

AP1000核电站建造自动焊技术应用风险分析

张岩 冯英超

【摘要】通过对AP1000核电站建造自动焊技术应用风险事件的分析,提出了在AP1000核电站建造过程中钢制安全壳、主管道、主蒸汽管道自动焊技术,以及管道焊接热处理的风险问题以及防范措施。

关键词: AP1000自动焊; 技术应用风险; 技术风险; 风险防范措施

一、概述

人们越来越认识到“安全、经济、清洁”的核电将是保证人类持续发展和保护生态环境的必由之路。AP1000是在改进完善第二代核电技术基础上发展的第三代升级延寿技术,在技术理论上,AP1000形成了自己全新的概念和革新性的技术,具有先进的设计理念 and 突出的设计特点,但缺乏实践和成熟核电站的运行经验。在这些核岛安装过程中,面临着经济风险、技术风险、管理风险、人员风险、安全风险、社会政治风险、自然环境风险及设备材料风险等多种诸多因素。

我国的三代核电自主化依托项目是引进、消化、吸收和再创新同步进行,故而会增加更多的风险因素。因此,对AP1000核电站建造自动焊技术应用的风险因素进行分析和评估,在此基础上进行风险措施防范,加强对自动焊技术应用的管理和控制,避

免由此而带来的损失,提高经济和社会效益。

二、风险事件的分类

AP1000核电站建造自动焊技术应用风险是一种不确定的事件或情况,这种事件或情况一旦发生,就会对管件安装的制造成本、进度、质量、安全等方面产生影响,导致无法实现工程建设预定目标的完成。

根据AP1000核电站建造自动焊技术的工作程序,包括表面处理、打磨、清理、管道组对、无损检测、焊材保管、焊工资格等,确定AP1000核电站自动焊技术应用风险过程中可能出现的典型风险事件。

风险分类方法多种多样,可以按来源、性质、领域、状态、影响发生概率、损失程度、发生后果等多种方法进行分类。本文进行对自动焊技术应用过程中的各项工作进行风险分析,按照

风险的领域分为3大类:技术风险、管理风险和 environment 风险。

1. 技术风险

(1) 设备技术风险 设备技术风险包括设备本身设计和制造试验所需的工装、机具两个方面。一般是由于预先研究不充分、设计时过于追求技术的先进性而造成设计上的不成熟,或是设计人员水平或经验不足、规范标准选择不当、安全系数选择不合理导致设计方案存在缺陷。

自动焊设备是自动焊实施和承载的主体。自动焊工艺试验之前,关键准备工作之一就是自动焊焊机的选择。通过信息搜集、厂家调研,结合核电项目上对焊接设备的要求,如设备的应用经验、供应商的技术支持和设备对现场的适用性等因素,因此对焊接设备的选择也是设备技术风险的一方面。

另一方面,由于自动焊设备主要依赖国外进口,设备的维护

维修服务期限短，而国内设备技术水平和售后服务能力比较薄弱，所以设备的维修与售后服务就成了一个比较突出的问题，成为对自动焊的焊接效率与质量的一个风险因素，使设备使用方在保证设备的可靠使用方面存在一定的风险。

(2) 管道圆度及焊接材料选择与匹配导致的风险 自动焊焊接管道的圆度是困扰自动焊的一个大问题。一般椭圆度的管道在焊接过程中可通过采用手动微调自动焊程序的方式，即可弥补对焊接带来的问题；而对于圆度差的管道，自动焊接时，会影响焊接在轨道上的自动旋转移位，造成电弧电压的不稳定，致使焊缝产生一定缺陷。所以自动焊焊接管道的圆度是一风险因素，需要对核电站自动焊管道的质量进行严格的控制，对管道货源采取有效的装卸、搬运措施来保证管道的外观质量。

由于焊接结构的传统设计原则上是以强度设计为主，焊接材料的选择普遍遵循按强度匹配的原则，同时参照自动焊焊接材料和自动焊设备特性，对国内外焊材厂家的自动焊焊材进行调研和试验，最后确定出能够满足文件要求的焊材，尽量避免因焊接材料匹配所导致的风险。

