

中国长江三峡集团公司科技图书出版基金资助

# 严寒地区

## 沥青混凝土面板研究与应用

毛三军 李忠彬等◎编著

中国三峡出版传媒  
中国三峡出版社



# 严寒地区沥青混凝土面板 研究与应用

毛三军 李忠彬等 编著

(节选版)

中国三峡出版传媒  
中国三峡出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

严寒地区沥青混凝土面板研究与应用 / 毛三军, 李忠彬等  
编著. —北京: 中国三峡出版社, 2017. 6

ISBN 978 - 7 - 80223 - 994 - 4

I. ①严… II. ①毛… ②李… III. ①寒冷地区 - 混凝土  
面板坝 - 研究 - 呼和浩特 IV. ①TV649

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 121572 号

责任编辑: 赵静蕊

中国三峡出版社出版发行  
(北京市西城区车公庄大街 12 号 100037)  
电话: (010) 57082645 57082655  
[http: //www. zgsxcbs. cn](http://www.zgsxcbs.cn)  
E - mail: sanxiaz@sina. com

北京市画中画印刷有限公司印刷 新华书店经销  
2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷  
开本: 787 × 1092 毫米 1/16 印张: 10.5  
字数: 202 千字  
ISBN 978 - 7 - 80223 - 994 - 4 定价: 138.00 元



上水库开工典礼



上水库原始地貌



上水库库盆开挖面貌



上水库堆石坝施工



廊道施工



库底沥青混凝土摊铺



防渗层摊铺



沥青拌和楼



防渗层碾压



完工后的上水库



上水库蓄水



完成初期蓄水



上水库卫星图



高山明珠



# 严寒地区沥青混凝土面板研究与应用

## 编委会

主任：毕亚雄

副主任：张超然

委员：毛三军 白和平 林立教 王纪卿 关怀宇 黄丹生  
张宝生 肖荣 牛国强 尹显俊 高崖 胡生勇  
宋刚云 武小兵 徐军 张学礼 彭建国 苏成龙  
宋永军 王道斌

编写组人员：毛三军 李忠彬 肖兴恒 陈初龙 吕明治 段杰辉  
赵轶 夏世法 王建军 成涛 孙宝成 王坚  
刘增宏 熊成林 任少辉 刘岩 洪彰华 武学毅  
汪正兴 张福成 孔德强



# 目 录

第 1 章 项目综述 .....	1
1.1 立项背景 .....	1
1.1.1 国际国内沥青混凝土面板现状 .....	1
1.1.2 当前沥青混凝土面板存在的问题 .....	4
1.1.3 呼蓄工程沥青混凝土面板应用技术瓶颈 .....	4
1.2 本项目研究目的及意义 .....	5
1.3 项目的可行性和研发的技术路线 .....	5
1.4 研究内容及成果 .....	8
1.5 主要创新点 .....	13
第 2 章 严寒地区水工改性沥青研究开发 .....	16
2.1 研究背景 .....	16
2.2 主要研究内容 .....	18
2.3 产品研发 .....	18
2.3.1 基质沥青 .....	18
2.3.2 改性剂 .....	19
2.3.3 试验设备 .....	19
2.3.4 试验思路 .....	19
2.3.5 稳定技术的开发与研究 .....	19
2.3.6 工艺配方的确定与优化 .....	22
2.4 样品的中试 .....	22
2.5 改性沥青技术标准的调整及改性沥青生产方案的确定 .....	23
2.6 工业化生产与应用 .....	24

<b>第3章 严寒地区沥青混凝土配合比优选试验研究</b> .....	25
3.1 沥青混凝土配合比优选试验目标及基本路线 .....	25
3.2 室内沥青混凝土配合比优选试验 .....	25
3.2.1 防渗层沥青混凝土配合比优选试验 .....	25
3.2.2 防渗层沥青混凝土全项性能试验 .....	30
3.2.3 整平胶结层沥青混凝土配合比优选 .....	31
3.2.4 封闭层沥青玛蹄脂配合比优选 .....	32
3.3 现场沥青混凝土配合比优选试验 .....	32
3.3.1 原材料试验 .....	33
3.3.2 防渗层现场设计配合比优选试验 .....	35
3.3.3 整平胶结层现场设计配合比优选试验 .....	38
3.4 沥青混凝土施工配合比优选试验 .....	38
3.4.1 场外摊铺试验 .....	38
3.4.2 场内摊铺试验 .....	49
<b>第4章 水工改性沥青技术指标及沥青混凝土面板技术要求</b> .....	62
4.1 沥青混凝土面板设计冻断温度的确定 .....	62
4.1.1 上水库水文气象条件 .....	62
4.1.2 上水库极端最低气温分析 .....	64
4.1.3 面板冻断温度确定 .....	66
4.2 严寒地区水工改性沥青技术指标的研究确定 .....	66
4.2.1 严寒地区水工改性沥青技术指标的研究 .....	67
4.2.2 严寒地区改性沥青技术指标的提出 .....	77
4.3 沥青混凝土面板技术要求 .....	78
4.3.1 封闭层技术要求 .....	79
4.3.2 防渗层和加厚层技术要求 .....	81
4.3.3 整平胶结层技术要求 .....	81
4.3.4 沥青砂浆技术要求 .....	81
<b>第5章 关键施工技术及质量控制</b> .....	85
5.1 沥青混凝土施工成套设备自主研发 .....	85
5.1.1 沥青混合料拌和系统的研发 .....	86
5.1.2 沥青混凝土摊铺和碾压设备的研发 .....	88

5.2	沥青混凝土面板施工技术再创新	91
5.2.1	拌和系统均衡上料工艺	91
5.2.2	沥青混凝土全过程温控技术	94
5.2.3	斜坡跟进碾压施工工艺	96
5.2.4	沥青混凝土面板细部结构施工工艺	97
5.2.5	沥青混凝土面板越冬保护技术	103
5.3	沥青混凝土面板柔性试验方法研究	105
5.4	沥青混凝土施工质量控制	108
5.4.1	原材料进场检验及质量控制	108
5.4.2	沥青混合料拌制质量控制	110
5.4.3	沥青混合料运输质量控制	113
5.4.4	面板基础垫层施工及质量控制	113
5.4.5	沥青混凝土摊铺和碾压施工质量控制	116
5.4.6	封闭层施工质量控制	119
5.4.7	成品保护	119
5.5	质量检测结果及质量评价	119
5.5.1	原材料质量检验结果	119
5.5.2	沥青混合料质量检验结果	124
5.5.3	沥青混凝土质量检验结果	125
5.5.4	施工质量评价	126
5.6	首次编制了严寒地区沥青混凝土施工规范	127
5.6.1	国内现行规范及应用情况	127
5.6.2	本规范的创新点	127
5.6.3	规范的推广应用（企业标准、行业规范）	131
第6章	沥青混凝土面板安全监测成果评价	132
6.1	监测布置及实施情况	132
6.2	监测物理量分析	135
6.2.1	大气温度	135
6.2.2	沥青混凝土面板防渗性能监测分析	135
6.2.3	沥青混凝土面板抗冻性能监测分析	140
6.3	监测成果评价	146

第7章 经济社会效益及成果应用 .....	148
7.1 技术经济效益 .....	148
7.1.1 研究成果的经济效益 .....	148
7.1.2 社会效益及推广应用价值 .....	149
7.2 成果应用 .....	150
7.2.1 呼和浩特抽水蓄能电站上水库沥青混凝土面板工程 .....	150
7.2.2 崇礼太舞四季滑雪场1#蓄水池沥青混凝土工程 .....	151
致 谢 .....	155
参考文献 .....	156

