

文章编号:0559-9350(2018)09-1137-11

我国沥青混凝土防渗工程技术的发展与展望

郝巨涛^{1,2}, 刘增宏², 汪正兴²

(1. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 本文针对国内沥青混凝土防渗技术发展中的热点问题进行了评述和分析, 包括学习掌握国外先进机械化施工技术, 以骨料高级配指数方法解决沥青面板高温流淌问题, 以SBS改性沥青技术解决沥青面板低温抗裂问题, 以及目前还处于探索研究阶段的沥青混凝土面板老化评估和修补技术研究, 沥青混凝土的水损害评估和酸性骨料应用技术研究, 沥青混凝土心墙的水力劈裂问题研究等。可以预见, 这些技术的研究进步必将在未来进一步助力沥青混凝土防渗技术的发展。

关键词: 沥青混凝土; 沥青混凝土防渗; 水力劈裂; 低温抗裂; 老化; 酸性骨料; 斜坡流淌

中图分类号: TU528.42

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20180491

1 引言

沥青混凝土以其防渗性能优异、适应基础变形能力强、一旦出现缺陷便于修补和工程维护等特点, 在我国水利水电工程中获得了越来越多的应用, 其优异性能也逐渐被工程界所认识。近20年来, 我国沥青混凝土防渗工程建设技术水平有很大提高, 这与国内优质沥青的生产供应能力、国外机械化施工技术的借鉴吸收、抽水蓄能电站及大中型土石坝建设的快速发展密不可分。在天荒坪、张河湾、西龙池等工程借鉴国外工程经验的基础上, 随着茅坪溪、尼尔基、冶勒、宝泉、呼和浩特等工程的成功建设, 我国目前已经能够独立建设沥青混凝土防渗工程, 实现了机械化精准施工和以孔隙率控制为核心的质量控制。在沥青混凝土面板防渗工程方面, 初步建立了具有我国特色的低温抗裂和斜坡稳定控制设计方法, 20世纪七八十年代我国沥青混凝土防渗工程中常见的斜坡高温流淌、低温开裂等问题已基本得到解决, 并建成了世界上环境温度最低的呼和浩特抽水蓄能电站沥青混凝土面板防渗工程。近年来, 依托已运行20年的天荒坪沥青混凝土面板工程, 有关面板老化特性和修补措施的研究正在进行。在心墙方面, 双桥等心墙坝工程已开展了酸性骨料应用尝试, 以扩大水工沥青混凝土的适用范围。随着去学水电站等高沥青混凝土心墙坝的建设, 对特殊情况下的心墙水力劈裂问题的研究也有了进一步认识。本文对当前沥青混凝土防渗技术发展中的关键问题和工程实践进行了分析评价, 包括斜坡热稳定问题、低温抗裂问题、面板老化评估、酸性骨料适用性、高心墙坝水力劈裂问题等, 并就相关技术的未来发展提出了看法。

2 沥青混凝土面板的斜坡热稳定性

斜坡热稳定性是沥青混凝土面板防渗工程中的关键技术问题之一。沥青混凝土面板在烈日曝晒

收稿日期: 2018-05-26; 网络出版日期: 2018-09-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180918.1102.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404803); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题(SM0112B242018);

中国水科院科研专项(SM0145B632017)

作者简介: 郝巨涛(1961-), 男, 辽宁辽阳人, 教授级高级工程师, 主要从事沥青混凝土防渗技术研究。E-mail: hjt@iwhr.com

下表面温度可达到70℃以上,导致沥青变软,可使面板在自重下顺坡向流淌,出现向下壅包,壅包上方出现横向开裂。面板一旦出现流淌壅包,一般每年都会出现新包,彻底修复难度很大,严重时就得拆除重做面板。1970年代末修建的河南南谷洞水库沥青混凝土面板防渗工程就曾发生面板流淌,1987年进行第3次翻修后仍有流淌出现。2004年由中国水科院试验提出配合比方案并对局部实施翻修施工^[1],至今运行良好。

沥青混凝土面板的斜坡热稳定性除与材料配合比有关外,施工工艺是重要的影响因素。我国1990年代以前建设的沥青混凝土防渗面板工程施工机械化水平低,造成现场拌制的沥青混合料配合比与设计配合比偏差较大,摊铺压实水平也不高,是导致那个年代沥青混凝土面板频繁出现流淌的主要原因之一。1998年起,借鉴天荒坪工程的德国机械化施工经验和公路施工建设经验,我国开展了碾压式沥青混凝土防渗体施工技术的系统研究^[2],主要研究结论是,国内以往沥青混凝土防渗工程存在的问题除与沥青品质有关外,施工机械化水平低是个重要因素;水利水电工程沥青混凝土施工除部分设备可直接利用公路施工设备外,还应对公路拌合站进行调整以满足拌料精度要求,开发斜坡摊铺机、斜坡牵引台车、心墙摊铺机等设备,以满足现场压实孔隙率的要求,该项目还提出了设备改造和开发的具体建议。这些成果为我国后来的碾压式沥青混凝土机械化施工奠定了基础^[2]。2004年南谷洞沥青混凝土面板翻修时,改造了国产公路LB1000型拌和站,包括增设热料仓、填料计量装置、热料储料罐等,使拌料精度满足了工程要求。同时采用了配备预压密实熨平器的国产小型LMP-03型斜坡摊铺系统,确保摊铺压实后孔隙率满足要求^[3]。南谷洞的成功经验为随后的宝泉工程提供了借鉴。宝泉沥青混凝土面板斜坡坡比1:1.7,是我国第一座由国内企业采用现代机械化施工技术自主建设的大型沥青面板防渗工程,也我国同类工程中面板最陡的。宝泉工程面积达16.6万m²,由于要求的施工强度高,工程中采用了大型LB2000型沥青混合料拌合站和经过改造的德国VOGELE 1800型摊铺机,确保了沥青混凝土的拌制质量和压实质量^[4-5]。宝泉的机械化施工技术在后来的呼和浩特沥青混凝土面板工程中也得到了成功应用。

