

核电设施用常压、低压容器 监造过程中的质量控制及经验反馈

牛元涛

东方电气（广州）重型机器有限公司

摘要：本文介绍了核电设施用常压、低压容器结构及特点，分析了核电设施用常压、低压容器在监造过程中的质量控制要点，并分享了实际监造过程中的一些经验反馈案例。

关键词：核电；容器；常压；低压；质量控制

近年来，为解决能源问题，同时兼顾环境保护，我国核电事业飞速发展。作为核电设施中最重要的一类设备，压力容器的制造质量直接影响核电设施的寿命、安全性及发电功率。因此，如何加强和完善对核电设施用压力容器的质量管控就显得尤为关键。

1 核电设施用常压、低压容器简介

1.1 常压、低压容器概述

常压容器是内部一直保持与外部大气环境相通的设备；低压容器是同外部大气相隔离，处于低压，但不含限压安全装置的设备。

常见的核电设施用常压、低压容器一般包括但不限于：容积控制箱、前贮槽、缓冲罐及各类排水槽等槽罐类设备。主要实现接收和贮存反应堆冷却剂、收集和暂存废液，防止容器内的放射性气体向环境泄漏，并将气体进行贮存衰变等功能。

常压、低压容器主要结构一般包括：封头、筒体、裙座（鞍座）、人孔、固定支杆、吊耳以及各类接管（接口）等零部件。接管（接口）主要包括：循环管（口）、进/排气管（口）、进/排

