



HTR—PM余热排出系统 水冷壁制造方案

王勇慧 张丽 孟东旺 张志军 梅少兵 王佳仁

【摘要】 高温气冷堆核电站示范工程（HTR—PM）采用非能动余热排出系统来执行反应堆舱室余热导出，主要设备是环绕反应堆压力容器放置的水冷壁。其初设方案为尺寸巨大的薄壁筒形结构，内壁纵向均匀满焊300根冷却水管，整体刚度差、焊接工作量大且焊后变形难于控制，这给制造、运输和安装都带来很大挑战。本文通过技术分析和产品调研，创造性地提出将在火电及冶金领域应用广泛的膜式壁技术引入核电安全级设备制造过程，取得了预期效果。

关键词： 高温气冷堆；余热排出系统；水冷壁；膜式壁；埋弧焊

1. 概述

在建的高温气冷堆核电站示范工程（HTR—PM）位于山东省石岛湾，是国家科技重大专项依托工程。作为具有第四代核电特征的先进堆型，高温气冷堆采用氦气和石墨分别作为一回路冷却剂和慢化剂，陶瓷包覆材料燃料球通过不停堆连续装卸方式运行，整个役期不会出现堆芯失水熔化的严重安全事故，具有固有安全特性。

为保证反应堆舱室混凝土层及内部设备温度低于设计限值，高温气冷堆设置了余热排出系统，可实现事故工况下的余热载出。来自反应堆压力容器的热量通过导热、对流、辐射传到水冷壁，管路中的水受热膨胀后密度下降，在重力作用下向上流动，经由空气冷却后由舱室底部重新进入管路参与下一次热循环。整个系统完全依靠重力及自然循环

运转，属于非能动系统。作为其中最为关键的设备，水冷壁设计尺寸为 $\phi 8\ 760\text{mm} \times 19\ 119\text{mm}$ ，由筒体、隔热套筒、冷却水管、上下联箱、环形筋板、环形底座及锥形支撑等组成。

2. 制作难点分析

设计方案中水冷壁采用筒体内壁焊接冷却水管的主体结构，每台水冷壁含三组冷却序列，各有100根SA106C冷却水管和对应的上、下联箱，如图1所示。为保证水冷壁接受的热量充分传给冷却水，管与筒体钢板接触面两侧的角焊缝不允许断续焊，要求全部满焊。经技术分析及产品调研，该方案存在以下制造难点。

（1）难于实现自动化，焊接工作量大 考虑到水冷壁的服役场所，整个服役期无法修理和更换，必须保证所有焊缝的质量可靠，避免出现管道被焊穿或虚焊，应优先选用自动焊。筒体的

外径尺寸为 $8\ 250\text{mm}$ ，冷却水管的尺寸为 $\phi 42\text{mm} \times 6\text{mm}$ ，筒体内壁相邻管中心距为 87mm ，真正施焊空间仅为 45mm ，且该角焊缝形式不利于埋弧焊作业，实际制造中只能由熟练手工焊接，因此焊接工作量大，总体焊接质量及制造周期难以保证（经测算，每台水冷壁需要填充焊材约 25t ）。

（2）整体刚度差，尺寸精度和焊后变形难于控制 水冷壁环绕反应堆压力容器放置，通过环形底座与舱室墙壁上的预埋件连接，外侧最小安装间隙在环形筋板与舱室内壁处，仅为 17mm ；内侧最小安装间隙在起吊吊耳处，距压力容器仅为 340mm 。技术文件要求在任一横截面上，水冷壁内外径的实测值应在理论值的 $\pm 10\text{mm}$ 范围内。