除施工工艺外,沥青混凝土配合比设计对其斜坡稳定性也有重要影响,其中包括斜坡稳定性室内试验判定及试验方法问题。我国自20世纪七八十年代沥青混凝土防渗技术起步至今,斜坡稳定性一直采用依据当时国内工程经验提出的马歇尔试件斜坡稳定试验控制,要求在70℃×48h下的斜坡流淌值不大于0.8mm^[6]。由于工程中普遍发现现场钻取的芯样无法满足这一要求,引发了工程界对这个参数的怀疑,有的工程甚至将0.8mm的流淌阈值要求放宽到了2.0mm。按照国外经验,如果沥青混凝土能够承受施工期的高温保持稳定,其运行期的长期稳定也不成问题。同时国外的斜坡稳定性采用切成两半的马歇尔试件进行斜坡热稳定试验,提出斜坡稳定性标准是,其一是在头24h内的试件变形要小,其二是在第2个24h内试件变形基本不再增加。至于什么是变形小却没有规定,并认为目测检查变形的精度足够,48h的试验历时足以了解斜坡稳定性^[7]。目前,《土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范》(SL501-2010)已明确规定仅对马歇尔标准试件采用0.8mm的流淌阈值控制,但是这一控制是否太严、能否放宽,前述的国外控制方法是否可行等问题,仍有待进一步研究。

在沥青混凝土配合比设计方面,早期防渗型沥青混凝土强调材料的防渗性,注重孔隙率要小,同时考虑到沥青混凝土的柔性要求,在配合比设计中倾向于采用较高的沥青含量和较少的粗骨料,细骨料偏多,对此有的工程尤甚。张河湾的防渗层沥青混凝土级配指数为0.24,沥青油石比高达8%^[8]。这种配合比的结果可导致沥青混凝土中粗骨料被沥青砂浆悬浮,不能形成相嵌咬合结构,而温度升高时沥青砂浆易于流变,从而降低了沥青混凝土的斜坡热稳定性。基于这一认识,宝泉上库面板的配合比设计从沥青混凝土结构入手,借鉴公路SMA碎石沥青混凝土的经验^[9],提出采用高级配指数($n=0.35 \sim 0.45$)形成稳定骨架结构的理念。其思想是,以粗骨料形成抗流淌变形的稳定骨架,以骨架中的适量(不是过量)沥青砂浆和沥青胶浆形成结构防渗体,以获得既能满足斜坡稳定(黏聚力和内摩擦角均较大)、又能抗渗耐久(孔隙率小于3%)的面板沥青混凝土。基于这一理念提出的高级配指数配合比设计方法,解决了宝泉工程1:1.7斜坡、极端最高气温43℃下(面板表面温度达80℃)的面板高温稳定问题,该工程运行至今没有任何流淌迹象。表1给出了同时期3个工程的沥青

表1 国内3座蓄能电站工程防渗层沥青混凝土配合比的比较

筛孔/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	沥青油石比/%
宝泉	100	98.5	87.0	66.3	51.6	37.5	26.5	18.3	14.4	11.3	7.0
西龙池	91	86	81	67	52	42	32	25	18	13	8.1
张河湾	100.0	99.6	87.9	68.8	58.2	49.9	36.4	20.1	15.0	12.0	8.3

混凝土配合比,从中可以看出,宝泉沥青混凝土配合比中粗骨料相对多,填料用量及沥青含量均较小。当然,考虑到沥青混凝土的柔性和适应基础变形能力,沥青含量也不应过低。

宝泉的工程经验为水工沥青混凝土防渗面板提供了借鉴。呼和浩特抽水蓄能电站上水库及崇礼冬奥会配套项目太舞1[#]蓄水池的面板沥青混凝土,即使使用了改性沥青,从斜坡热稳定性方面允许采用较高的沥青含量,采用的沥青油石比也仅为7.2%。工程实践表明,只要采用合适的配合比设计方法和施工工艺,可以根治我国以往沥青面板斜坡热稳定性差这一顽疾。同时也应看到,我国沥青面板坝的最陡坡比是1:1.7(如宝泉),国外的坡比则有做到1:1.5的(如奥地利的Zirmsee坝、Osche-niksee坝等)^[10],德国修复Alz发电引水渠水泥混凝土面板衬砌时,曾在1:1.25的陡坡上用桥式摊铺机进行了沥青混凝土面板施工^[11],与这些工程相比,我国还有相当的技术差距。

3 沥青混凝土面板的低温抗裂性

暴露在空气中的沥青混凝土防渗面板,在冬季低温和遭遇寒流时会发生收缩,由于面板自身或基础的变形约束作用就会产生拉应力,当拉应力超过自身拉伸强度时面板就会开裂发生低温冻断。我国早期修建的沥青混凝土面板坝,如半城子^[12]等,就遭受了严重的低温冻断破坏。奥地利的Hoch-wurten沥青混凝土面板坝于1984—1985年冬也发生了坡向低温冻断^[10]。

冻断试验是评价沥青混凝土低温抗裂性能的一种直观试验方法,可以测定沥青混凝土在降温过程中的温度-应力过程和冻断温度^[13],美国称为约束试件温度应力试验(TSRST),美国公路战略研究计划(SHRP)推荐了此方法^[14]。1980年代后期,西安理工大学结合沥青混凝土面板的低温抗裂研究,研制出了我国的沥青混凝土冻断试验机,试验方法也纳入了我国技术标准(DL/T5362-2006)^[15]。

