

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.06.14

CN-1515/CN-EP 异种奥氏体不锈钢 TIG 环焊缝 热裂纹与气胀缺陷控制

高汉亮, 朱桐宇, 王军平, 潘传龙, 王开龙

中核四〇四有限公司, 甘肃 嘉峪关 735100

摘要: 燃料棒包壳材料 CN-1515 与 CN-EP 焊接热敏感性较强, 且压塞装配引起的残余应力与界面空隙进一步加剧了热裂纹与气胀缺陷的产生。通过装配间隙控制实验, 将包壳管端面与端塞轴间装配间隙控制在 0~0.1 mm 内, 消除了焊缝卷边和塌陷缺陷; 通过压塞力实验, 确定压塞力为 115~130 N 时可保证压塞装配效果且焊缝中不会出现气胀缺陷; 基于母材热敏感性考虑, 通过钨极角度对比实验, 确定在满足焊接熔深要求的前提下选用 30° 钨极可降低焊缝过热倾向及钨极烧损。最终, 采用理论计算与实验结合, 确定焊接电流 21 A、22 A、焊接转速 12 r/min、焊接角度 63.6° 可获得 100% 目视及射线检测合格的焊缝, 经晶间腐蚀试验、金相检测和拉伸试验验证, 焊缝无晶间腐蚀倾向, 断裂均发生于母材。本研究填补了国内快堆包壳材料 CN-1515 与 CN-EP 异种奥氏体不锈钢焊接工艺空白, 为快堆包壳材料焊接工艺评定提供了技术借鉴。

关键词: 快堆燃料棒; TIG 焊接; CN-1515 奥氏体不锈钢; CN-EP 端塞; 热裂纹

中图分类号: TG44TL24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2026)06-0112-07

Control of Hot Cracking and Gas Expansion Defects in TIG Girth Welds of CN-1515/CN-EP Dissimilar Austenitic Stainless Steels

GAO Hanliang, ZHU Tongyu, WANG Junping, PAN Chuanlong, WANG Kailong

The 404 Company Limited. CNNC, Jiayuguan 735100, China

Abstract: The cladding materials CN-1515 and CN-EP for fast reactors exhibit strong welding thermal sensitivity, and the residual stress and interfacial gaps induced by plug assembly further aggravate the occurrence of hot cracking and gas expansion defects. Through assembly gap control experiments, maintaining the gap between the cladding tube end face and the plug shaft within 0-0.10 mm eliminated weld curling and collapse defects. Through plug force experiments, a plug force of 115-130 N was determined to ensure proper plug assembly without gas expansion defects in the weld. Based on the thermal sensitivity of the base metals, comparative experiments on tungsten electrode angles confirmed that a 30° electrode reduces the tendency of weld overheating and electrode burn-off while meeting the penetration requirement. Finally, by combining theoretical calculations with experimental validation, welding currents of 21 A and 22 A, a rotation speed of 12 r/min, and a welding angle of 63.6° yielded welds with 100% visual and radiographic inspection pass rates. Intergranular corrosion tests, metallographic examinations, and tensile tests verified that the welds showed no susceptibility to intergranular corrosion, and all tensile specimens fractured at the base metal. This study bridges the technological gap in the welding of dissimilar austenitic stainless steels CN-1515 and CN-EP for fast reactor cladding materials in China, providing technical references for the weld procedure qualification of fast reactor cladding materials.

Keywords: fast reactor fuel rod; TIG welding; CN-1515 austenitic stainless steel; CN-EP end plug; hot cracking

引用格式: 高汉亮, 朱桐宇, 王军平, 等. CN-1515/CN-EP 异种奥氏体不锈钢 TIG 环焊缝热裂纹与气胀缺陷控制[J]. 电焊机, 2026, 56(6): 112-118.

收稿日期: 2025-05-10 修回日期: 2026-02-01

作者简介: 高汉亮(1994—), 男, 学士, 工程师, 主要从事核燃料元件焊接技术研究。E-mail: hansirx@163.com。

Citation:GAO Hanliang, ZHU Tongyu, WANG Junping, et al. Control of Hot Cracking and Gas Expansion Defects in TIG Girth Welds of CN-1515/CN-EP Dissimilar Austenitic Stainless Steels[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(6): 112–118.

