

蒸汽发生器管板管孔液压胀缺陷产生机理及工艺控制措施

岑龙涛 张志强 王伟波 王保满
(中广核工程有限公司 广东 深圳 518124)

摘要: 全深度液压胀接技术是蒸汽发生器管板管孔接头普遍采用的制造工艺, 胀接过程清洁, 管子残余应力较小。本文介绍了液压胀接原理, 对于过胀、肿胀以及换热管内壁划痕和压痕缺陷等质量问题进行了描述, 分析问题产生的机理, 提出工艺控制措施, 为国内核岛主设备管板管孔的液压胀接质量控制提供了可借鉴的经验。

关键词: 蒸汽发生器; 液压胀; 缺陷; 工艺控制

0 引言

蒸汽发生器是核电站核岛关键设备之一, 其性能的优劣直接影响到核电站的运行安全和运行效率。液压胀接是通过管子内表面施加高液压力, 使管子产生塑性变形, 从而紧贴于管板孔内表面, 胀管通过保护设备在运行期间管子管板焊缝免受管束的负载, 同时封闭换热管与二次侧管孔间隙, 以实现蒸发器不同回路间的密封, 减少对管端焊缝的腐蚀, 提高设备的使用寿命。

核电站蒸发器换热管一般采用端部焊接和全深度液压胀接的接头形式, 管子管板胀接后, 在轴向深度方向上形成3个区域, 即胀接区、过渡区和未胀区, 如图1所示。

本文对液压胀接缺陷进行分类, 分析导致缺陷产生的因素, 进而对工艺过程控制的不足进行针对性地改进, 避免胀接过程中换热管内部缺陷的产生。

1 缺陷类型及原因分析

对于某项目18MND5低合金钢管板锻件(包括

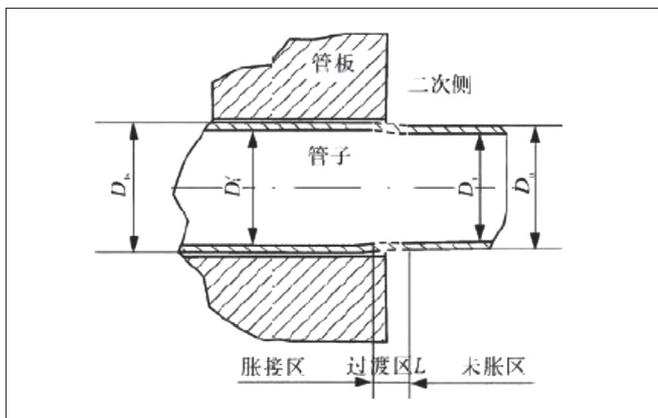


图1 管子管板胀接示意图

EQNiCrFe-7A 镍基堆焊层), 结合 NC30Fe 换热管液压胀接后的缺陷进行检测和分析, 得出缺陷类型主要有过胀、肿胀、换热管内壁划痕、换热管内壁压痕等, 下面对以上几类重要缺陷进行分析。

1.1 过胀

过胀现象发生于未胀区, 如图2所示。胀接后的胀管区 ECT 涡流轮廓检测, 分别从蒸发器的热端 Hot (A 侧) 和冷端 Cold (B 侧) 实施, 每侧包含 6156 个胀接管孔, 两侧共计 12312 个胀接管孔, 检测发现 A 侧的一个管孔 (C80R10) 存在过胀现象, 过胀缝隙深度为距离管板二次侧表面 10.8mm, 过胀区域管孔直径增大至 $\phi 15.98\text{mm}$ (非胀管段内径为 $\phi 15.47\text{mm}$)。经内窥镜目视检查及内径百分表尺检发现, 孔径在超出管板厚度的轴向方向先增大, 而后减小至换热管初始内径。ECT 轮廓曲线如图3所示。

液压胀接时, 胀接设备中的支承圈受高压力的影响, 与胀接止环发生挤压, 进入到止环与换热管之间的间隙, 实现密封胀接。在异常胀接过程发生时, 管孔内径扩张范围增大, 此时起密封作用的 O 型环与支承圈的胀接密封作用降低, 在管板二次侧间隙较大处, 缺少前端止环和管板孔的支承, 高压水力直接冲击支承圈, 支承圈产生断裂, 在断裂瞬间, 高压水泄压在胀区边缘, 管子区域发生膨胀, 导致换热管产生微小扩张, 发生过胀现象。

