

## 蒸汽发生器传热管的修理

A.S.Amar

当压水堆(PWR)蒸汽发生器传热管发现缺陷时,可以利用下列修理方案:(a)确定该缺陷是否可以接受(缺陷很小),是否可以继续使用降质的管子;(b)堵塞传热管的两端;(c)在传热管的缺陷区衬一段管子。

### 1. 堵管

直至80年代初,堵管是对付PWR蒸汽发生器传热管不可接受缺陷的仅有办法。凹痕已经造成一些电厂的几百根传热管进行了堵管。甚至在现在,因为衬管工艺在蒸汽发生器上部位置实施起来比较困难,而且费用昂贵,所以对于管板区上部的不可接受的降质,堵管还是经常采取的办法。目前世界上PWR核电厂已经有40000多根堵管。堵头由合金600材料的棒材制成,然而目前大多数安装的堵头已由合金690制成。堵管通常使用的工艺是焊接、爆炸以及机械或扩管安装。没有扩张或已扩张的典型的机械堵头在图1里表明。

被堵的管子还是继续对应力腐蚀破裂、疲劳和微振磨损产生敏感,而且最终会很严重。然而,在被堵管子里的冷却剂温度大约小于热侧未堵的管子 $40^{\circ}\text{C}$ ( $70^{\circ}\text{F}$ )。这就极大地减少了一回路水应力腐蚀破裂(PWSCC)的速率。由于流体弹性的不稳定性,致使被隔离的管子会经历大幅度的振动,并随之损坏临近的管子。为了防止这种情况,被堵的管子里可以插入稳定器来进行增强。例如:几段固体棒材,它可以相互或与堵头以螺纹相连接。

一些类型的堵头也对PWSCC的降质产生敏感,如下面所述:

(1)在七十年代西屋公司设计安装的爆炸堵头,已经遭受到了PWSCC,由几份有关堵头泄漏的报告可以证明,爆炸堵头至少在三个核电厂已经发现泄漏,这是因为大的塑性变形和在堵头安装时有不适宜的残余应力。至少在一个核电厂见到的破裂是环间型的,并在爆炸扩张的过渡区顶部(即在压力边界区)发生。这些泄漏的后果还没有进行评价。而这些堵头是由工厂退火的合金600制成的。可

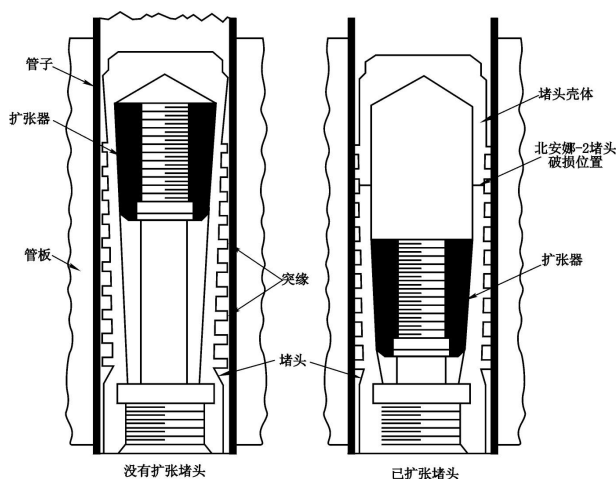


图1 美国西屋公司没有扩张和已扩张的机械堵头

以假定,敏感的微观结构,由于爆炸扩张工艺引起的残余应力以及热端一次侧的高温环境的复合结果是导致这些堵头的 PWSCC。

〔2〕最近报道安装在自然循环和直流蒸汽发生器里的 Babcock&Wilcox 的机械扩管堵头发生了 PWSCC,并且已经鉴别出是由几种不同热处理的合金 600 管子堵头。这种 PWSCC 在扩张区下面的过渡区里发生环间裂纹,也就是发生在根部,不属于压力边界部分,因而堵头的完整性没有受到影响〔见图 2〕。扩管区上部的过渡区〔即在“趾部”位置,它是压力边界的一部分〕较小程度的轴向裂纹形式降质也已经发现。这种降质是由旋转扁平探头检查探测到的,目前仅在热侧看到有破裂的堵头。