0 引言

燃料棒是燃料芯体与包壳材料的组合装配件,将燃料芯体装入包壳管后,使用特定结构的端塞分别压入包壳管两端,并将装配形成的环焊缝进行焊接密封,即完成燃料棒初步制造。燃料棒环焊缝焊接是燃料棒制造过程中的重要工艺环节。当前燃料棒环焊缝焊接以高能束流焊接技术为主,我国已实现从 TIG 焊向智能化激光焊接的工艺跃迁,并已突破焊缝缺陷控制、自动化控制与材料性能匹配等关键技术。

为满足钠冷快堆高温、强中子辐照、液态钠腐蚀三重极端环境下的长期服役服役要求,我国自主开发了包壳材料奥氏体不锈钢 CN-1515 与 CN-EP^[1]。Cr/Ni 当量比是调控奥氏体不锈钢焊接热裂纹的核心参数:当比值过大时,铁素体(δ相)优先析出并打断连续的奥氏体晶界,有效阻断 S、P、C 等元素形成的低熔共晶液膜连通,从而显著抑制热裂纹;反之,当比值过小时,焊缝趋向纯奥氏体凝固,柱状晶生长一致,液膜沿晶界连续分布,在冷却收缩应力下极易开裂;同时,包壳管 CN-1515 与端塞 CN-EP 之间的装配焊接过程中,实心端塞与薄壁包壳管两侧散热不对称,导致薄壁侧快速凝固抑制液膜形成,但实心侧缓慢冷却使 S、P、C 偏析富集,形成局部高裂纹敏感区,易形成热裂纹。

包壳管 CN-1515 与端塞 CN-EP 材料装配焊接工艺尚属国内首次,基本无可借鉴;且两种材料焊接为异种金属焊接,加上施焊需在防辐射的负压环境下进行,且对焊缝质量要求极高;因此,包壳管 CN-1515 与端塞 CN-EP 之间的焊接技术难度较大,其焊接工艺研发,有助于快堆燃料元件制造工艺的打通,对实现我国核能发展战略具有重要意义^[2]。本文基于包壳管 CN-1515 与端塞 CN-EP 材料焊接性,以及 TIG 焊接方式,开展端塞与包壳管的装配实验、焊接实验,并结合焊缝检测结果,确定最佳工艺参数,并着重对奥氏体不锈钢焊接过程中易于出现的热裂纹、以及端塞与包壳管焊接过程中易于出现

的气胀缺陷进行控制。

1 材料性能及焊接性分析

1.1 材料化学成分

快堆用包壳管 CN-1515 为冷拉拔加工制备,端塞 CN-EP 为固溶态棒材机加工制备,均为低碳奥氏体不锈钢,主要化学成分如表 1、表 2 所示。

表 1 包壳管 CN-1515 主要化学成分(质量分数,%)

Table 1 Main chemical composition of cladding tube(wt. %)

C	Si	P	S	Mn	Ni
0.04~0.08	0.30~0.75	≤0.020	≤0.0015	1.30~2.00	14.50~15.50
Cr	Mo	Ti	V	Cu	N
15.50~17.00	1.90~2.50	0.20~0.60	0.10~0.30	≤0.01	≤0.002

表 2 端塞 CN-EP 主要化学成分(质量分数,%)

Table 2 Main chemical composition of plug(wt. %)

C	Si	P	S	Mn	Ni
0.03~0.06	≤0.08	≤0.010	≤0.0015	0.40~1.00	14.00~16.50
Cr	Mo	Ti	Nb	Cu	N
15.50~18.00	2.40~3.20	≤0.05	0.30~0.60	≤0.03	≤0.005

1.2 焊接性分析

1.2.1 成分差异对焊接性的影响

包壳管与端塞同属 Fe-Cr-Ni 系低碳奥氏体不锈钢,基体成分相近,关键差异在于 Ti、V、Nb、Mn、Mo 元素含量上的差别,具体如下:

(1)Ti 含量差异。包壳管 Ti 含量明显高于端塞。Ti 可与 C 形成稳定 TiC,减少包壳管中奥氏体基体碳的活度,避免晶界贫 Cr 区形成,从而提高其耐蚀性^[3];同时 TiC 可稳定奥氏体相,防止高温或冷却过程中奥氏体转变。