水管（口）、仪表口以及卸荷口等，如图1所示。

1.2 常压、低压容器主要制造工艺流程及关键工序

常压、低压容器主要制造工艺流程如图2所示，关键制造工序包含封头、筒体、管和人孔补强板、管接头、人孔、吊耳、裙座以及总装等。

封头：材料回厂复验，拼接焊接，压制成型、固溶处理（如需）、无损检测，各孔加工。

筒体：材料回厂复验，卷制成型，纵焊缝（试样）焊接及无损检测，见证

件试验，各孔加工。

管、人孔补强板：材料回厂复验，尺寸加工。

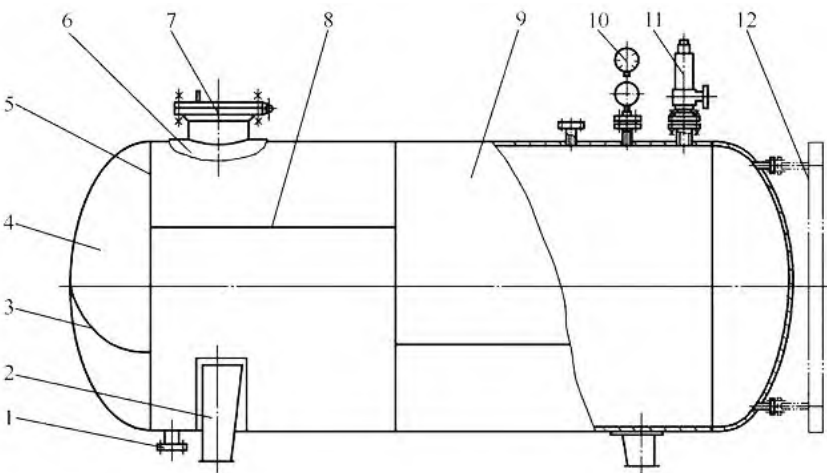
管接头：材料回厂复验，尺寸加工，与管焊接后无损检测。

人孔：材料回厂复验，短筒卷制成型、焊接及无损检测，短筒与法兰盘组焊及无损检测。

吊耳：材料回厂复验，各部件组焊及无损检测。

裙座：材料回厂复验，尺寸加工，组焊及无损检测，各孔加工。

总装：封头与筒体、封头与管接



1—法兰、2—支座、3—封头拼接焊缝、4—封头、5—环焊缝、6—补强圈、7—人孔、8—纵焊缝、9—筒体、10—压力表、11—安全阀、12—液面计

图1 压力容器结构

头、封头与裙座组焊及无损检测，总体尺寸及各种检测和试验（气密性试验、盛水试验、水压试验以及泄漏试验等），酸洗钝化、涂装。

2 监造过程中质量控制要点

2.1 原材料质量控制

原材料主要包括：板材（不锈钢板、碳钢板）、锻件、管、钢棒、焊材（焊丝、焊条）以及紧固件等。

原材料开始制造前，监造人员应重点关注主要材料采购技术条件、质量计划的审查，注意是否遗漏重要技术要求，工艺过程是否合理。把好原材料的制造关，对保证后续产品的制造质量至关重要。

原材料回厂后的复验，监造人员应重点关注主要材料采购技术条件、技术规格书、图样等技术文件中的重要技术要求，不能遗漏复验项目，同时要保

证材料完工资料及复验报告经审核无误后，方可允许使用。

非规范级设备使用的市售材料时，通常材料的质量证明书等质量证明文件存在缺少部分检测项目及数据的情况，建议在设备材料采购前针对上述情况，通过澄清单向设计部门进行澄清，采用“缺项补项”的复验方式来应对该种情况。

2.2 关键部件及关键点的质量控制

2.2.1 封头及筒体质量控制

根据制造工艺确定制造裕量（考虑实际使用钢板偏差），选择合适厚度的板材，确保封头、筒体成形后的厚度不小于设计要求的最小成形厚度。封头、筒体上任何开孔应避免对接焊缝，且开孔与对接焊缝边缘之间最小间距应大于封头、筒体名义厚度的3倍，并应≥100mm。

筒体由多筒节组成时，相邻筒节两

条焊缝边缘间外圆弧长以及封头焊缝中心线与相邻筒节焊缝边缘间外圆弧长应大于钢材厚度的3倍，且应≥100mm。多筒节筒体在组装时应考虑直线度，薄壁大直径筒体在成型后要考虑在重力作用下的存放变形问题。

筒体同一断面上最大内径与最小内径之差，应不大于该断面内径的1%（对锻焊容器为1%），且≤25mm。当被检断面位于开孔中心一倍开孔内径范围内时，则该断面最大内径与最小内径之差，应不大于该断面内径的1%（对锻焊容器为1%）与开孔内径的2%之和，且≤25mm。