这种 PWSCC 是归结为热端一次侧的环境、扩管区的残余应力和敏感的微观结构〔晶粒内碳化物的特征和晶间碳化物不足〕三个因素引起的。经热处理的材料也存在敏感的微观结构。Babcock&Wilcox 也报道了晶间碳化物沉淀的特征性方法不足以表明堵头材料对 PWSCC 的敏感。腐蚀试验也在进行中,以便把各种堵头材料的微观结构对 PWSCC 的相对抗力依次排列,并确定已经安装堵头预期的最小寿命。由于这些问题的结果使大量堵头已被拆除或进行了修理。Babcock&Wilcox 的肋状或圆锥形焊接的堵头还没有发现缺陷。然而,由于要检查这些堵头非常困难,制造厂建议拆除并更换这些堵头比较好。

〔3〕西屋公司设计的机械堵头已经在扩管区遭受到了 PWSCC。自 1980 年以来这种堵头安装量非常大。1989 年 2 月在北安娜核电厂 1 号机组,这种类型的堵头发生了严重的 PWSCC。堵头是由热处理的合金 600 制成,在这个事故中堵头周围发生环形的几乎穿壁的 PWSCC,如图 1 所示。在电厂运行瞬间,剩余的连接带断裂,随后把堵头顶部分向传热管上部,直到碰撞 U 形弯头,致使 U 形弯头被穿透引起严重的一次侧到二次侧的泄漏〔管子断裂〕。由于堵头顶部的冲撞临近的管子也会发生变形,但不会穿透。一次较大范围的调查得出结论,这种情况不会造成严重的安全问题,但是采取广泛的纠正措施是必需的。由几个因素〔包括碳含量和工厂退火温度〕可以确定合金 600 堵头的材料敏感性,高碳含量和工厂退火温度太低导致微观结构欠佳,随之增加了敏感性。

初步估计,大约 20 个美国 PWR 核电厂的西屋公司蒸汽发生器里大约有 7000 根传热管安装了可能对 PWSCC 敏感的机械堵头。由西屋公司开发的一种算法可以根据现场和实验室数据〔关于化学成份、微观结构和堵头安装的位置〕来估算

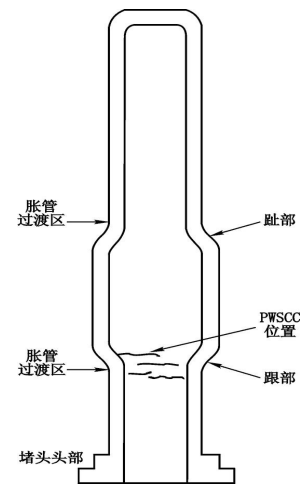


图 2 Babcock&Wilcox 公司机构扩张堵头和 PWSCC 裂纹

这些堵头的寿命。根据这个算法对有这种堵头的每个电厂进行演算的结果, 美国核管会 (NRC) 对安装有西屋公司敏感型机械堵头的所有核电厂提出了一个拆除、检查和修理堵头的方案。西屋公司表明所有在 1989 年安装的堵头都会对 PWSCC 产生敏感, 可以由演算方法来确定敏感发生的时间。然而认为是相对不敏感材料制成的堵头近来也出现严重的环向裂纹, 这仅是由最初的西屋公司演算估算时间的大约 20%。美国核管会现在要求美国电力公司对所有西屋公司使用的热处理合金 600 制成的机械堵头执行一个有关堵头的拆除、检查和修理的方案。另外, 使用合金 600 材料制成的西屋公司机械堵头的安装应该停止。

〔4〕由燃烧工程公司加工的焊接堵头也发生了降质并导致服役中的泄漏。在这些合金 600 堵头上的破裂已发生在焊接区, 并认为这是由 PWSCC 降质引起的。堵头的缺陷可以由重新焊接来修理或更换一个新的焊接堵头。焊接材料和程序的改进预计可以防止将来这种新焊接堵头的降质。