# 第 1 章 项目综述

## 1.1 立项背景

### 1.1.1 国际国内沥青混凝土面板现状

#### (1) 国际现状

沥青成功地应用于水工结构有着悠久的历史，但沥青混凝土防渗技术应用于大型水工建筑物，在国际上是 20 世纪 30 年代才发展起来的一项筑坝技术。沥青混凝土面板具有良好的防渗能力，优异的适应基础变形和温度变形能力，自身不需设置结构接缝，施工速度快，且无毒、环保，耐久性优异，非常适宜用作水库防渗体。国外将沥青混凝土面板用于大坝水库防渗始于 20 世纪 30 年代，且发展迅速，20 世纪 70 年代进入应用高峰期。1988 年第 16 届国际大坝会议将沥青混凝土防渗堆石坝列入了未来最高坝的适宜坝型。据不完全统计，目前全世界建成的沥青混凝土面板防渗土石坝已有 400 余座，第一座为 1937 年建成的阿尔及利亚的埃尔·格力布大坝，坝高 56m；最高的沥青混凝土面板坝为奥地利的奥申尼克（Oschenik）沥青混凝土面板坝，坝高 106m；防渗面积最大的沥青混凝土面板工程为德国的盖斯特（Geeste）水库防渗面积达  $184 \times 10^4 \text{m}^2$ 。

因为防渗性能优异且能适应较差的地形条件和较大的水位变幅，所以沥青混凝土面板在国外抽水蓄能电站水库防渗得到了广泛应用，已成为抽水蓄能电站水库防渗的首选。据不完全统计，国外已超过 80 多座抽水蓄能电站上水库采用了沥青混凝土面板防渗，主要分布在德国、美国、奥地利、日本、瑞典、挪威、法国、英国。比较典型的工程如德国的瓦尔杰克和高迪斯塞尔，美国的路丁顿，英国的台劳奇·黑尔，比利

时的库—特罗—波恩斯，法国的格兰德·麦宗，捷克斯洛伐克的坝尔尼—伐格，奥地利的黑福努，日本的萨比加瓦电站。其中美国 1972 年完工的路丁顿 (Lutington) 抽水蓄能电站上库防渗面板面积达  $27 \times 10^4 \text{m}^2$ ，日本 1994 年投入运行的蛇尾川抽水蓄能电站上库沥青混凝土面板堆石坝，坝高 90.5m，德国 2006 年完工的高迪斯塞尔 (Goldishthal) 抽水蓄能电站上水库，全库盆沥青混凝土防渗面积达  $95.8 \times 10^4 \text{m}^2$ 。

当前，国外水工沥青混凝土面板配合比设计、施工设备及质量控制关键技术被三家公司垄断，即德国的斯特拉堡 (Strawbag) 公司、瑞士沃禄 (Walo) 公司和日本的大成公司。这三家公司的沥青混凝土面板技术已比较成熟，各自形成了专有技术和设备，国外水工沥青混凝土面板工程基本由这三家公司完成。

## (2) 国内现状

1970—1990 年，我国在这个阶段修建沥青混凝土面板堆石坝 20 余座 (表 1.1-1)，但由于当时国产沥青品质较差，施工设备落后，国内技术人员不掌握沥青混凝土配合比和施工质量控制关键技术，此阶段修建的堆石坝沥青混凝土面板出现了众多问题，这些问题可以归结为三类，即低温开裂，高温流淌和接头脱开。这些问题导致水库渗漏严重，影响工程的正常运行，引起了国内工程界对沥青混凝土面板的质疑，使国内堆石坝沥青混凝土面板防渗技术的发展进入十分困难时期，相关工程建设也基本处于停滞状态，甚至有的工程不得不拆除沥青混凝土面板，改建其他防渗面板，如浙江牛头山坝和湖北车坝河坝。

表 1.1-1 20 世纪 70—90 年代我国修建沥青混凝土面板堆石坝统计表

序号	工程名称	地点	坝高 (m)	建设年代	防渗面积 ( $\text{m}^2$ )
1	抄道沟水库	河北青龙县	39	1970 年 ~ 1980 年	4000
2	正岔水库	陕西长安县	35	1970 年 ~ 1980 年	4000
3	半城子水库	北京密云县	29	1970 年 ~ 1980 年	11000
4	里册峪水库	山西绛县	57	1970 年 ~ 1980 年	12000
5	黄龙水库	云南嵩明县	22	1970 年 ~ 1980 年	3835
6	大夹砬子水库	辽宁恒仁县	27	1970 年 ~ 1980 年	
7	十二台子水库	辽宁朝阳县	24.5	1970 年 ~ 1980 年	1800
8	石砭峪水库	陕西长安县	82.5	1970 年 ~ 1980 年	37500
9	坑口水库	浙江青田县	37	1970 年 ~ 1980 年	4500
10	红江水库	广西玉林	45	1970 年 ~ 1980 年	9000
11	杨家庄水库	山西霍县	48	1970 年 ~ 1980 年	600
12	南谷洞水库	河南林县	79	1970 年 ~ 1980 年	20000



续表

序号	工程名称	地点	坝高 (m)	建设年代	防渗面积 (m <sup>2</sup> )
13	三家子电站	吉林集安	37	1970年~1980年	
14	二门山电站	黑龙江孙吴县	30	1970年~1980年	
15	横冲水库	云南呈贡县	40	1970年~1980年	13000
16	三八塘	陕西长安县	8	1970年~1980年	6677
17	磨板坑水库	广东梅县	23.1	1970年~1980年	2500
18	滁县铜矿尾矿坝	安徽滁县	21	1970年~1980年	
19	温状子水库	辽宁建昌	28	1970年~1980年	10500
20	汾河二库	山西太原	58.5	1970年~1980年	25000
21	四方村尾矿坝	安徽铜陵	62	1970年~1980年	
22	关山水库	山西昔阳		1980年~1990年	
23	车坝河水库	湖北恩施		1980年~1990年	
24	牛头山水库	浙江临海		1980年~1990年	
25	桥墩水库	浙江苍南	50	1980年~1990年	51329
26	东坝一级水库	福建莆田	58	1980年~1990年	

1990年~2010年,国内水工沥青混凝土面板工程开始对国外承包商开放,我国沥青混凝土面板发展进入国内外合作阶段,这个时期的代表性工程为天荒坪、张河湾、西龙池工程。这些工程由国外承包商或中外合作承建完成,但关键技术由国外承包商主导,如天荒坪工程由德国斯特拉堡公司主导,张河湾、西龙池工程由日本大成公司主导。我国的科研、施工单位虽然参与了这些工程,但只处于配合地位,无法掌握关键技术。但自浙江天荒坪抽水蓄能电站沥青混凝土面板建设开始,国内各科研、设计、施工单位也以此为契机,开始系统借鉴国外先进经验。经过天荒坪、张河湾、西龙池工程建设,国内技术人员已初步了解国外先进技术,开始有意识地向形成自有技术的方向发展。另外,这段时期国产沥青的品质也有了较大提高,为我国水工沥青混凝土面板的自主建设提供了可能。