(3) 焊接工艺风险 首先，在CV容器自动焊中，熔化极气体保护焊(GMAW)具有生产效率高、可以实现全位置焊接、节能、接头质量好等优点，成为高效化焊接方法的重要选择。焊接电源使用Power Wave R350，熔滴过渡采用直流脉冲形式。焊接

小车带有反馈系统，焊接系统采用干伸长度反应焊接电流大小，在焊接过程中由于焊枪需要来回摆动，系统通过自动调节干伸长度保证恒定的电流输出。对于自动焊接，在焊接过程中焊接小车的行走速度和焊枪的摆动速度必须匹配，行走太慢容易造成焊缝金属的堆积，成形效果差；行走太快则容易造成焊缝金属出现填充不上，形成焊缝不连续的现象。

其次，核电站主蒸汽系统管道具有管径粗、管壁厚特点，安装焊接主要以焊条电弧焊进行，焊接前还需进行热处理。因此施工时存在工作量大、施工难度大、焊接环境恶劣和质量要求高等问题，焊接过程中更是需要各个工种之间的密切配合。采用传统、简单而繁重的焊条电弧焊技术，虽然设备简单，操作方便，但是想要获得优良的焊缝，就必须依赖经过长期培训和工程锻炼的高技能焊工。同时，在现场焊接过程中，采用手工钨极氩弧焊工艺完成一道主蒸汽管道焊口大约需要两名高级焊工在200℃的高温下连续焊接作业15天时间，焊缝质量存在一定风险，容易受到焊工情绪、水平等因素的影响。目前，为了提高核电站主蒸汽管道的焊接质量，减少人为因素的影响，压缩主回路的安装和焊接工期，采用先进的自动化焊接技术，是未来核电建设发展的趋势，但其存在的风险仍不能忽略。

最后，主管道自动焊工艺与原始的手工焊工艺相比，虽然能够缩短核电站主回路管道的焊

接施工周期，减少核电施工成本，但也存在的不足之处，就是对试件坡口组对的要求提高。手工焊对试件组对的间隙要求为1.0~4.0mm，而自动焊要求值为0~1.0mm，从而对试件的加工尺寸、组对精度等方面提出了较高要求，这就可能为后续核电主管道现场施工带来风险，而成为制约施工的关键因素。另外，由于主管道自动焊设备、焊接材料都依赖进口，且价格昂贵，因此还存在投入成本的巨大风险；与此同时，设备与焊接材料的供货周期、设备的维修与售后服务都有可能成为后续施工的风险因素。

(4) 培训风险 为实现设计、制造的国产化而专门组织的课堂培训和实践培训，培训参与人员的综合能力、培训教材和方式的实际有效性，也会成为后续施工的风险因素。

2. 管理风险

组织机构方面：设备国产化的管理模式、参与实施国产化的单位、关键岗位人员的综合素质是否能够满足需要，组织控制与执行力度等方面。

相关方的接口管理：参与AP1000核电站自动焊技术应用研究单位之间的接口管理与协调、任务分工、相应的合同关系等，也属于软风险潜在因素。

经济性与进度：忽略时间与成本的关联、滞后的经费支付、错误的成本预测、价格估算不准，以及不良的进度管理等也会造成不良影响。

3. 环境风险

不可抗力：这里不可抗力主

要是指自然灾害造成的对自动焊技术的影响。

施工环境：施工的恶劣环境对自动焊技术的影响。

政策：政府的出口政策限制，以及国家之间的政局稳定性，经济政策和涉外政策的连贯性等也是影响因素之一。

三、技术应用风险的分析方法

各种AP1000核电站建造自动焊技术应用风险之间的相互关系错综复杂。有的风险可能会引起工程的延期，有的风险可能会引起严重的建造质量和安全事故，还有的潜在风险则可能会引起运行阶段严重的核安全事故，从而导致项目不能达到预期的目标。作为世界上首次工程实践的AP1000技术，技术应用风险的发生概率高，因此进行充分、有效的自动焊技术应用风险的分析是取得自动焊技术应用成功的基本保障。

