荐使用横截面为圆形的试样。
b) 应在异种金属焊接接头的顶部、中部及根部的母材和焊缝金属中分别取样，每个试样均应标识并记录其在试件中的具体位置。

5.5.2 微小尺寸拉伸试样：

a) 取样数量由试样尺寸（尤其是厚度）而定。
b) 试样纵轴方向平行于焊接熔合线方向。
c) 母材中取样区域的宽度不宜小于 10 mm。
d) 以某单 U 坡口且有隔离层的焊接接头为例，试样数量为 54 个，参见附录 C。
e) 推荐的微小尺寸拉伸试样尺寸，参见附录 D。

5.5.3 试样制备：

a) 采用对试样力学性能影响小的加工手段及工艺加工。
b) 试样标距段区域需用水线砂纸打磨至 2000 号，也可根据试验要求处理。

5.6 冲击试验用试样

5.6.1 取样位置及数量：

a) 试样缺口应位于焊接接头的不同区域，应涵盖母材、隔离层、对焊区、熔合线、距离熔合线不同距离的热影响区（以 1 mm 为间隔单位）。
b) 数量应结合具体焊接接头结构或测试目的而定。

5.6.2 试样制备：

a) 采用对试样力学性能影响小的加工手段加工，推荐采用电火花切割。
b) 尺寸及具体加工按照 GB/T 229、GB/T 2650、NB/T 47016 的规定执行。

6 检测方法

6.1 微观结构检测

6.1.1 金相检测：

a) 金相检测按照 GB/T 13298 的规定进行。
b) 应在低放大倍数下对试样进行连续检测。
c) 采用高放大倍数对特殊区域进行详细检测，放大倍数以看清微观组织结构为准，重点关注焊接接头母材热影响区及熔合线区域的金相组织。
d) 可按照 GB/T 10561、GB/T 13305、GB/T 1954、GB/T 6394、GB/T 30834 的规定进行特定项的检测。

6.1.2 熔合线区成分过渡检测：

a) 采用扫描电镜的能谱附件对各熔合线界面处小范围内进行成分线扫，以检测熔合线界面处的成分过渡。
b) 扫描步长不宜大于 2 μm，以防漏检熔合线界面处可能存在的成分突变。
c) 应采用二次离子质谱仪等研究界面处轻质元素（H、C 等）的分布。

6.1.3 电子背散射衍射检测：

a) 采用电子扫描显微镜的电子背散射衍射附件进行分析。
b) 检测晶粒尺寸及取向、晶界类型分布及残余应变等。
c) 样品台与水平面倾斜 70°角，当试样体积或者质量较大时推荐静置时间不少于 24 h。
d) 加速电压宜为 25 kV，以便减轻试样表面状态对衍射花样质量的影响。
e) 应根据观察区域的晶粒尺寸选择扫描步长，推荐的扫描步长为 1 μm。
f) 检测也可按 GB/T 19501、GB/T 36165 及 ISO/WD 24173 的规定执行。
g) 若存在硬度计打点标记区域，分析区域应远离标记区域，距离不应小于压痕对角长度的 3 倍。

6.2 力学性能测试

6.2.1 硬度试验：

a) 硬度试验按 GB/T 4340.1、GB 2654 及 GB/T 4675.5 的规定执行。
b) 推荐加载载荷为 0.98 N，载荷保持时间为 15 s。
c) 由于在熔合线附近存在成分过渡、热影响区、较高的残余应变等，对熔合线附近进行测试时选取的测试点应较为密集，对焊缝中部及母材区域测试时选取的测试点可较为稀疏。
d) 两相邻压痕中心之间的距离至少应为压痕对角长度的 3 倍，当相邻压痕大小不同时，应以较大压痕确定压痕间距。

6.2.2 拉伸试验：

a) 室温拉伸试验按 GB/T 228.1、GB/T 2651 的规定执行，高温拉伸试验按 GB/T 228.2 的规定执行。
b) 微小尺寸拉伸试样拉伸实验在室温下进行，推荐拉伸速率为 5μm/s。