表 1.1-2 1990年—2010年我国修建沥青混凝土面板堆石坝统计表

序号	工程名称	地点	坝高 (m)	建设年代	防渗面积 (m <sup>2</sup> )	承包商
1	天荒坪抽水蓄能电站上水库	浙江安吉	72	1996年~2000年	286000	斯特拉堡公司
2	张河湾抽水蓄能电站上水库	河北井陘	57	2004年~2006年	345000	日本大成公司

续表

序号	工程名称	地点	坝高 (m)	建设年代	防渗面积 (m <sup>2</sup> )	承包商
3	西龙池抽水蓄能 电站上水库	山西忻州	50	2004年~2006年	224600	日本大成公司
4	西龙池抽水蓄能 电站下水库	山西忻州	97	2004年~2006年	112500	日本大成公司
5	宝泉抽水蓄能 电站上水库	河南辉县	94.8	2005年~2008年	170000	中水科总公司

2011年至今为我国水工沥青混凝土面板技术的自主发展阶段。在这个阶段，为了提高我国沥青混凝土面板技术水平，重点针对沥青混凝土面板的防渗性能、变形性能、抗斜坡高温流淌性能、水稳定性能、抗低温开裂性能等关键技术开展了研究和工程实践，初步形成了沥青混凝土面板配合比设计方法、施工设备及施工技术，并在依托工程中获得了成功应用。至此，我国沥青混凝土面板技术进入自主发展时期。

### 1.1.2 当前沥青混凝土面板存在的问题

国内外沥青混凝土面板在应用过程中，遇到的技术问题主要为面板的低温开裂，斜坡高温流淌和接头脱开问题。随着沥青品质的提高、配合比技术的发展和施工工艺的完善，斜坡高温流淌和接头脱开问题得到了较好解决，但随着沥青混凝土面板在寒冷及严寒地区的应用，其低温抗裂技术仍未突破。

国外有资料可查的在极端最低气温 $-30^{\circ}\text{C}$ 以下严寒地区修建的沥青混凝土面板工程为奥地利 Fragant 梯级电站的 Oscheniksee 水库，大坝坝高 81m，上游面采用沥青混凝土面板防渗，位于海拔 2391m 的阿尔匹斯山地区，运行过程中在经历 $-35^{\circ}\text{C}$ 的低温后出现了 20 多条顺坡向较大裂缝，导致面板出现较大渗漏，工程不能正常运行。

### 1.1.3 呼蓄工程沥青混凝土面板应用技术瓶颈

呼和浩特抽水蓄能电站上水库库区地下水位大部分低于正常蓄水位，岩石透水性较大，存在向库外渗漏问题，根据库区工程地质条件需要进行全库防渗处理。上水库地处严寒地区，极端最低温度为 $-41.8^{\circ}\text{C}$ ，比山西西龙池抽水蓄能电站上水库极端最低气温还低 $7.3^{\circ}\text{C}$ ；极端最高温度为 $35.1^{\circ}\text{C}$ ，温差最大达 $77^{\circ}\text{C}$ 。沥青混凝土低温冻断与斜坡高温流淌相容问题突出。

国内代表沥青混凝土面板低温抗裂最高水平的是西龙池上库沥青混凝土面板工程，其极端最低气温为 $-34.5^{\circ}\text{C}$ ，防渗层沥青混凝土设计低温冻断温度 $-38^{\circ}\text{C}$ ，由日本大成公司承包建设。改性沥青采用国外产品，沥青混凝土配合比设计由日本大成公司完成，施工设备采用国外设备。

通过调研，我国现有沥青技术性能无法满足呼蓄电站沥青混凝土面板低温冻断温度不大于 $-43^{\circ}\text{C}$ 的要求；国内科研单位缺乏沥青混凝土低温冻断试验手段；国内施工单位缺少沥青混凝土面板施工设备和施工技术。综上所述，呼蓄工程采用沥青混凝土面板防渗面临巨大挑战。

## 1.2 本项目研究目的及意义

呼蓄电站上水库极端最低气温 $-41.8^{\circ}\text{C}$ ，为目前世界上已建和在建抽水蓄能电站沥青混凝土面板工程低温之最，并且由国人自主设计、自主施工，沥青混凝土面板低温抗裂无成功经验借鉴，面临巨大挑战。解决这个技术难点是关系到呼蓄上水库防渗工程成败的关键，必须进行深入研究。

本项目研究目的和意义包括两个方面：

第一，解决沥青混凝土面板 $-43^{\circ}\text{C}$ 以下低温抗裂的世界性难题，突破严寒地区沥青混凝土面板技术瓶颈，引领和促进沥青混凝土面板新材料、新工艺、新技术的研究，完成呼和浩特抽水蓄能电站上水库沥青混凝土面板建设工作，推动沥青混凝土面板防渗技术在我国严寒地区的应用发展；

第二，秉持三峡集团公司引进、消化、吸收、再创新的理念，进行水工改性沥青原材料、关键施工设备的自主研发，开展沥青混凝土面板施工工艺及质量控制技术的再创新，结束沥青混凝土面板关键技术长期依赖国外的历史，实现沥青混凝土面板技术的国产化。

本项目的研究成果应用和推广前景广阔，社会效益巨大。

## 1.3 项目的可行性和研发的技术路线

### (1) 项目的可行性

#### ① 可研阶段核准的面板防渗方案

呼和浩特抽水蓄能电站上水库在可行性研究阶段受当时国内外严寒环境沥青混凝土面板技术和建设水平的制约，推荐了钢筋混凝土面板全库防渗。该方案经2005年9月水电水利规划设计总院审查和2006年1月中国国际工程咨询公司项目申请报告核准评估均认为是合适的，2006年8月通过国家发改委核准。

#### ② 面板防渗方案比选

呼蓄电站上水库地处严寒地区，最冷月（1月）平均气温为 $-15.7^{\circ}\text{C}$ ，极端最

低气温  $-41.8^{\circ}\text{C}$ ，比山西西龙池抽水蓄能电站上水库极端最低气温还低  $7.3^{\circ}\text{C}$ 。鉴于呼蓄电站上水库恶劣的运行环境，中国长江三峡集团公司技术委员会对呼蓄电站上水库工程防渗方式进行了系统的研究，认为上水库防渗面板的抗冻性能直接影响工程运行安全及工程寿命，要求呼蓄公司进一步研究上水库防渗方案。因此，呼蓄公司组织各方开展钢筋混凝土面板和沥青混凝土面板两种防渗形式的比选研究。

经研究比较，钢筋混凝土面板防渗设计和施工经验丰富，施工工艺简单，但在呼蓄电站上水库严酷的气候条件下抗裂和冻融破坏问题突出。在严寒气候条件下钢筋混凝土面板长期遭受频繁冻融循环作用容易受到破坏。严重的冻融破坏，将威胁到建筑物的正常运行，降低建筑物的使用年限。并且钢筋混凝土面板裂缝及冻融破坏维修成本高工期长。沥青混凝土面板不存在冻融剥蚀破坏问题，具有良好的防渗能力，以及优异的适应基础变形和温度变形能力，自身不需设置结构接缝，施工速度快，且无毒、环保，耐久性好，易于修缮，维修成本低工期短。

经从枢纽布置、工程量及土建可比投资、建筑材料、防渗材料适用基础变形、防渗效果、施工条件、运行检修条件、技术可行性等方面进行综合比较，呼蓄电站上水库采用沥青混凝土面板较优。

