

努尔加水库碾压式土石坝沥青混凝土心墙 酸性砂砾石料的配合比试验研究

张庆春

(新疆汇通水利电力工程建设有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘 要: 努尔加水库周围天然砂砾石料丰富,而碱性岩石料源距离坝址较远,为节省工程投资,对碾压式土石坝沥青混凝土心墙采用酸性砂砾石料进行了配合比试验研究,主要包括抗剥落剂的选型和沥青混凝土的水稳定试验,并对所推荐配合比的沥青混凝土进行了压缩、拉伸、弯曲、静三轴和渗透试验。结果表明:推荐配合比的沥青混凝土其各项物理力学性能均满足设计要求。

关键词: 沥青混凝土; 酸性砂砾石料; 力学性能; 配合比试验研究

中图分类号:TV641.25

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2014)04-0215-06

Experiment on mix proportion of acidic gravel stone for asphalt concrete core wall of rolled earth rockfill dam in Nulga reservoir

ZHANG Qingchun

(Xinjiang Huitong Water Conservancy and Electric Power Engineering Construction Co., Ltd, Urumuqi 830000, China)

Abstract: The natural material of gravel stone around Nulga reservoir is rich but the material of rock stone is far from dam area, in order to save the engineering investment, the paper researched mix proportion about asphalt concrete core wall which adopted acidic gravel stone of rolled fill dam in Nulga reservoir. The work mainly included the selection of antistripping agent and water stability test of asphalt concrete. It also carried out compression, stretching, bending, static triaxial and penetration test for asphalt concrete of recommended mix proportion. The results show that the various physical and mechanical properties of asphalt concrete of recommended mix proportion can satisfy the requirement of design.

Key words: asphalt concrete; acidic gravel stone; mechanical properties; experiment of mix proportion

1 研究背景

沥青混凝土心墙作为防渗体具有较好的防渗性能,对土石坝的不均匀沉降适应能力强,节省防渗土料,机械化程度高,具有较好的抗震性能及抗老化性能,在严寒高山地区或潮湿多雨地带可以迅速施工等优点。因此,目前沥青混凝土心墙土石坝作为一种经济和具有竞争力的优越坝型越来越受到国内外专家和工程界的重视^[1],其应用范围也越来越广,而相比之下其材料与力学性能方面的研究显得相对较少^[2]。

通常土石坝心墙沥青混凝土常用石灰岩和白云岩等碱性骨料,因沥青呈酸性,故在沥青混合料热拌和过程中,沥青与碱性骨料的结合不仅是表面物理

结合,而且结合面会发生化学反应,可增强沥青和骨料的黏附力。然而在一些坝址区,在合理的经济运输距离范围内,很难找到碱性岩石料源,而天然的砂砾石料丰富且运输距离较近。新疆多数水利水电工程位于山区或山前,由于新疆新构造运动比较强烈,表现为年轻的造山运动和相应的凹陷作用,即第四纪以来的抬升和下降,在天山南北麓、昆仑山北麓及山前形成深切的河谷和宽阔的阶地,河床及阶地上广泛分布第四系冲积砂卵砾石地层,且厚度几米至几十米不等,成分以花岗岩、石英岩为主,以及碎屑岩类,具有较高的强度,因此,河床及阶地砂卵砾石地层,被广泛用于坝体填筑材料及混凝土骨料等。

土石坝心墙沥青混凝土已有采用酸性砂砾石料的工程实践^[3],且工程实践表明酸性砂砾石料可用

于土石坝沥青混凝土心墙。目前这些土石坝沥青混凝土心墙运行良好,但缺乏对沥青混凝土心墙酸性砂砾石料系统的研究^[4]。本文结合努尔加水库沥青混凝土心墙土石坝工程,通过进行系统的配合比试验,包括抗剥落剂的选型和沥青混凝土的水稳定试验,选择各种性能都满足设计要求的配合比,并对所推荐配合比的沥青混凝土进行各种物理力学性能试验,探讨并验证了沥青混凝土心墙采用酸性砂砾石料的可行性。

