

核电厂安全壳预应力锚具静载试验

苏强 朱万旭 唐小萍 杨青 黄颖 兰进军

(柳州欧维姆机械股份有限公司 柳州 545005)

摘要:核电厂安全壳大吨位预应力锚固系统是核电站安全壳施工中重要的、复杂的部分,锚具的静载锚固性能通过钢绞线—锚具组装件的静载试验来衡量。根据核电设计单位要求,核安全壳预应力锚具静载试验时应模拟实际工况,在端部增加砣锚固块,这与常规锚具静载试验相比,钢绞线在砣锚固块处产生弯折,这大大增加了试验的难度。本文介绍模拟实际工况下核安全壳预应力锚具的静载试验,试验的成功促使了国产核电预应力锚具的应用。

关键词:安全壳 预应力锚具 静载试验 锚具效率系数

1 概述

为确保安全,核电厂主厂房的围护结构设计成密闭的保护屏障称作安全壳,它是核电安全的最后一道屏障,在万一出现严重失水事故时能有效地密闭放射性物质的泄漏,使周围环境免遭污染。安全壳一般是带浅穹顶有环梁及平板的立式园筒形组合壳体结构。核电站安全壳为后张预应力混凝土结构,预应力系统包括竖向、环向和穹顶预应力系统三部份。尽管国内的预应力技术到目前为止有了长足发展,设计、建造了很多大型特殊预应力工程,但在核电领域内,预应力产品一直被国外公司垄断,这主要是因为过去国内预应力企业的产品在性能上、质量控制等方面都无法达到核电工程的高要求。随着我国核电建设自主化呼声越来越高,作为国内预应力行业最大的生产厂家,我公司二十年来一直致力于核电工程用预应力锚具的完善改进,希望能促进我国核电预应力领域的自主化。结合正在建设的秦山方家山、福清核电厂工程,根据核电标准顺利通过了各项试验,并建立起了满足核电要求的质保体系。

秦山方家山、福清核电厂安全壳预应力系统由竖向、环向和穹顶预应力系统三部份组成。竖向预应力系统:每一反应堆的竖向预应力系统使用144束钢束,每束为36股钢绞线,采用一端张拉的施工方式,个别曲率较大的钢束采用另一端补张拉,其中包括灌油束4束用于预应力系统在

役检查。环向预应力系统:每一反应堆的环向预应力系统使用223束钢束,每束为19股钢绞线,采用两端张拉方式。穹顶预应力系统:每一反应堆的穹顶预应力系统使用174束钢束,每束为19股钢绞线,采用两端张拉方式。核电系列锚具主要由灌浆帽、锚固块、夹片、承压板、喇叭口、灌浆连接器及灌浆管件组成,如图1所示。为确保锚具具有可靠的锚固性能,我公司对锚具进行了大量的试验研究,在各项试验中,静载试验是最重要、要求最高的一项试验,本文对静载试验作详细阐述,借此以期促进我国预应力锚具技术的进步。

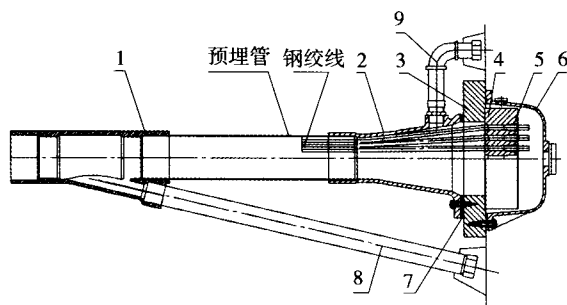


图1 欧维姆核锚系列锚具

- 1.灌浆连接器 2.喇叭口 3.承压板 4.锚固块 5.夹片
6.灌浆帽 7.密封垫 8.直管灌浆组件 9.弯管灌浆组件

2 试验方案

2.1 试验用标准

试验的目的是检验欧维姆核电系列锚具在模拟实际工况的条件下,与不同钢绞线组成组装件进行静载试验,验证试验是否满足方家山、福清核电项目技术规格书《安全壳预应力系统锚固系