1.2 肿胀

肿胀现象发生于胀接区。液压胀接后, B 侧的冷端管孔 (C114R20) 内径变化量 ΔR 为 0.26mm, 不满足 $\Delta R \leq 0.13\text{mm}$ 的验收要求。肿胀区域距离管板一次侧堆焊表面 480mm, 凸起的轴向长度 42mm, 管子凸起直径变化最大值为 16.04mm。

在管板深孔钻加工过程中, 由于 BTA 钻头的非正常切削运动, 造成管孔内壁螺旋槽在抛磨后, 形成图4

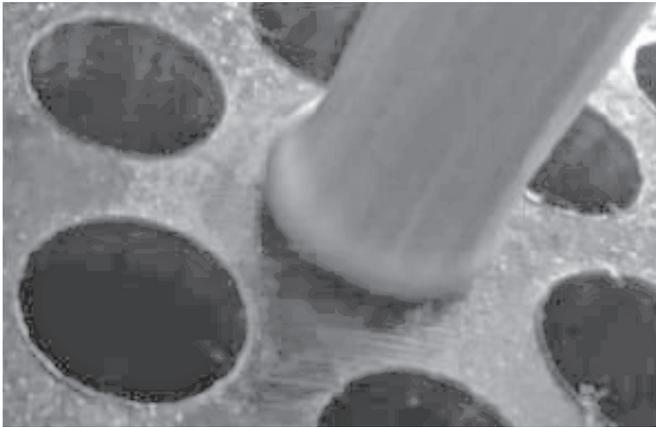


图2 过胀示意图

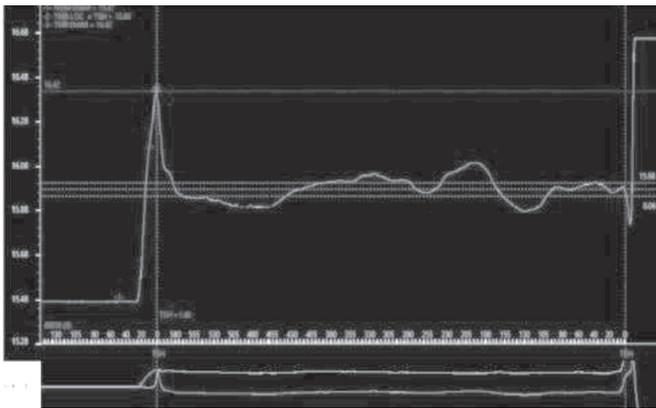


图3 ECT 轮廓曲线

所示的凹槽（对称或非对称）。进行管孔液压胀接时，换热管的薄壁被压入凹槽内，导致肿胀问题的发生。

1.3 换热管内壁纵向划痕（存在区域：胀接区）

此故障发生于胀接区，如图5所示。液压胀接后，胀接区域存在轻微纵向划痕，涡流检测无信号显示，分布区域在管板厚度范围内位置（管板厚度约为606mm），长度不相同，每孔1条或若干条。

产生纵向划痕的原因如下。

(1) 直接原因：液压胀杆因反复插入与管端焊接触、摩擦，在胀杆表面会产生微小积屑瘤，胀接止环与换热管内径接近，插入和拔出时会在换热管内壁产生较细、较直的划痕。

(2) 主要原因：在实施清理时，为清除残留的水、润滑脂以及残留的PT液体，需要反复推入、拉出清理工具，在此过程中，包裹前端圆环的无纺布局部脱离，造成圆环与管孔内壁直接接触，在反复推入和拉出过程中产生纵向划痕。

(3) 其他原因：管端焊接在管板一次侧约100mm范围内操作，如果胀套表面不够圆滑，存在轻微棱角或残留金属凸起，在胀套与换热管内壁贴合、插入及拔出过程中，可能产生轻微划痕。

1.4 换热管内壁环向压痕（存在区域：过渡区）

此故障发生于过渡区，如图6所示。全程液压胀后目视检测发现，457个管孔U型管内壁存在环向压痕，大多为管孔内壁单侧弧形轻微压痕，缺陷每孔为1处，位于管板一次侧表面约635mm，即在管板二次侧表面以外约25mm处。

经过测量和对比，压痕位置对应于液压胀管器上胀接止环的前端(图7中件1/10右端)，此位置设置有倒角。该倒角有2个作用：一是插入胀管器时，避免尖锐的边沿划伤换热管(图8)；二是胀接时避免胀接止环外沿压迫换热管。