2.2.2 热成形的奥氏体不锈钢零件质量控制

热成形的奥氏体不锈钢零件应进行固溶处理，并保持抗晶间腐蚀性能；冷成形的奥氏体不锈钢零件按GB/T 150.4—2011中8.1.1的规定执行。如

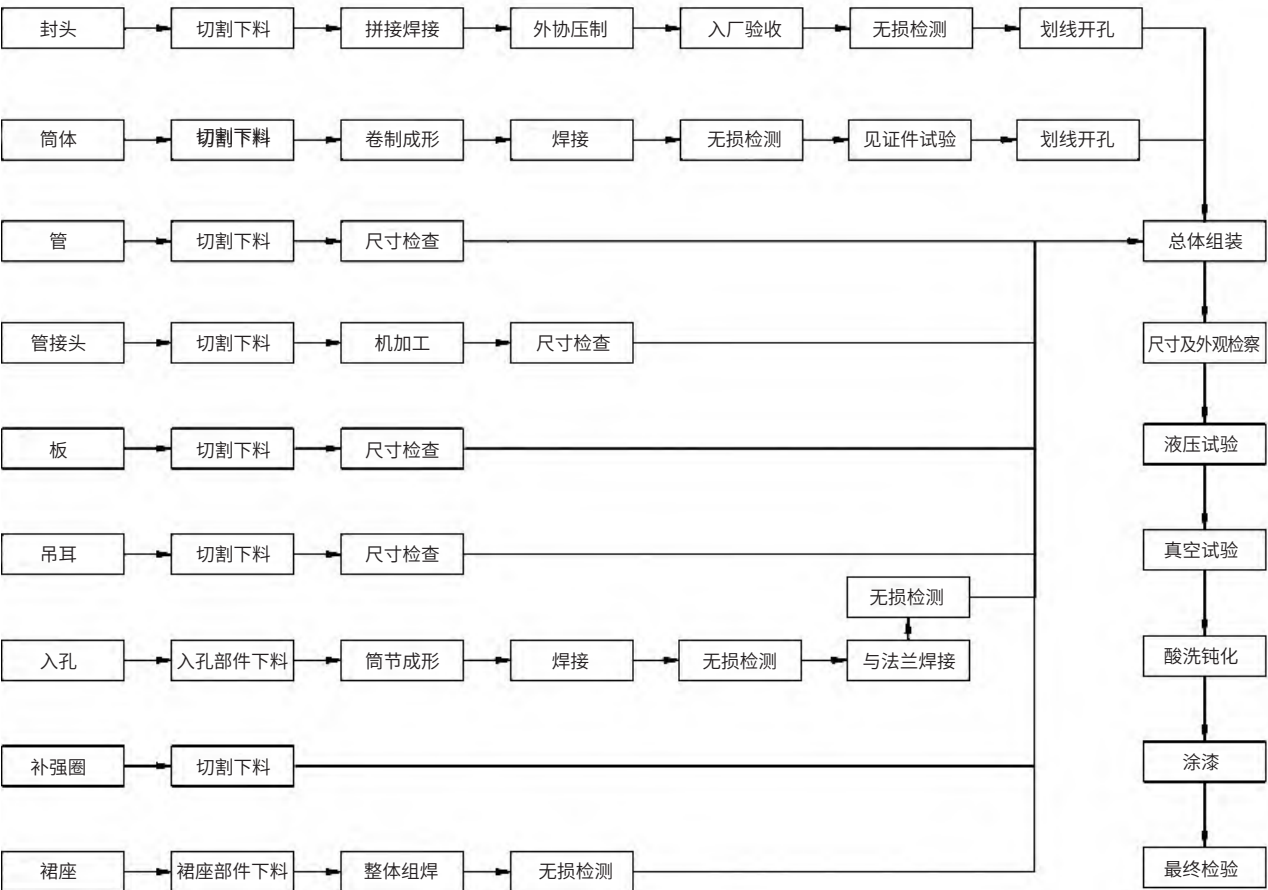


图2 容器制造工艺简图

果冷成形件变形率超过 15%，应进行固溶处理。当零件进行热处理时，母材的热处理试板应与零件进行同炉热处理，热处理后试板应按相应母材的要求进行各项理化性能试验。

2.2.3 全熔透焊接接头的无损检测质量控制

焊接时开坡口焊接接头应保证全焊透，审核质量计划时重点关注此类焊缝的无损检测，避免遗漏无损检测项或检测比例不符合要求等情况发生。当其两面施焊时，则接触介质的一面进行封底焊；单面施焊时，则须采取氩弧焊打底，背部充氩气等保护措施，以保证接头全焊透和根部平整。

2.2.4 不锈钢容器修磨质量控制

不锈钢容器局部伤痕、刻槽等缺陷应予以修磨，修磨斜度最大为 1:3。修磨的深度应不大于该部位钢材厚度的 5%，且最大 $\leq 2\text{ mm}$ ，否则应予焊补。

2.2.5 无损检测及工厂检验 / 试验质量控制

针对部分合同中既有规范级又有非规范级设备，因审核部门不同，无损检测及工厂检验 / 试验的程序文件必须分开编制，避免造成无损检测及检验检测的程序文件未经审批直接使用的情况发生。

2.2.6 容器整机验收质量控制

容器整机验收时重点关注接口尺寸、清洁度和防异物措施，重点检查插套焊定位用工装（焊丝）是否去除，水压试验切管后管内铁屑是否清理干净，容器内及管内焊缝的清洁度及是否有异物。

