

# 无粘结预应力技术在核岛安全壳结构中的应用

王祥德

(江苏中核华兴建筑科技有限公司, 江苏 南京 210012)

**[摘要]** 某核电项目核岛安全壳在国内首次采用“先灌浆后张拉”的无粘结预应力技术。该系统通过四重防护设计显著降低摩擦系数,具备后期应力监测、补张拉与钢绞线可更换等功能。系统阐述了该技术在埋管、穿束、灌浆、张拉及封锚等关键工艺的研发与应用,重点介绍了配套施工平台、新型成品灌浆料、摩擦系数精确测定方法及国产化装备等一系列技术创新。工程实践表明,该技术有效提高了施工效率、结构抗震性能与后期维护灵活性。

**[关键词]** 核电站;安全壳;无粘结预应力;灌浆料

**[中图分类号]** TU757

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 2097-0897(2025)22-0094-05

## Application of Unbonded Prestressing Technology in Nuclear Island Containment Structure

WANG Xiangde

(Jiangsu China Nuclear Industry Huaxing Construction Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210012, China)

**Abstract:** The nuclear island containment vessel of a certain nuclear power project adopts the unbonded prestressing technology of “grouting first and then tensioning” for the first time in China. The system significantly reduces the friction coefficient through a quadruple protection design, and has functions such as post stress monitoring, tensioning, and replaceable steel strands. The system elaborates on the research and application of this technology in key processes such as pipe burial, threading, grouting, tensioning, and anchoring, with a focus on introducing a series of technological innovations such as supporting construction platforms, new finished grouting materials, accurate measurement methods for friction coefficients, and domestically produced equipment. Engineering practice has shown that this technology effectively improves construction efficiency, structural seismic performance, and flexibility for later maintenance.

**Keywords:** nuclear power plant; containment shell; unbonded prestressing; grouting agent

### 1 工程概况

某核电项目反应堆厂房安全壳为双层钟罩型结构,由反应堆底板、内外筒体墙、内外穹顶组成,如图 1 所示。内安全壳为预应力钢筋混凝土结构,采用先灌浆后张拉的无粘结后张拉预应力系统,通过油脂、聚乙烯护套、水泥浆和钢束孔道对钢绞线进行四重保护,摩擦系数大大减少,并可以实现后期的钢绞线应力监测、补张拉及更换。

预应力钢束分布于预应力廊道顶板、筒体和穹顶部位,分为环向钢束 76 束和倒 U 形钢束 50 束,共计 126 束。单机组使用无粘结钢绞线 1 480t、成品

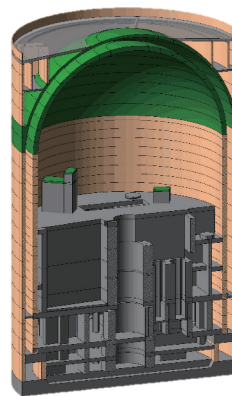


图 1 某核电项目内外壳剖面

Fig. 1 Internal and external shell profiles of a nuclear power project

**[作者简介]** 王祥德,项目经理,高级工程师,E-mail:15261444998@163.com

**[收稿日期]** 2025-02-05

灌浆料 500t、无缝钢管 240t、镀锌钢带 35t 和锚固系

统 252 套。

无粘结预应力施工工艺流程:埋管→平台安装→穿束→浆体制备→灌浆→张拉→封锚。

2 无粘结预应力施工工艺

2.1 埋管

钢管适用于所有倒 U 形钢束和带偏离弧度的环向钢束。钢管尺寸为  $\phi 219.1 \times 4.0$ 。加工主要工序为钢管的切割、弯曲及扩口。钢管加工完成后,在钢管内壁涂刷乳化油水溶液,避免锈蚀。

金属波纹管适用于不带偏离弧度的预应力环向钢束。金属波纹管选用 78mm×0.6mm 镀锌钢带卷制成。卷制过程为带材导入、波纹冷压成型、折卷、咬口连接、滚花压紧等。金属波纹管分为内径 210mm 主管和内径 215mm 套管。金属波纹管检验合格后可批量加工。