### ③ 沥青混凝土面板技术科研攻关项目的可行性

呼蓄电站上水库采用沥青混凝土面板比钢筋混凝土面板具有一定优势，但呼蓄电站上水库严酷的气候条件，对沥青混凝土面板的低温抗裂性能要求极高，需要进行科研攻关。根据国内当时沥青混凝土发展及应用情况，科研攻关工作是具有一定基础的，第一，在 1990 年至 2010 年期间，沥青混凝土面板防渗方案为众多大型抽水蓄能电站工程所采用，国内设计、科研及施工单位已具有一定工程实践经验。第二，经初步试验成果及资料分析，采用高性能改性沥青配制沥青混凝土基本可满足呼蓄电站上水库工程要求。第三，西龙池抽水蓄能电站上水库地处严寒地区，极端最低气温为  $-34.5^{\circ}\text{C}$ ，其沥青混凝土面板防渗工程经验可供借鉴。鉴于以上因素，可认为本技术科研攻关项目是可行的。

## (2) 研发的技术路线

### ① 宏观规划路线

为推动我国沥青混凝土面板防渗技术的发展，结束沥青混凝土面板防渗技术长期依赖国外技术的历史，解决呼蓄电站上水库沥青混凝土面板低温抗裂的世界性难题，中国长江三峡集团公司由毕亚雄副总经理和张超然院士牵头，组织行业内外专家对沥青混凝土面板防渗技术的难点和重点技术进行分析研究，其中难点技术专题

为沥青混凝土面板低温抗裂，重点技术专题为沥青原材料技术性能、面板沥青混凝土施工配合比设计和沥青混凝土现场施工工艺等。根据国内外沥青混凝土面板技术发展趋势，依托国内科研团队力量，通过联合科研攻关，突破技术瓶颈。

参与科技攻关的单位及工作分工为：项目科研攻关责任单位为内蒙古呼和浩特抽水蓄能发电有限责任公司，沥青混凝土面板相关的技术指标和设计要求制定由中国电建集团北京水利水电勘测设计研究院有限公司承担，沥青原材料研发由中国石油公司承担，沥青混凝土试验研究工作由中国水利水电科学研究院和西安理工大学承担，沥青混凝土面板施工技术研究和专业施工设备研发由中国葛洲坝集团公司、北京中水科海利工程技术有限公司和中国水利水电建设工程咨询西北有限公司承担。

2009年11月25日，设计单位根据呼蓄电站项目现场施工条件及同类工程成功经验，对上水库防渗面板方案进一步论证沥青混凝土防渗方案的可行性，提出呼和浩特抽水蓄能电站上水库钢筋混凝土与沥青混凝土面板防渗方案技术经济分析报告。2010年4月15日至16日，中国水利水电建设工程咨询公司主持召开了呼和浩特抽水蓄能电站上水库钢筋混凝土与沥青混凝土面板防渗方案技术经济分析报告咨询会议，主要咨询意见认为：“根据目前的初步试验成果，借鉴西龙池抽水蓄能电站等严寒地区沥青混凝土面板防渗工程经验，初步认为上水库采用全库盆沥青混凝土面板防渗方案技术上基本可行。”

2010年5月，设计单位根据上述咨询意见具体开展上水库沥青混凝土面板防渗形式设计研究工作。

2010年9月，由项目参与单位组成调研组，对中国石化辽河分公司、新疆克拉玛依炼化总厂、中海油气开发利用公司、盘锦市中油辽河沥青有限公司、北京路新大成景观公司等公司的水工沥青产品研发最新成果、生产能力及供货方式等做了详细的调研。中国水利水电科学研究院基于调研成果，对国内4个沥青厂家的13种改性沥青新产品开展原材料、沥青混凝土配合比研究试验。室内试验研究结果表明：采用自主研发的水工改性沥青材料，结合沥青混凝土配合比优化技术，可实现沥青混凝土面板低温冻断温度达 $-43^{\circ}\text{C}$ 以下，呼和浩特抽水蓄能电站上水库沥青混凝土面板防渗方案具备技术可行性。

2011年4月，中国三峡集团公司召开了呼蓄电站上水库沥青混凝土防渗面板试验成果评审会，认为：“对于沥青混凝土担心的低温冻断问题，现有试验成果表明基本可以解决。结合西龙池和张河湾抽水蓄能电站上水库沥青混凝土面板运行的成功实践，建议呼和浩特抽水蓄能电站上水库按沥青混凝土面板全库防渗方案开展相

关工作。”

2012年4月,设计单位编制完成《内蒙古呼和浩特抽水蓄能电站上水库防渗方案设计变更专题报告(送审稿)》,提出上水库改用全库盆沥青混凝土面板防渗方案。

2013年3月,水电水利规划设计总院会同内蒙古自治区发展和改革委员会、能源局对北京院提交的《内蒙古呼和浩特抽水蓄能电站上水库防渗方案设计变更专题报告》进行了审查,同意上水库防渗方案调整为全库盆沥青混凝土面板防渗方案。

## ② 技术细节路线

本项目研究综合采用材料研发、室内试验、现场试验、设备研发、工艺创新、质量检测等多种手段开展研究工作,实现产、学、研一体化,联合攻克严寒地区沥青混凝土面板的关键技术难题。

沥青混凝土低温抗裂性能主要决定于沥青品质、配合比设计、施工工艺、质量控制等。因此,本项目组以呼和浩特抽水蓄能电站工程为依托,针对沥青混凝土低温抗裂性能的各种影响因素进行深入研究,按照“水工改性沥青材料研发→沥青混凝土配合比试验研究→水工改性沥青原材料和沥青混凝土面板技术指标提出→沥青混凝土配合比提出→施工设备研发→工艺创新→大规模施工→试运行→效果反馈→整体方案评价”的总体技术路线,对严寒地区沥青混凝土面板设计关键技术进行系统研究。

## 1.4 研究内容及成果

本课题以呼蓄工程为依托,针对严寒地区沥青混凝土面板低温抗裂问题,进行了以下方面研究:

### (1) 严寒地区沥青混凝土水工改性沥青的开发研究

沥青原材料对沥青混凝土的低温抗裂性能影响较大。呼蓄工程开工前,对国内4个沥青厂家的13种改性沥青成型产品进行了调研,发现当时已有沥青无法满足呼蓄工程防渗层沥青混凝土面板低温冻断温度低于 $-43^{\circ}\text{C}$ 的要求。在此情况下,本课题选用牌号为C-130的极寒沥青作为基质沥青,通过掺加大剂量、低嵌段比、分子量在50000~80000的线形SBS作为改性剂,在改善低温性能的同时兼顾高温性能。针对大剂量SBS在沥青中难以稳定的难题,配以高性能的稳定剂、相容剂并采用特殊的加工工艺,使各种材料相容并分散均匀,形成稳定的胶体结构,攻克了基质沥青与外掺材料的稳定相容难题。经大量试验遴选,确定了SBS、稳定剂、相容剂的配合比,首次研发成功适合极端最低气温 $-41.8^{\circ}\text{C}$ 的水工5#改性沥青。该改性

沥青低温、高温性能优异，在拌料、运输、施工、运行过程中质量稳定，在呼蓄工程中应用超过 6500t，效果良好。

### (2) 严寒地区沥青混凝土配合比设计优化

① 通过采用自主研发的 5#水工改性沥青材料，以低温冻断温度为主控参数进行配合比优选设计，综合考虑抗裂、抗渗、抗弯等性能。实现防渗层沥青混凝土低温抗裂性能和其他性能的统一。通过采用自主研发的 5#水工改性沥青进行配合比优化设计首次解决了抽蓄电站防渗层混凝土低温冻断温度低于  $-43^{\circ}\text{C}$  的国际性难题。

