

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.04.11

反应堆压力容器管座贯穿件与顶盖 J 型焊缝缺陷分析及改进

李 恩, 何 冰, 江国焱, 戴光明, 刘盛波

东方电气(广州)重型机器有限公司, 广东 广州 511455

摘 要: 反应堆压力容器 (reactor pressure vessel, RPV) 管座贯穿件之间的 J 型密封焊缝的结构形式复杂, 焊接难度大, 极易产生焊接缺陷。针对某 J 型焊缝在水压试验后出现的渗透探伤显示进行了深入研究, 通过金相分析、扫描电镜、能谱分析等手段对焊接缺陷产生的原因进行了深入分析, 确定了缺陷产生的根本原因为焊接过程中焊缝熔池异物侵入导致的晶间夹杂而非 DDC (高温失塑裂纹) 裂纹, 水压试验后使用钢丝刷对 J 型焊缝表面进行抛光, 焊缝表面状态发生了变化, 焊缝中埋藏的微小夹杂缺陷暴露于表面, 在随后的焊缝渗透检验 (PT) 形成显示, 该缺陷为浅表缺陷 (表面 1 mm 以内), 在余量允许的情况下, 可通过打磨的方式去除, 其关键工艺改进措施为焊接过程的清洁度管控 (包括: 工位清洁管控、避免焊接-打磨交叉作业、焊前除尘等)。

关键词: J 型焊缝; 渗透检验; 夹杂; 改进措施

中图分类号: TG441.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2024)04-0077-07

Analysis and Improvement on the Penetration Testing Defects for J Type Joint of Head Cover and Pipe Seat in Reactor Pressure Vessel

LI En, HE Bing, JIANG Guoyan, DAI Guangming, LIU Shengbo

Dong Fang (Guang Zhou) Heavy Machinery Co., Ltd., Guangzhou 511455, China

Abstract: The complicated structure for J type joint of head cover and pipe seat in reactor pressure vessel and weld defects has been puzzled the manufacturers of nuclear island equipment. In this paper, the causes of penetration testing defects were deeply analyzed according to metallographic structure analysis, scanning electron microscopy, energy spectrum analysis, which was determined that the primary cause of the defect was intercrystalline inclusion caused by foreign body invasion in the weld pool during the welding process rather than DDC crack. After hydrostatic test, the weld surface had been polished by brush, and the surface of weld was broken. The tiny inclusion embedded in the weld are exposed to the surface. The defect is superficial (within 1mm of the surface) which could be removed by grinding under the condition that the margin is rich. The key process improvement measures were the cleanliness control of the welding process including that station cleaning control, avoiding welding and grinding cross operation and dust removal before welding.

Keywords: J type of joint; penetration testing defects; inclusion; improvement

引用格式: 李恩, 何冰, 江国焱, 等. 反应堆压力容器管座贯穿件与顶盖 J 型焊缝缺陷分析及改进[J]. 电焊机, 2024, 54(4): 77-83.

Citation: LI En, HE Bing, JIANG Guoyan, et al. Analysis and Improvement on the Penetration Testing Defects for J Type Joint of Head Cover and Pipe Seat in Reactor Pressure Vessel[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(4): 77-83.

收稿日期: 2023-05-12 修回日期: 2024-01-30

作者简介: 李 恩 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事核能相关主设备的焊接及热处理工艺开发。

通讯作者: 何 冰 (1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事核能相关主设备的新焊接工艺研发。E-mail: 928612175@qq.com。

0 引言

反应堆压力容器(reactor pressure vessel, RPV)是核岛的关键设备之一,是一回路系统压力边界的重要组成部分,其压力边界的完整性是放射性安全防护的第二道重要屏障。控制棒驱动机构(CRDM)贯穿件以及J型接头承受着高温高压的一次侧冷却剂^[1]。J型密封焊缝的结构形式复杂,坡口狭窄、空间曲面形式多样、对焊接变形要求苛刻^[2-3],而且镍基材料焊接,焊接难度大,很容易出现焊接缺陷^[4]。

