

## 尼尔基厂房混凝土蜗壳采用低掺率聚丙烯纤维限裂和抗渗的尝试

王琛<sup>1</sup>, 李军<sup>1</sup>, 史小兴<sup>2</sup>

1, 中水东北勘测设计研究有限责任公司;

2, 中国纺织科学研究院

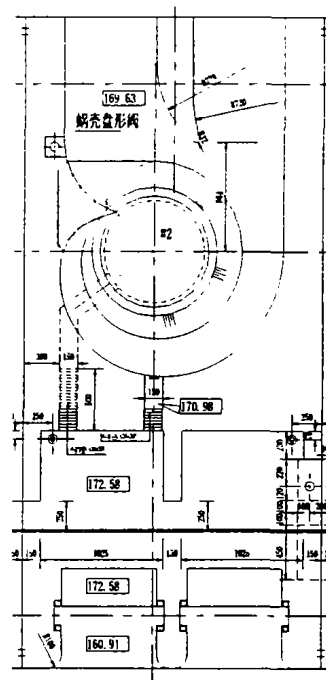
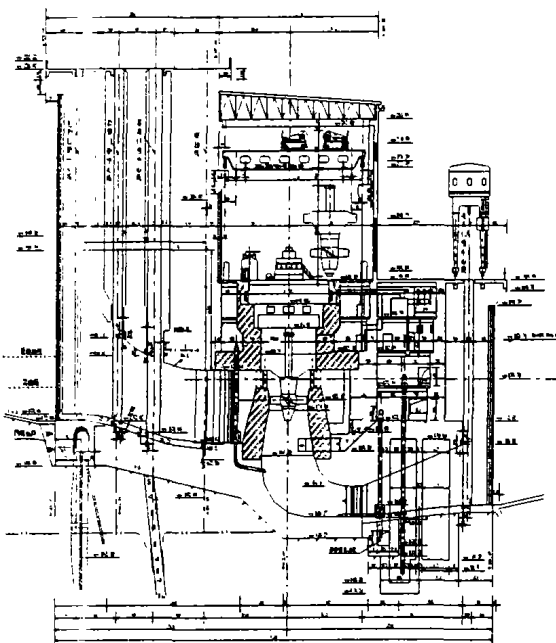
**摘要:** 测试和应用了低掺率聚丙烯纤维混凝土的抗裂和抗渗性能。通过和普通混凝土对比后得出结论: 低掺率的聚丙烯纤维能有效提高混凝土的限裂和抗渗能力, 改善钢筋混凝土蜗壳的抗渗效果, 说明了聚丙烯纤维对大级配混凝土的适应性。

**关键词:** 聚丙烯纤维混凝土; 抗裂; 限裂; 抗渗; 混凝土级配

### 1 概述

尼尔基水利枢纽位于黑龙江省与内蒙古自治区交界的嫩江干流上, 在内蒙古自治区莫力达瓦达斡尔族自治旗境内。枢纽工程建筑物等级为 I 等 1 级。发电部分为河床式厂房, 装有 4 台 62.5MW 的轴流转浆式水轮发电机组, 单机引用流量 326.9m<sup>3</sup>/s, 总装机容量 250MW。主厂房尺寸(长×宽×高)为: 149×72×64.65m, 机组间距 25m, 安装间布置在主机间左侧端部, 4 台机组间及主机间与安装场间各设一道结构缝。蜗壳混凝土浇筑方量约 2.9×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup> 左右。

水电站机组工作水头范围为 9.91m~33.2m。蜗壳采用钢筋混凝土蜗壳, 流道范围内最大平面宽度 18.4m, 进口断面最大高度 9.98m, 蜗壳顶板厚度 2.60m, 顶板底面设置有防渗钢板。按水库正常蓄水位 216.00m 计, 底板作用水头为 46.37m, 最大压力上升 56.0m, 流道断面尺寸及内水压力均较大。