尽管相对大量的传热管进行了堵管, 蒸汽发生器还是可以产生额定发电能力, 因为它具有有效功率的足够裕量进行正常运行。然而, 在裕量耗尽时继续堵管就会有效减少电厂的发电能力。另外, 大量的传热管被堵管就会影响蒸汽发生器的热工水力性能, 并导致安全问题。因为发生这种情况, 潜在的经济后果 (预期的修理成本和由于堵管损失电力的成本) 就会迫使考虑衬管或蒸汽发生器的更换。当大约 20% 的传热管被堵管时蒸汽发生器就会丧失它的发电能力的裕量。

衬管可以安装到以前被堵的传热管上 (如果堵头可以成功地被拆除的话), 那就可以恢复电厂的发电能力。焊接的堵头可以由电力拆除机 (EDM), 或钻孔或研磨方法来拆除。机械堵头可以采用水力装置推出除去。例如, 在 1988 年时由 ABB 公司把高丽核电厂 1 号机组的二台西屋公司 51 型蒸汽发生器上拆除了 1483 个机械堵头。然而, 不是所有的机械堵头都能成功地用水力推进装置拆除。在高丽 1 号机组上就遇到了几个问题, 包括损坏螺纹、芯子卡住、堵头卡死 (推力没有达到最大的容许负荷), 并在推进期间堵头被切断。这些方法往往提出一些问题, 包括堵头芯子热应力的张弛作用, 最后只能把整个堵头或剩余部分进行研磨才能除去。

## 2. 衬管

目前设计的大多数可采用的衬管工艺是为了覆盖 PWR 蒸汽发生器传热管的内表面, 从管板底部到泥渣堆以上的一些区域, 这对于自然循环蒸汽发生器的大多数传热管缺陷是合适的, 因为传热管在一次侧和二次侧的大多数缺陷都发生在管板和泥渣堆一带。对于外面几排的传热管可用的水室空间较小, 因而为了解决插入问题必须安装较短的衬管或有挠性的衬管, 如图 3 所示。在直流蒸汽发生器里的腐蚀疲劳和侵蚀腐蚀机理大多数发生在接近管板顶部, 因而从上管板下部一直到第一个支撑板进行衬管。第三个衬管的位置是在支撑板截面上, 衬管往往是为

了修复发生在支撑板与管子缝隙里发生的 IGA/IGSCC。支撑板上的衬管在美国很少使用（70 年代中期在帕利塞兹核电厂使用过，最近也只在二、三个电厂里试验性的进行使用），但现在日本和其它国家的电厂正在扩大使用。

PWR 蒸汽发生器衬管设计维持了原来传热管的满负荷，也就是说，衬管是从上联接点到下联接点作为传热管的结构元件更换了这段管子。衬管通常是使用具有比原来管子具有更好腐蚀抗力的材料制造，如经过热处理的合金 690。为电力公司在采购衬管和传热管材料时使用的一些依据性导则也已经编制出来。

衬管顶部的联接点可以是泄漏限制型或泄漏密封型。泄漏限制型如：水力扩张联接和复合联接（在机械扩张区里再进行水力扩张）已经得到了广泛使用，并且继续在相对低温度的电厂[一般热侧温度低于  $315^{\circ}\text{C}$ （ $600^{\circ}\text{F}$ ）]使用。目前，在较高温度电厂中使用具有 PWSCC 敏感的传热管时，安装的衬管使用泄漏密封联接，它是在衬管被扩张紧密与传热管接触（这也导致传热管的一些扩张）后进行钎焊或焊接。有的采用爆炸进行扩管和焊接。在具有 PWSCC 敏感传热管的高温电厂[一般热侧温度低于  $327^{\circ}\text{C}$ （ $620^{\circ}\text{F}$ ）]里自由间隔区的焊接点一般由短时间的高温热处理进行应力释放，以便尽量减少 PWSCC 发生的可能性。

PWR 蒸汽发生器衬管的底部联接点经常是机械扩管型，基本上是泄漏密封，因为在管板里可以强硬扩管。现在的某些设计中，在管板区使用焊接联接，有或没有机械扩管主要是为了附加保证接点不泄漏。周边上的衬管长度较短，限制了衬管修理泥渣堆高度上缺陷的能力，除非这下联接点从管板底部往上移。如果管板里的管子没有被充分扩张，这个方法就很难做到。然而，在全深度管板扩张的电厂里，下联接点的位置定在管板中间或更高位置是实际可行的。