CRDM管座的焊接难点主要体现在:接头为异种金属焊缝;焊接材料为焊接性很差的镍基合金焊材,焊接时容易出现热裂纹、气孔、夹杂等缺陷^[5];由于管座和上封头焊接坡口形式为J型坡口,在焊接过程中,熔覆金属冷却时产生的收缩力在J型坡口上、下位置产生力矩,导致管座产生变形。施焊过程中,接头的坡口形式、焊接工艺方法和规范参数、焊接材料的选择、辅助措施的应用及焊工的操作水平都对焊接质量有影响^[6]。

本文以某反应堆压力容器顶盖贯穿件J型焊缝为研究对象,通过金相组织分析、元素成分测量等手段对PT显示产生的原因进行深入分析,并提出改进措施,以确保RPV承压边界的完整性。

1 过程介绍

1.1 问题描述

某项目反应堆压力容器(RPV)在完成水压试验后,顶盖组件内壁CRDM管座贯穿件、堆侧接管贯穿件、排气管贯穿件与顶盖J型坡口的镍基焊缝(以下简称J型焊缝)进行液体渗透探伤时发现262组显示,不满足上游技术条件(不允许任何显示要求)。

1.2 PT显示分布情况

顶盖贯穿件J型焊缝渗透探伤共发现262组PT显示,其中堆侧接管J型焊缝存在59组超标PT显示、CRDM管J型焊缝存在201组超标PT显示、排气管J型焊缝存在2组超标PT显示,缺陷所在管孔分布情况见图1。PT显示随机分布于各管孔,圆形显示大小为 $\varnothing 0.5 \sim 1.5$ mm,线性显示长度为2~3 mm。

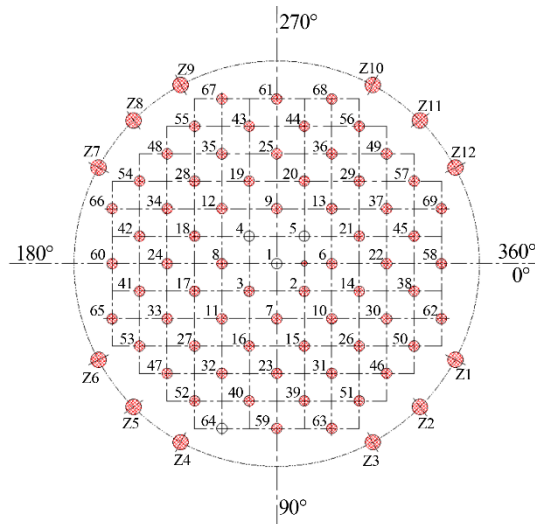


图1 PT显示分布示意

Fig. 1 Distribution diagram of penetrant test

该焊缝在焊接后(水压前)已经执行过一次渗透探伤的过程中发现表面有197处PT显示,开启了不符合项,并完成处置,缺陷去除后满足设计要求。对比焊接完成后和水压试验后的PT显示记录,两次检验的PT显示记录位置无对应关系,显示类型为圆形显示及线性显示。其相应的产品焊接见证件也按照设计文件要求进行制造及检验,无损检验及理化检测合格(包括化学成分分析、热影响区及母材硬度试验、宏观金相、微观金相)。