② 严寒地区沥青混凝土面板低温抗裂性能要求突出，但沥青面板为高温施工，运行时因太阳辐射也会达到  $70^{\circ}\text{C}$  以上，因此在设计低温性能时不能降低其高温性能。为了解决沥青面板高温、低温性能相容性问题，提出了丁朴荣级配公式的高级配指数设计方法，配合比设计中的级配指数大于 0.35，得到防止高温流淌的防渗层沥青混凝土，保证了斜坡沥青面板在施工期和运行期高温时段的稳定性，解决了严寒地区沥青混凝土面板低温抗裂和高温流淌的相容问题。

### (3) 严寒地区水工改性沥青原材料和沥青混凝土技术指标的研究

通过大量的室内试验研究并结合以往工程实践，进行严寒地区改性沥青原材料和沥青混凝土技术指标的研究，提出了严寒地区水工改性沥青原材料和沥青混凝土的关键技术指标。

表 1.4-1 水工 SBS 聚合物改性沥青技术要求

序号	项 目	单 位	质量 指标	试验方法 《公路工程沥青及沥青混合 料试验规程》JTJ 052—2000
1	针入度 (25℃, 100g, 5s)	1/10mm	> 100	JTJ T 0604—2000
2	针入度指数 PI		$\geq -1.2$	JTJ T 0604—2000
3	延度 (5℃, 5cm/min)	Cm	$\geq 70$	JTJ T 0605—1993
4	延度 (15℃, 5cm/min)	Cm	$\geq 100$	
5	软化点 (环球法)	℃	$\geq 45$	JTJ T 0606—2000
6	运动粘度 (135℃)	Pas	$\leq 3$	JTJ T 0625—2000/JTJ T 0619—1993
7	脆点	℃	$\leq -22$	JTJ T 0613—1993
8	闪点 (开口法)	℃	$\geq 230$	JTJ T 0611—1993
9	密度 (25℃)	$\text{g}/\text{cm}^3$	实测	JTJ T 0603—1993
10	溶解度 (三氯乙烯)	%	$\geq 99$	JT T 0607—1993
11	弹性恢复 (25℃)	%	$\geq 55$	JTJ T 0622—1993
12	离析, 48h 软化点差	℃	$\leq 2.5$	JTJ T 0661—2000

续表

序号	项 目	单 位	质量指标	试验方法 《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》JTJ 052—2000	
13	基质沥青含蜡量（裂解法）	%	≤2	JTJ T 0615—2000	
14	薄膜烘箱后	质量变化	%	≤1.0	JTJ T 0610—1993
15		软化点升高	℃	≤5	JTJ T 0606—2000
16		针入度比（25℃）	%	≥50	JTJ T 0604—2000
17		脆点	℃	≤ -19	JTJ T 0613—1993
18		延度（5℃，5cm/min）	Cm	≥30	JTJ T 0605—1993
19		延度（15℃，5cm/min）	Cm	≥80	

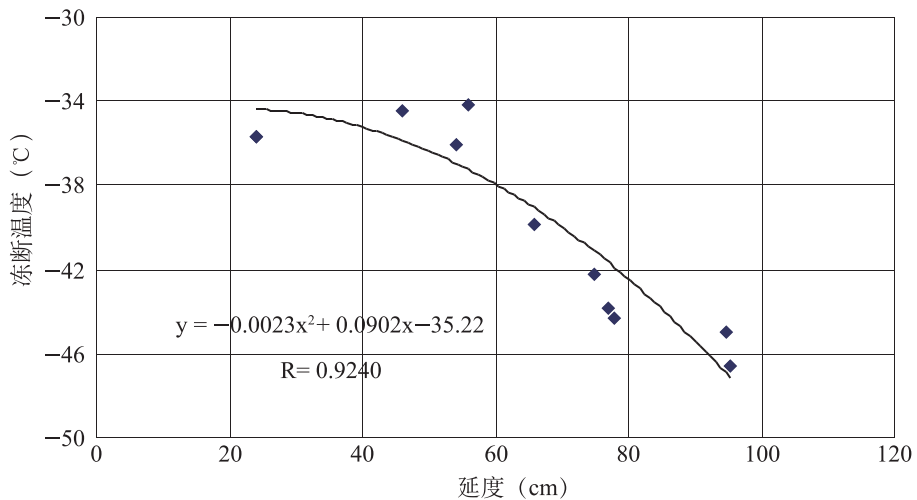
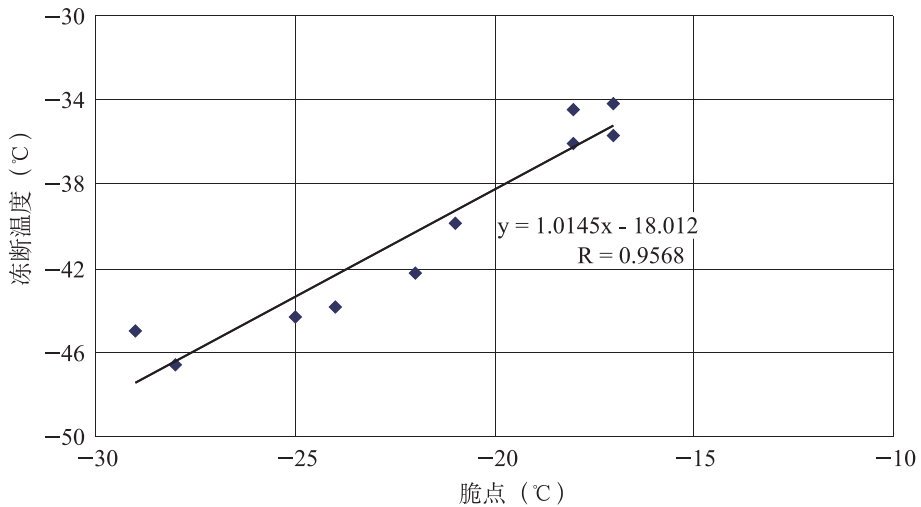


图 1.4-1 改性沥青脆点、5℃延度和沥青混凝土冻断温度的关系



表 1.4-2 防渗层沥青混凝土技术要求

序号	项 目		单位	技术要求	备 注
1	密度		$\text{g}/\text{cm}^3$	实测	/
2	孔隙率		%	$\leq 2$	马歇尔试件（室内成型）
				$\leq 3$	现场芯样或无损检测
3	渗透系数		$\text{cm}/\text{s}$	$\leq 1 \times 10^{-8}$	/
4	水稳定系数		—	$\geq 0.9$	孔隙率约 3% 时
5	斜坡流淌值		m	$\leq 0.8$	马歇尔试件（室内成型） (1 : 1.75, 70℃, 48h)
6	冻断温度		℃	$\leq -44^\circ\text{C}$ (平均值)	检测的最高值 应不高于 $-43^\circ\text{C}$
7	弯曲应变	2℃ 变形速率, 0.5mm/min	%	$\geq 2.5$	/
8	拉伸应变	2℃ 变形速率, 0.34mm/min	%	$\geq 1.0$	/
9	柔性试验 (圆盘试验)	25℃	%	$\geq 10$ (不漏水)	/
		2℃	%	$\geq 2.5$ (不漏水)	/