沥青混凝土面板的低温抗裂设计包括两方面的内容。首先是低温抗裂设计指标的确定,在建立了冻断温度参数的试验标准后,如何确定具体工程的冻断温度指标是设计中的关键问题之一,该指标显然与工程的极端最低气温有关。我国冻断试验标准采用的是200mm×40mm×40mm试件,试验中采用等速降温控制温度,降温速率一般采用-30℃/h^[15]。该标准方法与实际工程中的无限大/半无限大面板、面板单侧经受降温且降温速率随机明显不同。由于对此缺乏系统研究,我国目前采用的方法是,以当地极端最低气温并计入一定的温度安全裕度来选定设计冻断温度指标。在按照低温设计的两个沥青混凝土面板工程中,西龙池上库的极端最低气温为-34.5℃,选定的设计冻断温度为-38℃,温度安全裕度为3.5℃^[16];呼和浩特上库的极端最低气温为-41.8℃,选定的设计冻断温度为-45℃,温度安全裕度为3.2℃^[17]。经调研,呼和浩特上库沥青面板工程是目前国内外同类中气温最低的工程。

沥青面板低温抗裂设计的另一个重要问题是研究提出满足上述设计冻断温度指标要求的沥青混凝土。由于沥青混凝土的低温抗裂性能主要取决于所用的沥青,该问题的核心是选择或开发合适的沥青。例如,宝泉上水库极端最低气温-18.6℃,要求沥青混凝土冻断温度不高于-30℃,选用辽河石化分公司生产的昆仑牌90号普通沥青可满足要求;张河湾上水库极端最低气温-26℃,要求冻断温度-35℃,同样使用辽河石化分公司生产的昆仑牌90号普通沥青也可满足要求;而西龙池上水库工程要求冻断温度-38℃,因普通沥青已不能满足要求,该工程采用了SBS改性沥青,其性能见表2;呼和浩特上水库工程设计冻断温度-45℃,因市场上的改性沥青不能满足如此苛刻的要求,遂由中国水科院和盘锦中油辽河改性沥青有限公司经过一年多研究,开发出了5[#]水工改性沥青,其性能

表2 西龙池、呼和浩特改性沥青性能

检测项目	单位	西龙池上库 ^[19]		呼和浩特上库 ^[18]	
		技术指标	检测结果	技术指标	检测结果
针入度(25℃)100g, 5s	0.1mm	≥80	98	>100	119
针入度指数PI		≥-0.6	6.7	≥-1.2	-0.92
软化点(环球法)	℃	≥50	82	≥45	86
15℃延度(5cm/min) ^[20]	cm	≥150	103	≥100	85
5℃延度(5cm/min)	cm	≥40	64	≥70	94.8
含蜡量	%	≤2	2.0	≤2	1.8
脆点	℃	<-20	-28	≤-22	-29
25℃弹性恢复	%	≥60	100(15℃)	≥55	97
软化点差(48h)	℃	≤2.5	1.0	≤2.5	0.2
135℃动力黏度	Pa·s	≤3	1.2	≤3	2.27
质量损失	%	≤1.0	-0.2	≤1.0	-0.12
薄膜烘箱	软化点升高	℃	≤5	≤5	2.8
后(163℃×	针入度比(25℃)	%	≥55	≥50	82
5h)	脆点	℃	≤-18	≤-19	-27
	5℃延度(5cm/min)	cm	≥25	≥30	79.8

见表2，满足了工程需求^[18]。西龙池和呼和浩特是目前国内仅有的按照低温冻断温度指标进行控制的两个工程，西龙池、呼和浩特分别于2007年底和2013年底完工并蓄水，目前已经经历冬季低温多年，还没有发现有冻裂现象。

沥青混凝土的低温冻断温度与所用沥青的脆点和低温延度之间存在一定相关性。表3给出了不同厂家和科研单位改性沥青的相关数据，并可整理得到图1，据此可以根据工程要求的沥青混凝土冻断温度确定所需的改性沥青5℃延度和脆点，对于改性沥青选择具有借鉴意义。

表3 不同厂家改性沥青低温性能与沥青混凝土冻断温度^[18]

生产厂家	沥青品种	脆点/℃	5℃延度/cm	冻断温度/℃
盘锦中油辽河沥青有限公司	宝泉封闭层用水工沥青		45	-36.7
	水工改性沥青1*(SBS改性)	-24	77	-44.3
	水工改性沥青2*(SBS改性)	-21	66	-39.9
	水工改性沥青3*(SBS改性)	-25	78	-44.3
	水工改性沥青5*(SBS改性)	-29	94.8	-45.0
路新大成公司	水工沥青(SBS改性)	-17	56	-34.2
中海油气开发利用公司	改性沥青1*	-18	54	-36.1
	改性沥青2*	-18	46	-34.5
	改性沥青3*	-17	24	-35.7
	改性沥青5*	-22	75	-42.2
中国水利水电科学研究院	SK-2型改性沥青	-28	95.4	-46.6
	5*	-29		-47.5

自西龙池上库工程开始，我国沥青混凝土防渗面板工程为应对低温冻断问题已开始采用改性沥青，并以冻断温度为控制指标进行沥青混凝土的配合比设计。在呼和浩特上库工程中，应对的极端最低气温已低至-41.8℃，不论是在与-24.5℃下沥青面板发生冻断的我国半城子坝^[12]相比，还是与已发生冻断、并在修复加固中设计应对-35℃低温问题的奥地利Grossee坝^[10]相比，我国在抗低温冻断指标设计及改性沥青研发的工程实践方面，已经取得很大进步，并处于世界领先地位。但是也应看到，前述我国的沥青混凝土冻断温度指标确定方法还处于摸索阶段，经验还很少，相关的应用基础理论研究也明显不足，有待改进。