在胀接止环前端设置有倒角，见图9和图10。经过对比图9和图10发现，图10倒角有小的情况，且倒角存在偏口。在实施胀接时，前端支承圈(图7中件1/9)受胀接水压力靠向胀接止环，在极大的胀接压力下，前端支承圈变形挤入胀接止环与换热管间的间隙内实现密封。此时，因为周向挤入的量不同或止环端面不平齐，导致胀接止环倾斜，使胀接止环与管子内壁接触，在内壁上留下弧形微小压痕，如图11所示。

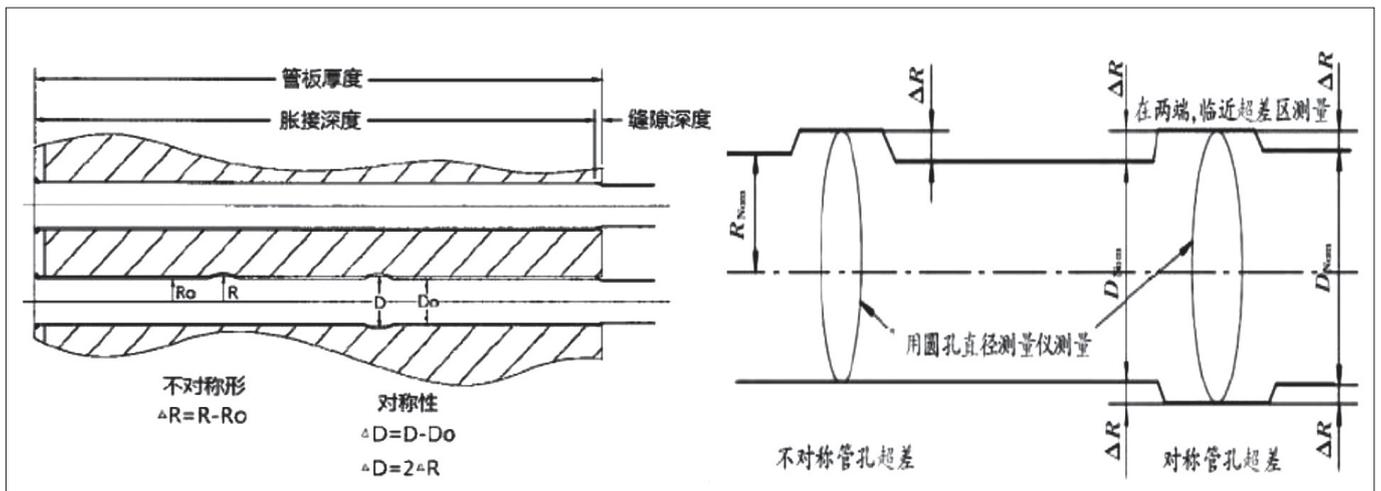


图4 液压胀管示意图（鼓起信号）

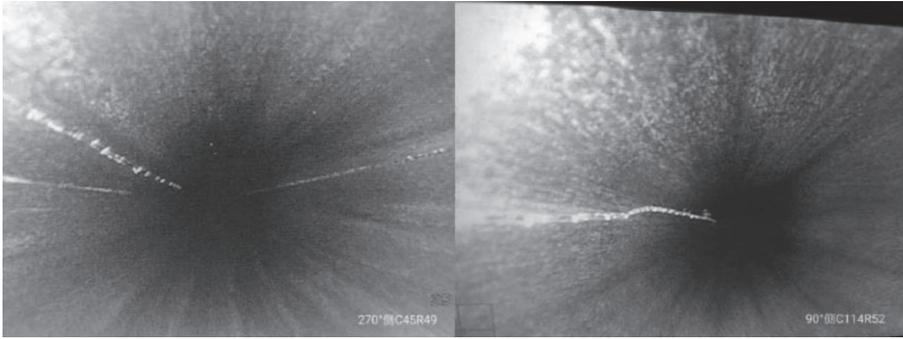


图5 轻微划痕（内窥镜）

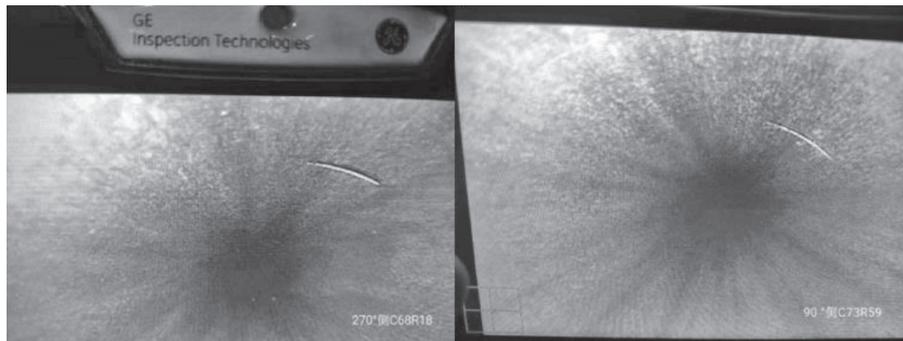


图6 轻微压痕（内窥镜）

2 工艺预防及改进措施

在蒸发器制造过程中，出现胀接方面的NCR，易导致堵管处理，从而增加设备制造成本，还会影响蒸发器的使用质量和服役寿命。根据目前国内蒸发器的制造经验，提出以下几点预防及改进措施：

(1) 改进胀接设备性能，提高设备安全性，减小人为失误，优化生产工序，提高胀接效率，有效降低缺陷发生的几率。

(2) 充分开展胀接工艺评定，多次进行胀接试验，优化胀接工艺参数，考虑管板材质、管板深孔钻、胀接工具等要素，综合前期制造工序，找到合适的胀接工艺方法，确保管子和管板之间的强度和密封性能，避免出现肿胀、过胀等缺陷。

(3) 胀接过程中，根据管板厚度的差异，分区胀接。胀接操作者要将胀杆序号、管孔编号等信息记录在专用的胀接图中，避免漏胀和重复胀接。

(4) 全程液压胀接前，采用无油洁净的压缩空气，对于管壁进行清扫工作，去除可能残留的异物和金属颗粒。

(5) 管端焊定位胀套使用过程中，观察棱角处是否存在与换热管内壁接触后产生划痕的风险。对胀后清理用的长钎和管端焊清理用短钎进行防护处理，使用热缩管对钎杆和前端圆环紧密包裹，避免金属工具与换热管内壁接触，确保清理过程不产生内壁划痕。