2.2 施工平台

施工平台由上层平台和下层平台组成,用于核电站核岛反应堆厂房内安全壳环向钢束的穿束、灌浆、张拉等作业。单台核岛反应堆厂房内安全壳安装 2 套施工平台,分别安装于内安全壳 120°和 300°扶壁柱区域。不同于传统核电有粘结预应力工程施工,该施工平台在预应力工程施工完成后,经局部调整用于核电站运行阶段预应力系统维护使用,永久保留。

上层平台由 4 台 3kW 电机驱动,上层平台运行总质量 10 280kg,其中平台质量为 6 000kg,2 个液压油泵及千斤顶的质量为 4 280kg,上层平台主要用于预应力设备吊装,两侧分别设置 1 台电动悬臂式起重机;下层平台有 2 台 3kW 电机驱动,下层平台承载穿束机、作业人员和工具。下层平台每个平台自重 5 000kg,穿束机重 820kg,人员重 800kg,合计下层平台运行总质量 6 620kg。导轨长度根据预埋件位置调整,工作中上下 2 个操作平台之间需保持一定的垂直距离,2 个平台不会同时作用于同一根导轨。平台采用齿轮齿条驱动方式。齿条焊接在导轨上,导轨通过预埋件和螺栓固定在安全壳混凝土结构上。

在建造阶段,下层平台宽约 13m,用于提供施工作业支持,确保预应力穿束、灌浆及张拉等关键工序的高效施工。在运营阶段,上层平台保留,用于吊装维护设备,下层平台调整为预应力维修平台,将下层平台两侧拆解,长度调整为 7.1m,用于后期的钢绞线应力监测、补张拉及更换。预应力施工平台如图 2 所示。

某核电项目核岛反应堆厂房先吊装外壳钢穹

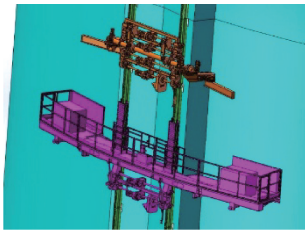


图 2 预应力施工平台

Fig. 2 Prestressed construction platform

顶,再进行内壳预应力施工。通过预应力施工平台分阶段提前安装,在外壳钢穹顶吊装前完成预应力环向钢束穿束施工,采取张拉设备提前引入的措施,达到环向钢束灌浆、张拉作业后施工的目的,保证了核岛外穹顶混凝土结构关键线路的施工。

2.3 管道定位安装

钢管使用承插连接,金属波纹管使用套管连接。接缝处使用热缩胶套进行密封固定。钢管使用 U 形钢筋焊接固定在钢衬里的结构骨架上,金属波纹管绑扎于焊接在钢衬里骨架的支撑件上。利用 BIM 建模和测量仪器严格控制预应力管道的安装精度。

为了避免预应力孔道发生堵塞,在孔道的施工过程中分 3 个阶段进行通孔,即在模板安装完成后的混凝土浇筑前、浇筑中和浇筑后,应立即进行通孔检查。使用直径 190mm 的不锈钢空心球从孔道一端通过钢丝绳通向孔道另一端。

2.4 穿束

2.4.1 穿束材料设备

无粘结钢绞线选用带油脂和高密度聚乙烯(HDPE)护套的 7 芯钢绞线,直径约 20mm。裸钢绞线公称直径 15.70mm,抗拉强度  $\geq 1\ 860\text{MPa}$ ,弹性模量为  $(195 \pm 10)\text{GPa}$ 。每米钢绞线约重 1.3kg。结合 HDPE 护套的物理性能与穿束机的输送特性研发国产液压穿束机,具备性能稳定、动力大等特点,配套无粘结钢绞线自动喷油装置,可有效降低孔道内摩擦力,保障无粘结钢绞线穿束的顺利开展。

2.4.2 环向钢束穿束

环向钢束采用穿束机将钢绞线逐根铺设进预应力钢束孔道内,使用水溶性油通过润滑装置喷淋在 HDPE 护套上,有效降低预应力孔道内 HDPE 护套相互间的摩擦力,减少穿束阻力,提高钢绞线穿束的效率。穿束机逐根穿束工艺如图 3 所示。

