

“华龙一号”贯穿件套筒预制阶段的目视检测

后 灿¹,边永丰²,谢明根¹,李义强¹

(1. 中国建筑第二工程局有限公司,北京 101100;2. 山东瑞祥模具有限公司,济宁 272400)

摘 要:以惠州太平岭“华龙一号”核岛钢衬里贯穿件套筒为检测对象,介绍了预制各阶段中目视检测的重点和常见缺陷,重点介绍了套筒筒段纵向焊缝余高及错边的测量,提出了套筒内外侧筒段纵向焊缝余高测量偏差的修正计算方法及其修正公式,并利用宏观金相腐蚀结果对其进行验证,最后提出一种错边量的实用测量方法并验证了其可行性,旨在确保贯穿件套筒预制过程中的目视检测符合相关标准要求,为核电站钢制安全壳贯穿件的检测提供一些参考。

关键词:贯穿件套筒;目视检测;纵向焊缝余高;错边量;修正

中图分类号: TG115.28 文献标志码: B 文章编号: 1000-6656(2024)02-0072-05

Visual inspection of the prefabrication stage of penetration sleeve for “Hualong No. 1”

HOU Can¹, BIAN Yongfeng², XIE Minggen¹, LI Yiqiang¹

(1. China Construction Second Engineering Bureau Co., Ltd., Beijing 101100, China;
2. Shandong Ruixiang Mold Co., Ltd., Jining 272400, China)

Abstract: Taking the steel lining penetration sleeves of the “Hualong No. 1” nuclear island in Taipingling, Huizhou as the testing object, this paper introduces the key points and common defects of visual inspection in each stage of prefabrication, focused on the measurement of longitudinal weld seam excess height and misalignment in the sleeve section, proposed a correction calculation method and correction formula for the measurement deviation of longitudinal weld seam excess height in the inner and outer sides of the sleeve section, and verified it using macroscopic metallographic corrosion results. Finally, a practical measurement method for misalignment was proposed and its feasibility was verified, aiming to ensure that visual inspection during the prefabrication process of penetration sleeves met relevant standard requirements, provide some references for the inspection of steel containment penetrations in nuclear power plants.

Key words: penetration sleeve; visual inspection; longitudinal weld reinforcement; misalignment amount; correct

核电站钢制安全壳贯穿件是为工艺管道、电缆穿越安全壳时,保持安全壳屏障的完整性和密封性而设置在安全壳壁上的穿墙连接部件,对核电站的安全稳定运行有着非常重要的作用,是核电站安全运行的重要保障之一。

“华龙一号”钢衬里有 176 个贯穿件套筒,贯穿

件套筒有 $\phi 457$ mm, $\phi 508$ mm, $\phi 610$ mm, $\phi 625$ mm, $\phi 940$ mm, $\phi 1\,016$ mm 等规格。钢衬里贯穿件套筒的筒段部分通过卷板机弯曲成型,水平位置对焊而成。制造过程需要进行 100% 目视检测、泄漏检测和渗透检测,以保证贯穿件焊缝的牢固和密封。目视检测是多道无损检测工序中的首位工序,是重要的质量检测控制环节。以惠州太平岭“华龙一号”核岛钢衬里贯穿件套筒为检测对象,介绍了预制各阶段中目视检测的重点和常见缺陷,提出相关套筒筒段纵向焊缝余高及错边尺寸测量方法并进行验证,旨在确保贯穿件套筒预制过程中的目视检

收稿日期: 2023-06-19
作者简介: 后 灿(1986—),男,本科,高级工程师,主要研究方向为核电站建造期间的无损检测
通信作者: 边永丰, sdrxmjjsb@163.com

测符合相关标准要求。

1 预制各阶段检测重点及常见缺陷

贯穿件套筒预制过程中,目视检测的重点主要为表面缺陷、坡口角度、组对间隙、错边量、焊接接头的宽度及余高等内容。

1.1 组对前表面缺陷

搬运和转换工位过程中可能造成磕碰损伤;卷板机在卷制过程中。钢板内外表面也可能出现压痕;保存不当可能形成锈蚀凹坑;组对前坡口面通过机加工形成,加工过程中可能会出现表面不连续性、表面粗糙、边缘毛刺等,同时也可能在坡口面上观察到钢板原材料的分层缺陷,这些缺陷都应在组对前清除,表面机械损伤、分层缺陷示例如图 1 所示。