2 原因分析

2.1 PT显示性质判定

J型焊缝PT显示轮廓清晰,可清楚观察显示形貌,结合显像过程观察、检验经验和焊接工艺,经评定:圆形显示为微小夹杂,线性显示为无裂纹特征。

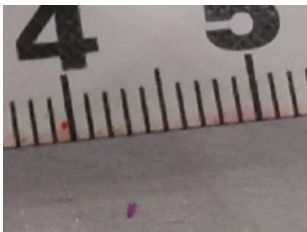
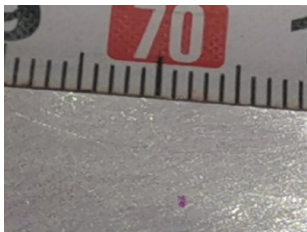
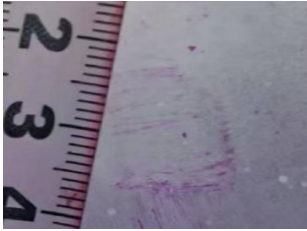
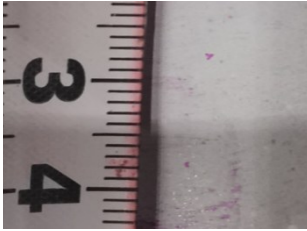
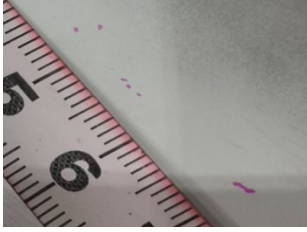
根据渗透检测原理判断:如果缺陷渗入的渗透剂较多,随着时间的推移,显示的颜色将变深,尺寸变大。所以,可根据这一显像来粗略判断缺陷的深浅。通过施加显像剂后立即观察和显像30 min后再次观察到的显示尺寸对比,通过显示颜色的深浅变化和显示尺寸大小变化来评估缺陷深度,较深的缺陷会渗入较多的渗透剂,施加显像剂后,缺陷内的渗透剂受毛细作用回渗到工件表面,在白色背景下形成显示,随着时间推移,回渗的渗透剂越多,显

示的颜色将变深,尺寸变大。J型焊缝PT显示尺寸小、轮廓清晰、色泽淡,可初步判断导致PT显示的缺陷深度小。

为确定缺陷深度,选取3处典型缺陷再次进行渗透探伤,通过观察缺陷显像过程,记录缺陷形状,

判断缺陷深度,如表1所示。通过对3处典型缺陷喷涂显像剂后不同时间段的显示尺寸进行对比,发现PT显示尺寸基本未发生变化,深度较小或无深度,显示形貌无裂纹特征,因而判断缺陷性质为气孔或夹杂。

表 1 显像时间与缺陷尺寸的关系
Table 1 Relationship between imaging time and defect size

缺陷编号	显像时间		
	即时	10 min	30 min
CRDM管2号 ($\varnothing 1 \times 1$)			
CRDM管5号 ($\varnothing 0.5 \times 1$)			
CRDM管4号 ($\varnothing 0.5 \times 5 + L3 \times 1$)			

2.2 典型PT显示现场金相检测分析

为判定PT显示的性质,选取5个有代表性的典型J型焊缝PT线性显示采用金相抛光后进行金相检测($\times 100$),以确定显示性质,之后逐层抛磨进行现场金相检测和PT检验。抛磨控制要求为每次抛磨深度约0.1 mm,抛磨总深度不超过0.5 mm。

金相检测分析结果如下:

序号1:1处2 mm的线性显示,2处 $\varnothing 0.5$ mm的圆形显示在第一次金相抛光后缺陷去除,无抛磨深度。

序号2:1处 $\varnothing 0.5$ mm的圆形显示金相检测结果为夹杂,抛磨0.1 mm后去除。

序号3:1处 $\varnothing 1$ mm的圆形显示抛磨0.3 mm后去除,中间经过3次金相检测,结果为夹杂。

序号4:1处2 mm的线性显示抛磨0.25 mm后去除,中间经过2次金相检测,结果为夹杂。

序号5:1处3 mm的线性显示抛磨0.45 mm后未完全去除,中间经过4次金相检测,结果为夹杂。

上述金相检测分析结果表明,PT显示无裂纹形貌特征,可确定为夹杂;PT显示抛磨去除过程表明,大部分显示深度小于0.5 mm。

2.3 焊接见证件金相检测分析

受现场金相检测条件限制,无法在产品焊缝上开展更高倍数的金相检测。为进一步判定PT显示的性质,选择产品焊缝焊接见证件的宏观金相试样,对其焊缝截面进行PT检验,并对PT显示位置开展更高倍数的金相检测。