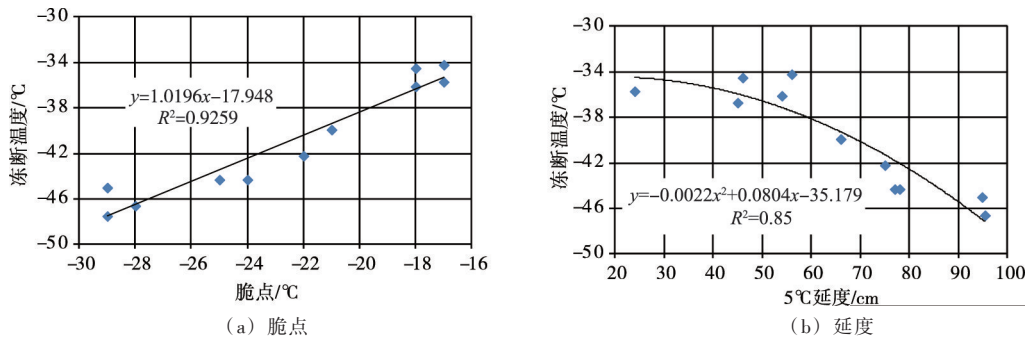


图1 改性沥青低温性能与沥青混凝土冻断温度的关系^[18]

4 沥青混凝土面板的老化问题

沥青混凝土的老化，也就是其中沥青的老化。沥青在贮存、运输、施工及后期运行过程中，在热、氧气、阳光、水等因素作用下，会发生挥发、氧化、聚合等物理化学变化，使沥青逐渐变硬变脆，针入度和延度降低、软化点增高、脆点增高、黏度增大等。在材料方面，老化除了与所用沥青有关外，有些骨料还具有减缓老化的作用^[21]。对于施工期老化，通常采用残留针入度百分比，即施工后的沥青针入度占其原有针入度的百分比(RP值，Regained Penetration %)，来评价老化情况。文献[22]介绍玉滩和峡沟两座心墙坝工程70号沥青施工期老化的RP值为68.5%(=50/73)，并介绍日本一些工程的RP为60%~85%。为了评价施工期老化，美国SHRP计划提出的方法是，将松散的沥青混合料至于135℃下的强制通风烘箱中4h，以模拟现场拌合和摊铺施工中的老化^[23]。

沥青在工程运行过程中的老化主要是在自然环境作用下，包括水力侵蚀、日光照射、空气氧化等，发生的较为慢长的性能劣化过程。该老化过程除与沥青品质相关外，首先与沥青混凝土的密实度密切相关。表4是天荒坪沥青混凝土面板2015年(运行18年后)现场检查、不同孔隙率沥青混凝土的老化对比试验结果，其中试件1是现场取芯防渗层芯样(取芯高程905m)的下层沥青混凝土，试件2是天荒坪施工时拌制的松散防渗层沥青混合料，该料留存在上水库附近隧洞内用于修补。从表中看出，留存料因孔隙率较大(可达10%以上)，尽管洞内避光，仍发生了严重的热氧老化，针入度比芯样低59%，冻断温度低了11℃，抗裂能力明显较差，已不再适合用于沥青面板修补^[24]。

表4 天荒坪不同存放条件沥青混凝土历经18年后的老化对比试验结果^[24]

防渗层沥青混凝土	冻断温度/℃	针入度(25℃,0.1mm)	软化点/℃	黏度(135℃,MPa·s)
试样1(芯样下层)	-33.6	63	50.1	525
试样2(9号洞留存料)	-22.3	26	59.0	950

其次，老化还与所在部位距离面板表面的深度有关，表层部位老化最为严重。表5是天荒坪运行18年后、上水库库顶常年裸露区沥青混凝土面板防渗层不同深度的老化对比试验结果，该工程防渗层厚100mm，试验时将现场钻取的芯样按照0~10mm、15~55mm、60~100mm分为表层、上层、下层进行试验。表中B80原样沥青是指采用现场洞内留存的桶装沙特B80沥青及其他工程石灰岩骨料，按照天荒坪当年施工配合比重新拌制成型的沥青混凝土。从中看出，老化主要发生在表层10mm以内^[24]。

选用什么试验参数评价老化进程，对于正确评估沥青混凝土的寿命至关重要。Kliwer^[25]着眼于路面的低温开裂，曾采用冻断试验(TSRST)的冻断温度作为衡量沥青混凝土老化的试验参数。对于沥青混凝土防渗面板，其老化是由表及里，最终的破坏可能开始于表面出现低温微裂纹，也可能还伴随随沥青与骨料分离导致的沥青混凝土松散。文献[24]基于前种考虑，采用冻断温度评价天荒坪沥青混凝土面板的老化。表5中常年裸露区的表层沥青混凝土冻断温度因老化已升至-23.5℃，由于天荒坪上库极端最低气温约为-15℃，从低温开裂角度考虑，这一老化后的冻断温度值目前还不致于引发

表5 天荒坪不同深度部位沥青混凝土历经18年后的老化对比试验结果^[24]

防渗层沥青混凝土	冻断温度/℃	芯样回收沥青		
		针入度(25℃,0.1mm)	软化点/℃	黏度(135℃,MPa·s)
B80原样沥青	-35.5	78	45.5	450
表层0-10mm	-23.5	46	55.3	730
上层15-55mm	-33.6	61	50.6	650
下层60-100mm	-32.4	62	50.6	550

天荒坪沥青面板发生表层低温开裂。

在外界因素方面,日照、气温、库水浸泡情况等,都可能会影响沥青混凝土的老化。文献[22]介绍,在2009年对天荒坪沥青面板常年裸露A区、水位变动B区和水下C区分别钻取芯样,并分别对芯样的表层、上层和下层进行残留针入度(RP)试验,在扣除施工期老化估算值后,发现常年裸露A区的上层基本没有老化;在表层老化对比方面,试验发现水下C区竟然比水位变动B区还严重(见图2),并且日本的Yashio坝也发现了这一现象^[22]。由于在日照、气温、库水浸泡3个因素中,水下区域只有库水浸泡作用强于水位变动区,前述试验结果应当是启示了库水浸泡的老化作用。但这一点还有待研究证实。