(4) 改进了沥青混凝土圆盘柔性试验方法, 使试验条件更符合工程实际, 提高了试验精度。

在传统马歇尔沥青混凝土试件抗渗试验的基础上, 改进了沥青混凝土圆盘柔性试验方法, 该试验方法可检验沥青混凝土在一定变形状态下的抗渗性能, 试验结果能有效评估沥青面板实际工程防渗效果。

改进的沥青混凝土圆盘柔性方法如下:

① 采用《土工沥青混凝土试验规程》沥青混合料制备的方法, 成型直径 60cm、厚 5cm 的沥青混凝土圆盘试件;

② 待沥青混凝土圆盘试件冷却至室温后, 将其安装到内径 50cm 的钢制试验压力桶机架, 试件周边 5cm 严格密封并用螺栓上下压紧;

③ 将装有圆盘试件的钢制试验压力桶机架放在恒温房内, 在试验温度 (2℃、25℃) 条件下恒温一昼夜;

④ 在圆盘试件下方缓慢施加水压力使试件弯曲变形, 在圆盘上部中心等部位测量变形, 并观察试件裂缝和漏水情况;

⑤ 当中心位置位移量达到规定值时, 从上部通过承压设备 (如填置砂石料) 限制沥青混凝土板进一步变形。逐级缓慢加压至设计水压, 稳定 4h 后撤压。

在设计水压下, 当试件未达到规定的挠跨比 (2℃ 时挠跨比  $\geq 2.5\%$ , 25℃ 时挠跨比  $\geq 10\%$ ) 时漏水即可结束试验, 评定试件不合格; 当试件达到规定的挠跨比时

不漏水即可评定为合格。

#### (5) 严寒地区沥青混凝土面板施工设备及施工质量控制技术研究

沥青混凝土面板必须在高温条件下施工，各项性能热敏感性强，一般拌和站出机口温度控制在 $150^{\circ}\text{C} \sim 180^{\circ}\text{C}$ ，在 $140^{\circ}\text{C}$ 以上摊铺， $110^{\circ}\text{C}$ 以上终碾完成才易满足工程质量。但严寒地区气温低，沥青面板散热快，温降速率大，同时防渗层采用改性沥青，黏度较大，压实难度大，使施工后孔隙率小于3%的核心要求较难保证。针对这些问题，本课题通过拌和站、摊铺和碾压设备的改造，施工工艺的精细化控制，形成严寒地区沥青混凝土面板施工配套技术，大大提高了沥青面板的施工质量保证率。主要内容包括：

① 对拌和楼冷料仓、拌料控制系统进行二次改造，增设关键部位保温措施。根据外界气温调整拌和站出机口沥青混凝土的温度，保证低温期拌和楼的出料温度达到设计要求上限；

② 采用改变摊铺宽度的先进摊铺设备，以保证转角部位全部实现机械化摊铺，消除人工摊铺，保证摊铺质量。对摊铺设备的预压实系统进行二次改造，保证斜坡摊铺过程中面板预压实率大于90%；

③ 摊铺机、振动碾的斜坡牵引台车实现了国产化，施工速度达到国际先进水平。尤其是提高了现场斜坡供料系统的速度，减少了摊铺机停机待料的频率和时间。自主研发了摊铺机斜坡跟碾设备，保证了面板接缝的及时碾压；

④ 通过配合比设计及拌和站拌料精度控制，在满足其它性能的前提下，把出机口防渗层沥青混合料的孔隙率控制在1.5%左右（设计要求不超过2%），给现场摊铺、碾压留有足够的裕度。

⑤ 通过场外试验和场内试验，确定平面、斜坡沥青混凝土的碾压工艺，严格控制施工过程中摊铺后初碾，复碾，终碾的温度和碾压遍数。

⑥ 在低温时段，采用棉被对摊铺后不能立即上碾的沥青面板进行保温蓄热，以保证碾压时的温度要求。

⑦ 施工缝要求成 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 碾压密实，沥青混合料铺筑时搭接 $10 \sim 15\text{cm}$ ，优先碾压。为保证碾压温度，施工缝不能跟碾时覆盖保温被，冷缝在铺筑前采用专门的红外线预加热措施。

通过采取上述措施，呼蓄工程沥青面板合格率控制在99%以上，有效克服低温大风等不利条件对施工质量的影响，取得了良好的应用效果，相关成果已编制形成三峡集团公司企业标准《水工沥青混凝土面板施工规范》（Q/CTG 35—2015）。

现场检测结果表明：防渗层沥青混凝土拌和站出机口孔隙率平均值 1.52%，施工完成后孔隙率平均值 2.5%，完全满足运行期防渗层沥青混凝土面板孔隙率 $\leq 3\%$ 的要求。

防渗层沥青混合料出机口成型试件低温冻断温度平均值  $-44.6^{\circ}\text{C}$ ，施工完毕后现场取样检测的低温冻断温度平均值  $-43.7^{\circ}\text{C}$ ，两者之差仅有  $0.9^{\circ}\text{C}$ ，而国内其他已建沥青混凝土面板工程防渗层室内成型低温冻断温度与现场摊铺施工后的冻断温度指标差别超过  $3^{\circ}\text{C}$ 。

## 1.5 主要创新点

呼蓄电站上水库地处严寒地区，极端最低气温达  $-41.8^{\circ}\text{C}$ ，沥青混凝土面板工程由国人自主设计、自行施工，国内外无成功先例可资借鉴，其工程建设面临巨大挑战。呼蓄公司组织国内相关设计、科研及施工单位经过深入研究，艰难攻关，严格质量管理，沥青混凝土面板工程获得了圆满成功。其主要技术创新点如下：

(1) 研发出适用于极端最低气温  $-41.8^{\circ}\text{C}$  地区沥青混凝土面板的水工改性沥青，并实现了工业化生产应用。

基于外掺大剂量、低嵌段比、低分子量 SBS 的沥青改性相容稳定技术，在改善沥青低温性能的同时兼顾高温性能，经自主研发，首次研发出适用于极端最低气温  $-41.8^{\circ}\text{C}$  地区的水工改性沥青。该品种沥青低温、高温性能优异，质量稳定，实现了工业化生产，在呼蓄工程中应用超过 6500t。

(2) 基于防渗层沥青混凝土“稳定骨架”配合比设计理论，并以低温抗冻断为主控指标进行配合比优化设计，首次攻克了抽水蓄能电站防渗层沥青混凝土低温冻断温度低于  $-43^{\circ}\text{C}$  的国际性难题。

① 通过采用自主研发的 5#水工改性沥青材料，以低温冻断温度为主控参数进行配合比优选设计，综合考虑抗裂、抗渗、抗弯等性能。实现了防渗层沥青混凝土低温抗裂性能和其他性能的统一。通过采用自主研发的 5#水工改性沥青进行配合比优化设计，首次解决了抽水蓄能电站防渗层混凝土低温冻断温度低于  $-43^{\circ}\text{C}$  的国际性难题。

② 严寒地区沥青混凝土面板低温抗裂性能要求突出，但沥青面板为高温施工，运行时因太阳辐射也会达到  $70^{\circ}\text{C}$  以上，因此在设计低温性能时不能降低其高温性能。为了解决沥青面板高温、低温性能相容性问题，提出“稳定骨架”配合比设计