## 2 蜗壳结构混凝土开裂分析与评价

钢筋混凝土蜗壳的限裂和防渗一直是设计难点。根据当前国内现行规范的要求，钢筋混凝土蜗壳设计不能满足规定的限裂要求时，蜗壳内壁应增设防渗层。而在结构方面，针对钢筋混凝土蜗壳结构的内力分析，仍然以简化为平面框架计算的方法为主，大型蜗壳结构的内力分析则辅以三维有限元计算或结构模型试验的方式，而直接以应力分析成果配置钢筋与现行设计规范不相匹配。

混凝土蜗壳为空间结构，断面为不规则梯形。尤其是大型蜗壳，进口段跨度大，侧墙高，受力条件复杂。针对尼尔基厂房设计，蜗壳结构设计时进行了相应的平面结构及三维有限元结构计算分析，且顶板底部设有钢板。计算分析表明，蜗壳顶板和侧墙的应力较大，尤其是进口一定角度内的断面跨度较大，应力水平较高。局部应力集中问题严重，尤其是在角隅处的应力集中明显。最大应力大大超出了混凝土的抗拉强度，必须进行大量的结构配筋和抗（限）裂配筋。另外，蜗壳顶部钢板的结构作用不明确且不显著。由于按有限元计算的应力进行配筋尚属非规范方法，蜗壳结构配筋设计系结合应力图形和平面结构计算分析进行的。

对于大型混凝土蜗壳，内水压力作用下的应力均较高，容易引起混凝土开裂。另外，施工期混凝土的离析、塑性变形、碳化收缩、干缩、温升及运行期水温的变化也是蜗壳混凝土裂缝的主要诱因。因此，除混凝土强度设计外，混凝土蜗壳的设计主要着眼于抗裂和限裂是十分必要的。

尼尔基发电厂房为河床式厂房，其蜗壳结构特性与东北地区同等规模的红石、太平湾等大型河床式电站厂房进行比较可知，尼尔基厂房蜗壳结构净跨尺寸及内水压力均为最大，而顶板则是三者中最薄的。根据对上述已建工程的调查研究结果表明（见表1），各电站的混凝土蜗壳均存在不同程度的渗漏现象。我们知道，大型混凝土蜗壳结构不仅需要进行各种工况的结构分析，而且需要进行结构本体的抗裂和限裂验算。而限裂要求对于水头（或水力梯度）大小不同的结构，因其各自结构尺寸和内压大小的不同，通过计算有的能够达到，如太平湾厂房的混凝土蜗壳，而达到符合规范限裂要求的代价是配置限裂钢筋；有的则达不到，如红石厂房的混凝土蜗壳，故此该厂房的蜗壳采用了全钢板（衬）护砌防渗，但由于未对结构进行限裂配筋，另由于蜗壳浇筑时侧墙钢衬和混凝土的密实性、整体性较差，故而导致该电站蜗壳在运行期间产生钢衬起鼓和漏水，进而直接影响机组的正常运行。后对其进行相应的补强处理后才得以正常使用。但是，上述混凝土蜗壳仍然存在不同程度的渗漏问题。实践证明，由于蜗壳结构的特殊性，限裂钢筋直径、间距受到结构配筋及混凝土级配、浇筑施工的限制，总体的限裂效果不好，所以混凝土蜗壳出现开裂的情况仍是较多的，也是较为普遍的。由于裂缝的产生，蜗壳渗漏成为设计和施工的一大问题。故此，在混凝土蜗壳一定范围采用抗（限）裂纤维材料成为必要和经济的选择和尝试，经初步在金哨水电站工程混凝土蜗壳顶板部位的局部试用，观察证实，聚丙烯纤维混凝土可以有效地防止裂缝的出现和扩展。

## 3 聚丙烯纤维增强混凝土的性能分析

目前国内在水利水电行业应用较多的主要为钢纤维混凝土，钢纤维作为一种较为实用且规范性的材料，其性能指标是非常优越的，应用及推广均有章可循，但因其其在混凝土单位体积中的造价较高且规范中对混凝土级配有较为严格的要求，难以适应较大体积的混凝土浇注。而作为一种造价更为低廉的混凝土新型增强材料——聚丙烯纤维也同样具有与钢纤维一样好的性能指标。