技术应用风险分析是对风险发生原因、发生时间、持续状态、风险后果和不可预测程度进行的全面分析，以保证分析、评估、管理的合理性、全面性和科学性。为了能够全面掌握自动焊技术应用潜在的风险，应以人、机、料、法、环为基础，从自动焊焊接内容及工序方面，建立一种完善的AP1000核电站建造自动焊技术应用风险管理分析框架（见附图），来描述、分析和防范自动焊技术应用风险。

其中，人、机、料、法、环分别表示如下意义：①人：指的

是设备操作人员应具有合格的操作资质。②机：指的是承载焊接工作实施的自动焊设备。③料：主要指的是焊接填充材料（即焊材）。④法：主要指的是进行焊接施工的上游设计文件，工作程序/方案。⑤环：主要指的是施工过程中的环境控制。

四、技术应用风险的防范措施

按照技术应用风险的分类，既包括了可控因素，又包括不可控因素，其中管理风险和环境风险通过严控可以得到改善。而技术风险是最难控制的风险，应重点防范，建立从风险识别、风险分析、风险规划、风险预警到风险控制的动态持续管理的闭环管理机制，对风险管理技术——焊接工艺流程有限分解，然后通过专家评估、试验验证等方法进行风险识别与风险分析，运用分析结果规划与建立风险预警，进行风险控制措施，同时进行信息反馈。

1. 钢制安全壳（CV）自动焊技术风险及解决措施

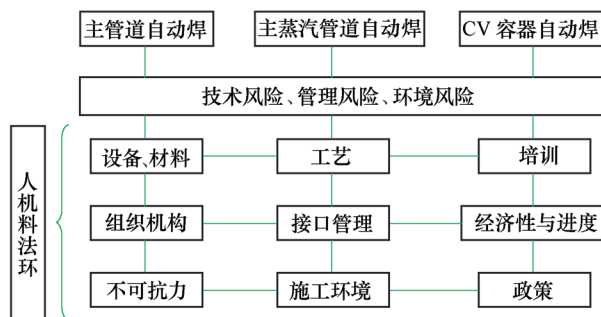
钢制安全壳（简称CV）作为非能动系统的重要组成部分，

能有效确保核反应堆安全，防止辐射物质扩散。以往，国内在建的CV钢制安全壳容器主要采用手工焊接方法制造，但存在生产效率低，施工周期长，对焊接人员技术要求高等问题。现在，已在核电项目上使用钢制安全壳（CV）自动焊技术焊接SA738Gr.B钢，开发合适的工艺参数，相比手工焊接，钢制安全壳（CV）自动焊技术实现了可连续焊接，不再过分依赖焊接人员技能，焊缝成形质量好，这也为后续核电现场施工提供了技术参考。

（1）CV容器仰焊（4G）位置焊接工艺研发风险 CV容器封头拼装的仰焊位置在焊接时由于受到焊接熔池自重的影响，焊缝成形很难控制，存在风险，需进行专用焊材选型及特殊焊接工艺的研发。

（2）CV容器焊接变形控制风险 由于CV容器的安装技术规格书对于整体垂直度与圆度要求高，因此，采用自动焊进行焊接变形控制需要通过焊接试验和现场模拟进行深入分析研究，提前进行风险控制，避免在焊接过程中出现焊接质量不过关的问题。

（3）CV容器自动焊专用工



AP1000核电站建造自动焊技术应用风险管理分析框架

装设计制作风险 CV容器自动焊施工需针对2G、3G和4G不同焊接位置进行现场施焊，与焊接相配套的专用组对、焊机行走工装和装置的设计和制作将为焊接工作的实施带来风险，在设计和制作中应多次试验进行验证。

(4) CV容器自动焊现场施工技术方案风险 CV容器自动焊现场实施，涉及到吊装、组对、热处理、焊接、测量等多个专业的作业，如何合理安排组织施工作业流程、拼装顺序、焊接顺序将是一个庞大的系统工程，需通过经验积累、试验总结提炼和现场实际模拟，并在施工过程中不断完善和优化，避免由此而带来的施工风险。