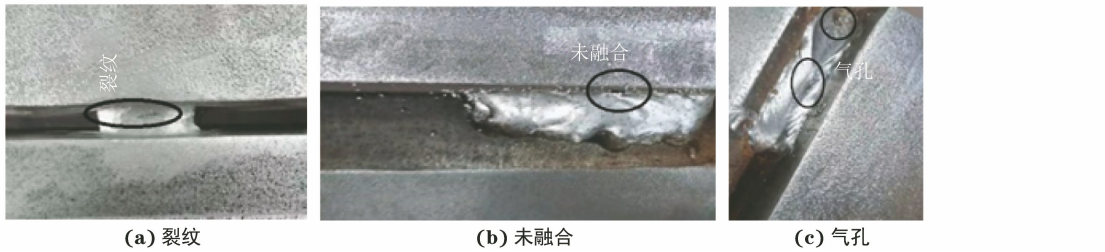


图 1 表面机械损伤、分层缺陷示例

1.2 组对时表面缺陷

定位焊缝表面裂纹、未熔合、气孔缺陷示例如图 2 所示,定位焊时,焊点处的未熔合、气孔、夹渣、裂纹、咬边等缺陷在后续焊接时,可能被埋入焊缝中,成为内部缺陷,进而降低焊接接头的严密性,减小焊缝的有效截面,致使其机械强度下降,也可能造成应力集中,发展成焊缝裂纹源,因此定位焊的目视检测应和焊缝最终检测的要求相同。

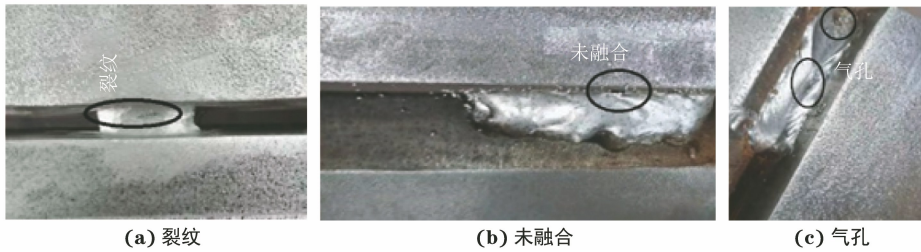


图 2 定位焊缝表面裂纹、未熔合、气孔缺陷示例

1.3 焊后外观检测

完工的焊接接头及热影响区域不得有裂纹、未熔合、未焊透、密集气孔、夹杂物、咬边、焊瘤、未焊满等外观缺陷;特别值得注意的是,一些可能影响后续其他无损检测结果的外形缺陷也是不能接受的,如未圆滑过渡的棱边、打磨沟槽、表面划伤等,这些缺陷可能对后续的渗透检测显示、射线底片的评定造成干扰,都应在其他检测之前消除。打磨沟槽外形缺陷的射线检测底片如图 3 所示^[1]。