理论,即以级配骨料形成防止斜坡流淌的稳定骨架、以沥青胶浆形成骨架填充体进行防渗层配合比设计。在此理论指导下,提出了丁朴荣级配公式的高级配指数设计方法,配合比设计中的级配指数大于 0.35,得到了防止高温流淌的防渗层沥青混凝土,保证了斜坡沥青面板在施工期和运行期高温时段的稳定性,解决了严寒地区沥青混凝土面板低温抗裂和高温流淌的相容问题。

$$P_i = P_{0.075} + (100 - P_{0.075}) \frac{d_i^n - 0.075^n}{D^n - 0.075^n}, n > 0.25 (n = 0.35 \sim 0.50)$$

(3) 首次提出了严寒地区水工改性沥青的技术指标及沥青混凝土面板技术要求。目前水电工程的设计和施工规范中缺少对改性沥青原材料性能的规定,本项目经过深入研究首次提出了严寒地区水工 SBS 聚合物改性沥青的技术要求,建立了改性沥青 5℃ 延度、脆点与沥青混凝土冻断温度的关系,填补了规范无规定的空白。

通过大量的室内试验研究并结合以往工程的实践经验,首次提出了严寒地区沥青面板防渗层和封闭层的技术指标,相关成果已纳入规范,为严寒条件下沥青混凝土面板设计奠定了基础。

(4) 改进了沥青混凝土圆盘柔性试验方法,使试验条件更加符合工程实际,提高了试验精度。

在传统马歇尔沥青混凝土试件抗渗试验的基础上,改进了沥青混凝土圆盘柔性试验方法,该试验方法可检验沥青混凝土在一定变形状态下的抗渗性能,试验结果能有效评估沥青混凝土面板实际工程防渗效果。

(5) 自主研发了沥青混凝土拌和、摊铺、碾压设备,实现了严寒地区沥青混凝土面板施工工艺创新,首次编制了严寒地区水工沥青混凝土面板施工规范。

① 为了保证严寒地区改性沥青混凝土面板的施工质量,通过自主研发,实现了拌和、摊铺、碾压等施工设备的二次改造。对沥青混凝土拌和站的冷料仓、拌料精度控制系统、保温系统进行了二次改造,提高了拌料精度,保证了出机口温度;改造了摊铺机的上料系统、牵引系统和预压实系统,使摊铺机的预压度达到 90% 以上,摊铺效率达到国际先进水平;自主研发了跟碾设备,该碾压设备可在斜坡施工时对摊铺后的接缝部位实施碾压,有效保证了面板接缝的施工质量。

② 防渗层沥青混凝土面板的孔隙率必须小于等于 3% 才能满足防渗和耐久性的要求。严寒地区防渗层面板因为低温抗裂技术要求突出,必须采用改性沥青,但改性沥青的黏度高,加上严寒地区气温低,在施工过程中控制防渗层沥青混凝土面板孔隙率不超过 3% 的难度很大,尤其是面板接缝部位,更难实现。另外,根据以往

工程实践，沥青混凝土低温冻断室内成型试验数值比现场摊铺后的取芯检测数值低 $3^{\circ}\text{C}$ 左右，呼蓄工程如采用此标准可能导致摊铺后沥青混凝土面板的低温抗裂不能满足设计要求。在这种情况下，本项目研究提出严寒地区沥青混凝土面板成套质量控制技术，包括对沥青混合料的生产、运输、现场摊铺、碾压、接缝部位的前、后处理、低温及大风时段保温技术、关键设备的技术参数要求等成套质量控制措施，实现了防渗层沥青混凝土孔隙率和低温抗裂性能从拌料到施工的全过程控制，取得了良好的应用效果。相关成果已编制形成三峡集团公司企业标准《水工沥青混凝土面板施工规范》（Q/CTG 35—2015），填补了严寒地区沥青混凝土面板施工技术空白。

## 第 2 章 严寒地区水工改性沥青 研究开发

### 2.1 研究背景

沥青混凝土的低温冻断性能主要取决于沥青原材料性能和沥青混凝土配合比设计，其中沥青自身的品质起到关键性作用。为解决呼蓄电站上水库工程沥青混凝土面板防渗层低温冻断温度低于  $-43^{\circ}\text{C}$  的国际性难题，根据以往工程实践经验，设计推荐呼蓄电站上水库工程沥青混凝土面板防渗层、加厚层和封闭层均采用水工改性沥青，并提出了改性沥青技术指标，详见表 2.1-1。

通过调研的国内沥青生产厂家，现有的成品改性沥青性能不能满足呼蓄电站沥青混凝土冻断温度  $\leq -43^{\circ}\text{C}$  的要求，其检测结果见表 2.1-2、2.1-3。

表 2.1-1 改性沥青技术指标

项目	单位	设计要求
针入度 (25 $^{\circ}\text{C}$ , 100g, 5s)	1/10mm	>100
针入度指数 PI	—	$\geq -1.2$
延度 (5 $^{\circ}\text{C}$ , 5cm/min)	Cm	$\geq 70$
延度 (15 $^{\circ}\text{C}$ , 5cm/min)	Cm	$\geq 100$
软化点 (环球法)	$^{\circ}\text{C}$	$\geq 45$
运动粘度 (135 $^{\circ}\text{C}$ )	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\leq 3$
脆点	$^{\circ}\text{C}$	$\leq -22$
闪点 (开口法)	$^{\circ}\text{C}$	$\geq 230$
溶解度 (三氯乙烯)	%	$\geq 99.0$
弹性恢复 (25 $^{\circ}\text{C}$ )	%	$\geq 55$
离析, 48h 软化点差	$^{\circ}\text{C}$	$\leq 2.5$

续表

项目	单位	设计要求
基质沥青含蜡量	%	≤2
薄膜烘箱后	质量变化	≤1.0
	针入度比 (25℃)	≥50
	延度 (5℃, 5cm/min)	≥30
	延度 (15℃, 5cm/min)	≥80

表 2.1-2 国内优质沥青厂家改性沥青指标检测结果

项目	单位	设计要求	盘锦水工改性沥青	路新大成水工沥青	中海油改性沥青
针入度 (25℃, 100g, 5s)	1/10mm	>100	78	103	105
针入度指数 PI	—	≥-1.2	-0.23	-0.43	—
延度 (5℃, 5cm/min)	Cm	≥70	44.9	56	54
延度 (15℃, 5cm/min)	Cm	≥100	—	123	>150
软化点 (环球法)	℃	≥45	82.5	75	63
运动粘度 (135℃)	Pa·s	≤3	1.3	2.4	0.5
脆点	℃	≤-22	—	-17	-18
闪点 (开口法)	℃	≥230	>230	>230	>230
溶解度 (三氯乙烯)	%	≥99.0	99.5	99.8	99.6
弹性恢复 (25℃)	%	≥55	92	80	83
离析, 48h 软化点差	℃	≤2.5	1.2	1.6	1.2
基质沥青含蜡量	%	≤2	1.4	—	1.3
薄膜烘箱后	质量变化	≤1.0	-0.3	-0.3	-0.12
	针入度比 (25℃)	≥50	73	73	80
	延度 (5℃, 5cm/min)	≥30	32	32	39
	延度 (15℃, 5cm/min)	≥80	—	—	—

表 3.1-3 国内优质沥青厂家水工改性沥青混凝土冻断温度

沥青厂家	改性沥青	冻断温度
盘锦市中油辽河沥青有限公司	水工改性沥青	-36.7
北京路新大成景观公司	水工沥青	-34.2
中海油气开发利用公司	改性沥青 1#	-36.1