这些衬管以及被衬管覆盖的管子区还是处在压力边界上，必须按 ASME 规范要求检查，也就是对 20%壁厚或更深的缺陷使用涡流或超声检查方法是完全可以探测到的。实验室的管子-衬管复合样品已经用来证明其可检查性。在这些试验里，管子缺陷一般可以由电子发射装置产生的刻痕来模拟。一些典型的衬管方法和经验在后面进行讨论。

安装在美国运行蒸汽发生器中的第一批衬管是在帕利塞兹核电厂的水力扩张衬管。这些衬管是由燃烧工程公司开发的并在 70 年代中期安装的，是为了修理支撑板处的管子二次侧缺陷。这些衬管是泄漏限制型的。在衬管的顶部和底部使用水力扩张联接。

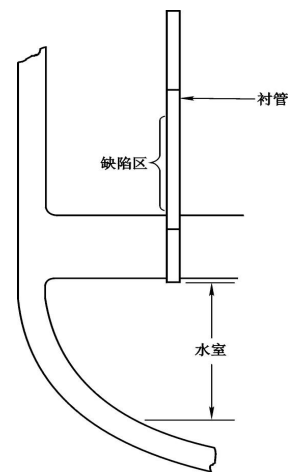


图 3 受水室空间的限制，较短衬管的安装

早期的西屋公司衬管设计如图 4 里所示, 在管板区底部使用水力-机械复合联接, (a) 在顶部使用同样的水力-机械复合联接 (见图 4, a), (b) 在顶部使用水力扩张, 然后进行钎焊联接 (见图 4, b)。顶部和底部的水力-机械复合联接的衬管, 在 1981 年首先在圣奥诺弗雷核电厂 1 号机组上使用, 并且在大多数低温电厂安装中使用。

如上所述, 复合扩管的施工, 首先要进行水力扩张, 然后在水力扩张区内进行机构扩管。使用这种复合扩张的理由是: (a) 在由水力扩张方法的扩张和非扩张之间进行过渡, 这能导致较低的残余应力, 引起的 SCC 的可能性就小。(b) 引入机械扩张区, 导致更紧密的联接, 就比单独使用水力扩张所达到泄

漏更低, 这就称为泄漏限制型设计。形成了大约 100 毫米 (4 英寸) 长的水力扩张区。在这样的扩张后, 衬管的变形部位将有一些弹性变形的回复。然后, 在水力扩张区进行 50 毫米 (2 英寸) 长的强硬扩管, 进行防泄漏的机械联接。1981 年在圣奥诺弗雷 1 号机组的三台蒸汽发生器里大约有 6900 根传热管安装了衬管。然而, 大约有 400 根传热管在安装衬管后随后又进行了堵管, 因为在衬管和传热管之间发现有明显的接触不良。在 1988 年附加的涡流检查中发现有 156 根安装有衬管的传热管信号指示扩管不好。这些传热管以及在 1988 年对另外已经有衬管而发现有泄漏的 31 根传热管都进行了堵管。

80 年代初, 在圣奥诺弗雷 1 号机组也由西屋公司安装了钎焊的管板衬管 (在圣奥诺弗雷 1 号机组 1981 年安装衬管的 7% 是使用钎焊) 以及在京纳核电厂由 Babcock & Wilcox 公司安装的衬管 (图 5) 用来覆盖管板底部到管板上表面以上 150—300 毫米 (6—12 英寸) 区域的传热管。安装方法包括在上下联接点的水力扩张, 上接点采用钎焊和下接点采用爆炸