选取了16个焊接见证件宏观金相试样的截面

进行PT检验,6个试样截面存在圆形显示,见图2。

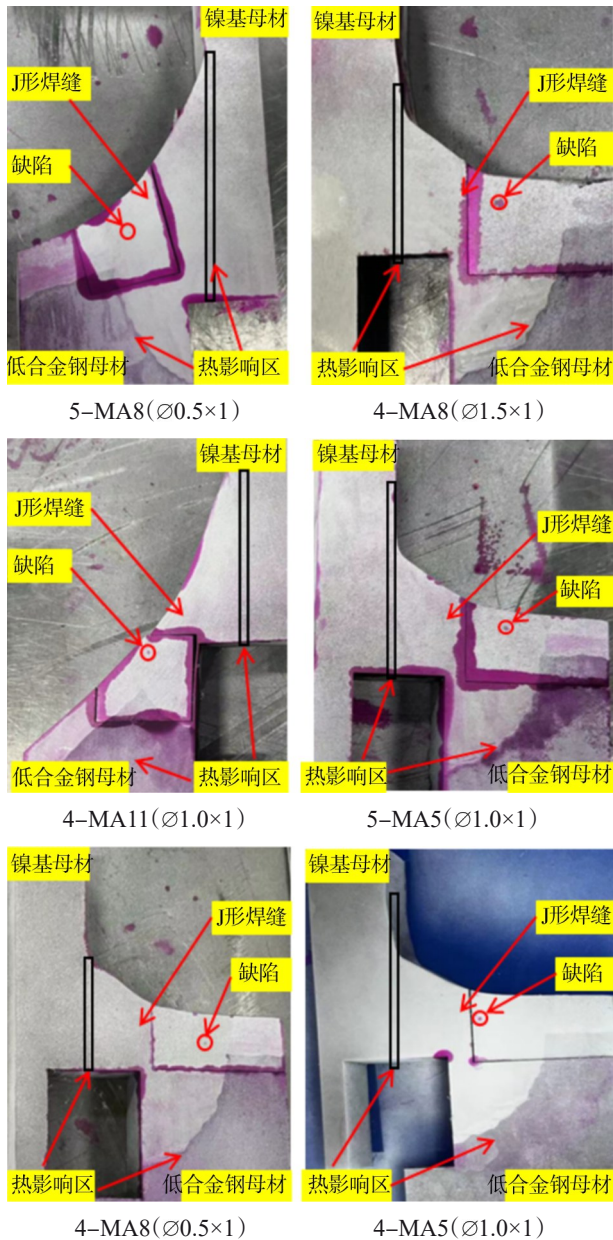


图2 存在PT显示的焊接见证件宏观试样照片

Fig. 2 Macro photos of welded specimens

对试样表面采用抛光绒布进行金相抛光后进行金相检测,金相检测分析结果:

- (1) 4个试样未发现缺陷(金相抛光已去除)。
- (2) 2个试样进行金相检测时发现缺陷,分别行100×、200×、400×放大观察,显示性质为夹杂,未发现沿晶扩展特征,无裂纹形貌特征。
- (3) 为进一步判定PT显示与晶界的相对位置,对两个有PT显示的微观试样(详见图3)采用王水

浸泡,放大200倍观察,焊缝为奥氏体组织。

编号4-MI5的缺陷为半圆状,直径约0.043 mm,缺陷位于奥氏体晶内,边缘圆滑,两端圆钝,无应力集中扩展现象;编号为4-MI8的缺陷为蠕虫状,长约0.4 mm,一边边缘沿晶界走向,缺陷腔体主要位于左边的奥氏体晶内,缺陷两端圆钝,无应力集中扩展现象。