2 沥青混凝土粗骨料采用未破碎砂砾石料的配合比试验

努尔加水库位于昌吉市境内三屯河出山口前中低山区,多年平均气温 6.4℃,极端最高气温 39.4℃,极端最低气温 -31.4℃,努尔加水库大坝为沥青混凝土心墙坝,最大坝高 73.0m,坝顶长度 486m。枢纽所属建筑物主要由沥青混凝土心墙坝、左岸导流兼泄洪排沙洞、放水洞和表孔泄洪洞组成^[5]。

2.1 原材料

粗骨料:粗骨料(粒径 2.36~19 mm)为未破碎的天然砂砾石,化学成份检测结果及碱度模数计算结果见表 1。

未破碎的天然砂砾石粗骨料为酸性,与沥青粘附力试验结果为:黏结力等级为 4,未破碎的天然砂砾石粗骨料与沥青粘附力较差(黏结力等级 < 4 级),不能满足黏附力等级要求,其他性能都满足沥青混凝土心墙对粗骨料的技术要求^[6]。

细骨料:细骨料(粒径 2.36~0.075 mm)采用河砂,所检测的河砂质地坚硬、新鲜,在加热过程中未出现开裂、分解等现象,岩性与天然砂砾石粗骨料相似为酸性。

填料:填料为灰岩矿粉,岩性为碱性,所检测的矿粉满足沥青混凝土填料技术要求,可以用作沥青混凝土心墙的填料。

沥青:克拉玛依 AH-70 号沥青,质量满足规范要求。

表 1 未破碎砂砾石料化学成分检测结果								%
项 目	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	
检测值	67.42	0.59	13.16	5.28	2.83	1.49	3.26	
碱度模数	$M = (CaO + MgO + FeO) / (SiO_2) = 0.1124$							

注:碱度模数依据中华人民共和国电力行业标准《土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范》DL/T5411-2009 中沥青混凝土原材料的技术要求中的公式计算,且当 $M > 1$ 时为碱性, $0.6 < M < 1$ 为中性, $M < 0.6$ 时为酸性。

2.2 未破碎砂砾石料与沥青粘附性试验研究

影响沥青与无机料粘接的因素很多,无机料的酸碱性只是一个因素,粗骨料和细骨料的形状(人工破碎料或天然料)、粗骨料和细骨料的级配组成和填料(矿粉)的细度等因素也都影响沥青与无机料的粘接性能。

砂砾石料与沥青粘附力较差,不能满足黏附力等级要求,针对骨料的特殊性,进行了未破碎砂砾石料与沥青的黏附性试验研究。为了改善砂砾石与沥青的粘附性,采用加入抗剥落剂。本次试验中采用的沥青抗剥落剂有:常州信拓公司生产的 XT-1 型和 XT-2 型,西安公路研究所生产的 PA-1 型。试验方法为水煮法,沥青型号为克拉玛依 AH-70 号。

(1)XT-1 型抗剥落剂。试验选用 XT-1 型抗剥落剂,加入量分别为沥青质量的 0.2%、0.25%、0.3%、0.4%、0.5% 时,粘附力等级达到 5 级(含 5-级)骨料(骨料数量一组为 29 个)所占比例分别为 31.04%、79.31%、82.76%、46.67%、44.83%。XT-1 型抗剥落剂添加量以 0.3% 最佳。

(2)XT-2 型抗剥落剂。试验选用 XT-2 型抗剥落剂,加入量分别为沥青质量的 0.35%、0.4%、0.45% 时,粘附力等级达到 5 级(含 5-级)骨料(骨料数量一组为 30 个)所占比例分别为 86.67%、100%、66.67%。XT-2 型抗剥落剂添加量以 0.4% 最佳。