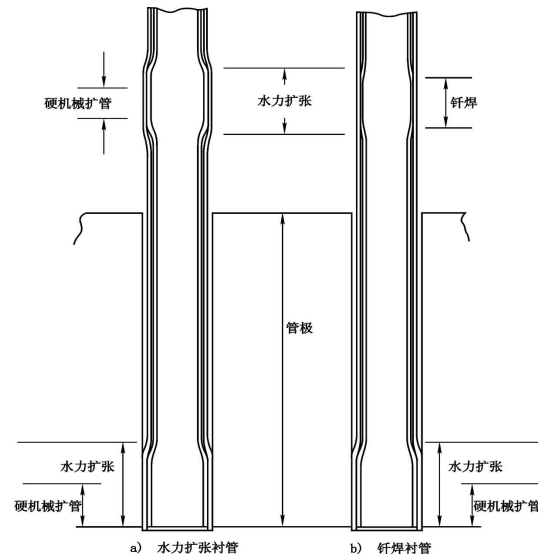


图 4 早期西屋公司的衬管

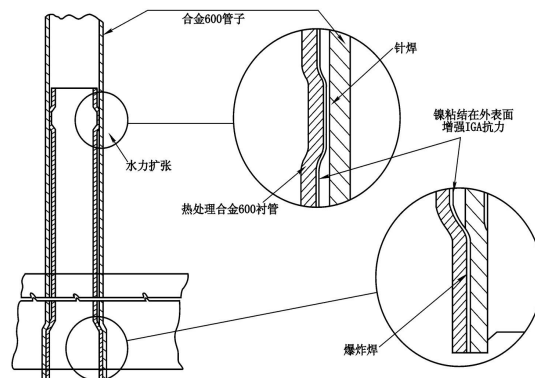


图 5 Babcock & Wilcox 公司密封型衬管

焊接。这些衬管材料是经过热处理的合金 690，并且把金属镍熔结在外表面以增强对 IGA 的抗力。水力扩张和爆炸焊接工艺看来比硬扩管工艺产生的残余应力小。然而这种设计会导致泄漏，目前这个电厂正在使用全焊接工艺进行衬管。

图 6 里显示的泄漏密封扩管能使用在传热管的变形或未变形管子之间的扩张过渡区里有 PWSCC 缺陷的传热管上，而不需要任何附加的衬管材料。即使在缺陷区的裂纹进一步扩展时，也不会再产生泄漏，因为这种泄漏密封扩张提供了新的管子与管板的联接，比老的联接方法好。

在部分深度的扩张管里修理扩张过渡区 PWSCC 的另一种方法是按实验基础设计的方法，这已经在道益尔 2 号机组上使用（如图 7 所示）。这种方法使用了一根薄的合金 690 小衬管大约 40 毫米（1.5 英寸）长，用爆炸扩张并焊接覆盖在有裂缝的传热管上。以前没有扩管的那部分传热管在管板上进行了扩管，因此提供了负荷承载能力。换句话说，传热管的变形和未变形部分之间的过渡区现在处于新的无缺陷部位。这样残余应力也比原来硬扩管联接时要小。这种衬管很薄，以致传热管的内部尺寸没有特别变化，能够使反应堆冷却剂全流量通过。如果在以后发现新的缺陷，这种设计也不会妨碍将来使用其它设计和工艺制作的长衬管。然而，这种衬管的设计不再继续使用，因为在该衬管的顶部和底部的被扩张传热管里经过以后不长的运行时间又发生了 PWSCC。所有具有这种类型的衬管的传热管都进行了堵管。

焊接衬管的工艺（如图 8 所示）使用了水力扩张，随后在合金 690 衬管与母体管子之间用钨极惰性气体进行焊接（TIG）。选择的衬管长度要保证上联接点在管板和泥渣堆区域上部，这已经选用 900 毫米（36 英寸）或更长的衬管。每根衬管都用水力扩张，然后把衬管顶部焊接到母体管子上，接着焊接在管板底部，不论缺陷在这段管子的哪个部位，都是这样。在衬管之前焊接区必须进行处理以除去氧化层和腐蚀层，因此，保证了合适的金相结合。焊接参数必须按特定电厂选择最佳化，因为不同电厂的传热管尺寸会有所不同（壁厚和直径）。事实上对于给定电厂的众多传热管壁厚会有一个范围，对压水堆蒸汽发生器传热管一般允许的公差为  $\pm 10\%$ 。在给定的电厂里这个公差就使壁厚有 20% 的变化。如果发生耗蚀（由于腐蚀而使金属损失）这个变化会更大。耗蚀也会促使管子周围管壁不均匀。另外，由于原来传热管技术条件中管子内外表面之间的同心度不严格，因而在焊接