在沥青混凝土老化规律研究方面,文献[22]采用热沥青混合料的加速老化试验方法,研究天荒坪面板沥青混凝土的老化进程。该方法将松散的沥青混合料至于135℃的烘箱中,每小时搅动一次。对于不同老化历时的沥青混合料抽提沥青,测试残留针入度(RP值),可以建立加速老化小时数(H)与RP值的关系。进一步收集了国内外7个经历不同年代工程的表层沥青混凝土RP值,包括天荒坪的A区RP(41%)、B区RP(51%)和C区RP(45%),前述玉滩和峡沟施工期(对应年数为0)的老化RP(68.5%),以及历时31年的日本Numappara坝的两个RP(38%和55%)。假设加速老化的RP和实际环境下的RP可比(见图3),根据上面试验和收集的资料,文献[22]建立了加速老化时数(H)与工程环境年数(Y)的相关关系^[22]: $H=4.3+0.88Y$ 。根据这一关系,施工期老化对应的加速老化时间为4.3h,实际环境下1年的老化相当于加速老化0.88h。利用该相关关系,文献[22]通过加速老化试验,预测了天荒坪未来的弯拉应变变化。该相关关系是沥青混凝土老化规律研究的有益尝试,可用于预测面板的老化寿命,尽管其加速老化条件与实际环境条件是否完全可比,还有待进一步研究证实。

对于沥青混凝土面板封闭层,造成其老化的外界因素除了日照、气温、库水浸泡以外,还与水

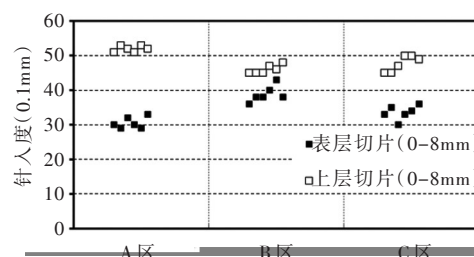
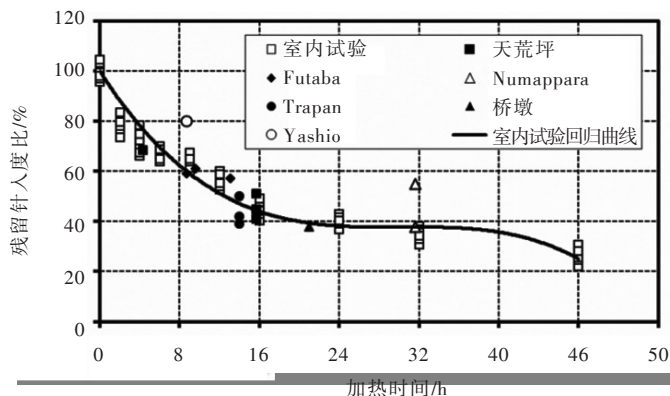
图2 天荒坪面板运行13年后A区、B区、C区芯样表层及上层抽提沥青的针入度^[22]图3 不同工程沥青面板的表层RP与加速老化试验的RP对比^[22]



图4 2015年天荒坪西库岸封闭层外观^[24]



图5 2015年天荒坪库区西北角温水排放剥蚀^[24]

力冲刷侵蚀有很大关系。冲刷侵蚀来自蓄水库的水位日变动、库顶降温水管的喷淋等。在2015年对天荒坪的检查中,发现可将封闭层按破损情况沿高程分为两个区,▽898 m以上为A区,以下为B区,A区为封闭层破损区,B区为封闭层外观完整区。根据破损严重情况可将A区进一步分为A1区(常年裸露区)和A2区(水位变幅区),见图4。A1区封闭层呈竖向条带型破损,明显与库顶的喷淋水有关,同时因A1区未受库水位变动作用,破损相对较小;A2区受库水位变动作用,破损明显比A1区严重,很多部位封闭层已基本消失。在库区西北角,还发现由洗浴温水排放引发的封闭层剥蚀(图5)。

在封闭层老化规律方面,文献[24]介绍2015年针对天荒坪常年裸露区残留封闭层的取样抽提后进行检测,25℃针入度为0.4~0.6 mm,软化点为90~95℃;施工时封闭层采用沙特B45沥青,针入度为3.5~5.0 mm,软化点为54~59℃。历经18年,封闭层老化已十分严重,且相当部分在水力侵蚀下已经脱落。同时,文献[24]采用中海油道路50号沥青模拟天荒坪封闭层的B45沥青,针对2 mm厚的封闭层沥青玛蹄脂(沥青:矿粉=3:7),进行了1.55、0.68和0.35 W/m² 3种辐射强度,以及55℃、50℃、45℃共3种温度下的紫外光老化试验,结果发现该温度变幅对试验结果几乎没有影响;根据试验结果并参照以往经验,建立了不同辐射强度下该沥青玛蹄脂的针入度与紫外光照射时间的关系。按照这一关系和现场的紫外辐射强度,就可以推知不同老化年数的针入度变化。由于目前天荒坪没有光强监测设施,对封闭层的检测数据只有一次,这一关系还有待今后研究验证。

沥青混凝土面板的老化演进是由表及里地进行,老化会使面板出现裂纹,降低抵抗水力侵蚀破坏的能力。为了应对老化,目前有主动和被动两种方法。主动的方法是在表面涂刷封闭层沥青玛蹄脂,并定期更换(一般5~10年),目前德国和我国等基本采用这一方法;被动的方法是不涂刷封闭层,以防渗层表层作为防止老化向内部发展的屏障,到一定时间(比封闭层更换的时间要长)再更换老化破坏的面板表层,奥地利的沥青混凝土面板坝多用这一方法。不论采用哪种方法,都有必要了解面板的老化规律、老化进程,选择更换已老化破坏部位的时间,以期用最小的代价得到最持久(甚至是永久)的工程效果。但对于这些问题的认知目前还很肤浅,尽管已有了前面介绍的一些有意义的尝试研究。在材料方面,通过工程对比已经发现,改性沥青的抗老化侵蚀能力要强于普通沥青。