(2)Nb 含量差异。端塞含 Nb,包壳管不含 Nb。Nb 优先与 C 形成 NbC,保证 Cr 在基体中的固溶度,减少贫 Cr 层,防止晶间腐蚀,同时提高高温强度和持久塑性。

(3)V 含量差异。包壳管含 V,端塞不含 V。V 可改善晶界合金化,提高韧性;与 C、S 等形成稳定化合物,提高耐热性并阻止元素间扩散;细化晶粒,增强韧性和塑性。

(4) Mn 含量差异。包壳管中 Mn 含量略高于端塞。Mn 为奥氏体稳定元素,包壳管中较高的 Mn 有利于稳定奥氏体组织,但会增大热敏感性。

(5) Mo 含量差异。端塞中 Mo 含量略高于包壳管。较高的 Mo 可提升高温强度,但促进脆性相析出的风险也更大。

1.2.2 Cr_{eq}/Ni_{eq} 分析

将表 1、表 2 中的化学成分分别代入 Hammar-Svensson 公式^[4],计算 $R=Cr_{eq}/Ni_{eq}$ 。

$$Cr_{eq}=Cr+Mo+1.5Si+3Ti+2Nb \quad (1)$$

$$Ni_{eq}=Ni+30C+0.5Mn \quad (2)$$

由上,包壳管 CN-1515 中 R 在 0.98~1.37,可能覆盖 A 模式和 AF 模式边界,中值 1.16,处于 A 模式区,有较高的热裂倾向。

端塞 CN-EP 中, R 上限达 1.5,进入 FA 模式区,中值 R 约 1.21,仍处于 A 模式范围,但在 A 模式边缘。CN-EP 也倾向于全奥氏体凝固,热裂风险高。

2 焊接设备及焊接工艺

2.1 焊接设备

本实验采用自主研发的自动化焊接设备,主要由焊枪、焊室、环向旋转机构及辅助机构组成。焊接电源为德国 EWM 公司 tetrix-230 型直流 TIG 焊机;焊枪配备 $\varnothing 1.6$ mm 钨钨极(含 2% Ce_2O_3)。包壳管与端塞在焊室内的装配及焊接示意如图 1 所示。

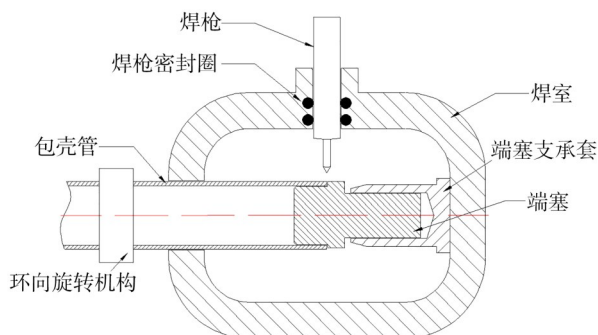


图1 端塞自动焊接示意

Fig. 1 The schematic diagram of automatic welding of plugs

包壳管与端塞材料导热率较小,线膨胀系数较大,高温下热塑性良好^[5]。在装配焊接过程中,包壳管为薄壁管、端塞为实心棒材,二者散热速率不同,焊缝横向存在较大的温度梯度,易诱发热裂纹。为

改善端塞散热条件,采用铜质支承套对端塞进行包覆,以提高冷却速率、降低温度梯度。

2.2 焊接工艺

2.2.1 焊前清理

端塞清理:压塞装配前,使用去离子水对端塞进行超声清洗,80℃烘干后以氮气吹扫去除表面水分及浮尘。

包壳管清理:使用专用内孔倒角器清理管口内壁毛刺,氮气吹扫金属碎屑后,以蘸有无水乙醇的绸布擦拭距管口端面 0~30 mm 范围内的内外表面及端面,再以氮气吹扫残留的无水乙醇及浮尘。

2.2.2 压塞装配

端塞与包壳管经清理后,通过压塞顶杆,将端塞顶压入包壳管一端,完成装配。装配方式为过盈配合,过盈量控制在 0~0.01 mm 内。装配后形成对接焊缝,不开坡口接头形式如图 2 所示。