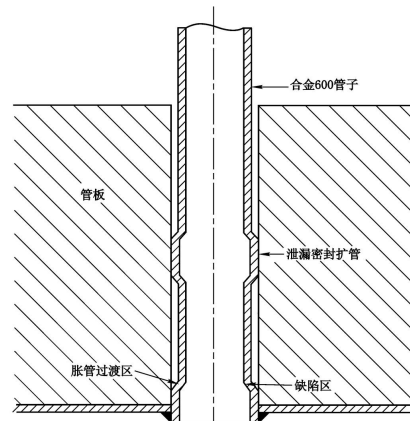


图 6 在管板扩张过渡区存在 PWSCC 时进行的泄漏密封扩管

时能否成功地产生好的金相结合将决定于在样品传热管（对该电厂是典型的）上选择最佳的焊接参数。水力扩张使这段衬管与母体管子相一致，并在焊接之前控制好衬管与母体管子之间的间隙。如果发现这条焊缝有泄漏或经无损检验不合格，那么紧挨着这条焊缝可以再焊一条修理的焊缝。在近几年，考虑到顶部联接点处有 PWSCC 的问题，已经在那里进行应力释放。在灵哈尔斯 2 号机组、高丽 1 号机组和其它核电站已经成功地证明了这种焊接衬管的方法。

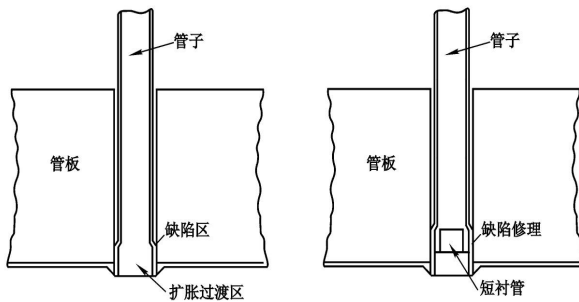


图 7 采用爆炸扩张的短衬管

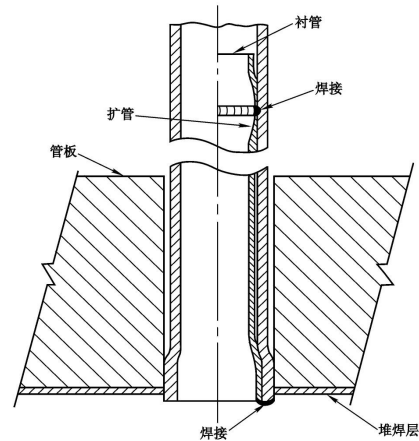


图 8 焊接衬管

通常衬管长度超过顶部联接点 25 毫米（1 英寸）或更多些。如果在联接点部位环形裂纹扩展或穿壁，导致管子两头断裂，那么超过联接点的那部分衬管就能保护该处破损的母体管和防止与其它管子的撞击。一些欧洲设计的衬管没有这种特征。例如，在一种设计中衬管的端部采用了角焊。而在另一种设计中母体管子的缺陷部分被切割和取出来，衬管被相吻合的对缝焊接到母体管子上。因为缺陷和敏感材料从关键区域除去就能防止缺陷的扩展。上述加长衬管设计的好处还没有被实验所证明。有一个问题就是来自进入冷却剂推力将会对管子施加压力使衬管端部脱开，尽管衬管的延长部分有约束力。如果裂纹延长超过衬管长度，那么衬管的延长部分也没有什么帮助。然而，因为衬管材料是新的，就不太可能在降质的母体管子之前破裂。使用延长一段的管子大概是为了对安全有好处，其害处尚未知晓。

自 1985 年起，日本已经在支撑板部位使用了钎焊的衬管。除了在支撑板部位的钎焊联接，日本也开始使用激光焊接联接的衬管。另外，Babcox & Wilcox 公司安装了支撑板衬管，在衬管的顶部和底部使用爆炸焊接联接，并在安装后进行应力释放。支撑板衬管在管束的较高部位，比安装管板衬管难度大。在管束较高部位进行操作时使用的工具必须是组合式可拆的或者是可折叠的，因为直线长度仅限于管板底部和水室封头之间的垂直距离。