2.4.3 倒 U 形钢束穿束

采用整体牵引工艺进行倒 U 形钢束穿束,使用穿束机预先编束后通过钢丝绳置换、钢绞线编束墩头,在连接牵引装置后,使用 30t 整体牵引卷

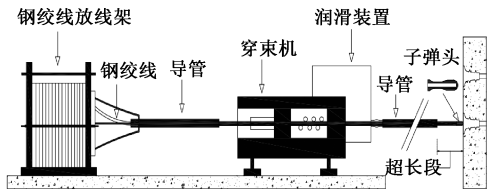


图 3 穿束机逐根穿束工艺

Fig. 3 Single strand threading process for threading machine

扬机将整束钢绞线拉入预应力孔道内。为保证钢绞线 HDPE 护套的完整性,牵引过程中,使用水溶性油脂对钢绞线进行润滑。整体牵引工艺如图 4 所示。

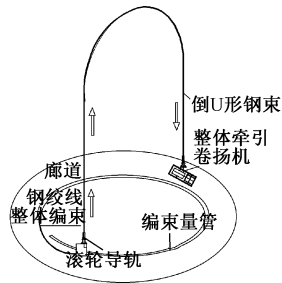


图 4 整体牵引工艺

Fig. 4 Overall traction process

## 2.5 灌浆

### 2.5.1 模拟灌浆试验

选取和实体工程一致的预应力钢束进行模拟灌浆试验,灌浆完成 80h 后且浆体强度满足设计要求后,模拟管道开窗和切割,检查孔道密实情况,开窗位置在管道的顶部,切割面应垂直于管道轴线方向,检查灌浆是否密实,本工程选取曲率最大的 H41 为试验钢束,在试验场地搭设脚手架,根据设计图纸模拟 H41 管道安装,用钢管代替所有波纹管,管道接口处采用焊接密封,模拟混凝土包裹管道,以满足管道密封要求。按以上灌浆流程进行现场施工,符合设计要求,一次成功,验证了灌浆方案的可靠性。

### 2.5.2 气密性试验

使用密封件对预应力钢束两端进行密封,进行气密性试验。采用分三级加压的试验方法,压力下降速率满足要求后启动预应力灌浆作业。

### 2.5.3 浆体制备

无粘结预应力系统中首次应用成品灌浆料,制浆工艺从传统的二次搅拌优化为一次搅拌成型,搅拌时间从传统的每罐 50min 优化到 10min,制浆能力从传统的每罐 0.5m<sup>3</sup> 增加到 1.5m<sup>3</sup>。浆体技术性能稳定,搅拌后 8h 内浆体流动度控制在 9~13s。成

品灌浆料制备的浆体性能参数为氯离子含量 0.02%,芯部泌水全被吸收,初凝 45h,终凝 47h,密度 1.97g/cm<sup>3</sup>,温度为 21℃,7d 抗压强度为 55.2MPa。

### 2.5.4 孔道灌浆

1)倒 U 形钢束灌浆:结合密封件承载力及钢束区域,倒 U 形钢束灌浆分为 3 个阶段,先后为灌锚垫板、竖直部分、穹顶部分。竖直部分在锚垫板部分灌浆完成后至少 72h 进行,穹顶部分灌浆在竖直部分灌浆完成后至少 24h 进行。倒 U 形钢束灌浆如图 5 所示。

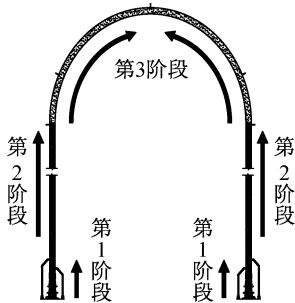


图 5 倒 U 形钢束灌浆各阶段

Fig. 5 Grouting for inverted U-shaped steel bundles

2)环向钢束灌浆:环向钢束只需 1 次灌浆。遵循“最低点灌浆,最高点排浆,钢束端测试流动度”的原则。

## 2.6 张拉

### 2.6.1 张拉设备

按规定对千斤顶及相应传感器或者压力表进行定期校核、检验。使用尼龙绳线锯割除钢绞线的 HDPE 护套后安装锚具及千斤顶。监测钢束的锚具及千斤顶需在测力传感器安装固定后进行安装。结合无粘结预应力特性,研发应用国产千斤顶,其性能稳定,可实现压力及伸长值自动测读和数据远程传输功能,测量精度高,避免人工测读误差。