金相组织分析结果表明,产生PT显示的缺陷位于奥氏体晶内,性质为夹杂,未发现沿晶及穿晶扩展特征,无裂纹形貌特征,如图3所示。

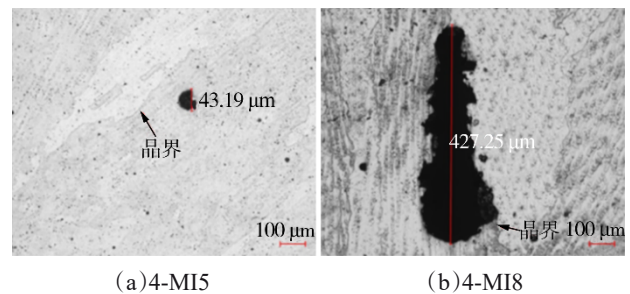


图3 焊接见证件金相组织照片

Fig. 3 Metallographic structure photo of welded specimens

2.4 扫描电镜观察和能谱成分分析

为准确确定缺陷的性质和成分,对焊接见证件金相检测发现的夹杂缺陷(编号4-MI5及编号4-MI8),采用扫描电镜观察和能谱成分分析,扫描电镜观察结果为夹杂,如图4所示。

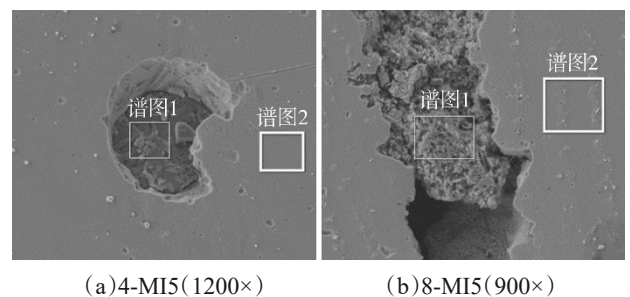


图4 见证件典型缺陷扫描电镜照片

Fig. 4 SEM photos of typical defects

采用能谱仪对显示位置及临近焊缝成分分析谱图如图5~图8、表2~表5所示,检测分析结果为:

- (1) 编号4-MI5缺陷主要成分为Si、O、Al、Ca、Ti等元素,系统标准样品标签为SiO₂、Al₂O₃、Wollastonite(钙硅石)、Ti的元素及其氧化物,临近区域焊缝未检测到这些元素及其氧化物。
- (2) 编号4-MI8缺陷主要成分为Si、O、Al、Ca、

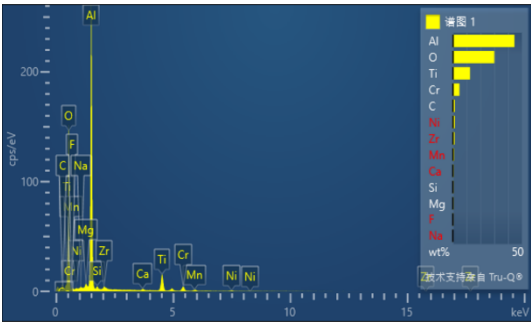


图 5 4-MI5 谱图 1 (缺陷区域)

Fig. 5 4-MI5 spectrum 1 (defect area)

表 2 编号 4-MI5 谱图 1 成分

Table 2 Chemical composition of 4-MI5 spectrum 1

谱图 1	线类型	Wt. %	Wt. % Sigma	标准样品标签
C	K 线系	1.63	0.12	C Vit
O	K 线系	30.52	0.21	SiO ₂
Mg	K 线系	0.47	0.05	MgO
Al	K 线系	45.59	0.24	Al ₂ O ₃
Si	K 线系	0.39	0.05	SiO ₂
Ca	K 线系	0.66	0.07	Wollastonite
Ti	K 线系	12.12	0.18	Ti
Cr	K 线系	5.03	0.16	Cr
Mn	K 线系	0.84	0.14	Mn
Ni	K 线系	1.40	0.20	Ni
Zr	L 线系	1.35	0.15	Zr
总量		100.00		