除了上面讨论的方法, 其它许多新方法也可能是可以采用的, 下面是比较各种替换方法的一些基本准则: {a} 由无损检验、水压试验和电厂启动后所显示的性能来证明联接点是不泄漏的; {b} 长期的可靠性; {c} 衬管发生泄漏时修理是否容易; {d} 联接点的可检查性; {e} 联接点焊好后母体管子的可检查性; {f} 大量传热管进行衬管的成本 (包括停堆成本) 与蒸汽发生器更换的成本相比较; {g} 进行这些修理时人员的辐射剂量。还没有发布对各种衬管设计进行比较的研究结果。为了对给定的设计进行评价已经开发了设计审查的检查清单。

已经有好的衬管修理的操作经验。除了破损的蒸汽发生器进行更换外, 大多数安装的长衬管 (不是小尺寸衬管) 还在运行。数量不多的长衬管发现有泄漏, 并且进行了堵管, 但对于全衬管没有系统性的问题。

据报道仅与衬管操作有关的重要衬管问题有: {a} 上述在道益尔 2 号机组里安装的短衬管端部的母体管子发生 PWSCC; {b} 在圣奥诺弗雷 1 号机组扩管不好并随后发生泄漏。然而, 重要的问题是大多数衬管在母体管子和衬管上产生高的残余应力, 这就会引起新的破裂。残余应力的影响可以使用衬管联接样品在实验室里进行评价, 但是在现场不容易测量。另外, 衬管在一次侧上引入了缝隙, 这些缝隙的长期影响还不太清楚。最后, 要检查衬管的缺陷很困难。当在母体管子上的缺陷扩展成为穿壁时, 那么, 母体管子和衬管之间的间隙就会滞留二次侧水, 这就会促进 IGSCC 或 IGA 或其两者都有。这里讨论的问题都需要进一步研究, 并应该开发一个数据库, 有助于研究人员了解和预测压水堆蒸汽发生器传热管堵管和衬管的性能。

### 3. 涂镍

法马通和 Belgatom 公司已经开发了涂镍工艺, 以修理压水堆蒸汽发生器传热管的 PWSCC 裂纹。这个概念在图 9 里说明。涂镍层工艺包括电解清洁受损表面, 然后纯镍沉积在受损表面大约 200 微米 (8 密耳) 厚。镍沉积在受损的管壁上填补了穿壁裂纹, 停止了一回路冷却剂向二回路系统的泄漏。此外镍沉积防止了一回路冷却剂与受损的管壁之间接触, 阻止了裂纹的扩展和新裂纹的产生。涂镍方法对比衬管有几个优点。该工艺产生的残余应力很低。不要求随后进行热处理, 它能适用于传热管直线段的任何地方。它也可以在以后损坏修理时, 可以进入到涂层以上部位的区域, 反之衬管就不能。涂层也可

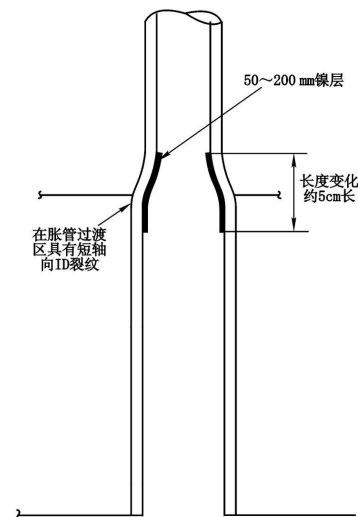


图 9 在胀管过度区具有 PWSCC 时的涂镍层修理

以清除，因为在需要时该涂层可以使用化学方法进行剥落，而不会损伤传热管。

对于涂镍区的在役检查，涂镍方法是个缺点。因为镍是磁性的，涂层对于由常规涡流探头引起的小磁场产生屏蔽，不能用来检验涂镍区域。然而，已经开发了新的超声检查方法能探测轴向和环间裂纹。脉冲磁饱和涡流检查也可以用来检查涂镍的传热管。

涂镍层于 1985 年首先应用于 91 根管子上，作为现场试验以评价不同的涂镍方法。在现场和试验室试验的结果上得到了经验，一个最佳的涂镍层工艺已经开发出来，并于 1988 年在道益尔 2 和 3 号机组（比利时）的蒸汽发生器胀管过渡区（具有严重的裂纹）得到应用。

章成光译自（NUREG/CR-4731） 丁训慎校