### 2.6.2 预应力摩擦试验

#### 1) 试验原理

根据预应力摩擦试验结果修正张拉应力及钢束的理论伸长值。钢束两端分别安装压力传感器和千斤顶。一端千斤顶先对钢束一端施加拉力,称为主动端,另一端千斤顶后施加拉力,称为被动端。记录两端的张拉压力及伸长值。依据被动端的张拉压力及伸长值绘制被动端伸长值,计算 2 段线性回归方程,2 段线性方程形成的交点即为实际脱离索力值。

当伸长值在设计理论计算伸长值的范围之间时,可按下述公式计算摩擦系数。

$$\mu = \frac{-\ln(k_r) - kx}{\theta} \tag{1}$$

式中: $\mu$  为摩擦系数; $k_r$  为传输系数,即被动端实测压力与主动端压力的比值; $k$  为摆动系数,由深化设计提供( $\text{m}^{-1}$ ); $x$  为预应力束长度( $\text{m}$ ),由深化设计提供; $\theta$  为偏向角( $\text{rad}$ )。

2) 试验结果

试验结果如表 1 所示。

表 1 钢束试验结果

Table 1 Test results of steel strands

试验钢束号	V <sub>1</sub>	V <sub>5</sub>	H <sub>1</sub>	H <sub>5</sub>
实际总伸长值/mm	1 102	1 172	1 048	965
理论总伸长值/mm	1 045	1 132	1 013	1 013
伸长值误差/%	5.45	3.53	3.46	-4.74
传输系数 $k_r$	0.777	0.738	0.718	0.640
实际摩擦系数 $\mu_r$	0.022	0.038	0.028	0.045
理论摩擦系数 $\mu_r$	0.05	0.05	0.05	0.05

由表 1 可知,钢束伸长值误差均在-5%~10%范围内,伸长值满足设计要求。所有试验钢束摩擦系数均<0.05,与内安全壳强度分析采用的数值相同,摩擦系数满足原设计要求。

2.6.3 测力传感器安装

监测钢束在张拉前需安装测力传感器。单机组共有 8 台预应力传感器,分别在 2 束环向监测钢束和 2 束倒 U 形监测钢束的两端各布置 1 台测力传感器。测力传感器安装如图 6 所示。

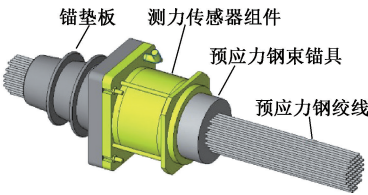


图 6 测力传感器安装

Fig. 6 Installation of force sensor

2.6.4 钢束张拉

1) 整体张拉

按照设计要求,每束钢绞线要达到 12.276MN 的拉应力。张拉力通过千斤顶两端同时施加荷载进行控制,并使用理论伸长值进行校核。采用分级张拉荷载或压力进行计量的方式。张拉主要分为 4 个阶段:初级阶段、加压阶段、警戒阶段、最终阶段。

2) 单根张拉

外壳穹顶吊装后,受外壳穹顶支撑牛腿和钢肋板的影响,施工空间狭小,预应力施工平台无法运行至穹顶区域,采用单根张拉千斤顶进行分级张拉,一端逐根将钢绞线张拉至目标压力后更换为另一端,重复上述操作直至到达最终压力( $F$ )。张拉

主要分为 3 个阶段:25% $F$ ,50% $F$ ,100% $F$ 。

2.7 封锚

1) 保护帽安装:预应力束两端均预留长度 1.2m,保护帽通过密封圈及螺栓固定在锚板上,以保护钢绞线。保护帽在灌蜡进出口上配有 2 个螺纹盖。当环向钢束安装保护帽时,灌蜡出口应朝上布置。