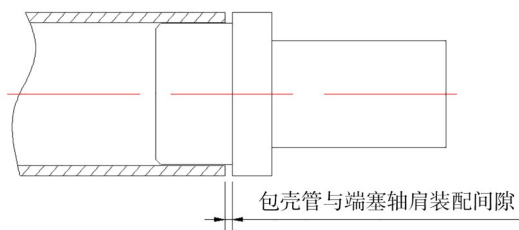


图2 端塞环焊缝的焊缝形式

Fig. 2 The schematic diagram of girth weld joint

2.2.3 环焊缝自动焊接

完成压塞装配的包壳管与端塞置于环向旋转机构顺时针匀速旋转,焊室内通入氩气置换空气。气体置换完成后,焊枪预送气、起弧施焊,端塞与包壳管的环焊缝在电弧热作用下熔化凝固成形;焊接完成后熄弧,焊枪停止送气,焊室氩气继续对焊缝进行冷却保护,焊缝冷却后关闭焊室气体,焊接完成。焊接过程中的电流-时间曲线如图 3 所示。

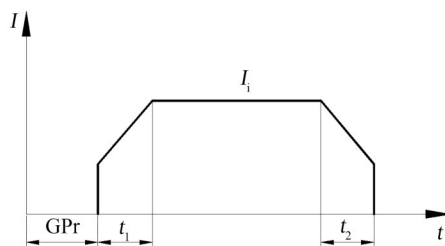


图3 焊接电流-时间示意

Fig. 3 The schematic diagram of welding current-time

3 装配与焊接工艺实验

3.1 装配工艺实验

压塞装配质量直接影响焊缝成形。压塞力不足时,端塞装配不到位,包壳管与端塞轴间间隙偏大,影响焊接;压塞力过大时,端塞轴肩根部挤压包壳管端部内侧,形成空隙,熔池气体填充后产生气胀缺陷^[6]。此外,过盈配合在焊缝纵向上引入残余应力,压塞力越大应力越大,若熔池凝固时该应力未完全释放,将促进热裂纹产生。

3.1.1 装配间隙控制实验

在不同装配间隙下,以 20~22 A 焊接电流进行试焊,观察焊缝成形,结果如表 3 所示。

表 3 包壳管端面与端塞轴间装配间隙实验

Table 3 Assembly clearance test between the end face of the casing tube and the plug shaft

焊接电流/A	装配间隙/mm	焊后成形情况
20	0.09	无塌陷、卷边
21	0.09	无塌陷、卷边
22	0.09	无塌陷、卷边
20	0.10	无塌陷、卷边
21	0.10	无塌陷、卷边
22	0.10	无塌陷、卷边
20	0.11	无塌陷、卷边
21	0.11	塌陷
22	0.11	塌陷
20	0.12	塌陷
21	0.12	卷边
22	0.12	严重卷边
20	0.13	严重卷边
21	0.13	严重卷边
22	0.13	严重卷边

本实验中,在相同电流下,随着包壳管与端塞装配间隙增大,焊缝成形质量越差,当装配间隙超过 0.10 mm 时,包壳管与端塞轴肩未形成有效熔池,包壳管端口熔化冷却后产生塌陷甚至只将包壳管一端熔化形成卷边。在相同装配间隙下,增大焊接电流会加剧该现象的产生。

由表 3 可知,包壳管与端塞轴间间隙控制在 0~0.10 mm 时,可避免焊缝塌陷和包壳管卷边。

3.1.2 压塞力范围实验

控制包壳管与端塞装配过盈量一致,各取 10 根样品在不同压塞力下进行压塞及焊接实验,统计压

塞结果及焊缝 X 射线检测结果,如表 4 所示。

表 4 压塞力实验

Table 4 Test of the pressure of the plug

压塞压力/N	压塞结果/mm	焊缝 X 射线检测结果
95	1.0	—
100	0.55	—
105	0.30	—
110	0.13	—
115	0.10	无气胀缺陷
120	0.08	无气胀缺陷
125	0.06	无气胀缺陷
130	0.03	无气胀缺陷
135	0.03	2 个气胀缺陷
140	0.02	3 个气胀缺陷
145	0.03	5 个气胀缺陷

当压塞力过小时,包壳管端面与端塞轴间间隙无法满足 0~0.10 mm 的控制要求;当压塞力过大时,焊缝出现气胀缺陷。由表 4 可知,压塞力控制在 115~130 N 范围内,可保证装配到位且不产生气胀缺陷。