表1 东北地区大型河床电站混凝土蜗壳比较表

特性指标	电站名称	尼尔基水利枢纽发电厂房	红石水电站发电厂房	太平湾水电站发电厂房	备注
单机容量	MW	63.8	50	47.5	
单机流量	m <sup>3</sup> /s	317.5	251	455	
水轮机型号		ZZA883-LH-640	ZDA190-LH-600	ZZ560a-LH-800	
最大水头	m	33.2	25.6	15.5	
最小水头	m	9.91	22.8	12.3	
设计水头	m	22.0	23.3	12.6	
蜗壳内最大压力上升	m	56.0	38.8	35.4	
机组段长度	m	25.0	22.0	28.0	
边墙厚度	m	3.3	3.0	2.5	
顶板厚度	m	2.57	3.3	4.43	
中墩厚度	m	3.0	2.4	2.5	
蜗壳进口处单孔净跨	m	7.7	6.8	6.0	
蜗壳最大高度	m	10.0	9.3	12.0	
有否钢衬		仅顶板有	有*	无	*88年#2机钢衬漏水并起鼓经处理
配筋控制情况		限裂	限裂*	限裂	*未考虑限裂(加钢衬)
渗漏情况		在建	有	有	
有否加纤维		有	无	无	

根据国内一些试验室以往所作的试验表明,用聚丙烯纤维来控制混凝土裂缝,其性能主要与其在混凝土中的体积率有关,其掺量远低于钢纤维所要求的体积率(0.6%-2%),当体积率达到0.1%时,混凝土收缩值大幅降低,当聚丙烯纤维体积率大于0.3%便会产生许多不可见的裂纹体系。与不掺聚丙烯纤维的情况相比,裂缝宽度大大减小,阻裂能力可以提高一个数量级。同时,聚丙烯纤维具有很高的抗碱性能,在碱性水泥基中可长期保持它的强度,长期暴露于水中其材料强度并不降低。另外根据最新统计资料显示,国内具有自主知识产权的凯泰(CTAFiber)混凝土专用改性聚丙烯纤维在-78℃的严寒气温中仍然能够保持上述性能。

表2 钢纤维及聚丙烯纤维在混凝土中的体积率比较

材料	比重	单位体积用量	推荐用量(kg/m <sup>3</sup> )	适用范围
钢纤维	7.85	0.6%~2%	80~120	一级配混凝土
聚丙烯纤维	0.91	0.1%	0.9	一、二级配及以上

参照国内同行业各试验室的试验方法,由中水六局试验室针对中国纺织科学研究院提供的凯泰(CTAFiber)混凝土专用改性聚丙烯纤维样品进行了纤维增强混凝土的各项性能试验。原材料如下:水泥采用抚顺水泥厂生产的#525中热水泥,粗、细骨料采用筛分系统生产的人工碎石和天然砂,外加剂采用引起减水剂,凯泰(CTAFiber)混凝土专用聚丙烯纤维掺量为每立方米混凝土0.7kg,凯泰(CTAFiber)混凝土专用改性聚丙烯纤维性能见表3。试配混凝土配合比及试验成果见表4、5。

表3 凯泰 (CTAFiber) 混凝土专用改性聚丙烯纤维性能

纤维长度	19mm	当量直径	48 μ m
密度	0.91g/m <sup>3</sup>	抗拉强度	≥400MPa
熔点	约 160℃	弹性模量	≥3500 MPa
燃点	约 580℃	断裂延伸率	15—25%
导热性	极低	安全性	无毒材料
抗碱能力	PH=14 的 NaOH 溶液, 60℃水浴, 48h 后抗拉强度的保持率大于 99%		
抗老化性	纤维经过了特殊的抗老化处理		
抗低温性	经-78℃实验检测纤维性能无变化		

表4 试配混凝土配合比

样品	设计号	砂率 (%)	水灰比 w/c	坍落度 (cm)	每立方米混凝土用量 (kg/m <sup>3</sup> )					外加剂 (%)
					水泥	砂	粗骨料		水	
							5-20mm	20-40mm		
掺纤维	C25W6	40	0.42	16.4	359	731	548	548	150	0.7
不掺纤维	C25W6	40	0.42	17.2	359	734	550	550	151	0.7

