

文章编号：0258-0926(2015)S1-0180-04；doi：10.13832/j.jnpe.2015.S1.0180

ACP1000 蒸汽发生器 I-690TT 合金 U 形传热管评定技术

李 磊，何戈宁，张富源，黄 伟，霍 蒙，侯 晔

中国核动力研究设计院，成都，610041

摘要：为了固化核电厂蒸汽发生器传热管的全流程制造工艺和关键工艺参数，保证传热管批量化制造时质量的稳定性，提出了一整套评定技术方案。该技术方案可对核电厂 I-690TT 合金 U 形传热管的化学成分、机械性能、金相组织的均匀性及无损检测方法的有效性进行全面验证，并在 ACP1000 蒸汽发生器传热管国产化研制过程中成功应用。

关键词：蒸汽发生器；U 形管；690TT 合金；评定

中图分类号：TL341 **文献标志码：**A

Qualification of Steam Generator Alloy I-690TT U-Bend Tubes in ACP1000 Nuclear Power Plants

Li Lei, He Gening, Zhang Fuyuan, Huang Wei, Huo Meng, Hou Ye

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China

Abstract: In order to validate the whole manufacturing process and key technical parameters of nuclear steam generator heat transfer tubes and stabilize the properties during the tube mass production, an integrated technical qualification plan is established. This plan can evaluate the homogeneity of the chemical, mechanical and metallurgical properties, and can verify the effectiveness of non-destructive inspection methods of I-690TT U-bend tubes. The plan has been implemented successfully in the domestic manufacture of ACP1000 steam generator tubes.

Key words: Steam Generator, U-bend Tube, Alloy 690TT, Qualification

0 引 言

传热管是核电厂蒸汽发生器的核心功能部件，也是核安全一级部件。二代改进型百万千瓦级机组、三代核电美国非能动安全先进压水堆（AP1000）、欧洲先进压水堆（EPR）、中核集团第三代先进压水堆（ACP1000）等机组蒸汽发生器都选择耐腐蚀性能优良的 I-690TT 合金作为 U 形传热管材料。I-690TT 合金 U 形传热管的化学成分、机械性能、金相组织、内部质量及尺寸公差等方面技术性能指标要求高，制造工艺复杂，长期以来，其供货被少数几家国外厂商垄断，严

重抬高了蒸汽发生器国产化成本，制约了核电工程建设进度。为了满足我国具有自主知识产权的三代核电 ACP1000 机组的国内建设及出口需要，迫切需要通过实现 I-690TT 合金 U 形传热管的国产化，彻底解决蒸汽发生器设备制造国产化问题。

在前期突破传热管各单项关键工艺的基础上，采用批量化试制的方法，对全流程制造工艺的合理性进行评定，是传热管工程供货前研发阶段必不可少的环节。本文针对 ACP1000 机组蒸汽发生器 I-690TT 合金 U 形传热管，提出了一整套评定技术方案，通过对批量化制造的传热管各方

收稿日期：2015-05-04；修回日期：2015-08-20

作者简介：李 磊（1982—），男，工程师，现从事核电站蒸汽发生器等设备设计研究工作

面性能的检验,验证制造工艺的稳定性和合理性。

1 评定依据和目的

ACP1000 机组的设计和建造规范总体上采用法国体系,其中蒸汽发生器采用 RCC-M 规范(2007 版)进行设计和制造。

按 RCC-M 规范要求,传热管制造厂在首次供货前,为验证传热管制造工艺的合理性、验证产品性能满足规范要求,应进行评定。

蒸汽发生器传热管的评定依据 RCC-M M140 有关制品评定的内容、M4105《用于压水堆蒸汽发生器管束的镍-铬-铁合金无缝管》的要求进行。根据 RCC-M M143.6 的规定,通过评定检验和试验,应能:验证传热管的化学成分及金相组织满足设计要求且均匀;验证传热管力学性能满足设计要求且均匀;验证传热管的内部及表面质量满足设计要求;建立缺陷一览表、验证无损检测方法的有效性。