3.2 焊接工艺实验

3.2.1 钨极角度实验

分别使用 15°、18°、22.5°、30° 的钨极,在同一压塞装配工艺及焊接电流下进行焊接实验,制作金相试样观察焊缝截面,结果如图 4~图 7 所示。

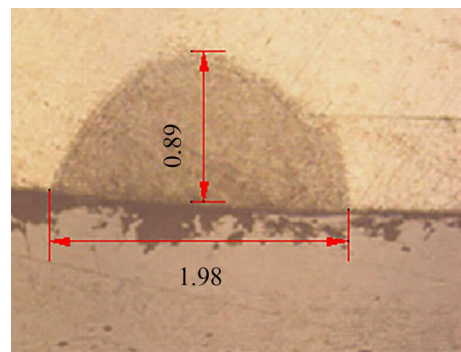


图 4 15°钨极焊缝金相组织

Fig. 4 Metallographic diagram of the weld joint of 15° tungsten electrode welding

两种母材焊接热敏感性较强,为防止热输入过大导致热裂纹,应在保证熔深的前提下尽量控制焊缝深度^[7]。同一电流下,较大角度的钨极电弧覆盖范围更宽、能量密度更低,可避免端塞侧过热;同时,较大角度钨极更耐烧损,有利于自动化连续生产。综合熔深与热输入控制要求,选用 30°钨极。

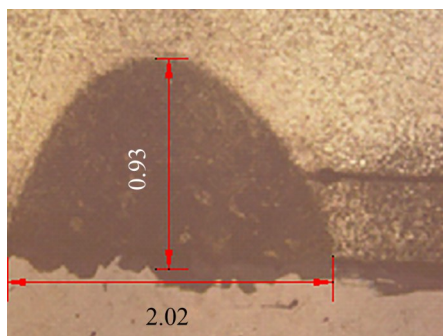


图5 18°钨极焊缝金相组织

Fig. 5 Metallographic diagram of the weld joint of 18° tungsten electrode welding

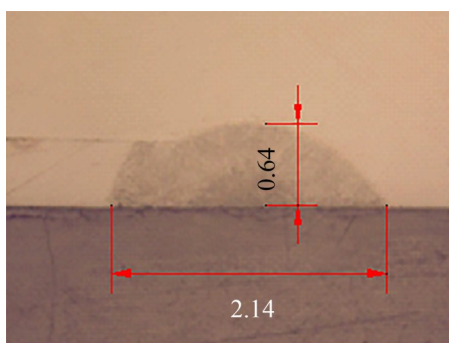


图6 22.5°钨极焊缝金相组织

Fig. 6 Metallographic diagram of the weld joint of 22.5° tungsten electrode welding

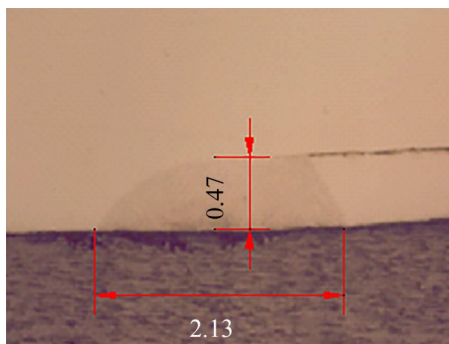


图7 30°钨极焊缝金相组织

Fig. 7 Metallographic diagram of the weld joint of 30° tungsten electrode welding

3.2.2 焊接参数实验

本工艺的主要焊接参数为焊接电流 I 、焊接转速 v 和焊接角度 ω 。其中,焊接角度 ω 定义为从施加焊接电流起,环焊缝绕轴线转过的角度。为保证焊接质量,采用低电流对环焊缝焊接两圈,焊接角度按经验公式计算:

$$\omega = 720^\circ + D - v \times (t_1 + t_2) \times 360^\circ \quad (3)$$

式中 D 为调整角度,为保证焊接后起弧点与收弧

点位置不重叠而引入的偏移量,取 $3^\circ \sim 5^\circ$; t_1 为电流上升时间; t_2 为下降时间。

根据焊接手册及前期焊接实验,取焊接转速 $v = 12 \text{ r/min}$,计算得焊接角度 $\omega = 636^\circ$ 。在此转速和角度下,调整焊接电流进行实验^[8]。焊接参数如表5所示,每组10根试样。