2) 石蜡灌注:将加热熔化的石蜡通过灌蜡泵从保护帽进口注入,直至出口有石蜡溢出,随即封闭阀门完成灌注。

3) 防火材料安装:防火材料分为隔热板及防火帽。防火帽外部为防火层,内部为钢结构框架,该钢结构框架预先设计有 4 个螺栓孔以便固定安装。隔热板及防火帽通过螺栓固定于预应力锚垫板端面预留的螺栓孔中。安装完成后,防火材料表面不得有严重破损。

3 结语

本核电项目核岛反应堆厂房是国内首个采用无粘结预应力技术的核岛工程,通过无粘结预应力技术在核岛安全壳结构中研发与应用,在预应力施工工艺、新型灌浆料的研发与应用、预应力孔道摩擦系数精确测定方法、无粘结预应力施工装备研发与应用等一系列关键技术上取得突破,形成了系统性、自主化的反应堆厂房无粘结预应力系统施工成套技术,推动预应力系统施工技术进步。研究成果如下。

1) 研发出先灌浆后张拉的预应力施工方法,创新采用先吊装外壳钢穹顶,再进行内壳预应力施工的新工艺。通过预应力张拉平台分阶段提前安装,达到水平张拉设备提前预引入、水平钢束灌浆及张拉作业后施工的目的,同时采用单根千斤顶技术进行穹顶段水平钢束的精密张拉作业,解决了预应力施工与外穹顶施工相互制约的问题。

2) 新型成品灌浆料首次应用。无粘结预应力钢束孔道直径长达 220mm,浆体灌注量大大增加。但在灌浆施工过程中存在水泥和外加剂性能不匹配导致浆体参数波动、水泥浆体运输距离远、制浆工艺效率低的问题,严重影响施工效率。为解决该难题,通过与专业科研单位合作,成功完成预应力成品灌浆料的研发与应用。预应力成品灌浆料加水搅拌均匀即可使用,相比水泥加外加剂方案,单机搅拌时间可缩短 80%,浆体流动性保持时间超过 10h,且无泌水、微膨胀、强度高、性能稳定,通过模拟灌浆试验成功应用,满足核岛安全壳预应力工程的施工要求。凭借其简便的浆体配制流程、良好的

流动性和早期强度,预应力灌浆的施工效率可提升30%以上,同时确保灌浆质量稳定可靠。

3)研发了预应力孔道摩擦系数精确测定方法,简化摩擦试验流程,减少了试验数据的偏差,测定结果更接近实际工况,所有试验钢束摩擦系数均<0.05,与内安全壳强度分析采用的数值相同。

参考文献:

[ 1 ] 王祥德. 田湾核电站安全壳预应力管道施工技术[J]. 山西建筑,2021,47(1):93-95.  
WANG X D. On prestressed pipeline construction technique for containment of Tianwan Nuclear Power Plant [ J ]. Shanxi architecture,2021,47(1):93-95.

[ 2 ] 张大魏. 某核电站反应堆双层安全壳结构施工关键技术研究[D]. 南京:东南大学,2019.  
ZHANG D W. Research on key construction technology of double containment structure for a nuclear power plant reactor [ D ]. Nanjing:Southeast University,2019.

[ 3 ] 张波,彭建兵. 核电站安全壳 1200t 级预应力综合施工技术[J]. 江苏建筑,2020(4):9-11.  
ZHANG B,PENG J B. Comprehensive construction technology of 1200ton prestressing concrete for nuclear power plant containment [ J ]. Jiangsu construction,2020(4):9-11.

[ 4 ] 段宝平,雷学玲,管基海,等. 环状立体双向双螺旋无粘结预应力空心板车道关键施工技术[J]. 施工技术,2020,49(16):55-58,65.  
DUAN B P, LEI X L, GUAN J H, et al. Key construction technology of circular solid bidirectional double helix unbonded prestressed hollow-slab carriageway[ J ]. Construction technology, 2020,49(16):55-58,65.

[ 5 ] 蔡彪,刘军,李斌,等. 核电站大尺寸薄壁钢衬里底板施工技

术[J]. 施工技术(中英文),2022,51(22):67-71.  
CAI B,LIU J,LI B,et al. Construction technology on bottom plate of thin steel liner with large dimension in nuclear power plants [ J ]. Construction technology,2022,51(22):67-71.