(3)PA-1 型抗剥落剂。试验选用 PA-1 型抗剥落剂,加入量分别为沥青质量的 0.3%、0.35%、0.4%、0.5% 时,粘附力等级达到 5 级(含 5-级)骨料(骨料数量一组为 30 个)所占比例分别为 63.33%、73.34%、62.07%、36.67%。PA-1 型抗剥落剂添加量以 0.35% 最佳。

试验结果表明,骨料与沥青黏附力等级的高低,不仅与抗剥落剂的型号有关,还与所选抗剥落剂加入量有关,未破碎砂砾石料中与沥青黏附力等级为 5 级的骨料比例并非随抗剥落剂用量增加而线性增长,对于 XT-1 型抗剥落剂最佳添加量为 0.3%,XT-2 型抗剥落剂最佳添加量为 0.4%,PA-1 型抗剥落剂最佳添加量为 0.35%,并且骨料与沥青的黏附力等级都为 5 级。同时,综合比较 3 种抗剥落剂黏附力试验结果可知,XT-2 型抗剥落剂试验结果比其他两组好,所以在后期试验中选 XT-2 型抗剥落剂并按沥青质量的 0.4% 添加。

2.3 沥青混凝土水稳定试验

沥青混凝土水稳定试验分为常温施工配合比和冬季施工配合比,试验采用最大骨料粒径 $D_{max} = 19$

mm,矿料级配指数为 0.38、常温施工时采用填料浓度为 2.0,油石比 6.6%、6.9% 和 7.2%,组成 3 个配合比,冬季施工时采用填料浓度为 1.8,油石比 8.1% 和 8.4%,组成 2 个配合比,共 5 个配合比进行水稳定试验,试验结果见表 2~6。

从试验结果可以看出:按沥青质量的 0.4% 添加 XT-2 型抗剥落剂后,试验选取五组由天然砂砾石料作粗骨料、河砂作细骨料的沥青混凝土进行试验,水稳定系数都大于 0.97,满足《土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范》DL/T5411-2009 中规定沥青混凝土的水稳定系数应大于 0.90 的要求^[4]。其中常温施工配合比以 12 号配合比(油石比为 6.9%)的沥青混凝土水稳定性最好,冬季施工配合比以 27 号配合比(油石比为 8.4%)的沥青混凝土水稳定性最好,所有试件的渗透系数都满足规范的要求,即小于 1×10^{-8} cm/s,水稳定试验确定配合比成果表见表 7 和 8。

表 2 沥青混凝土水稳定试验成果表					% , MPa
试件编号	孔隙率	最大抗压	$\sigma_{\max}$	水稳定	
		强度 $\sigma_{\max}$	平均值		
泡水	SW11-1	1.990	1.7420	0.9114	
	SW11-2	1.132	1.4525		
	SW11-3	1.767	1.4185		
未泡水	SW11-4	1.669	1.6384	1.6872	
	SW11-5	1.838	1.7066		
	SW11-6	1.873	1.7166		

注:常温施工配合比,油石比 6.6%,填料浓度为 2.0。

表 3 沥青混凝土水稳定试验成果表					% , MPa
试件编号	孔隙率	最大抗压	$\sigma_{\max}$	水稳定	
		强度 $\sigma_{\max}$	平均值		
泡水	SW12-1	1.029	1.3262	1.0166	
	SW12-2	1.436	1.4078		
	SW12-3	1.408	1.3282		
	SW12-4	1.765	1.2727		
未泡水	SW12-5	1.708	1.2981	1.3320	
	SW12-6	1.831	1.4251		

注:常温施工配合比,油石比 6.9%,填料浓度为 2.0。

表 4 沥青混凝土水稳定试验成果表					% , MPa
试件编号	孔隙率	最大抗压	$\sigma_{\max}$	水稳定	
		强度 $\sigma_{\max}$	平均值		
泡水	SW13-1	1.447	1.0515	0.9694	
	SW13-2	1.839	1.3215		
	SW13-4	1.741	1.2861		
未泡水	SW13-5	1.791	1.1183	1.2239	
	SW13-6	1.759	1.2674		