5 沥青混凝土的酸性骨料问题

沥青混凝土功用的发挥,取决于沥青将粗细骨料胶结成一个整体的效果。在不与水接触时,这一胶结不会发生任何问题;如果遇到水时,沥青与骨料的胶结就可能被破坏,发生水损害。这是因为水比沥青更容易浸润骨料表面,并降低沥青与骨料之间的黏附性。当沥青和碱性骨料接触时会发生化学反应,生成不溶于水的化合物并形成化学吸附。当沥青和酸性骨料接触时不会发生化学反应,沥青和骨料表面只会有物理吸附,而物理吸附远远小于化学吸附。所以为了避免沥青混凝土的水损害,其骨料应优先选择石灰石、白云石、玄武岩等碱性骨料。当需采用酸性骨料时,必须进行论证并采取必要的技术措施,以防发生水损害。1981年我国曾召开“酸性骨料在水工沥青混凝土中应

用问题”技术讨论会,并指出,室内外试验表明,消石灰、硅酸盐水泥、电石渣、三氯化铁、煤焦油、聚酰胺等作为抗剥离剂,在适当剂量下,对提高酸性骨料与沥青的黏附性能,均由较好的效果。由于试验方法和技术指标还不能很好表征酸性骨料的黏附性,以致室内试验成果有时不能正确反映实际的工程效果,应对试验方法和技术指标进行研究^[26]。

甘肃敦煌的党河沥青混凝土心墙坝是我国最早的碾压式心墙坝,坝高58.5 m,1975年建成。施工中沥青采用玉门黑渣油或糠醛渣油与10号沥青掺配(相当于60号沥青指标),骨料采用戈壁沙砾,最大粒径25 mm,属酸性骨料,油石比8.5%,天然砂砾54.5%,碎石37%,填料8.5%^[27]。

1978—1980年我国曾进行渠道沥青混凝土衬砌试验,以了解针对酸性骨料采用不同处理措施的效果,包括陕西冯家山北干渠渠首15 m长试验段和青海湟海渠3650 m长试验段。处理措施包括:(1)掺消石灰,即按矿料重的2%采用0.1 mm粒径以下的消石灰代替部分矿粉;(2)掺水泥,即用烘干粉碎的矿渣水泥和废水泥代替矿粉;(3)掺三氯化铁,即用矿料重0.22%的三氯化铁与3%~5%的水配成三氯化铁水溶液,喷洒裹覆矿料,晾干后拌制沥青混凝土;(4)掺低标号煤焦油,即将脱水后的煤5与30号石油沥青按23:77混合均匀。试验段运行数年后,未发现磨损、剥落、因强度降低所致的崩裂现象^[28]。

四川双桥心墙坝坝高73 m,多年平均气温17℃。由于坝址区缺乏碱性骨料,砂砾石料岩质种类较多,酸性、碱性岩质都有。统计表明1/3砂砾石未达到规范不小于4级的黏附性要求,破碎后不满足黏附性要求的比例上升到1/2。为此,曾采用褐色液态的PA-1抗剥落剂进行试验,发现在SG70号沥青中掺加0.4%的PA-1,可以使砂砾石中酸性骨料的黏附性等级由2~3级提高到不小于4级^[29]。

冬奥会配套工程崇礼太舞1[#]造雪用蓄水池采用改性沥青混凝土面板衬砌防渗,因当地没有碱性骨料故采用高家营料场骨料。该骨料SiO₂含量高达69.24%,是典型的酸性骨料。但试验发现,其与改性沥青的黏附性达到5级。经分析,一是SBS改性沥青的骨料黏附性比普通沥青好,二是高家营酸性骨料表面多孔,吸水率达2.5%,热沥青可进入骨料表面增加黏附力。该工程设计要求沥青混凝土冻断温度低于-40℃,2015年建成后运行良好^[30]。

诚如文献[26]中指出的,目前工程中判断酸性骨料是否合格的技术指标仍需进行研究。该指标要求粗骨料的黏附性等级不低于4级,水稳定性系数不低于0.9^[31],其试验方法就是水煮法^[15]。水稳定系数就是马歇尔试件水中浸泡处理后的抗压强度与常规抗压强度之比,前者要求在60℃水中浸泡48 h,然后移入20℃水中2 h;后者为在20℃空气中不少于48 h。然而实践中,常出现黏附性等级不满足要求的酸性骨料,水稳定系数却大于0.9,满足要求^[29]。

水稳定性试验实际上是一种在强化条件下的水损害耐久性试验,影响水稳定系数的因素包括浸泡水的水温、浸泡时间以及试件的孔隙率。另外水稳定系数中采用的强度试验方法也会有影响。因此,在水工沥青混凝土采用酸性骨料的未来实践中,除了开发有效的改善酸性骨料与沥青黏附性的掺加剂和掺加工工艺,对酸性骨料沥青混凝土的水损害耐久性评价方法进行研究,也十分必要。

6 沥青混凝土心墙的水力劈裂问题

水力劈裂是土质心墙坝设计中需要考虑的重要问题之一,对此人们广为接受的观点是,当有效小主应力为拉应力,且其数值大于土体的抗拉强度时,就将发生水力劈裂^[32]。与土质心墙相比,沥青混凝土心墙的孔隙率极低,一般小于3%,加之沥青本身为憎水材质,其内部一般不会形成连续分布的孔隙水压力。此外,大坝心墙温度一般较低,而10℃时沥青的黏度极大,有试验证实,沥青不会传递外水压力。基于这两点,一般认为沥青混凝土心墙可不考虑水力劈裂问题^[33]。但是,如果沥青混凝土心墙由于某种原因已发生局部开裂,且压力水进入裂缝,则在压力水作用下开裂的进一步扩展是有可能的^[34]。我国一些沥青混凝土心墙坝在建设过程中,参照土石坝水力劈裂的方法,进行了水力劈裂试验研究和论证。