评定的最终目标是形成并固化传热管制造工艺流程和关键工艺参数,以保证经评定的制造工艺的可重复性、传热管各方面性能及尺寸的稳定性。

2 评定实施过程

蒸汽发生器传热管评定过程通常分以下几个阶段:

(1) 制造厂在前期工艺摸索和专项工艺研发的基础上,以满足工业化生产为目的,编制传热管制造大纲及配套的制造、检验和试验程序。制造大纲及其配套程序应包括传热管制造工艺流程、全部制造工序的工艺控制方法、工艺参数及相关验收准则的详细描述。

(2) 评定方根据制造厂提交的制造大纲及配套程序,针对该制造厂制造工艺的特点及评定要实现的目标,在产品技术条件的基础上,提出评定所需的附加试验和检验要求。

(3) 制造厂根据评定方提出的附加试验和检验要求编制评定试验大纲。建立评定质量保证程序和质量计划。

(4) 制造厂在获得评定方对上述所有文件的书面认可后,开展评定件的投料、制造、检验和试验工作。评定方对评定件的制造全程跟踪,及时协助解决相关技术问题,并参与关键工序的现

场见证,监督制造厂严格按照经批准的文件生产制造。

(5) 评定方根据制造厂提交的制造工艺参数记录文件、检验和试验结果报告等对传热管制造工艺的合理性及传热管的技术性能进行评价。

(6) 制造厂根据评定审查的结果完善相关制造工艺后,制定工业化生产蒸汽发生器传热管的最终制造大纲及其配套程序,并用于核电厂传热管产品的正式制造供货。

3 评定技术方案

为了达到评定目标,尤其是验证传热管化学成分、机械性能、金相组织的均匀性以及传热管的内部质量满足设计要求,应结合传热管的制造工艺流程和工艺方法制定合理可行且经济的评定技术方案。

目前国内核电传热管制造厂在制造工艺流程上均采用真空感应熔炼+电渣重熔的方式进行 690 合金冶炼,然后对电渣锭(每支约 3~4 t)进行锻造、热挤压及多道冷轧以达到成品管外径和壁厚尺寸,期间包括多次中间退火热处理、矫直、清洁、修整工序。外径和壁厚尺寸达到要求的管材在最后一次退火热处理后,进行矫直、外表面抛光、时效热处理(TT),然后进行理化性能取样检测、无损检测;检测合格后进行弯管,并对较小弯曲半径的管子进行消除应力热处理,最后进行水压试验和最终清洁度检测。

传热管在正式产品供货时采用按批抽检的方式进行验收。由于同批内各支管子的制造条件不可能完全一致,性能必然存在差异。导致性能存在差异的因素主要包括:合金锭冶炼过程中产生的化学成分偏析,主要体现在合金锭头部、中部、尾部的化学成分及金相组织差异上;锻造、弯管冷变形过程中压力加工的不均匀性,主要体现在锻造比和变形不均匀上;热处理保温温度、保温时间、升/降温速率等参数实际分布的不均匀性对性能的影响。

针对评定批次,为了验证同批次的所有传热管性能均满足设计要求且分布均匀,在产品验收试验要求的基础上,增加试验频次,并且补充解剖检验、残余应力检测等一系列试验和检测项目。

3.1 评定件规格及数量

ACP1000 蒸汽发生器传热管外径和壁厚规

格为 17.48 mm×1.02 mm, U形弯曲半径范围为 R82.55 mm~R1520.00 mm。弯曲半径规格数量为 112 种,单台蒸汽发生器传热管数量为 5835 根,总长约 125351 m,重量约为 54150 kg。

为了验证批量生产传热管的制造工艺,要求评定件的制造应采用正式产品供货生产时相同的冶炼工艺和重熔锭重量、关键技术参数相同的制造工艺,一个批次的传热管评定件的数量不得少于 100 支,保证评定件对正式产品的代表性。