(6) 对于胀管器的胀接止环前端结构，增加10°倒

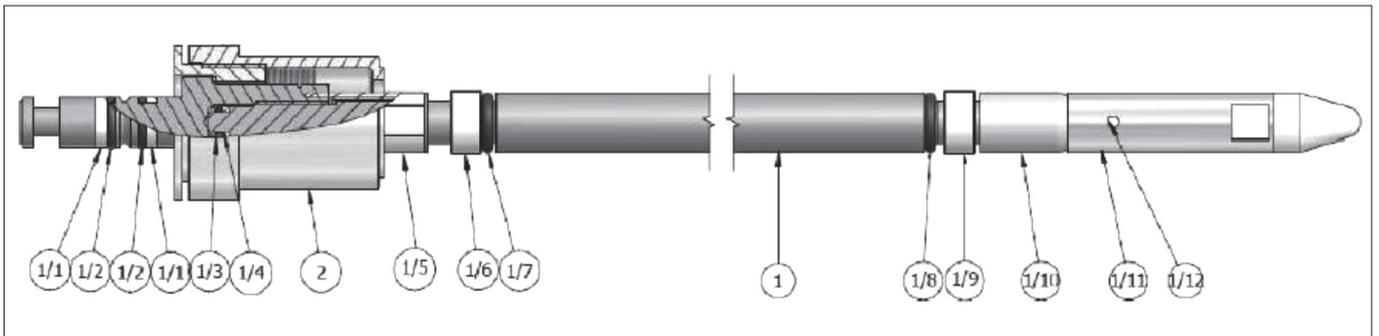


图7 胀管器示意图

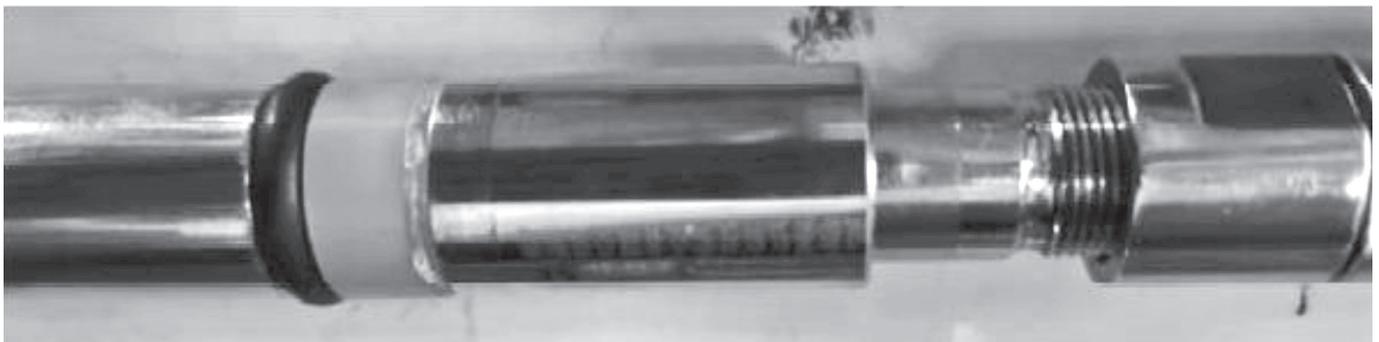


图8 胀管器装配状态

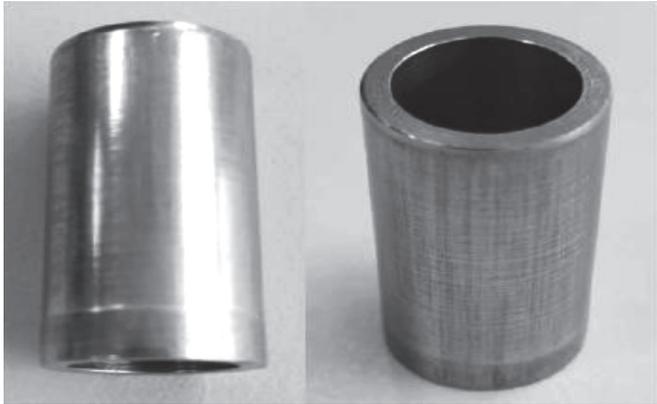


图9 胀接止环（倒角较好）



图10 胀接止环（倒角小并偏口）

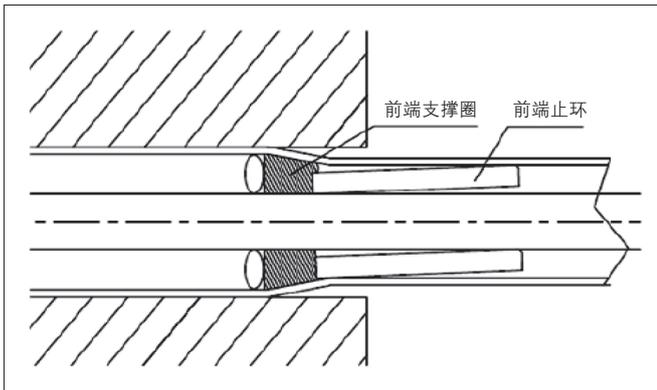


图11 胀接时的胀接止环状态

角，倒角轴向长度增大至2.5mm，圆滑过渡，同时减小止动螺母非螺纹端长度。通过改进胀杆和胀接止环的结构，避免环向压痕问题的发生。

3 结语

华龙项目蒸汽发生器液压胀接是设备制造过程中的重要环节，换热管内壁胀接缺陷会严重影响蒸发器水压试验的成功与否，甚至造成设备服役时核辐射泄漏事故的发生。

工艺措施改进后，管孔液压胀接的质量得到了明显改善，数据如表所示。

表 液压胀缺陷的数据

缺陷类型 (管孔数量/个)	设备编号		
	SG1	SG2	SG3