3 监造过程中经验反馈案例

3.1 筒体变形

筒体是容器类设备的主要及重要部件，其中筒体的卷制是容器类设备的关键工艺，筒体的圆度是筒体的关键指标。大型薄壁筒体在卷制成型后的吊装、存储等过程容易造成筒体变形，导致筒

体尺寸（圆度、直线度等）超差，如图 3、图 4 所示。

筒体卷制成形后防变形显得尤为重要。筒体存放方式一般分为两种：轴向放置和径向放置，筒体轴向放置优点是筒体圆度受到重力影响较小，缺点是筒体吊装及摆放容易，缺点是筒体圆度受到重力影响较大。

综上，筒体卷制成形后应在筒体内部放置临时工装（支撑），保证筒体径向放置时不会因重力导致筒体变形。对于容器类设备专业供应商应制作一组或多组工装（最好是可调节十字支撑），工装适用范围应覆盖容器制造范围。



图 3 筒体内部未放置支撑导致圆度超差



图 4 筒体内部焊接临时支撑

3.2 筒体吊装损伤

容器筒体在制造过程中需要进行多次吊运，因防滑、防脱钩等安全原因无法对吊具与筒体直接接触部位进行有效的防护，导致吊具对筒体造成一些损伤，尤其是大型筒体，因其质量较大而会造成较大的损伤。

在筒体吊运后，应重点针对筒体两端要进行外观检测如图 5 ~ 图 7 所示，对轻度损伤和划痕（修磨深度不得大于该部位钢材厚度的 5% 与 0.3 mm 两者的小值）通过打磨进行处理（打磨后应进行 PT 检测）；对严重损伤部位进行补焊

（必须出具返修方案），返修后提供返修报告。不论打磨部位是否经过补焊均要在打磨后对厚度进行检测，避免打磨后部位厚度超差。

3.3 埋弧焊焊丝的扩散氢含量问题

焊材是设备的重要原材料，焊材的验收是重中之重。焊材供应商一般情况下的制造执行标准为 NB/T 20009 压水堆核电厂用焊接材料系列标准。

其中 NB/T 20009.9—2013《压水堆核电厂用焊接材料 第 9 部分：1、2、3 级设备埋弧焊用碳钢焊丝及焊剂》中 4.6 熔敷金属扩散氢含量要求：采用水银法或色谱法测定，含量不应大于 0.005 mL/g，且该标准中 5.7 条明确熔敷金属扩散氢含量测定方法符合 GB/T 3965《熔敷金属中扩散氢测定方法》，GB/T 3965—2012（最新版本）中要求试验结果单位应为 mL/100g，故含量标准表示方法应为 0.5 mL/100g。

根据以往试验结果及相关焊材供应商的供货情况调查，一般焊材供应商的焊材制造水平基本上在 2.5 ~ 4.0 mL/100g（会因为季节的水汽变化略有变动），NB/T 20009.9—2013 中要求熔敷金属扩散氢含量不应大于 0.005 mL/g（0.5 mL/100g），基本上是不可能达到的。



图 5 吊具造成的严重损伤



图6 打磨后厚度检测

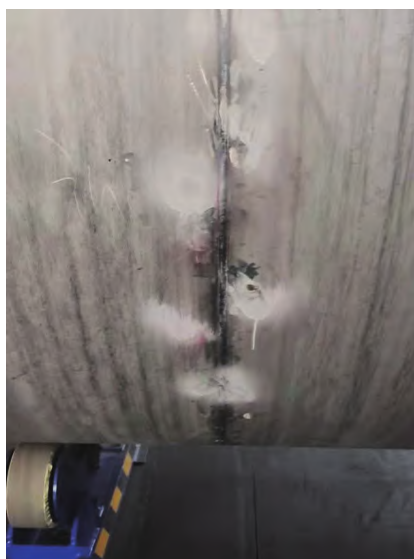


图7 打磨后 PT 无损检测

查阅同类能源部标准(NB/T 20009.29—2014《压水堆核电厂用焊接材料第29部分:安全级设备埋弧焊用碳钢焊丝和焊剂》)中要求为 $\leq 0.4 \text{ mL/kg}$ (4 mL/100 g),故NB/T 20009.9—2013中熔敷金属扩散氢含量要求与相关标准明显不一致(相差近10倍)。综合分析,NB/T 20009.9—2013中熔敷金属扩散氢含量要求应为 $\leq 5 \text{ mL/100 g}$,而非 0.005 mL/g 。