评定件应选择合适的弯管规格以覆盖所有规格弯曲半径 U形管的制造工艺,弯管规格至少应包括最小弯曲半径、需要消除应力热处理的最大弯曲半径、无需消除应力热处理的 U形管最小弯曲半径、最大弯曲半径。

3.2 化学成分

化学成分的合理配比是保证 690 合金力学性能和耐腐蚀性能的基础。为了保证传热管的性能和制造工艺稳定可靠,制造厂应在材料技术标准规定的化学成分要求范围内,进一步确定化学成分的目标值,并给出内控范围。

应严格控制原材料的选用和清洁,采用重熔工艺,去除杂质并均匀化学成分,减少 S、P 以及 As、Pb、Hg 等低熔点有害元素的含量。

为了验证管材化学成分的均匀性,要求在多个部位取样进行熔炼分析和成品分析。熔炼分析试样取自电渣锭的头部和尾部;成品分析在对应电渣锭头、中、尾的成品管子上分别取样检验。

3.3 非金属夹杂物

电渣锭应锻造充分,锻造比不小于 3,并保证足够的头、尾切除量,保证用于制造传热管的材料化学成分均匀、非金属夹杂物满足要求。在锻造后切除头、尾的棒材两端截取试样进行非金属夹杂物检测,并在每端的 1/2 半径和边缘位置取纵向试样检测。

3.4 热处理

热处理包括多次中间固溶退火处理、轧制至成品外径规格后的最终固溶退火处理、TT 处理和较小弯曲半径管子的消除应力热处理。最终退火热处理采用氢气保护气氛的连续网带炉进行,TT 热处理和消除应力热处理采用真空炉间歇操作的方式进行。

制造厂应根据化学成分熔炼分析的目标值及

实测结果,在规范规定的热处理参数范围内,确定适当的内控工艺参数。

为了保证管材热处理参数实际分布的均匀性,应检测炉温的分布状况。实际生产时,应对炉温最高区域的管子和炉温最低区域的管子直接附着热电偶进行连续测量。

应严格控制热处理时的保护气体流量或真空度、炉装量、加热速率、冷却速率、保温温度、保温时间等重要工艺参数分布的均匀性,并提出内控指标。

3.5 校直和外表面抛光

在最终固溶退火热处理后,管子应在校直机和抛光机上进行校直和外表面砂带抛光。为限制校直的冷操作硬化程度,制造厂应进行工艺研究,规定校直引起的屈服强度增加值的上限,并在后续的外表面抛光中规定足够的去除深度消除表面硬化层的影响,避免 TT 处理时在传热管表面产生细晶区导致晶粒度及其级差指标不符合设计要求,影响管材的耐腐蚀等性能。

3.6 理化性能

理化性能检验项目包括室温拉伸、高温拉伸、硬度、压扁、扩口、直管残余应力(开环法)、晶粒度、显微组织、晶间腐蚀试验。

为验证传热管力学性能分布的均匀性,对评定批增加了取样频次,要求每批管子 100%在管两端取样检测。

为验证同一支管子不同部位理化性能的均匀性,以及热处理条件不均匀性的影响,选择最终退火热处理及 TT 热处理时位于炉温最高和最低区域的管子,在 TT 热处理后将每支管子分割成若干段,每段均取样进行上述项目检验。

3.7 无损检测

传热管在 TT 热处理后的直管状态进行无损检测,包括表面目视检测、内窥镜检测、超声检测、外涡流检测。

RCC-M 规范规定传热管超声检测和外涡流检测时,当缺陷深度超过壁厚 10%时属于超标缺陷。制造厂应在传热管评定批次的制造过程中,通过对缺陷的解剖检验,确定缺陷的类型和尺寸,并根据缺陷深度不超过壁厚 10%的原则制定超声和涡流检测信号幅值验收准则。