统》中的相关条文要求。静载试验的主要要求是锚具效率系数 ≥ 0.95 ，延伸率 $\geq 2\%$ 。

静载试验按国标上的最高要求FIP1993《后张预应力体系验收建议》进行，其中锚具效率系数 η_A 按以下公式计算：

$$\eta_A = \frac{F_{TU}}{F_{pm}}$$

F_{TU} —预应力筋—锚具实测极限抗拉力

F_{pm} —预应力筋的实际平均极限抗拉力

而我国的国家标准GB/T14370-2007《预应力筋用锚具、夹具和连接器》的锚具效率系数 η_a 按以下公式：

$$\eta_a = \frac{F_{apu}}{\eta_p \times F_{pm}}$$

η_p —预应力筋的效率系数

η_p 的取用：预应力筋—锚具组装件中预应力钢材为1至5根时， $\eta_p = 1$ ，6至12根时 $\eta_p = 0.99$ ，12至19根时 $\eta_p = 0.98$ ，20根以上时 $\eta_p = 0.97$ 。

因FIP1993计算锚具效率系数 η_A 时没有考虑预应力筋的效率系数 η_p 的影响，所以试验的要求比我国的国家标准GB/T14370-2007要求高，难度大。锚具孔位越大，相应的难度越高：对于19孔锚具 $\eta_p = 0.98$ ，对于37孔锚具 $\eta_p = 0.97$ 。

2.2 试验用钢绞线

试验所要配套的钢绞线必须满足BS5896-1980或Euronorm138-79标准，钢绞线由7根钢丝组成，直径为15.7mm，断面积150mm²，强度为1770MPa级，最小抗拉强度为265kN，伸延率保证值为3.5%，松弛率要求0.7Fr，1000小时小于2.5%。钢绞线选用的是江西新华金属制品有限责任公司、江阴华新钢缆有限公司生产的钢绞线。由中国核电工程有限公司、中国核工业第二十二建设公司方家山核电项目部、中国核工业第二十四建设公司福清核电项目部、柳州欧维姆机械股份有限公司共同见证对钢绞线进行抽样。

抽样后对钢绞线进行母材试验，测量钢绞线的实测极限拉力、延伸率、弹性模量等指标，用于试验的钢绞线必须符合设计要求，母材试验合格后按试验所需长度进行切割下料。经测量，江

西新华金属制品有限责任公司生产的钢绞线母材实测极限拉力为266.2kN；江阴华新钢缆有限公司生产的钢绞线母材实测极限拉力为297.8kN。两种钢绞线母材实测极限拉力都满足大于265kN的要求，但两者强度相差很大，相对应的抗拉强度分别为1775MPa与1985MPa，这对锚具的配套试验提出了更高要求。

2.3 试验用锚具

锚具为柳州欧维姆机械股份有限公司研制生产的核电系列锚具，规格为19孔与37孔。根据试验大纲对试验锚具进行抽样，检测锚具各主要参数，抽样的锚具必须符合设计要求。根据试验需要，抽样的19孔锚具与37孔锚具各12套。由中国核电工程有限公司、中国核工业第二十二建设公司方家山核电项目部、中国核工业第二十四建设公司福清核电项目部、共同见证对锚具进行抽样。

2.4 砵锚固块制作

为模拟实际工况，我们先根据施工图制作试验用的砵锚固块，砵锚固块如图2所示，其断面尺寸、配筋情况、强度级别根据实际工程中锚固区的情况确定，根据试验需要制作19孔与37孔两种砵锚固块。试验时钢绞线要穿过砵锚固块再与锚板组装，因此，喇叭口内部的钢绞线是发散的，钢绞线在喇叭口小端，即喇叭口与预埋管连接处发生弯折挤压，且在锚板的锚固处也存在同样角度的弯折挤压。在弯折处，钢绞线产生应力集中，如应力集中过大，钢绞线很容易提前被剪断，试验很难达到标准要求。与常规锚具试验相比（不用配套安装锚下部件，试验过程中钢绞线平行无弯折挤压，无应力集中），这无疑又大大增加了试验的难度。