(5) 熔池下塌风险 在进行厚板焊接试验中，不同送丝速度也会给焊缝质量带来一定影响。这是因为送丝速度与焊接电流有关，而焊接电流对焊缝的成形影响较大。若设置的焊接参数中送丝速度较大，会出现熔池下塌的现象，在盖面层焊接时会出现余高较高的现象。为解决焊缝上的未熔合现象，应调整焊枪角度，熔化极气体保护焊时，焊枪垂直焊接时飞溅率最小，焊枪倾斜角度越大，飞溅越多，一般焊枪倾角 $\leq 20^\circ$ ，并适当降低送丝速度，减少焊缝层数。采取以上措施后，会发现未熔合现象得到改善，焊缝成形美观，无明显缺陷。

2. 主管道、主蒸汽管道自动焊技术风险及解决措施

在主管道、主蒸汽管道焊接试验中，实现连续的自动焊接是最为关键的，但是在焊接过程当

中往往出现焊接间断、焊接缺陷等对焊接工艺的开发以及焊接质量的影响，为此，需要对焊接中可能出现的风险因素进行识别和判断，并采取预防及消除措施。

具体措施如下：

(1) 侧壁熔合不良风险 出现侧壁熔合不良的原因主要是焊接参数（主要是电流）的设定与焊缝不能实现良好匹配：即熔池成形不良，从而使得焊缝存在未熔合（关键是侧壁）的风险。对此可采取以下措施：在焊缝根部宽度的测量上要认真细心，待根部宽度确定后，慎重的选择和设定焊接参数，一般选择较大工艺参数的下限，而针对管道温度较低的情况下，焊接参数的选择、设置也较为关键：一般要选择焊接参数的上限。

(2) 气孔风险 焊接过程中出现气孔是最为常见的一种缺陷，产生的因素是多方面的，主要有以下几点：正面保护气体流量的设置、焊机气路密封性、焊接过程控制、环境因素和人为因素的影响。它的存在不仅会使焊缝截面减小、强度降低，还会使腐蚀加剧，导致结构过早失效。因此，对气孔要给予足够的重视，根据生产条件采取相应措施预防风险的发生。

第一，气体流量的设置对熔池的成形及周围气体的流动都具有较大的影响，不许有较大的变动：气体流量偏小，在下坡位置容易保护不良；气体流量过大，容易在爬坡位置出现过大保护；所以在焊接过程当中，要严格采用工艺指导书所规定的气体流量范围。

第二，焊机气路密封性是否良好对于焊接质量存在较大的影响，在焊接过程当中，气体要从氩气罐里出来，经由氩气表、气管、焊机、氩气带等送至焊枪，各个环节的气路连接都要认真进行，在焊接前要进行预送气并用肥皂水检测气体接头。

第三，焊接过程控制因素主要包括氩气罩高度、钨极端部尺寸、熔池缺陷的及时控制及清理等。在焊接过程中，氩气罩要尽量贴近坡口端部；钨极尺寸要尽量靠拢标准数值，且在焊接过程当中要密切关注其变化；焊缝表面缺陷要及时、全面的进行清理。

第四，焊接时环境因素影响虽是不可控的，但应尽量避免由于周围的空气流动对焊接质量带来的影响，这也是气孔形成的主要因素之一。因此，在施焊过程中尽量对焊缝周围实行密闭，减少空气的流动，同时对焊接施工人员的走动要进行严格的控制。

(3) 粘钨、夹渣风险 焊接过程当中会经常出现粘钨现象，而粘钨对焊接的影响比较麻烦，常在起弧过程中，若焊缝表面不平整选择的参数和焊接过程行走不当，易导致钨极触壁，钨极浸入熔池里，瞬间凝固在焊缝中即出现夹钨缺陷。因此，要采取措施对粘钨风险进行预防，主要通过对弧压的控制和调节，以及焊枪偏转角度进行控制。在施焊过程中，焊枪偏转角度应为 $0^\circ \sim 3^\circ$ （偏离焊丝方向），当输机数值与设置数值不一致时，要尽量通过调节的方式给予更

正,使弧压尽量贴近于设置值。

在5GT位置焊接时,270°附近是熔池拉伸的最长、弧压最容易跟踪不稳的区域,最易粘钨,因此在施焊过程中,要密切关注此区域附近熔池的成形,在临近位置时,可适当提高弧压,以避免粘钨风险的发生。