注:常温施工配合比,油石比 7.2%,填料浓度为 2.0。

表 5 沥青混凝土水稳定试验成果表					% , MPa
试件编号	孔隙率	最大抗压	$\sigma_{\max}$	水稳定	
		强度 $\sigma_{\max}$	平均值		
泡水	SW26-1	1.881	1.0448	1.2103	
	SW26-2	1.870	1.1477		
	SW26-3	1.899	1.1203		
	SW26-4	1.905	0.8710		
未泡水	SW26-5	1.785	0.9285	0.9124	
	SW26-6	1.647	0.9378		

注:冬季施工配合比,油石比 8.1%,填料浓度为 1.8。

表 6 沥青混凝土水稳定试验成果表					% , MPa
试件编号	孔隙率	最大抗压	$\sigma_{\max}$	水稳定	
		强度 $\sigma_{\max}$	平均值		
泡水	SW27-1	1.761	1.1136	1.2396	
	SW27-2	1.885	1.2667		
	SW27-3	1.824	1.0301		
	SW27-4	1.058	0.9686		
未泡水	SW27-5	1.042	0.8610	0.9171	
	SW27-6	1.805	0.9218		

注:冬季施工配合比,油石比 8.4%,填料浓度为 1.8。

表 7 常温施工配合比成果表					% , mm
配合比编号	最大粒径	级配指数	填料浓度	油石比 B	
12	19	0.38	2.0	6.9	

注:粗骨料:未破碎砂砾石;细骨料:100%河砂。

表 8 冬季施工配合比成果表					% , mm
配合比编号	最大粒径	级配指数	填料浓度	油石比 B	
27	19	0.38	1.8	8.4	

注:粗骨料:未破碎砂砾石;细骨料:100%河砂。

3 粗骨料采用不破碎砂砾石料沥青混凝土性能试验

3.1 沥青混凝土压缩试验

沥青混凝土压缩试验在沥青混凝土专用试验机上进行,该机通过变频器可以无级调速,以控制加载的速率。将试验机置于恒温室中,利用计算机采集控制系统采集试验数据。将制备好的试件在 6.4℃ 水槽中恒温 4 h,然后进行试验^[7]。

本次试验中 12 号常温施工配合比和 27 号冬季施工配合比的压缩试验结果见表 9,抗压应力应变典型曲线见图 1、图 2。

从试验结果可以看出:抗压强度:12 号沥青混凝土配合比(油石比 6.9%,填料浓度 2.0)抗压强度大,27 号沥青混凝土配合比(油石比 8.4%,填料浓度 1.8)压缩应变较大。

表 9 沥青混凝土压缩试验结果表			MPa, %	
配合比 编号	试件 编号	孔隙率	最大抗压 强度 $\sigma_{\max}$	最大抗压强度时 的应变 $\varepsilon\sigma_{\max}$
12 (常温施工 配合比)	Y12-1	1.856	3.785	6.618
	Y12-2	1.622	3.688	8.412
	Y12-3	1.799	3.202	8.673
	平均值	1.759	3.558	7.901
27 (冬季施工 配合比)	Y27-1	1.872	2.929	7.584
	Y27-2	1.521	2.726	9.643
	Y27-3	1.685	2.889	9.511
	平均值	1.693	2.848	8.913

注:粗骨料:未破碎砂砾石;细骨料:100%河砂。

3.2 沥青混凝土拉伸试验

沥青混凝土拉伸试验在沥青混凝土专用试验机上进行,该机通过调频电源可以无级调速,以控制加载的速率。将试验机置于恒温箱中,利用计算机采集

控制系统采集试验数据。将制备好的试件在6.4℃下恒温 40 min,然后进行拉伸试验,12 号常温施工配合比和 27 号冬季施工配合比的拉伸试验结果见表 10,拉伸试验应力应变典型曲线见图 3 和图 4。