检测出的所有缺陷应建立缺陷一览表,给出

缺陷的显微照片、缺陷类型、尺寸及信号幅值信息，以证明无损检测方法的有效性。

3.8 在役可检测性

蒸汽发生器传热管在役检查需进行涡流检测，为了能从涡流信号中分辨出服役过程中可能产生的缺陷信号，要求管材具有足够低的背景噪声。

制造厂应在传热管制造过程中采用在役检测相同的方法进行涡流检测，包括直管的内涡流信号检测和弯管的内涡流检测，严格控制管材的整体噪音水平，以及某些局部区域由于轻微凹痕、鼓包、打磨痕迹、壁厚减薄、磁导率变化、弯管等原因产生的高于噪声的信号的幅值和数量，并记录显示的位置，避免对管子在役检测信号产生干扰。

3.9 U 形管弯头部位性能检测

为验证传热管成形后弯头部位表面状态和金相组织，对评定批次每个规格的 U 形管随机选取进行解剖检测，在弯头 0°、90°和 180°位置截取试样进行粗糙度、晶粒度和显微组织检验。

3.10 U 形管弯头部位残余应力检测

制造厂在制定弯管工艺应尽可能减小弯头部位的残余应力，为了验证弯管引起的残余应力处于正常范围内，进行以下检验。

(1) 采用相同规格的 316L 管材按相同的弯管工艺制造弯头，弯曲半径为不进行消应力处理管子的最小弯曲半径，在弯头 0°、90°和 180°位置取样进行氯化镁应力腐蚀试验，要求不应产生腐蚀裂纹。

(2) 对评定批每个规格的传热管随机选取，在弯头 0°、90°和 180°位置进行 X 射线残余应力测试，并与国外同类管材进行对比，评价残余应力水平的合理性。

3.11 尺寸检测

传热管尺寸检测项目包括直径、壁厚、弯曲半径、长度、直管段直线度、两管腿平行度、弯管段椭圆度、轮廓度、U 形管平面度等。

对于管子外径和壁厚，应在直管阶段采用超声方法在管子全长度上连续测量，并记录每根管

子外径和壁厚的最大值、最小值和平均值；弯管后还应采用超声方法检测弯头背拱区的壁厚。

为保证传热管后续穿管顺利，传热管管尾与管板配合的区域采用特殊定制的量规进行检测。

对于弯管段的椭圆度，不仅要控制单支管子弯头不同区域椭圆度的均匀性，还应控制不同管子间的椭圆度差异，为后续传热管在蒸汽发生器制造厂安装时同防振条装置均匀接触提供保证。

3.12 最终清洁

管子外表面应选用酒精湿润的白布擦拭，然后用干净、干燥的白布擦拭，白布无变色方为合格。

管子内表面应选用沾有酒精的不起毛毡塞或布条穿过管孔进行清洁，通过的毡塞或布条无变色方为合格。

最终清洁后随机抽取部分管子进行浸水测试，并向水中吹入空气使水具有氧化性，试验后管子表面不得存在铁素体污染物。

最终清洁后随机抽取部分管子进行内、外表面的氯离子、氟离子、钠离子、硫酸根离子、二氧化硅含量检测，并满足设计要求。

4 结 论

为实现 RCC-M 规范规定的制品评定目标，结合传热管制造特点和工艺流程，制定了一套核电站蒸汽发生器 I-690TT 合金 U 形传热管评定技术方案。

评定技术方案对传热管冶炼、轧制、热处理、无损检测、弯管等各关键工序都提出了控制要求，可全面验证管材化学成分、机械性能、金相组织、内部质量及尺寸精度满足设计要求以及传热管性能的均匀性，可验证无损检测方法对缺陷检出的有效性。

通过评定，可固化工业化大批量生产蒸汽发生器传热管的关键工艺过程及参数，保证产品质量的可靠性和稳定性。该技术方案已在 ACP1000 蒸汽发生器传热管国产化研制过程中成功应用。

(责任编辑：刘胜吾)