6.2.3 冲击试验：

安全端焊接接头不同部位的冲击试验按 GB/T 229、GB/T 2650、NB/T 47016 的规定执行。

7 试验结果观察及处理

各测试项目应根据相应的标准对结果进行观察或者数据处理，如拉伸试验结果应遵循 GB/T 228.1 进行结果观察及数据处理。

8 质量保证

8.1 试验人员要求

本标准所规定的各项测试，试验人员应具备相关的专业知识和试验经验，以提高试验可操作性及结果可信度。

8.2 试验系统校准要求

各测试设备应安规定进行检测，保证相关实验参数和结果的可信度。

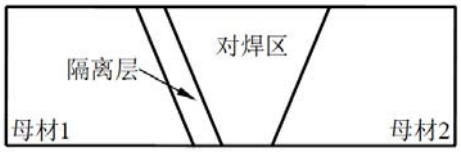
9 试验报告

试验报告应包括但不限于以下内容：

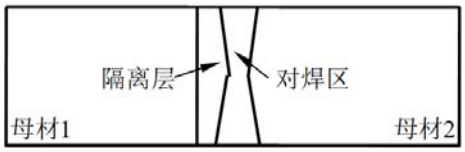
a) 本标准编号；
b) 材料牌号和标准号、炉批号、化学成分、热处理状态和力学性能等质量证明文件；
c) 焊接工艺评定报告、焊工和焊接操作工的资格鉴定书、填充材料质量证明文件等；
d) 试样形状尺寸、表面状态、取样位置、取样方向；
e) 试验参数，如试验温度、加速电压、扫描步长、加载载荷、保荷时间等；
f) 试验结果，包括金相组织、晶粒尺寸、晶界类型分布、界面成分分布、显微硬度分布、不同区域力学性能、冲击吸收能量等；
g) 试验异常记录；
h) 试验人员和日期。

附 录 A
（资料性附录）
三种典型核电厂安全端异种金属焊接接头剖面图

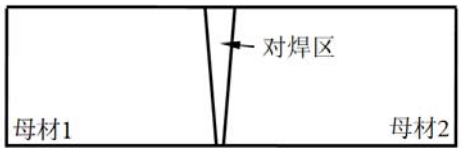
三种典型核电厂安全端异种金属焊接接头剖面见图A.1。



a） 单 U 坡口且有隔离层的焊接接头



b） 双 U 坡口且有隔离层的焊接接头



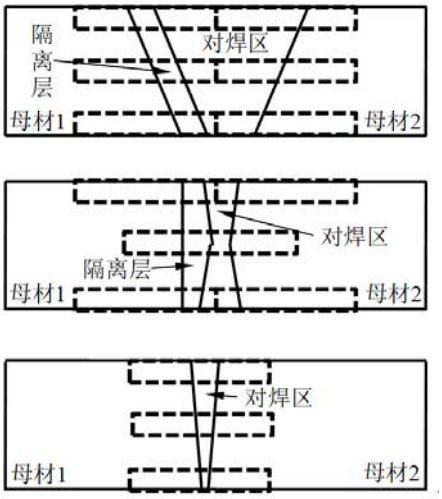
c） 无隔离层的窄间隙焊接接头

说明：
此处没有标注出母材内壁的堆焊层。

图 A.1 三种典型核电厂安全端异种金属焊接接头剖面图

附 录 B
（资料性附录）
三种典型核电厂安全端异种金属焊接接头剖面试板上金相分析用取样示意图

三种典型核电厂安全端异种金属焊接接头剖面试板上金相分析用取样见图B.1。



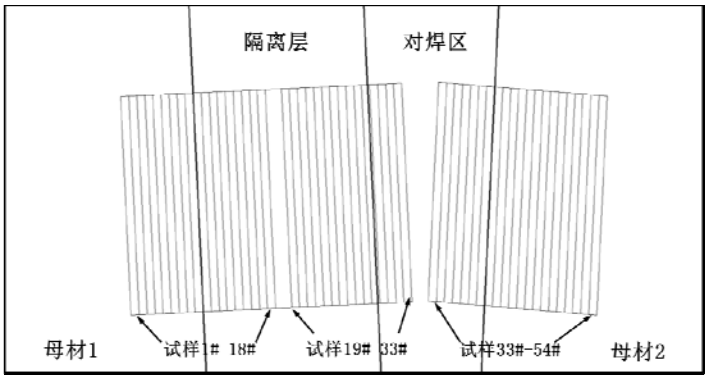
说明

此处没有标注出母材内壁的堆焊层

图 B.1 三种典型核电厂安全端异种金属焊接接头剖面试板上金相分析用取样示意图（位置及数量）

附　录　C
（资料性附录）
微小尺寸拉伸试样取样示意图

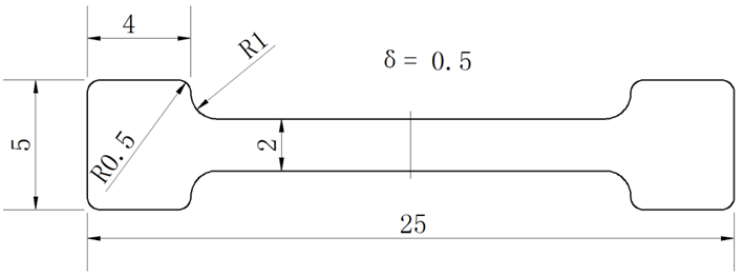
微小尺寸拉伸试样取样见图C.1



图C.1　微小尺寸拉伸试样取样示意图

附　录　D
（资料性附录）
微小尺寸拉伸试样尺寸示意图

微小尺寸拉伸试样尺寸见图D.1



图D.1　微小尺寸拉伸试样尺寸示意图