表5 焊接实验参数

Table 5 Welding experiment paramant

组别	焊接电流/A	焊接转速/(r·min ⁻¹)	焊接角度/(°)
A	19	12	636
B	20	12	636
C	21	12	636
D	22	12	636
E	23	12	636

焊后依次进行目视检测和X射线检测,对100%合格的焊缝全部取样制作金相试样,在100倍显微镜下检测,结果如表6所示。

表6 焊缝检测结果

Table 6 Test result of weld joint

组别	目视检测结果	目视合格率/%	射线检测结果	射线合格率/%	金相检测结果	金相合格率/%
A	无缺陷	100	3个未焊透	70	—	—
B	无缺陷	100	1个未焊透	90	—	—
C	无缺陷	100	无缺陷	100	无缺陷	100
D	无缺陷	100	无缺陷	100	无缺陷	100
E	无缺陷	100	无缺陷	100	2个有裂纹	80

CN-1515的热敏感性高于一般的奥氏体不锈钢,焊接热输入稍有增大即可能产生热裂纹。为达到熔深要求并消除热裂纹^[9-10],应选择C、D组参数,即在21 A、22 A、焊接转速12 r/min、焊接角度 636° 下进行焊接,可获得较理想的焊缝。

4 焊缝理化性能检测

基于3.2.2节确定的C、D两组焊接参数,分别制备试样进行晶间腐蚀试验、金相检测和拉伸试验,验证焊缝性能。

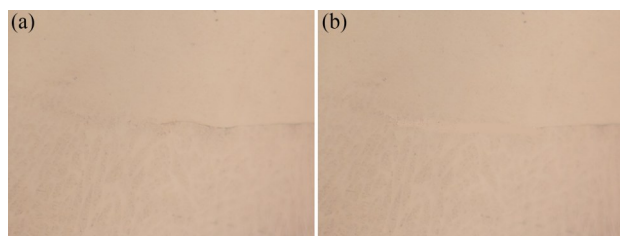
4.1 晶间腐蚀试验

分别在C、D组参数下各制备1个晶间腐蚀试样,按GB/T 4334中E法进行试验,两组试样均未发现晶间腐蚀倾向。由于包壳管尺寸限制,每组仅取1个试样,后续批量生产中需增加检验频次以进一

步确认。

4.2 金相检测

分别在C、D组参数下各制备2个金相试样,按GB/T 11809要求,在100倍金相显微镜下观察,均未发现裂纹缺陷,焊缝成形良好。C组和D组焊缝金相形貌如图8所示。焊缝区域呈现均匀的奥氏体基体,整体组织均匀致密。在熔合线附近,焊缝组织与母材组织过渡平缓,无明显的脆性相或缺陷。



(a)C组参数下的焊缝金相 (b)D组参数下的焊缝金相

图8 焊缝金相检测

Fig. 8 Metallographic inspection result of weld joint

4.3 拉伸试验

分别在C、D组参数下各制备2个拉伸试样,按GB/T 228.1进行试验,结果如表7所示。4个试样均断裂于母材,表明焊缝强度不低于母材。

表7 拉伸试验结果

Table 7 Tensile test result

试样编号	最大拉力/kN	断裂位置	抗拉强度/MPa
C-1	5.505	断于母材	782
C-2	5.801	断于母材	824
D-1	6.630	断于母材	938
D-2	6.301	断于母材	896

5 结论

本研究确定了快堆燃料棒CN-1515包壳管与CN-EP端塞TIG环焊缝的最佳工艺控制方案,以有效抑制热裂纹与气胀缺陷的产生。通过实验证明:

(1)装配间隙与压力:将包壳管端面与端塞轴间间隙控制在0~0.10 mm,压塞力保持在115~130 N,能够消除焊缝塌陷、卷边,并防止气体残留形成气胀缺陷。

(2)焊接参数优化:选定30°钨极可在满足熔深的同时降低热输入和钨极烧损。理论计算与实验验证了在焊接电流21 A/22 A、焊接转速12 r/min、焊

接角度636°的工况下,焊缝目视及射线检测合格率达100%。

(3)焊接质量综合验证:焊缝经晶间腐蚀试验、金相检验和拉伸试验评估,未发现晶间腐蚀倾向,拉伸试样均断裂于母材,表明焊缝强度不低于母材,组织致密均匀。

因此,所研究的装配与焊接工艺参数成功实现了异种奥氏体不锈钢TIG焊缝的可靠控制,为后续工程化应用奠定了及时基础,填补了国内CN-1515与CN-EP材料焊接工艺空白,为快堆包壳材料焊接工艺规范化提供了实际可用的技术参考。