表 10 沥青混凝土拉伸试验结果表			MPa, %	
配合比 编号	试件 编号	孔隙率	最大抗压 强度 $\sigma_{\max}$	最大抗压强度时 的应变 $\varepsilon_{\max}$
12 (常温施工 配合比)	L12-1	1.771	1.523	1.679
	L12-2	1.923	1.424	1.560
	L12-3	1.764	1.503	1.595
	平均值	1.819	1.483	1.611
27 (冬季施工 配合比)	L27-1	1.862	1.477	2.048
	L27-2	1.701	1.083	1.893
	平均值	1.782	1.280	1.970

注:粗骨料:未破碎砂砾石;细骨料:100%河砂。

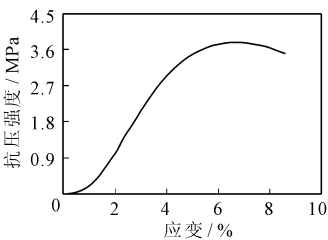


图 1 压缩应力应变典型曲线
(油石比 6.9%,填料浓度 2.0)

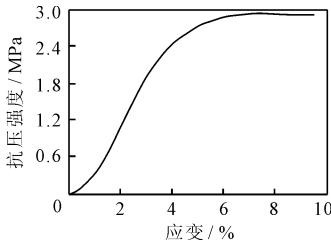


图 2 压缩应力应变典型曲线
(油石比 8.4%,填料浓度 1.8)

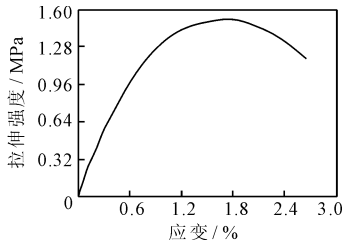


图 3 拉伸应力应变典型曲线
(油石比 6.9%,填料浓度 2.0)

从试验结果可以看出:12 号沥青混凝土配合比(油石比 6.9%,填料浓度 2.0)抗拉强度大,27 号沥青混凝土配合比(油石比 8.4%,填料浓度 1.8)最大抗拉强度时的应变较大。

3.3 沥青混凝土小梁弯曲试验

城墙沥青混凝土弯曲试验在沥青混凝土专用试验机上进行,该机通过调频电源可以无级调速,以控制加载的速率。将试验机置于恒温室中,利用计算机采集控制系统采集试验数据,将制备好的试件在 6.4℃下恒温 40 min,然后进行弯曲试验。12 号常温施工配合比和 27 号冬季施工配合比的小梁弯曲试验结果见表 11。小梁弯曲试验应力应变典型曲线见图 5 和 6。

从试验结果可以看出:综合比较小梁弯曲试验结果中的各项力学性能参数可知,12 号常温施工配合比(油石比 6.9%,填料浓度 2.0)沥青混凝土的强度比 27 号冬季施工配合比(油石比 8.4%,填料浓度 1.8)沥青混凝土的强度要高些,但 27 号冬季施工配合比沥青混凝土的变形性能比 12 号常温施工配合比沥青混凝土的变形性能强得多。

表 11 沥青混凝土小梁弯曲试验结果表

%, mm, MPa, %							
配合比 编号	试件 编号	孔隙率	最大 荷载 N	最大 荷载时 挠度 f	$\sigma_{\max}$	ε	挠跨比 f/L
12 (常温 施工配 合比)	W12-1	1.939	305.640	4.620	1.637	2.772	2.310
	W12-2	1.525	443.178	3.507	2.374	2.104	1.754
	W12-3	1.053	509.825	3.396	2.731	2.037	1.698
	平均值	1.505	419.548	3.841	2.248	2.305	1.921
27 (冬季 施工配 合比)	W27-1	1.604	364.646	5.650	1.953	3.390	2.825
	W27-2	1.047	439.924	5.261	2.352	3.156	2.630
	W27-3	1.095	404.266	4.982	2.166	2.989	2.491
	平均值	1.249	402.945	5.298	2.157	3.179	2.649