三峡茅坪溪沥青混凝土心墙坝在建设过程中,曾采用厚壁空心圆柱试件在三轴仪上进行水力劈

裂试验,发现在内外水压存在压差的情况下,并产生径向变形后才产生水力劈裂。另外还曾采用周边被夹持固定的圆形平板试件进行水力劈裂试验,板上施加水压,板下填充过渡料,发现在1 MPa的水压力作用下,沥青混凝土板的剪切变形达18 %时,才在周边发生水力劈裂破坏^[35]。多年后,朱晟也采用圆形平板试件进行水力劈裂试验,根据试验结果认为,当沥青混凝土心墙局部出现拉伸破坏裂缝时,会形成水楔作用,从而诱导发生水力劈裂^[36]。西安理工大学也曾采用中空圆柱体试件研究沥青混凝土的水力劈裂,认为心墙水力劈裂的物质条件是心墙中裂缝或缺陷的存在和心墙材料的低透水性,而足够大的所谓“水楔”作用是其发生的力学条件^[37]。

上述水力劈裂试验着眼于水的荷载作用进行试验,研究不同沥青混凝土试件(圆柱、圆板)在水荷载下的破坏。文献[38]着眼于剪胀导致孔隙率增加并进行模型试验,研究了3.5 %孔隙率沥青混凝土中的渗透性及水力劈裂,测得了在0.05 ~ 0.13 MPa水压力下进入沥青混凝土体的水量过程线,试验总共历经130多小时,最终在施加0.06 MPa外荷载下发生断裂。试验表明剪胀部位在0.13 MPa水压力和0.06 MPa拉应力下可能发生水力劈裂。

沥青混凝土的水力劈裂成因比较复杂,既可由水荷载对心墙裂缝部位的水楔作用引发破坏,也可由压力水在3%以上孔隙率沥青混凝土中因渗透形成孔隙水压力引发破坏,心墙自身应力状态也有很大影响。剪胀是造成后一种破坏的重要原因之一。目前对于水力劈裂破坏的研究还有待进一步深入。在工程方面,对于可能出现后一种水力劈裂破坏的部位,采取剪胀性小的沥青混凝土配合比,应是一种有效的应对水力劈裂破坏的方法。

7 结语

目前沥青混凝土防渗技术在我国水利水电工程建设中的应用正进入前所未有的快速发展阶段,主要有抽水蓄能电站的蓄水库防渗面板和土石坝的防渗心墙,其中呼和浩特抽水蓄能电站上水库在低温抗裂方面、去学水电站心墙坝在坝高方面,已经处于世界前列。这一防渗技术在我国的发展历程并不平坦,特别是1990年代首先以学习掌握国外先进机械化施工技术为起点,并自主研究解决了沥青混凝土面板的斜坡流淌问题和低温抗裂问题,目前我国正在研究建立具有自身特点的沥青混凝土面板老化评估修补技术、酸性骨料应用技术、心墙水力劈裂应对技术等。可以预见,这些技术的研究进步必将在未来进一步助力沥青混凝土防渗技术的发展。

参 考 文 献:

- [1] 岳跃真,郝巨涛,孙志恒.水工沥青混凝土防渗技术[M].北京:化学工业出版社,2007.
- [2] 郝巨涛,孙志恒,岳跃真,等.碾压式沥青混凝土施工技术研究[R].北京:中国水利水电科学研究院,2004.
- [3] 鲁一晖,郝巨涛,岳跃真,等.沥青混凝土面板防渗工程中的几个问题[J].水利水电技术,2005,36(3): 72-74.
- [4] 岳跃真,郝巨涛.宝泉抽水蓄能电站上水库面板沥青混凝土施工[J].中国水利,2009(6): 68.
- [5] 郝巨涛,刘增宏.水工沥青混凝土防渗技术,中国大坝技术发展水平与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [6] 土石坝沥青混凝土面板和心墙设计准则:SLJ01-88[S].北京:中华人民共和国水利部、能源部,1988.
- [7] EAAW 2007, Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau (Recommendations for the execution of asphalt works in hydraulic engineering)[S]. Deutsche Gesellschaft Für Geotechnik (DGGT). Germany, 2007.
- [8] 翁立刚,李登平,马博,等.张河湾沥青混凝土面板防渗层沥青混合料目标配合比设计[J].葛洲坝集团科技,2008(1): 27-29.
- [9] 沈金安.改性沥青与SMA路面[M].北京:人民交通出版社,1999.