参考文献:

- [1] 王建强,戴志敏,徐洪杰.核能综合利用研究现状与展望[J].中国科学院院刊,2019,34(4):460-468.
WANG J Q, DAI Z M, XU H J. Research status and prospect of comprehensive utilization of nuclear energy [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34 (4):460-468.
- [2] 冯伟,黄晨,杜爱兵,等.先进快堆外套管材料铁素体/马氏体钢研究进展[J].核科学与工程,2011,31(3):245-251.
FENG W, HUANG C, DU A B, et al. Development of ferritic/martensitic steels used as advanced duct material for reactor [J]. Nuclear Science and Engineering, 2011, 31(3):245-251.
- [3] 吴林,邢长军,姚春发,等.合金元素Ti及热处理工艺对0Cr18Ni10Ti奥氏体不锈钢组织及性能的影响[J].金属热处理,2016,41(10):26-29.
WU L, XING C J, TAO C F, et al. Effect of Ti element and heat treatment on microstructure and properties of 0Cr18Ni10Ti austenitic stainless steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(10):26-29.
- [4] 范修谦.铸造奥氏体不锈钢的铬镍当量比和相对磁导率[J].特种铸造及有色合金,2011,31(05):439-441.
FAN X Q. Chromium Nickel Equivalent and Relative Magnetic Permeability in the Austenitic Stainless Steel [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2011, 31 (05):439-441.
- [5] 高佩,王锋,罗煦.快堆燃料组件包壳用15-15Ti不锈钢的热塑性[J].金属功能材料,2020,27(5):33-37.
GAO P, WANG F, LUO X. Hot ductility of 15-15Ti stainless steel for fuel assembly cladding tube of fast reactor [J]. Metallic Functional Materials, 2020, 27(5):

- 33-37.
- [6] 朱国胜,杨晓东,童慎修. AFA 3G 燃料棒下端塞电子束焊产生气胀的分析[J]. 核动力工程,2020,23(5): 75-78.
- ZHU G S, YANG X D, TONG S X. Analysis of Undercutting on EBW Girth Weld of Bottom End Plug for AFA 3G Fuel Rod [J]. Nuclear Power Engineering, 2020,27(5):33-37.
- [7] 王苹,汪建红,温轲. 燃料棒加长端塞与包壳管 TIG 环焊工艺研究[J]. 中国核电,2024,17(02):171-175.
- WANG P, WANG J H, WEN K. Study on TIG Girth Welding for the Long Bottom End Plug of Fuel Rods [J]. China Nuclear Power, 2024, 17(02): 171-175.
- [8] 田红雨,姬鹏波,李宗书,等. 基于正交试验设计的环形燃料棒柱面环焊参数优化[J]. 焊接技术,2026,55(05):10-13.
- TIAN H Y, JI P B, LI Z S, et al. Parameter optimization of annular fuel rod cylindrical circumferential welding based on orthogonal experimental design [J]. Welding Technology, 2026, 55(05): 10-13.
- [9] 陈兵兵,盛国福,姚俊,等. 燃料棒上端塞 TIG 环缝内壁减薄形成原因分析[J]. 工程建设与设计, 2020(24):109-110.
- CHEN B B, SHENG G F, YAO J, et al. Analysis on the Causes of the Thinning of the Internal Wall of the TIG Annular Slot of the Fuel Rod Upper Plug [J]. Construction & Design for Engineering, 2020(24): 109-110.
- [10] 汪建红,杨通高,沈林,等. 实验快堆转换区组件焊接工艺[J]. 电焊机,2016,46(11):123-126.
- WANG J H, YANG T G, SHEN L, et al. Technology research on welding CEFR blanket region FA [J]. Electric Welding Machine, 2016, 46(11): 123-126.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>