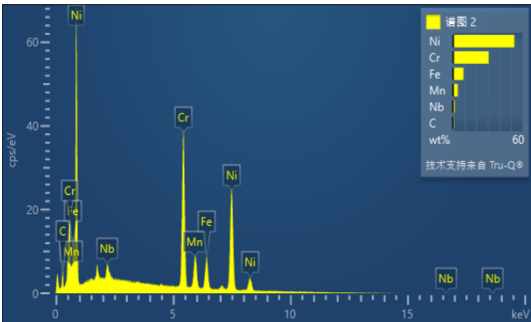


图 6 编号 4-MI5 谱图 2 (基体)

Fig. 6 4-MI5 spectrum 2 (base metal)

表 3 编号 4-MI5 谱图 2 成分

Table 3 Chemical composition of 4-MI5 spectrum 2

谱图 2	线类型	Wt. %	Wt. % Sigma	标准样品标签
C	K 线系	1.10	0.06	C Vit
Cr	K 线系	30.94	0.26	Cr
Mn	K 线系	4.21	0.18	Mn
Fe	K 线系	9.13	0.19	Fe
Ni	K 线系	53.02	0.32	Ni
Nb	L 线系	1.60	0.14	Nb
总量		100.00		

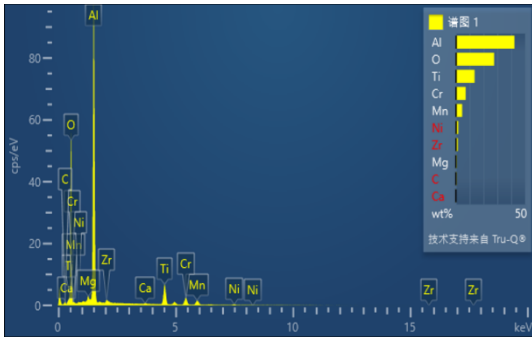


图 7 编号 4-MI8 谱图 1 (缺陷区域)

Fig. 7 4-MI8 spectrum 1 (defect area)

表 4 编号 4-MI8 谱图 1 成分

Table 4 Chemical composition of 4-MI8 spectrum 1

谱图 1	线类型	Wt. %	Wt. % Sigma	标准样品标签
C	K 线系	0.46	0.10	C Vit
O	K 线系	27.65	0.20	SiO ₂
Mg	K 线系	0.55	0.05	MgO
Al	K 线系	42.38	0.24	Al ₂ O ₃
Ca	K 线系	0.34	0.06	Wollastonite
Ti	K 线系	13.60	0.19	Ti
Cr	K 线系	7.11	0.18	Cr
Mn	K 线系	4.63	0.19	Mn
Ni	K 线系	1.81	0.21	Ni
Zr	L 线系	1.48	0.16	Zr
总量		100.00		

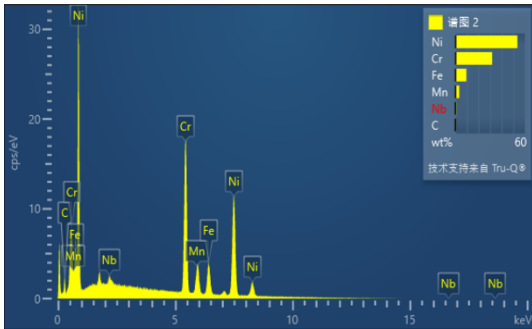


图 8 编号 4-MI8 谱图 2 (基体)

Fig. 8 4-MI8 spectrum 2 (base metal)

表 5 编号 4-MI8 谱图 2 成分

Table 5 Chemical composition of 4-MI8 spectrum 2

谱图 2	线类型	Wt. %	Wt. % Sigma	标准样品标签
C	K 线系	0.69	0.06	C Vit
Cr	K 线系	31.79	0.26	Cr
Mn	K 线系	3.46	0.18	Mn
Fe	K 线系	9.50	0.20	Fe
Ni	K 线系	53.69	0.33	Ni
Nb	L 线系	0.87	0.13	Nb
总量		100.00		

Ti 等元素,系统标准样品标签为 SiO_2 、 Al_2O_3 、Wollastonite(钙硅石)、Ti 的元素及其氧化物,临近区域焊缝未检测到这些元素及其氧化物。