- [10] TSCHERNUTTER P . Experience Gained with Asphaltic Concrete Facings on Highlevel Embankment Dams of the Fragant Group of Power Schemes[C]//16th International Congress on Large Dams . San Francisco, USA, 1988 .
- [11] ERICH Schonian . The Shell Bitumen Hydraulic Engineering Handbook[M] . Shell International Petroleum Company Ltd., London, 1999 .
- [12] 郝巨涛, 丁德全, 黄昊, 等 . 半城子水库沥青混凝土面板坝的现状及相关问题探讨[J] . 水力发电, 2006, 32(5): 81-83 .
- [13] AASHTO . Standard test method for thermal stress restrained specimen tensile strength (TP10-93)[S] . Washington, DC . , 1993 .
- [14] AASHTO . Standard Practice for Determination of Low-Temperature Performance Grade (PG) of Asphalt Binders (R049)[R]. Washington, D.C., 2009 .
- [15] 水工沥青混凝土试验规程: DL/T 5362-2006[S] . 北京: 中华人民共和国国家发展改革委员会, 2006 .
- [16] 孟凡珍, 沈安琪, 刘海宇 . 西龙池抽水蓄能电站上下水库沥青混凝土防渗面板设计与实践[C]//大坝技术及长性能研究进展 . 2011 .
- [17] 赵轶, 陈建华, 任少辉 . 呼和浩特抽水蓄能电站新技术研究与应用[C]//抽水蓄能电站工程建设文集, 2014 .
- [18] HAO Jutao, CAO Pengyun, LIU Zenghong, et al . Developing of a SBS polymer modified bitumen to avoid low temperature cracks in the asphalt facing of a reservoir in a harsh climate region[J] . Construction and Building Materials, 2017, 150: 105-103 .
- [19] 张伟 . 西龙池电站上水库沥青混凝土施工质量控制[D] . 西安: 西安理工大学, 2007 .
- [20] XIA S F, LU Y H, WANG Z X, et al . Studies on the Key Technical Problems of Asphalt Concrete Facing Slabs in Upper Reservoir of Huhhot Pump Storage[C]//Proceedings of The 4th International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting . Leipzig, Germany, 2015 .
- [21] BELL C A, KIEWER J E . Evaluating Aging of Asphalt Mixes[C]//Proc . ASCE Transp. Congr.-Civ. Engrs. Key to the Worlds Infrastructure . New York, 1995 .
- [22] WANG Weibiao, ZHANG Yingbo, ZHU Yue, et al . Investigation of aging of asphalt concrete reservoir facing with time[J] . Advances in Civil Engineering Materials, 2013, 2(1): 347-359.
- [23] BELL C A, ABWAHAB Y, CRISTI M E, et al . Selection of laboratory aging procedures for asphalt-aggregate mixtures[R] . National Research Council, Washington, D.C . 1994 .
- [24] 汪正兴, 郝巨涛, 刘增宏 . 天荒坪抽水蓄能电站上库沥青混凝土面板老化现状研究[C]//中国大坝工程学会2016学术年会论文集 . 郑州: 黄河水利出版社, 2016 .
- [25] KIEWER J E, ZENG H YU , VINSON T S . Aging and low-temperature cracking of asphalt concrete mixture [J] . Journal of Cold Regions Engineering, 1996, 10(3): 134-148 .
- [26] 《酸性骨料在水工沥青混凝土中应用问题》技术讨论会在青田县召开[J] . 水工沥青技术, 1981(4): 75 .
- [27] 沥青在我国水利水电工程的应用(续)[J] . 水工沥青技术, 1981(2): 6-7 .
- [28] 陈治郑 . 沥青与酸性矿料黏附性试验研究[J] . 水工沥青技术, 1981(2): 18-24 .
- [29] 张应波, 王为标, 兰晓, 等 . 土石坝沥青混凝土心墙酸性砂砾石料的适用性研究[J] . 水利学报, 2012, 43(4): 460-466 .
- [30] 崇礼县太舞1#蓄水池衬砌面板沥青混凝土设计配合比试验报告[R] . 北京: 北京中水科海利工程技术有限公司, 2014 .
- [31] 土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范: DL/T 5411-2009[S] . 北京: 中华人民共和国能源局, 2009 .
- [32] ANDERSEN K H, RAWLINGS C G, LUNNE T A, et al . Estimation of hydraulic fracture pressure in clay [J] . Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(6): 817-828 .
- [33] International Commission on Large Dams, Bituminous Cores for Fill Dams, State of the Art[R] . Bulletin 84, 1992 .
- [34] 吕明治, 鲁一晖 . 沥青混凝土防渗土石坝, 土石坝, 水工设计手册[M] . 2版, 第6卷 . 北京: 中国水利水电出版社, 2014 .
- [35] 饶锡保, 龚壁卫, 丁红顺, 等 . 沥青混凝土水力劈裂模型试验研究[C]//第24届全国土工测试学术研讨会论文集 . 2005 .

- [36] 朱晟, 魏匡民, 饶锡保. 土石坝沥青混凝土心墙水力劈裂研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(1): 218-222.
- [37] 鲁超. 沥青混凝土心墙模型水力劈裂的试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.
- [38] 曹岩, 郝巨涛, 汪正兴, 等. 沥青混凝土在剪胀条件下的水力劈裂模型试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(3): 213-219.

Development and prospect of hydropower project with asphalt concrete impervious elements in China

HAO Jutao^{1, 2}, LIU Zenghong², WANG Zhengxing²

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: Hot issues in the modern construction of hydropower project with asphalt concrete impervious elements in China have been reviewed and commented in this paper, which began in 1995 with the commencement of Tianhuangping Project using the western mechanization technology. Since then, the flow-off defects of asphalt facing at high temperature, pervasive before 1990s in China, has been prevented by means of a new mix design method with higher mixing index. Low temperature cracking of asphalt facing at extremely low temperature has also been avoided with the aid of special developed bitumen modified by SBS polymer. At present, new topics have been discussed and under studied, such as the aging of asphalt facing and the repair method, the evaluating method of water damage and the application of acid aggregate to the asphalt concrete, hydraulic fracturing of asphalt core wall, etc, which will deepen the comprehension of the nature of hydraulic asphalt concrete.

Keywords: asphalt concrete; asphalt impervious facing; asphalt core wall; hydraulic fracturing; low temperature crack; aging; acid aggregate; flow-off of asphalt facing

(责任编辑: 祁 伟)

《水利学报》征订启事

《水利学报》创刊于1956年, 是中国水利学会主办的综合性学术刊物, 是水利行业创刊最早、国内外最具影响的学术期刊, 在水利工程类核心期刊中排第一位, 被国内外多家检索系统收录。《水利学报》刊登反映水利、水电、水运领域较高水平的学术论文、专题综述和工程技术总结, 开展学术论文的讨论和评论, 介绍国内外科技动态和消息。主要专业范围包括: 水文及水资源、防洪、灌溉及排水、水力学、泥沙、河港及水运、岩土工程、水工结构及材料、水利水电施工及监理、水力机电、水利经济、水环境、水利史研究等。本刊邮局发行, 邮发代号2—183。每册30元, 全年订价360元。

主编: 程晓陶 国内统一刊号: CN11-1882/TV 国外代号: M216

地址: 北京海淀区复兴路甲1号院 邮政编码: 100038

投稿网址: <http://jhe.ches.org.cn>

联系电话: 010-68786919; 68786221; 68786238; 68786262

传真: 010-68786649; E-mail: slxb@iwhr.com

《水利学报》编辑部