表5 试配混凝土性能试验成果

样品	含气量 (%)	抗压强度 MPa			劈拉强度 MPa			极限拉伸值 10 <sup>-4</sup>		弹性模量 10 <sup>4</sup> MPa			抗渗标号
		7d	28d	90d	7d	28d	90d	28d	90d	7d	28d	90d	
掺纤维	3.45	31.9	37.3	39.8	2.3	3.48	4.68	1.14	1.28	3.06	3.35	4.13	≥10
不掺纤维	3.26	27.9	34.2	36.2	2.2	2.88	3.98	0.96	1.12	3.16	3.46	4.25	≤8

抗裂试验用胶砂的重量配合比为: 水泥 1, 砂 2.8。水胶比 0.55, 凯泰 (CTAFiber) 混凝土专用改性聚丙烯纤维掺量 0.7kg/m<sup>3</sup>, 板状试件尺寸 610×914×19mm, 成型后在 28±20℃、相对湿度 70%的试验室内用风扇吹 1.5 小时。然后置于 40±3℃、相对湿度 50%、风速 2.5m/s 的环境中。在 24 小时龄期裂缝基本稳定后进行观测。其观测结果见表 6。从聚丙烯纤维混凝土抗裂机理上分析, 掺入聚丙烯纤维后, 由于其乱向均匀分布的特点, 起到微配筋作用和保水作用, 大大减缓了由于骨料的快速失水和混凝土塑性收缩及温度收缩而产生的裂缝, 且延缓了塑性收缩裂缝出现的时间。同时, 在混凝土开裂后, 纤维的抗拉作用突显, 有效地阻止了裂缝的进一步发展。试验表明, 混凝土裂缝面积、裂缝宽度及失水速率均随着纤维体积率的增大而显著降低, 说明掺入聚丙烯纤维后能够有效地阻滞混凝土内部塑性裂缝并提高混凝土的抗裂性能。

表6 胶砂开裂试验成果

样品	裂缝宽度 A (mm)	裂缝长度 B (mm)	裂缝面积 A×B (mm)	A×B 加和值	对比百分率 (%)
掺纤维	2.0	0	0		
	1.0	307	307	504.5	85
	0.5	395	197.5		
不掺纤维	2.0	0	0		
	1.0	373	373	593.3	100
	0.5	440.6	220.3		

从以上试验成果中可以看出, 在混凝土中添加低掺率的聚丙烯纤维后, 纤维对混凝土拌合物含气量影响不大, 坍落度虽然有所降低, 但其和易性得到改善。混凝土的抗裂强度有显著提高, 且其抗压强度 (特别是早期强度) 得到提高。由于纤维抑制了混凝土内部的自由水蒸发,

乱向均匀分布在混凝土中的大量纤维起了所谓承托骨料的作用,降低了混凝土表面的析水与集料的沉降,从而使混凝土中的孔隙大大降低,此外,由于混凝土中纤维的物理作用,大大减少了收缩裂缝尤其是连通裂缝的产生,因而减少了渗水通道,有效提高了混凝土抗渗能力以及变形能力。通过对混凝土试件进行的打压试验,抗渗标号可提高一个等级,从而使混凝土的抗渗性能得到大大改善。

#### 4 纤维在混凝土蜗壳中的应用和施工

根据试验室所做的实验工作,在实际应用中,考虑到掺入聚丙烯纤维后能够显著提高抗裂和抗渗性能的特点,设计中将原要求的 C25W8 降低到 C25W6,将纤维掺率调整到 0.9kg/m<sup>3</sup>。在蜗壳浇筑期间,对现场各结构部位不同级配(二级配水泥用量 343kg,水灰比 0.42,骨料最大粒径 40mm、三级配水泥用量 297kg,水灰比 0.40,骨料最大粒径 80mm,坍落度 7-9cm)混凝土进行了大量的取样试验,从后期的生产性试验数据中可知(数据过多略),C25W6 二、三级配混凝土的 28 天平均抗压强度均达到了 36.5MPa 以上,抗渗标号均达到和超过 W12,与不掺纤维的混凝土试件相比抗渗能力提高了 60%以上。由于纤维在大体积混凝土设计和施工中处于初步尝试阶段,我们未对混凝土的抗渗指标进行下调。