基于国内现有改性沥青难以满足呼蓄工程的技术要求, 迫切需要开发一种具有突出低温性能的沥青产品, 并通过试验确认沥青产品性能能够满足防渗层沥青混凝土冻断温度低于 -43℃, 这是呼蓄电站上水库沥青混凝土面板工程成功的关键。在

这样的背景下，中国水科院联合盘锦中油辽河沥青有限公司及中海油气利用公司，共同开发适用于呼蓄工程的严寒水工改性沥青产品，SK-II、水工改性沥青 1<sup>#</sup>、水工改性沥青 3<sup>#</sup>、水工改性沥青 5<sup>#</sup>。通过技术评定，最终选定盘锦中油辽河沥青有限公司生产的水工改性沥青 5<sup>#</sup>。

## 2.2 主要研究内容

(1) 开发至少一种新型严寒水工改性沥青产品，低温性能满足沥青混凝土冻断温度低于  $-45^{\circ}\text{C}$ ，高温性能满足沥青混凝土  $70^{\circ}\text{C}$  斜坡流淌值小于  $0.8\text{mm}$  的极端技术要求。

(2) 开发出低嵌段比 SBS 提高沥青低温性能的沥青改性技术。以保证改性沥青生产、运输、贮存、施工工程中的质量及其稳定性。为未来类似工程需求做技术储备。

(3) 提出呼蓄工程严寒水工改性沥青生产指标要求，指导工程材料的生产、供应及工程施工过程质量控制。

## 2.3 产品研发

### 2.3.1 基质沥青

考虑成品改性沥青对高低温性能的要求，采用牌号为 C-130 的极寒沥青基础料，由辽河石化公司南蒸馏车间采用辽河环烷基低凝稠油炼制生产，具体分析数据见表 2.3-1。

表 2.3-1 基质性能指标

分析项目	分析结果	C-130 技术要求
针入度 0.1mm 25 $^{\circ}\text{C}$	140	120 ~ 140
软化点, $^{\circ}\text{C}$	38.2	36 ~ 41
延度, cm (15 $^{\circ}\text{C}$ )	$\geq 150$	—
延度, cm (10 $^{\circ}\text{C}$ )	$\geq 150$	$\geq 100$
闪点, $^{\circ}\text{C}$	256	$\geq 250$
溶解度, %	99.99	$\geq 99.0$
蜡含量, %	2.0	$\leq 2.2$
TFOT 损失, %	0.012	$\leq \pm 0.4$
针入度比, %	56.9	$\geq 52$
TFOT 后延度, cm (15 $^{\circ}\text{C}$ )	$\geq 100$	$\geq 100$
TFOT 后延度, cm (10 $^{\circ}\text{C}$ )	$\geq 100$	$\geq 100$



### 2.3.2 改性剂

改性剂优选低嵌段比的线形聚苯乙烯-丁二烯热塑性弹性体，高含量的丁二烯嵌段又称为软段，具有良好的低温性能，又因为含有双烯键而具有一定的极性，与沥青保持良好的相容性。选择嵌段比为3:7，SBS产品中低温性能最好的分子量范围在50000~80000的线形SBS产品。

### 2.3.3 试验设备

本实验用到的主要仪器设备见表2.3-2:

表 2.3-2 试验主要仪器

仪器名称及型号	生产厂家
锥针入度专用恒温器	大连北方分析仪器有限公司
针入度测定器	北京兰航测控分析仪器有限公司
BFH-03C 超级低温恒温器	大连北方分析仪器有限公司
精密电子天平	梅特勒公司
沥青延度测定仪	北京兰航测控仪器仪表有限公司
沥青乳化分散剪切机	上海 FLUKO 电气设备公司
沥青软化点测定器	北京兰航测控分析仪器有限公司
全自动沥青动力黏度试验仪	上海昌吉地质仪器有限公司
SLL-B 石油沥青蜡含量测定仪	沈阳施博达仪器仪表有限公司
BFH-01B 恒温水浴 (测定四组分)	大连北方分析仪器有限公司
石油沥青薄膜烘箱	沈阳施博达仪器仪表有限公司
沥青运动粘度测定仪	BROOKFIELD CO.
改性沥青旋转薄膜烘箱	JAM. @ COX CO.
400 倍荧光显微镜	NIKON 公司
沥青混凝土冻断试验设备	西安理工大学

### 2.3.4 试验思路

由于呼和浩特地区夏季炎热、冬季寒冷，因此在产品开发时要同时兼顾沥青的高低温性能，解决材料间的相容问题，保证产品的施工操作和易性。采用SBS改性沥青技术加工路线，由于低分子量、低嵌段比的线形SBS，在常规的加入量下对于改善沥青高温性能作用并不理想，因此要兼顾高温性能就要增加改性剂的加入量，而这样又会导致大剂量改性剂如何稳定在沥青体系中的问题。

为了解决以上矛盾，需要开发适宜的加工工艺，使各种材料相容并分散均匀，形成稳定的胶体结构，才能在保证沥青具有良好高温性能的前提下，更加突出沥青材料的低温抗裂特性。

### 2.3.5 稳定技术的开发与研究

#### (1) 基质沥青与不同量SBS的相容性研究

以辽河低凝环烷基原油生产的重交通道路沥青与SBS具有良好的相容性，环烷

烃和芳香烃含量高，普遍认为是生产 SBS 的最佳原料沥青。但是沥青对于 SBS 的溶解能力是有限的，普遍认为 SBS 的加入量在 3% ~ 5% 时，稳定剂可以在外力作用下将 SBS 稳定分散在沥青中。本研究采用表 2.3-1 中 C-130 极寒沥青基础料为基质沥青，考察添加 5% ~ 8% SBS 时改性沥青的稳定性；稳定剂按照通常加入量为 0.2% ~ 0.3% (WT%)。具体数据见下表 2.3-3。

表 2.3-3 不同 SBS 添加量对改性沥青稳定性的影响

分析项目	1#	2#	3#	4#
SBS 加入量, %	5	6	7	8
稳定剂加入量, %	0.25	0.26	0.28	0.30
针入度 25℃, 0.1mm	117	105.1	89.5	78.2
软化点, ℃	67.0	76.0	83.0	87.4
延度, 5℃, cm	73.6	67.6	58.7	42.3
黏度, 135℃, Pa·s	0.87	1.0	1.6	2.4
闪点, ℃	>230	>230	>230	>230
溶解度, %	99.9	99.9	99.9	99.9
离析, 软化点差, ℃	2.2	2.8	8.9	>20
弹性恢复, 25℃, %	90	92	94	95
PI	-0.99	-0.67	-0.23	0.14
RTFOT, 质量变化, %	0.02	0.012	0.012	0.010
针入度比, %	70.2	75.3	78.0	83.5
延度 5℃, cm	41.6	38.2	30.9	26.4

从上表数据可以看出，当 SBS 加入量在 5% 时，离析试验结果接近  $\leq 2.5^\circ\text{C}$  技术要求，当 SBS 加入量在 6% ~ 8% 时，离析试验结果未满足技术要求，并且随着加入比例的增大，不稳定现象越发突出。说明普通稳定技术对于大剂量的 SBS 稳定效果很不理想。

未经中国三峡出版传媒有限公司的书面许可，任何媒体及个人不得转载、摘编该节选内容。违者将被依法追究其侵权责任。  
如有需要请购买原版书。



三峡小微 中国三峡出版传媒 中国三峡出版社