12mm 厚SA—516 Gr.70钢板卷成 $\phi 8\ 250\text{mm}$ 的筒体，本身刚

度较差。从焊接结构角度来看,在封闭筒体内壁设置密集不间断长直焊缝的结构拘束度很大,焊接过程中将不可避免带来应力集中,焊后变形难于控制。

3. 制造方案

为解决设计方案难于实现自动化焊接、焊后尺寸与变形难于控制的问题,一种已经在火电、冶金上应用广泛且技术成熟的膜式壁制造方案被引入安全级水冷壁的制造中。膜式壁是将鳍片管(扁钢和光管)连续拼接组成的大幅管屏,制造工艺成熟,而且具有机械行业标准《JB/T5255—1991焊制鳍片管(屏)技术条件》。部分大型冶金厂配套的膜式壁转炉烟道形状和尺寸接近HTR—PM水冷壁,而且服役工况非常恶劣(500℃以上高温及烟尘冲刷),表明膜式壁方案具有可行性。

与原方案相比,膜式壁制造方案具备以下优势:①膜式壁方案不使用卷制筒体,改由冷却水管与扁钢条直接拼接成筒体,整体刚度增加,降低了密集焊缝造

成的应力集中,焊后变形便于控制。②原方案筒体与冷却水管焊缝均为角焊缝,难以采用自动焊接作业,人工焊接工作量大;膜式壁方案采用成熟鳍片管制造工艺和设备,多头焊机可双面成形,大大提高焊接效率,且焊接成形美观,焊缝质量易于保证。

在此基础上,设置了膜式壁制造方案的具体制造流程,首先是膜式壁筒体和联箱制作,然后在特定工装上将筒体和联箱进行总装,探伤、水压和气压试验合格后装配最外层的隔热套筒,整体喷砂、涂漆后出厂。

(1) 分片膜式壁制作 分片膜式壁的制作、检测参照《JB/T5255—1991焊制鳍片管(屏)技术条件》进行。图2所示的膜式壁专用生产线配备1600mmMAG12/20型埋弧焊机,最多一次可焊接10根并排的管子和扁钢条,生产效率和焊接质量都很高。根据设备情况,将单台水冷壁的筒体分为30个单元,每个单元膜式壁为12°。

制造前定尺采购安全3级管

道及扁钢条,管与扁钢条不允许拼接,因起弧和收弧需要,两端各放50mm余量,焊接完成后切除。从生产线下来的直膜式壁如图3所示,经局部整形和100%MT探伤合格后进行热处理,以消除焊接残余应力。热处理加热温度为600~650℃,保温时间为30min。热处理之后,分片直膜式壁还需要进行变形处理,目的是将分片直膜式壁制作成用于最终总装的12°弧形单元膜式壁。

变形处理在压力机上进行,压力机通过压模、圆钢和垫木将压力缓慢的传送给扁钢条(见图4)。分片膜式壁的变形处理非常重要,直接关系到最终总装时能否顺利进行,压制时应用R样板逐步检测成形效果,并保证管