夹渣常因坡口或焊缝表面不干净,层间清渣不彻底,焊接电流过小,焊接速度过快,熔池冷却过快,熔渣及夹杂物来不及浮起等原因导致。在现场主管道焊接过程中,由于现场环境比较恶劣,浮尘比较多,所以每次焊接完成后应进行焊缝层间清理,防止出现夹渣缺陷。

(4) 打底焊缝背部挂渣风险 在管道打底焊接过程中,往往易在点固棒处出现背面发黑甚至挂渣的现象,这是因为打底焊接至点固棒处,由于节约气体用量的考虑,所以操作人员常会把背面氩气流量调小后再熄弧,并用角磨机打磨点固棒。打磨过程中会将部分空气带入,而打磨完成后,背面氩气流量开大,使得背面保护腔内空气还未排尽就起弧焊接,造成背面保护不良,出现焊缝背部挂渣风险。

因此,打底焊接过程中,如需打磨处理,应继续进行背部充氩,待打磨完成后,尽量多充3min左右的氩气。

3. 管道焊接热处理风险防范措施

焊接热处理包括焊前预热及焊后热处理等,在进行焊前预热或焊后热处理时,首先应检查下列先决条件是否符合要求,避免由此带来的风险事故的发生。

(1) 人员资格风险防范 进行热处理操作的所有人员必须经过相应培训,且具有相应资格证书。

(2) 跟踪文件风险防范 需进行经预热和热处理的焊缝要检查是否与文件相一致。检查所有的跟踪文件是否齐备,能否满足现场操作的需要。

(3) 设备风险防范 检查设备是否完好,自动记录仪是否正常,热电偶及记录仪是否经过标定。

以上检查合格后,由热处理人员开始对焊缝进行加热器具和热电偶的布置,具体要求可参见相关工作程序。

五、结语

在AP1000核电站建造自动焊技术应用过程中,由于任何一个环节出现的风险都有可能导致极其严重的后果,所以应建立风险识别、判断、预警和分析模式管理,严格控制所有潜在的、可能导致风险的因素;同时,对于最难控制的技术风险,应重点防范,建立从风险识别、风险分析、风险规划、风险预警到风险控制的动态持续管理的闭环管理机制,避免由此带来的危险事故和巨大损失。

参考文献:

- [1] 高永军, 关锐. AP1000设备技术转让与国产化过程中的风险管理浅析[J]. 2009, 2(4): 330-335.
- [2] 何文炯. 风险管理[M]. 大连: 东北财经大学出版社, 1999.
- [3] 沈明鉴. 项目风险管理[M]. 北

京: 机械工业出版社, 2004.

- [4] 杨建平. 重大工程项目风险管理中的综合集成方法[J]. 管理科学文摘, 1999, (7):21-23.
- [5] 高军, 刘先涛. 工程项目风险管理对策的规划研究[J]. 科技管理研究, 2003(3): 66-69.
- [6] 冯英超, 等. 核电站安装施工中自动化焊接技术应用分析[J]. 电焊机. 2009, 39 (8): 27-29.
- [7] 孙建新. 高强钢焊接结构的潜在风险分析[J]. 电焊机, 2014, 44(5): 132-135.
- [8] 尹长华, 赵海鸿, 张荣芬. 长输管道安装焊接材料的选择[J]. 焊接, 2005, (6).
- [9] 罗云, 樊运晓, 马晓春. 风险分析与安全评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [10] 朱启超, 匡兴华. NASA高技术项目风险管理技术与方法[J]. 世界科技研究与发展, 2004, 26(3): 95-102.
- [11] Friededsen Victoria P. Risk communication:Communicating risks as a function of good risk management Collection of Technical Papers-4th International Energy Conversion Engineering conference,2006:1189-1197.
- [12] 苑庆生. 核电站反应堆冷却系统的主管道安装焊接探析[J]. 硅谷, 2015, (04).
- [13] 王挺, 等. 核岛主蒸汽管道焊接施工总结[J]. 电焊机, 2009, 39(8).

作者简介: 张岩等, 中国核工业二三建设有限公司。

MW 20160922