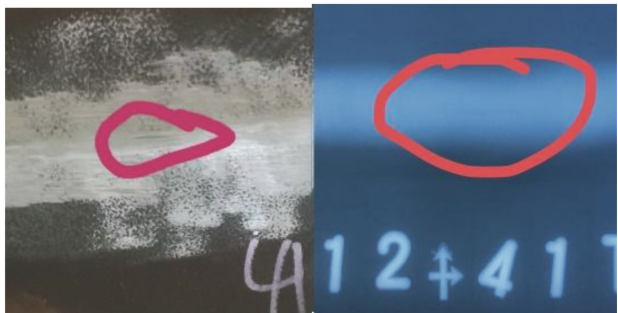


图 3 打磨沟槽外形缺陷的射线检测底片

2 尺寸检测

坡口角度和组对间隙尺寸应按图纸要求严格控

制,通常情况下可采用常规方法进行检测,即坡口角度使用焊接检验尺的多用尺与主尺组合测量,组对间隙使用焊缝检验尺的多用尺或者塞尺直接测量。

焊缝余高过高和错边量超差是常见的几何形状偏差,可能破坏焊接接头的连续性,又会造成局部应力集中,降低疲劳强度,影响产品的使用安全周期。近年来国内外对焊缝余高和错边量控制都比较关注,也制定了相应标准加以控制。贯穿件套筒预制中焊缝余高和错边量尺寸也有相关的要求,B.T.S.3.15《安全壳防泄衬里和空气闸门建造-无损检验》规范中焊缝余高的允许值如表 1 所示,同时该标准要求 $e < 12\text{ mm}$ 最大允许错边量为 $e/4$; $e \geq 12\text{ mm}$ 最大允许错边量为 $e/10 + 2$,且最大为 5 mm 。

表 1 B.T.S.3.15 规范中焊缝余高允许值 mm

壁厚 e	焊缝余高最大允许值	
	正面	背面
$e \leq 5$	1.5	1.5
$5 < e \leq 10$	2	2.5
$e > 10$	2.5	3

目前,焊缝余高和错边量的常规目视检测方法是使用 HJC40 型通用焊接检验尺测量相关尺寸,

HJC40 型通用焊接检验尺结构及实物如图 4 所示。该检验尺是为平板焊缝设计的,其测量套筒卷制纵焊缝尺寸时,即使没有余高,受套筒结构影响,测量也会存在偏差,在套筒外表面测量余高时,测量值将小于实际值,反之在内表面测量余高时,测量值将大于实际值,而且筒径越小误差越大,可能造成误判漏判。因此,用该类型焊接检验尺测量贯穿件套筒纵向焊缝余高时,必须对测量结果进行修正才能准确判定余高是否满足表 1 中的规定。同理,由于筒段焊缝两侧母材存在一定的曲率,使用通用的焊接检验尺和直板尺测量错边量时,误差较大,甚至无法测量。

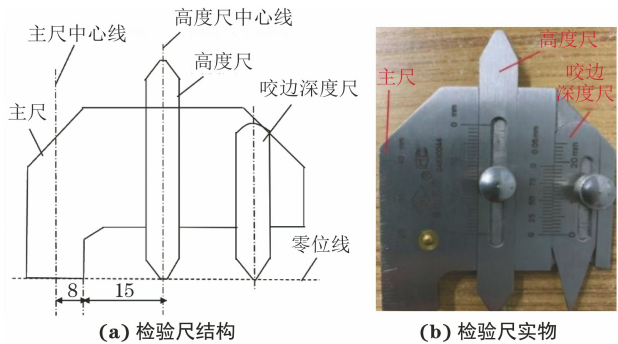


图 4 HJC40 型焊接检验尺结构及实物示意

2.1 筒段纵向焊缝余高测量

2.1.1 套筒内侧纵向焊缝余高测量修正

以 HJC40 型焊接检验尺主尺端面 AB 为测量基准,在高度尺的配合下进行测量,读出的测量值会大于实际值,其差值为 $\Delta_{内}$,套筒内侧纵向焊缝余高测量示意如图 5 所示。

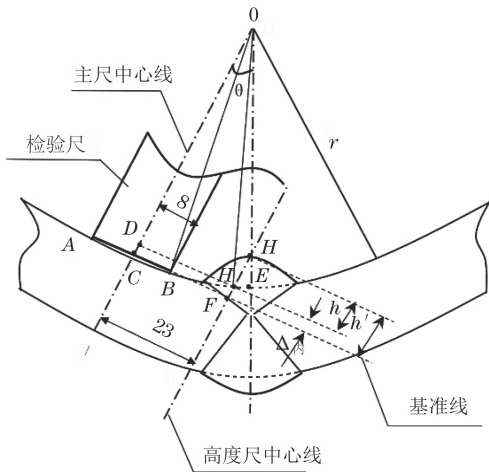


图 5 套筒内侧纵向焊缝余高测量示意

图 5 中套筒内侧纵向焊缝实际余高 $HE = HH' \cos \theta$, 由于倾斜角 θ 很小,所以 $HE \approx HH' = h$; 内侧焊缝余高测量值 $h' = FH$; 当无错边余高为