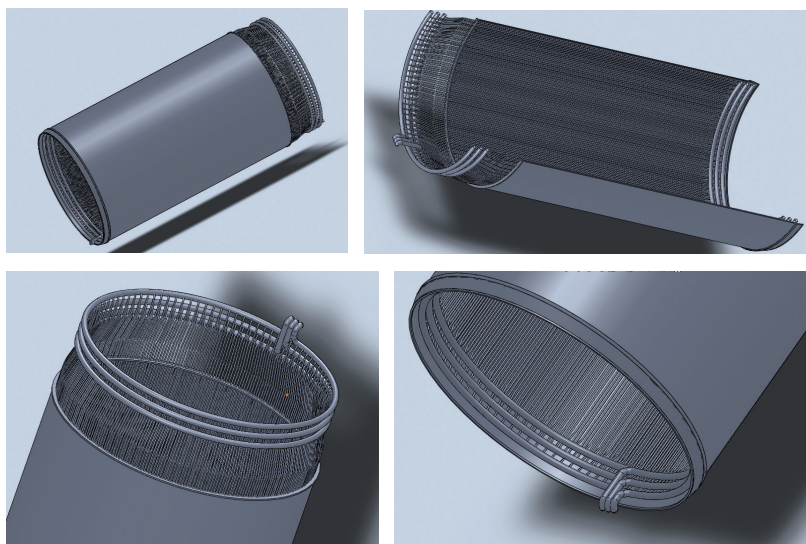


图1 设计方案水冷壁三维模型



图2 分片直膜式壁生产线

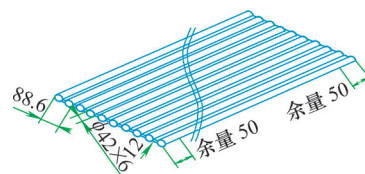


图3 分片直膜式壁示意

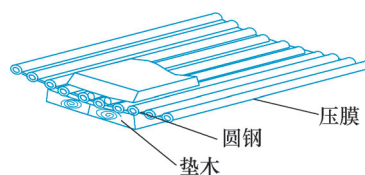


图4 分片直膜式壁变形过程示意

子不被压扁或损伤。

(2) 环形联箱制作 联箱的制造、检测参照JB/T1610—1993《锅炉集箱制造技术条件》进行。单台水冷壁有上、下联箱各三个，规格为 $\phi 8180\text{mm}$ ，由 $\phi 168\text{mm} \times 6\text{mm}$ 的管道分段弯制、焊接而成。在联箱制作过程中，拼接焊缝总数不能超过3条，管接头的焊接管孔应当避开联箱拼接焊缝，并且避开管接头的连接焊缝与相临焊缝的热影响区。

联箱的椭圆度应控制在8mm以内，管道壁厚减薄量应控制在0.6mm以内，通球试验用球直径为140mm。联箱对接焊采用全氩弧焊，焊接错边量应控制在0.25mm，对接焊缝应进行100%RT检测，装配过程中的上联箱如图5所示。

(3) 水冷壁总装 单元膜式壁和联箱制造完成后，进入最终总装阶段。为保证装配精度，专门设计了如图6所示的两组装配工装，每15块经变形处理的弧形单元膜式壁拼接成1/2筒体。在标准平台上划线放样，将外支撑圈、单元膜式壁、环形筋板及联箱等按放样尺寸就位并与工装固定。综合检查各单元膜式壁定位及尺寸，调整并确定装配用扁钢条宽度，对扁钢条加工坡口，定位焊固定并按相应焊接工艺由有资质的核级焊工进行手工焊接，焊缝应进行100%MT检测，两个1/2筒体拼成完整筒体效果如图7所示。

经水压、气压试验合格后，对拼接完成的膜式壁筒体整体进行喷砂处理，将膜式壁及联箱表



图5 环形上联箱装配效果

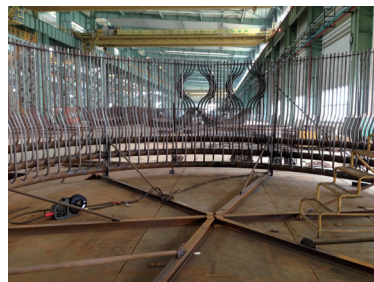


图6 膜式壁装配工装 (180°)



图7 膜式壁筒体和联箱装配后

面浮锈去除后喷漆，最后逐块装配隔热套筒并焊接，装好后效果如图8所示。

4. 结语

本文将在火电及冶金领域应用成熟的膜式壁技术引入HTP—PM余热排出系统水冷壁设备的制造中，解决了初设方案难于实现自动化焊接、焊后尺寸与变形难于控制的难题。结果表明，用

膜式壁方案制造的水冷壁整体刚度和尺寸精度控制良好，现场安装顺利完成。

参考文献：

- [1] 刘俊杰. 10MW高温气冷实验堆的堆体结构特点[J]. 核动力工程, 2001, 22 (1): 53-56.

作者简介：王勇慧、孟东旺、张志军，中核能源科技有限公司；张丽，清华大学核能与新能源技术研究院；梅少兵、王佳仁，苏州海陆重工股份有限公司。

MW 20170321



图8 隔热套筒装配效果