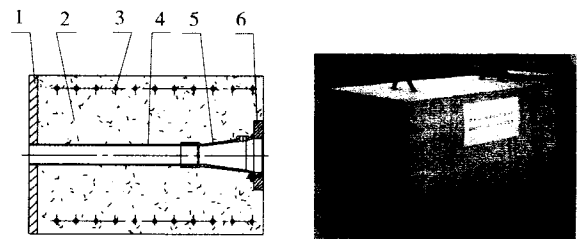


图2 砵锚固块

1 钢板 2 砵 3 辅助钢筋 4 预埋钢管 5 喇叭口 6 承压板

3 试验过程

按试验方案准备工作全部完毕后开始试验，试验按下图3进行组装，注意各根钢绞线穿束时不能打绞；安装1工具锚与2千斤顶前，用单根张拉千斤顶对每根钢绞线进行预紧，预紧力取钢绞线抗拉强度标准值 f_{ptk} 的5%~10%，预紧后再装上2千斤顶与1工具锚，在此端用施工时将采用的千斤顶按其理论破断力的20%、40%、60%、80%分级加载，加载速度为100MPa/每分；加载到理论破断力的80%后进行锚固，千斤顶卸载，放张锚固后在另一端用10千斤顶加载回至80% f_{ptk} 并保压锚固一小时，保压后在组装件的另一端用10千斤顶逐渐加载至钢绞线破断。试验现场如图4所示。

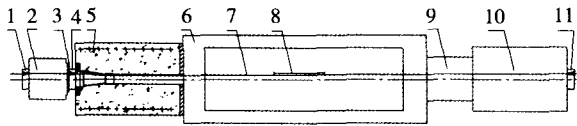


图3 静载试验组装

- 1 工具锚 2 千斤顶 3 限位板 4 试验锚具 5 砣锚固块
6 承力台座 7 钢绞线 8 测量总应变的装置 9 荷载传感器
10 千斤顶 11 试验锚具



图4 试验现场

试验过程中进行以下观察与测量：

(1) 每加一级时测量记录每级活塞的伸长量、夹片相对位移 Δr 和钢绞线的相对位移 Δs （测两付夹片与两根钢绞线），如图5所示；

(2) 记录荷载-延伸图，在试验过程连续记录。为直观地了解荷载与延伸的变化，试验时用一套多功能锚具静载试验系统把荷载-延伸图直接显示在计算机上（图6）；

(3) 记录极限力 F_{TU} 和在极限力时钢绞线自由长度的延伸率 ε_{apu} 。

极限力 F_{TU} 可以从荷载传感器的显示仪表上读取，也可以从计算机上直接读取；延伸率 ε_{apu} 可以从安装在钢绞线上的测量总应变的装置读取，也可以在计算机上直接读取。

(4) 记录破坏位置与形式。

(5) 最后拆卸锚具部件、拍摄图片、检查各组件。

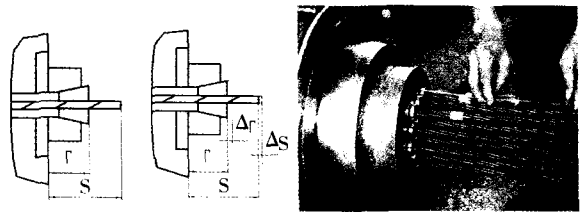


图5 加载中相对位移测量

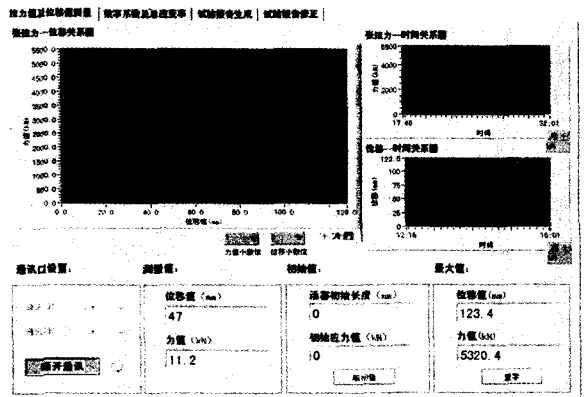


图6 荷载-延伸图

4 试验结果与分析

4.1 静载性能指标结果

每一组试验的锚具效率系数及延伸率完全满足FIP1993的要求，锚具效率系数 η_A 大于95%，延伸率 ε_{apu} 大于2%，不同厂家钢绞线与欧维姆核电系列锚具的试验结果如表1所示。