0 时,检验尺读数 $\Delta_{内} = H'/F$, 则有

$$\begin{aligned} \Delta_{内} &= H'/F = CD = OC - OD \\ &= (OB^2 - BC^2)^{1/2} - (H'/O^2 - H'/D^2)^{1/2} \\ &= (r^2 - 8^2)^{1/2} - (r^2 - 23^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: r 为套筒内半径; $\Delta_{内}$ 为套筒内侧纵向焊缝余高修正值; h' 为焊接检验尺测量值。

所以修正后的实际筒段内侧纵焊缝余高值 $h = h' - \Delta_{内}$ 。

2.1.2 套筒外侧纵向焊缝余高测量修正

HJC40 型焊接检验尺主尺端面 AB 与套筒外侧表面相切,保证主尺中心线对准圆心,以此为基准,在高度尺的配合下进行测量,读出的测量值会小于实际值,其差值为 $\Delta_{外}$,套筒外侧纵向焊缝余高测量示意如图 6 所示。

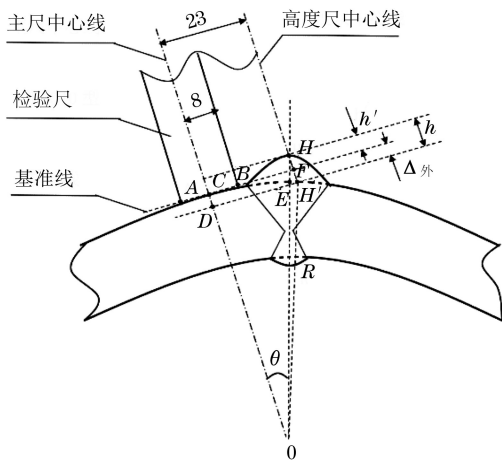


图 6 套筒外侧纵向焊缝余高测量示意

图 6 中套筒外侧纵向焊缝实际余高 $HE = HH' \cos \theta$, 由于倾斜角 θ 很小,所以 $HE \approx HH' = h$; 外侧焊缝余高测量值 $h' = FH$; 当无错边余高为 0 时,检验尺读数 $\Delta_{外} = H'/F$, 则有^[2]

$$\begin{aligned} \Delta_{外} &= H'/F = CD = OC - OD \\ &= R - (H'O^2 - H'D^2)^{1/2} \\ &= R - (R^2 - 23^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: R 为套筒外半径; $\Delta_{外}$ 为套筒外侧纵向焊缝余高修正值; h' 为焊接检验尺测量值。

所以修正后的筒段外侧纵焊缝余高值 $h = h' + \Delta_{外}$ 。

2.1.3 套筒纵向焊缝余高测量试验

为了验证套筒纵向焊缝余高理论公式的准确性,选一个外径为 457 mm,壁厚为 16 mm,圆度较好的套筒作为试验对象,套筒内、外侧纵向焊缝余高测量现场如图 7 所示。

由式(1)可得套筒内侧焊缝余高修正值 $\Delta_{内} =$

$(212.5^2 - 8^2)^{1/2} - (212.5^2 - 23^2)^{1/2} = 1.10$ mm。选取一处测量点,在套筒内侧通过 HJC40 型焊接检验尺量出纵向焊缝余高测量值 $h' = 4$ mm。故修正后内侧焊缝实际余高 $h = h' - \Delta_{内} = 2.90$ mm。

由式(2)可得套筒外侧焊缝余高修正值 $\Delta_{外} = 228.5 - (228.5^2 - 23^2)^{1/2} = 1.16$ mm。在内侧选取测量点对应的套筒外侧位置,通过 HJC40 型焊接检验尺量出纵向焊缝余高测量值 $h' = 1$ mm。故修正后外侧焊缝实际余高 $h = h' + \Delta_{外} = 2.16$ mm。

为了实际工作中方便,笔者列出几种常见预制规格的贯穿件套筒内、外侧纵向焊缝余高修正值 Δ (见表 2)。

表 2 几种规格的贯穿件套筒内、外侧焊缝余高修正值 Δ mm

套筒外径	壁厚	$\Delta_{内}$	$\Delta_{外}$
457	16	1.10	1.16
508	16	0.98	1.04
610	20	0.82	0.87
625	20	0.80	0.85
940	20	0.52	0.56
1 016	20	0.48	0.52