在施工工艺方面,聚丙烯纤维增强混凝土对拌合及施工工艺没有特别要求,由于聚丙烯纤维在混凝土当中的作用是以物理方式体现的,本身不与混合料及外加剂产生化学反应,所以在混凝土拌合时添加如引气、减水、早强……等等外加剂产品并不对纤维增强混凝土构成材料性质方面的影响,所以无须考虑添加外加剂因素,但添加聚丙烯纤维后的混凝土需要保证一定的拌合时间。拌合时间以纤维能在混凝土中均匀分布为准,小型拌合机械拌合时间一般为 2-3 分钟左右。而对于采用大型拌合系统来拌合的混凝土,则时间要短得多。在尼尔基工程实践中,在拌合系统内将纤维预先加入到混凝土中,为保证纤维在混凝土中的均匀分布,拌合时间较一般混凝土(60s)的拌合时间延长了 30s 左右。在混凝土浇筑质量方面,为避免大体积混凝土内部温升过高而产生过大的塑性收缩变形,尽管添加了聚丙烯纤维作为增强材料,对于混凝土的浇筑分层分块仍需按照有关规程规范严格、细致地进行划分。

#### 5 结语

目前,国内水工结构设计中,对结构正常使用极限状态的验算是按照荷载的长、短期效应,根据结构受拉钢筋以及混凝土自身的特性进行抗裂和限裂验算的。由于在实际的设计和施工当中,限裂钢筋受结构配筋以及钢筋直径、间距、保护层和骨料粒径等多方面因素的影响,钢筋不可能贴近结构(构件)表面细密布置;而在温度场变化及干缩变形较大的大体积混凝土结构中配置的温度钢筋,也不能形成大面积的拉结作用,故而不能有效的提高抗裂性能。由于考虑限裂因素,使得混凝土单位体积含钢量大大增加,而钢筋对有效受拉混凝土截面之外的裂缝不起控制作用,因而增大含钢率并达不到大范围控制混凝土裂缝产生的目的。排除施工质量问题,上述实际问题应该是很多类似于混凝土蜗壳等流道结构在设计时满足限裂要求后仍然存在渗漏的原因。

低掺率改性聚丙烯纤维在蜗壳混凝土中,由于其在混凝土中能够细密分布,有显著的阻裂效果,并在混凝土进入塑性期间有效地降低和减小混凝土收缩产生的裂缝。试验表明,低掺率改性聚丙烯纤维混凝土,由于其弹性模量的适度降低,提高了混凝土的变形能力,而不降低(实际上提高了)其抗压强度。其在混凝土硬化后期抑制干缩裂缝开展并使裂缝变细的性能更大幅度提高了混凝土的抗渗能力和受力钢筋的抗锈蚀能力。上述性能对提高大型蜗壳混凝土的施工质量以及限裂、抗渗等方面均具有非常好的实用性。

通过实验可以认为,低掺率聚丙烯纤维混凝土较钢纤维混凝土更能适用于二级配及其以上级配混凝土的生产和施工,由于改性聚丙烯纤维在混凝土中的掺率较低,其成本远低于含钢率高的混凝土,且能达到和超过水工混凝土设计所要求的各项强度指标,尤其是抗渗指标具有较大的突破。这对于大型混凝土蜗壳及大型流道结构的限裂以及抗渗等方面的设计和施工更具实际意义和推广价值。

#### [参考文献]

- [1] 石岩, 抗裂合成纤维在尼尔基工程中的应用, 2003
- [2] 中水六局试验室, 混凝土使用配合比统计报告, 2003
- [3] 中水六局试验室, 混凝土强度检测报告, 2003
- [4] 冯乃谦 《实用混凝土大全》, 北京: 科学出版社, 2001
- [5] F. Leonhart 著, 胡贤章等译, 《钢筋混凝土结构裂缝与变形的验算》, 北京: 水利电力出版社, 1983