	工艺措施改进前	工艺措施改进后	工艺措施改进后
过胀	1	0	0
肿胀	50	1	0
环向压痕	457	0	0
纵向划痕	12312	9	5
漏胀	0	0	0
重复胀接	0	0	0

通过对液压胀接工艺过程控制的不足进行针对性地改进，有效避免了换热管内缺陷的产生，为蒸发器制造的整体质量可控提供了有益的研究经验，为国内核岛主设备管板管孔液压胀接的工艺质量控制提供了宝贵的经验。

参考文献：

[1] 王细洋. 航空概论 [M]. 北京：航空工业出版社，2011.
 [2] 王晓辉，韩君. 管子管板液压胀接管内缺陷的产生机理及防止 [J]. 压力容器，2014(11):67-73.
 [3] 李翠翠，和广庆. 蒸汽发生器管子管板核级热交换器液压胀接工艺评定研究液压胀接缺陷原因分析及预防措施 [J]. 机械工程师，2019(07):176-177+180.
 [4] 刘英东，王成伟，姜殿军，等. 核级热交换器液压胀接工艺评定研究 [J]. 压力容器，2017,34(05):21-26.

作者简介：岑龙涛(1988.01-)，男，汉族，陕西西安人，硕士研究生，高级工程师，研究方向：核电核岛换热器设备工艺制造与质量监督。