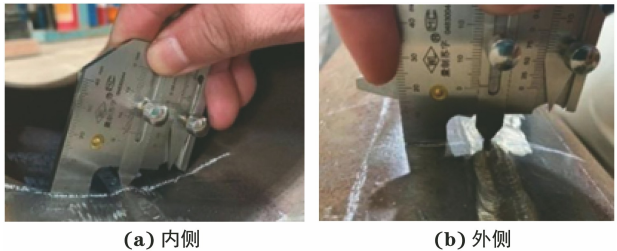


图 7 套筒内、外侧纵向焊缝余高测量现场

笔者对测量点进行切割,然后对焊缝截面进行宏观金相腐蚀,测量得出套筒内侧实际余高 $h = 2.84$ mm,外侧实际余高 $h = 2.12$ mm。套筒内、外侧纵向焊缝余高宏观金相显示如图 8 所示。

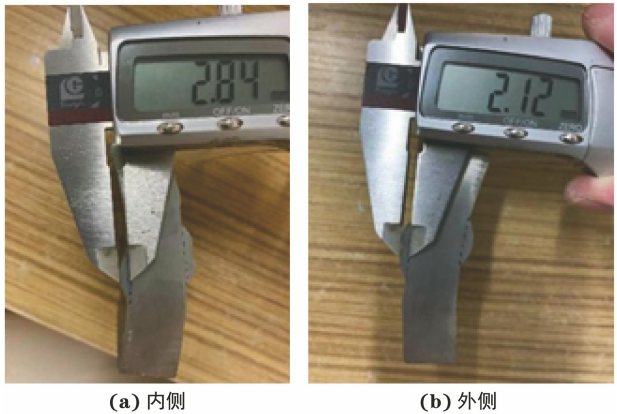


图 8 套筒内、外侧纵向焊缝余高宏观金相显示

同理,分别对常见规格的贯穿件套筒加工余量的纵向焊缝余高测量点进行取样,通过金相腐蚀试验进行验证,其结果如表 3 所示。

表 3 几种规格的贯穿件套筒内、外侧焊缝余高测试值与金相腐蚀验证值对比 mm

套筒外径	壁厚	测试值	金相腐蚀验证值
457	16	外侧 2.16/内侧 2.90	外侧 2.12/内侧 2.84
508	16	外侧 2.22/内侧 2.88	外侧 2.17/内侧 2.81
610	20	外侧 2.28/内侧 2.82	外侧 2.24/内侧 2.77
625	20	外侧 2.26/内侧 2.78	外侧 2.22/内侧 2.74
940	20	外侧 2.32/内侧 2.83	外侧 2.29/内侧 2.78
1016	20	外侧 2.36/内侧 2.77	外侧 2.33/内侧 2.74

可见,采用上述修正方法得到的纵向焊缝余高测试值与金相腐蚀验证值基本一致,此方法用于测量套筒内、外侧纵向焊缝余高是可行的。

上述理论计算都是基于套筒圆度较好的前提下,当套筒圆度较差或者焊缝附近存在较大棱角时,修正值 Δ 可以在筒体上,直接使用 HJC40 型焊接检验尺测出,但是必须注意套筒外侧测量时,应保持主尺端面中点与切点重合,若中点与切点偏离,将引起更大误差。

2.2 错边量测量

套筒筒段存在一定的曲率,使用通用焊接检验尺和直板尺测量错边量较困难。在测量之前,需要加工辅助测量的试板,通过配合使用可快速测出。

在套筒外侧测量错边量时,辅助测量试板的内圆弧半径为被检套筒的外半径 R ,试板内侧母材切割有一个同圆心的槽;在套筒内侧测量时,辅助测量试板的外圆弧半径为被检套筒的内半径 r ,试板外侧母材切割有一个同圆心的槽^[3]。槽深应高于被检焊缝余高,宽度大于焊缝宽度加两侧各 15 mm,辅助试板两侧端面至槽距离相同,且要保持平整一致,辅助测量试板结构及其实物如图 9 所示。