[ 6 ] 汪虎,邹少俊,张海方. 华龙一号核电站内层安全壳穹顶施工技术[J]. 施工技术(中英文),2022,51(9):130-134.  
WANG H,ZOU S J,ZHANG H F. Construction technology of inner containment vessel dome for HPR1000 nuclear power plant [ J ]. Construction technology,2022,51(9):130-134.

[ 7 ] 孙乐. EPR 核电站内安全壳穹顶施工稳定性研究[ D ]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.  
SUN L. Construction stability analysis of inner containment dome of the EPR[ D ]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2016.

[ 8 ] 王洋洋. 基础筏板大体积混凝土温度场分析及施工控制[ J ]. 施工技术(中英文),2023,52(22):111-114,120.  
WANG Y Y. Temperature field analysis and construction control for mass concrete of foundation raft[ J ]. Construction technology, 2023,52(22):111-114,120.

[ 9 ] 杜彦东,张季超,李瑞祥,等. 明挖隧道衬砌大体积混凝土水化热温控技术研究[J]. 施工技术(中英文),2024,53(24):74-77.  
DU Y D,ZHANG J C,LI R X,et al. Hydration heat temperature control technology of mass concrete lining of open-cut tunnel[ J ]. Construction technology,2024,53(24):74-77.

[ 10 ] 李志鹏,罗奇星,韩庆华,等. 大体积混凝土墙水化放热温度场分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2023,56(8):878-885.  
LI Z P,LUO Q X,HAN Q H,et al. Analytical solution for the temperature field of the hydration heat in a mass concrete wall [ J ]. Journal of Tianjin University ( science and technology ), 2023,56(8):878-885.

(上接第 83 页)

[ 2 ] 马欣伯,娄霓,冯仕章,等. 我国模块建筑的发展与应用[J]. 建设科技,2023(12):12-16.  
MA X B,LOU N,FENG S Z,et al. Development and application of module building in country [ J ]. Construction science and technology,2023(12):12-16.

[ 3 ] 岳清瑞,吴朝昀,刘晓刚,等. 多高层模块化结构及建造技术研究进展与未来趋势[J]. 建筑结构学报,2024,45(8):1-19.  
YUE Q R,WU Z Y,LIU X G,et al. Progress and future trends in development of multi-story and high-rise modular structures and construction technology[ J ]. Journal of building structures,2024,45(8):1-19.

[ 4 ] 赵春婷,朱宏利,潘磊. 钢框架模块化建筑适应性设计实践[J]. 城市建筑空间,2024,31(10):118-120.  
ZHAO C T,ZHU H L,PAN L. Practice of adaptive design for steel frame modular building[ J ]. Urban architecture space,2024,31(10):118-120.

[ 5 ] 陈晓旭,陈兆荣,陈戊荣,等. 模块化薄壁轻钢建筑研究——以集装箱建筑为例[J]. 城市建筑空间,2023,30(8):120-122.

CHEN X X,CHEN Z R,CHEN W R,et al. Modular thin-walled light steel building:taking container building as an example[ J ]. Urban architecture space,2023,30(8):120-122.

[ 6 ] 闫清峰,张纪刚,王涛,等. 预制预装修模块化建筑连接节点抗震性能[J]. 吉林大学学报(工学版),2023,53(2):505-514.  
YAN Q F,ZHANG J G,WANG T,et al. Seismic performance of connection joints between prefabricated prefinished volumetric construction [ J ]. Journal of Jilin University ( engineering and technology edition ),2023,53(2):505-514.

[ 7 ] 杨浩文,薛伟辰,江佳斐. 模块化混凝土结构抗震性能研究进展[J]. 施工技术(中英文),2024,53(6):1-8,71.  
YANG H W,XUE W C,JIANG J F. Research progress on seismic performance of modular concrete structures [ J ]. Construction technology,2024,53(6):1-8,71.

[ 8 ] 孟辉. 混凝土模块化集成建筑吊装系统设计及安装关键技术研究[J]. 广东土木与建筑,2022,29(3):58-60,74.  
MENG H. Design of concrete modular integrated building hoisting system and the key technology of installation [ J ]. Guangdong architecture civil engineering,2022,29(3):58-60,74.