该事宜已通过澄清单报相关技术部门审批,相关技术部门审核后要求依据熔敷金属扩散氢含量 $\leq 5 \text{ mL/100 g}$ 执行,故NB/T 20009.9—2013中熔敷

金属扩散氢含量要求存在错误,在日后的监造和审核过程中,埋弧焊碳钢焊丝及焊剂熔敷金属扩散氢含量应按 $\leq 5 \text{ mL/100 g}$ 执行。

3.4 无损检测程序文件与上游标准不一致问题

容器设备焊接前后应进行无损检测工作,无损检测须依据执行国标或行标编制具体执行程序文件。在无损检测程序文件编制过程中,往往因编制人员疏忽或对标准掌握程度等因素导致程序文件中的部分内容与上游标准不一致,会出现两种情况:一是无损检测程序文件要求低于上游标准,二是无损检测程序文件要求高于上游标准。当无损检测程序文件低于上游标准的情况出现时,相关问题会在程序文件审查时被提出并改正,一般不会影响执行;但当无损检测程序文件高于上游标准的情况出现时,往往审核阶段顺利通过,但针对部分高于上游标准的特殊处未向执行部门及人员进行传递。

在无损检测工作执行过程中,因无损检测人员多为Ⅱ、Ⅲ级经验丰富的持证人员,对相关国标及行标掌握熟练,但对程序文件一般解读不细致,对于一些参数直接使用相关国标及行标,致使实际操作过程中某项参数与审批执行的程序文件不符,因此往往会发生经验主义错误,导致不符合项的产生。

故当无损检测程序文件或其他检验、试验程序文件高于上游标准的情况出现时,文件编制人员务必要将相关特殊点在文件传递过程中进行重点强调(必要时可有针对性地进行技术交底),同时执行人员要杜绝经验主义,在操作前对关键过程及参数进行核实。

4 结语

总结核电设施用常压和低压容器在监造过程中发现的质量问题,特别是重复发生的质量问题,发现人为因素导致产生的质量问题占绝大多数,究其主

要原因基本上都是经验主义,暴露出容器专业制造厂部分干部、员工的核安全意识和质量意识不强、亟待提高。供应商或分包商应多多加强自身的核安全文化建设,秉持“质量第一、安全第一”的核安全文化意识,树立“核安全高于一切”的理念,坚持“四个一切”核工业精神开展产品生产和制造,坚决杜绝“差不多”“没影响”等经验主义思想和行为。

作为一名核电设备监造人员,我们不应故步自封,要主动不断学习新的技术知识,逐渐提高自身的业务水平;要时刻保持怀疑一切的态度和坚持仔细、认真、踏实的工作作风,并不断强化自己的质量保证意识,始终坚持“四个凡是”“两个零容忍”核电行为准则,以程序文件为依据,以相关法规、标准、规程和规范等为指导,以监造团队为依托,做好各自所监造的核电设备的质量控制工作,做一名有高度责任心的核电设备监造工程师,为核电厂监造出高质量的核电设备。

参考文献:

- [1] 臧希年,申世飞.核电厂系统及设备[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [2] 肖文.中国核电[M].北京:北京联合出版公司,2021.
- [3] 杨小华.CPR1000核电常规岛工艺设计技术研究[M].武汉:中国地质大学出版社,2008.
- [4] 韩树新,盛水平.承压类特种设备实用技术[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [5] 刘巍,邢继.中国核电工程有限公司民用核安全机械设备设计技术培训教材[M].北京:中国原子能出版社,2016.