注:粗骨料:未破碎砂砾石;细骨料:100%河砂。

3.4 沥青混凝土静三轴试验

试验在专用的沥青混凝土三轴仪上进行,三轴仪安装在恒温室内,围压、轴向力、轴向变形和体积变形由传感器经电子量测-控制系统测量,通过计算机采集数据。将制备好的试件在 6.4℃下恒温 4 h,然后进行试验。每种配合比的沥青混凝土试件分别进行0.3、0.6、0.9、1.2 MPa 4 个围压的三轴试验,

三轴试验结果见表 12,由试验曲线整理得 $E-\mu$ 、 $E-B$ 分别建立对应配合比情况下的 $E-\mu$ 、 $E-B$ 模型。
-B 模型非线性参数见表 13、14。由这些参数可以

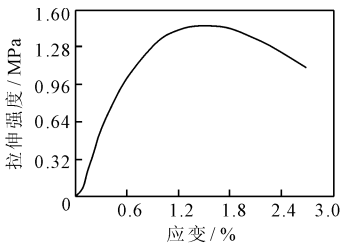


图 4 拉伸应力应变典型曲线
(油石比 8.4%, 填料浓度 1.8)

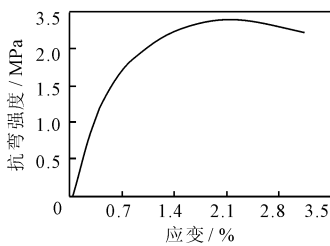


图 5 弯曲应力应变典型曲线
(油石比 6.9%, 填料浓度 2.0)

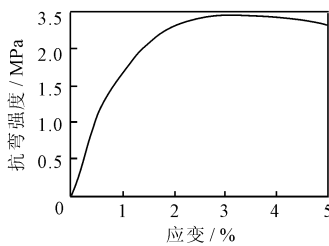


图 6 弯曲应力应变典型曲线
(油石比 8.4%, 填料浓度 1.8)

表 12 沥青混凝土静三轴试验结果 MPa, %

配合比 编号	孔隙率	围压 σ_3	初始变 形模量 E_i	最大 偏应力 ($\sigma_1 -$ σ_3) _{max}	最大偏应 力时对应 泊松比 μ_i	最大偏应 变 ε_{1max}	配合比 编号	孔隙率	围压 σ_3	初始变 形模量 E_i	最大 偏应力 ($\sigma_1 -$ σ_3) _{max}	最大偏应 力时对应 泊松比 μ_i	最大偏应 变 ε_{1max}
12	1.366	0.3	96.15	1.869	7.752	0.4595	27	1.036	0.3	48	1.387	12.043	0.4651
(常温	1.590	0.6	104.17	2.361	11.249	0.4528	(冬季	1.071	0.6	65	1.440	16.815	0.4824
施工配	1.684	0.9	116.28	2.786	13.782	0.4568	施工配	0.927	0.9	70	2.481	18.689	0.4648
合比)	1.369	1.2	123.46	3.774	13.909	0.4304	合比)	0.830	1.2	78	2.546	25.760	0.4770

注:粗骨料:未破碎砂砾石;细骨料:100%河砂。

表 13 静三轴试验参数计算结果($E-\mu$ 模型) g/cm³, MPa

配合比 编号	平均密度	K	n	φ°	C	R_f	G	F	D
12	2.364	539.8	0.290	30.99	0.459	0.808	0.467	-0.027	1.116
27	2.339	336	0.342	21.64	0.567	0.848	0.463	0.011	0.493

表 14 静三轴试验参数计算结果($E-B$ 模型) g/cm³, MPa

配合比 编号	平均密度	K	n	φ°	C	R_f	体积变形参数	
							K_b	m
12	2.364	539.8	0.290	30.99	0.459	0.808	2292.0	0.281
27	2.339	336	0.342	21.64	0.567	0.848	2679.1	0.417