4.2 夹片与钢绞线位移情况

测量记录的夹片相对位移 Δr 和钢绞线的相对位移 Δs 随着拉力的增加均匀增加，且在持荷期间保持稳定，夹片跟进平整，这表明钢绞线在试验过程中没有失锚滑动且试验锚具没有发生过的塑性变形。

表1 锚具效率系数与延伸率

项目	江西新华钢绞线						江阴华新钢绞线					
	锚具效率系数 η_A			延伸率 ε_{apu}			锚具效率系数 η_A			延伸率 ε_{apu}		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
19孔锚具	0.98	0.96	0.97	3.6%	2.9%	3.6%	0.96	0.97	0.97	3.5%	2.8%	3.6%
37孔锚具	0.98	0.97	0.97	3.6%	3.3%	3.3%	0.97	0.97	0.96	3.4%	3.2%	3.6%

4.3 锚具表象

试验后从拆开的夹片看,夹片无碎裂,锚固块没有出现过大的塑性变形(图7)。



图7 试验后的夹片与锚固块

4.4 钢绞线断口情况

钢绞线的断口大部分为颈缩(图8),少数为斜口,断口位于喇叭口小端处或锚固块外圈孔口出口处,这两处正是钢绞线受弯折挤压的地方。颈缩的断口及最后的锚具效率系数与延伸率表明:即使钢绞线存在弯折,通过合理的设计,也可以使试验较好地满足标准要求。我们通过大量的试验研究表明,如设计合理,试验能够满足FIP1993要求。

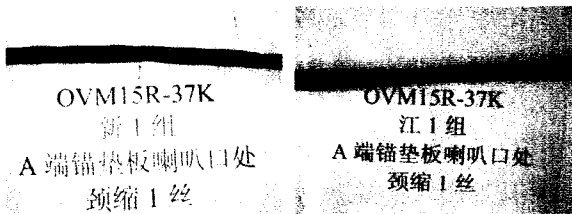


图8 钢绞线断口

4.5 承压板与锚固块情况

试验后检查承压板、砧锚固块完好(图9)。

5 试验总结

通过欧维姆核电系列锚具与不同钢绞线的配套静载试验,表明欧维姆核电系列锚具具有优异的静载锚固性能,能很好地满足核电工业的高标准要求:

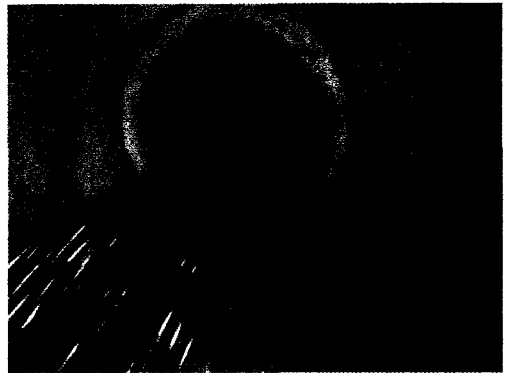


图9 试验后承压板、砧锚固块端面

(1) 锚具和钢绞线组装件静载试验满足国际上的最高标准: FIP1993《后张预应力体系验收建议》的要求;

(2) 在模拟实际工况的苛刻试验条件下(钢绞线在试验过程中产生弯折),试验同样也能满足FIP1993要求;

(3) 与两种强度差别很大的钢绞线配套试验表明,欧维姆核电系列锚具有很强的配套适应性。

欧维姆核电系列锚具的静载试验成功,标志着我国在核电预应力领域自主化方面迈出了坚实一步,促进了国产预应力锚具在核电工程的应用。

参考文献

- [1] GB/T14370-2007《预应力筋用锚具、夹具与连接器》[S].
- [2] FIP1993《后张预应力体系验收建议》[S].
- [3] 郝发领. 大吨位预应力后张拉施工技术[J]. 核电期刊, 2002, 4.
- [4] 龚振斌. 岭澳核电站安全壳预应力工程简介[J]. 结构工程师增刊, 2000, 12.
- [5] 夏祖讽, 王明弹, 黄小林, 王晓雯. 百万千瓦级核电厂安全壳结构设计与试验研究[J]. 预应力技术, 2005, 6.