在套筒外侧测量错边量时,首先目测错边最严重的位置,再将辅助测量试板的圆弧槽中心线与纵向焊缝中心线对齐,使用钢板尺分别测出焊缝两侧热影响区至槽的距离,两边测得高度之差即为焊缝该处的错边量,套筒外侧纵向焊缝错边量测量原理及现场如图 10 所示。

笔者测量了外径为 457 mm 的贯穿件套筒纵向焊缝两边热影响区至槽的距离,其结果分别为 11 mm 和 7 mm,所以错边量为 4.0 mm。

为了验证此方法的可行性,在测量位置选取试样进行宏观金相腐蚀,外侧显示的错边量为

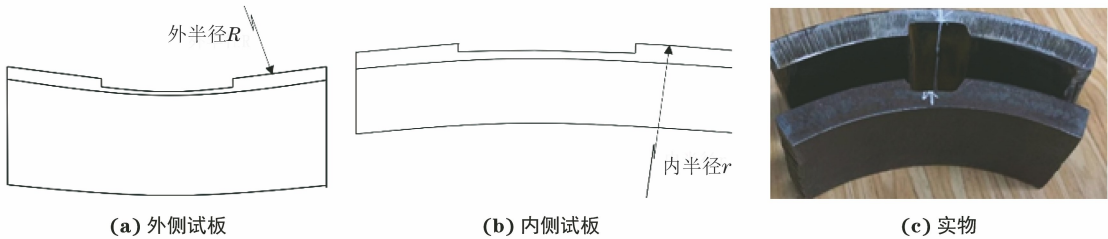


图 9 辅助测量试板结构及其实物

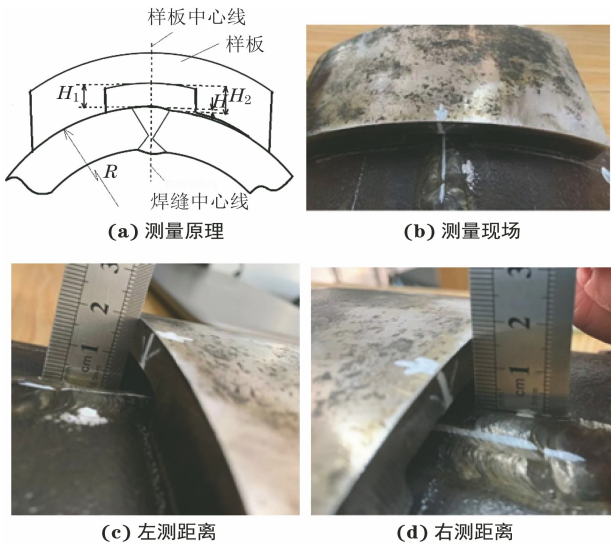


图 10 套筒外侧纵向焊缝错边量测量原理及现场
3.90 mm, 内侧显示的错边量为 3.92 mm(见图 11), 结果与上述测量计算值基本一致, 证明此方法适用。



图 11 套筒内外侧纵向焊缝错边量的宏观金相显示

3 结语

(1) 贯穿件套筒预制中, 组对定位焊缝外观缺陷的检测不能忽视, 其可能影响产品整体焊缝质量和使用寿命, 并影响后续其他无损检测结果的判定。

(2) 采用 HJC40 型通用焊接检验尺测量贯穿件套筒内、外侧纵向焊缝余高时, 需要进行修正才能得到实际的余高值。圆度较好的预制套筒, 纵向焊缝余高修正值可以通过表 2 直接得到, 也可通过式 (1) 和式 (2) 计算得到。

(3) 对于几种常用规格的套筒, 可提前加工一些辅助测量试板, 方便快速测量出套筒纵向焊缝错边量。该方法也可以用于相似管段等部件焊缝尺寸的测量, 便于目视检测人员能够准确判断出相关焊缝尺寸是否满足相关标准要求。

参考文献:

[1] 王跃辉, 国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材编审委员会. 目视检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[2] 崔学义, 秦德全. 压力容器筒体纵环焊缝棱角及错边的检验方法[J]. 压力容器, 1990, 7(2): 85-51.

[3] 何宗辉. 圆筒体对接焊缝余高的检测原理及方法[J]. 石油化工设备, 1991, 20(4): 38-40.