根据缺陷成分分析,产生的缺陷来自于焊道打磨产生的粉尘及残留的药皮焊渣。

综合上述扫描电镜和能谱分析分析可以得出:

(1)缺陷来自于焊道打磨产生的粉尘及残留的药皮焊渣,性质为夹杂,无裂纹形貌,不是高温失塑裂纹(DDC)。

(2)缺陷位于奥氏体晶内,未发现沿晶及穿晶扩展特征,无裂纹形貌特征。

(3)显示抛磨去除过程表明,大部分显示深度小于 0.5 mm。

2.5 焊材特性分析

J 型坡口镍基焊缝采用的焊材为核电领域工程应用成熟牌号(INCONEL 152/ INCONEL 152M)的镍基焊条,焊材型号为 ENiCrFe-7,该焊材是由 SMC 集团研发推出的,严格控制 S、P 含量,降低结晶裂纹敏感性^[7],ENiCrFe-7 焊材在“二代加”及“三代”核电站主设备安装、制造中应用广泛,除了用于镍基合金的对接焊外,还广泛用于异种金属结构的焊接以及耐蚀层堆焊^[8-9]。

焊材回厂后按照产品技术条件进行入厂复验,验收结果合格。该焊材工艺性能良好,焊材贮存符合公司焊材管理程序及标准要求,施焊时在有效期内。

镍基 ENiCrFe-7 焊条在 500 °C 高温空气中易出现轻度氧化,当温度达到 750 °C 时,则氧化加剧。由于 Ni 的氧化物熔点(2 090 °C)比 Ni 本身的熔点(1 446 °C)高出了近 45%,即当 Ni 熔化的时候,Ni 的氧化物无法完全熔化。因此,未完全熔化的氧化物部分残留在熔池中形成微小夹杂或细小不连续氧化物,在焊道的氧化物或残留的杂质未能完全清除干净,继续焊接时氧化物或杂质掺杂进入熔池中形成微小夹杂。

镍基合金 ENiCrFe-7 相较于其他材质焊材,焊缝易过热,造成晶粒粗大,导致接头力学性能和耐腐蚀性能下降。同时,Inconel 690 镍基合金焊接时还具有液态金属流动性差、焊缝金属熔深浅等特点^[10],当采用镍基焊条进行焊接时,如果焊道间的

药皮未彻底打磨干净,或焊接过程中各种粉尘(如打磨过程的粉尘)侵入熔池,容易在焊道中产生夹杂缺陷。

2.6 原因分析小结

顶盖贯穿件 J 型焊缝 PT 显示位于奥氏体晶界内,非裂纹形貌,无沿晶及穿晶扩展特征,其性质为夹杂而不是 DDC 裂纹。PT 显示的直接原因为:水压试验前使用了千叶轮、砂纸等工具对检验合格的 J 型焊缝表面进行了处理,水压试验后使用了钢丝刷对 J 型焊缝表面进行了抛光,焊缝表面状态发生变化,焊缝中埋藏的微小夹杂缺陷暴露于表面,在水压后的焊缝 PT 检验形成显示,不是由于水压试验所导致。其根本原因为:清洁度控制不满足施焊要求,焊接时存在交叉作业的情况,打磨粉尘进入到相邻焊接工位的焊缝熔池中,导致存在夹杂。

3 管控措施

通过分析,可以确定顶盖贯穿件 J 型焊缝 PT 显示是由于焊接过程中的存在焊接-打磨交叉作业导致异物进入产生的夹杂,其相应的控制措施为:

(1)进入焊接工位的人员需穿戴鞋套和清洁服,防止异物带入。

(2)焊接过程中禁止焊接-打磨交叉作业,避免异物侵入熔池。

(3)焊接工位必须配备吸尘装置,打磨后需采用吸尘器去除尘渣后方可进行下一层焊接。

(4)该种类 PT 显示均为浅表缺陷,深度较浅,当缺陷既定发生时,产品如仍有尺寸余量可通过打磨的方式(深度方向去除 1 mm 即可)完全去除。

4 结论

本文针对某项目反应堆压力容器顶盖贯穿件 J 型焊缝水压试验后的 PT 显示产生的原因进行了深入的原因分析,确定了该缺陷的性质、产生的原因以及推荐的处理方案,对指导其他核设备制造处理同类型的案例的缺陷分析以及工艺改进优化具有一定的参考意义,结论如下:

(1)该 PT 显示为夹杂缺陷,产生的原因是焊接

过程中焊缝熔池有杂质侵入。

(2)针对此种PT显示,其控制措施为焊接过程质量管理提升,应避免焊缝熔池杂质的侵入。

(3)PT显示为浅表缺陷,在存在尺寸余量的情况下,可通过打磨的方式进行去除。

参考文献:

- [1] 孙广,兰银辉,张中伟,等. 压水堆核电站控制棒驱动机构下部 Ω 焊缝的焊接[J]. 焊接,2013(08):64-66+72.
SUN G, LAN Y H, ZHANG Z W, et al. Welding of Ω type weld in drive mechanism of control rod in reactor closure head adapters [J]. Welding & Joining, 2013 (08):64-66+72.
- [2] 付强,罗英,杨敏,等. RPV顶盖和CRDM管座焊接残余应力三维数值模拟[J]. 焊接学报,2015,36(11):105-108+118.
FU Q, LUO Y, YANG M, et al. Three-dimensional numerical simulation on welding residual stress in weld between RPV head and CRDM nozzle [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2015, 36(11):105-108+118.
- [3] 李汉宏. 核电压力容器J型坡口自动焊接[J]. 电焊机,2010,40(02):84-87.
LI H H. Research on automatic welding of J type groove for nuclear reactor pressure vessel [J]. Electric Welding Machine, 2010, 40(02):84-87.
- [4] 孔永红,高俊根,吴义党,等. 焊接机器人在核反应堆压力容器顶盖焊接中的应用及分析[J]. 电焊机,2021,51(10):56-60.
KONG Y H, GAO J G, WU Y D, et al. Application and analysis of welding robot system for nuclear reactor pressure vessel closure head [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(10):56-60.
- [5] 万军. 镍及镍基合金的焊接[J]. 锅炉制造,2004(3):33-34.
WAN J. Welding of Nickel and Nickel Based Alloy [J]. Boiler Manufacturing, 2004(3):33-34.
- [6] 彭乃康. 反应堆压力容器驱动管座和上封头密封焊接[J]. 一重技术,2013(03):47-49.
PENG N K. Sealing Welding Between CRDM Adaptor and Top Head of RPV [J]. CFHI Technology, 2013 (03):47-49.
- [7] 曾俊焄. AP1000蒸汽发生器水室封头制造关键工艺研究及质量控制[D]. 广东:华南理工大学,2017.
ZENG J T. Research on key manufacturing process and quality control of AP1000 steam generator water chamber head [D]. Guangdong: South China University of Technology, 2017.
- [8] 薄春雨. 690镍基合金焊带熔敷金属结晶裂纹敏感性研究[D]. 北京:机械科学研究总院,2007.
BO C Y. Investigation on Solidification Cracking Susceptibility of 690 Nickel-based Welding Strip Surfacing Metal [D]. Beijing: China Academy of Machinery Science & Technology, 2007.
- [9] 谷雨,张俊宝,黄逸峰,等. 焊接工艺对690镍基合金焊丝熔敷金属高温失塑裂纹敏感性影响研究[J]. 电焊机,2019,49(04):206-210.
GU Y, ZHANG J B, HUANG Y F, et al. Research on influence of welding technology on DDC susceptibility of deposited metal of 690 nickel base alloy welding wires at high temperature [J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(04):206-210.
- [10] 朱兴华. Inconel690镍基合金材料焊接技术要点[J]. 电子世界,2013(14):189.
ZHU X H. Key points of welding technology for inconel690 nickel base alloy [J]. Electronics World, 2013 (14):189.