3.5 沥青混凝土渗透试验

将制备好的沥青混凝土试件在渗透试模中装好,试件周边密封,保证不渗水。将装有试件的试模置于沥青混凝土渗透试验仪上进行试验,试验结果见表 15。

从上述结果可以看出:所有试件的渗透系数都满足规范要求,即小于 1×10^{-8} cm/s。

4 结 语

综上所述,对配合比和砂砾石料适用性进行了系统的试验研究,推荐努尔加水库土石坝心墙沥青混凝土的粗骨料采用未破碎天然砂砾石,细骨料采

表 15 沥青混凝土渗透试验结果 %, 10^{-9} cm/s

配合比编号	试件编号	孔隙率	渗透系数
12 (常温施工配合比)	ST12-1	1.3200	7.921
	ST12-2	1.7079	7.978
	ST12-3	1.9284	4.712
	平均值	1.6521	6.870
27 (冬季施工配合比)	ST27-1	1.5887	1.079
	ST27-2	1.2770	1.151
	ST27-3	1.3636	1.030
	平均值	1.4098	1.087

注:粗骨料:未破碎砂砾石;细骨料:100%河砂。

用天然河砂,填料为灰岩矿粉,沥青为克拉玛依 AH-70 号沥青,并按沥青质量的 0.4% 添加常州信拓公司生产的 XT-2 型抗剥落剂改善沥青混凝土的水稳定性。

经对推荐的沥青混凝土配合比进行的各项沥青混凝土试验表明:采用天然砂砾石料作粗骨料、河砂作细骨料的沥青混凝土水稳定系数都大于 0.97,满足《土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范》DL/T5411-2009 中规定沥青混凝土的水稳定系数应大于 0.90 的要求。沥青混凝土压缩试验、拉伸试验、小梁弯曲试验、渗透试验、三轴性能试验结果表明,沥青混凝土的各项物理和力学性能均满足设计要求。

参考文献:

[1] Saxegaard H. Asphalt Concrete Cores for Embankment Dams[J]. International Water Power and Dam Constructions. 2000, 52(2): 26-27.

[2] 张文. 沥青混凝土心墙土石坝的实践与发展[J]. 东北水利水电, 1991, 11(12): 2-11.

[3] 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.

[4] 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院. DL/T5411-2009, 土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.

[5] 水利部新疆维吾尔自治区水利水电勘测设计研究院. 新疆昌吉市三屯河努尔加水库工程初步设计报告[R]. 2010, 11.

[6] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 中华人民共和国电力行业标准. DL/T5362-2006, 水工沥青混凝土试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.

[7] 西安理工大学防渗研究所, 陕西省水利水电工程西安理工大学质量检测中心. 努尔加水库沥青混凝土心墙材料试验研究报告—采用未破碎砂砾石作沥青混凝土粗骨料[R]. 2012.5.

(上接第 214 页)

[4] Gao Xubo, Wang Yanxin, Li Yilian, et al. Enrichment of fluoride in groundwater under the impact of saline water intrusion at the salt lake area of Yuncheng Basin, northern China[J]. Environmental Geology, 2007, 53(4): 795-803.

[5] Gao X B, Wang Y X, Li Y L. Hydrogeochemical characteristics of fluoride in groundwater: a case study in Yuncheng Basin, Northern China[C]//. 7th International Conference on Calibration and Reliability in Groundwater Modeling, "Managing Groundwater and the Environment", 2009.

[6] He X, Wang Y X, Ma T, et al. Hydrogeochemical characteristics of high fluoride bearing groundwater in the Hetao Plain, Northern China[C]//. 7th International Conference on Calibration and reliability in groundwater modeling, "Managing Groundwater and the Environment", 2009.

[7] 运城地方志编纂委员会. 运城市志[M], 北京: 生活·读书·新知三联书店, 1994.

[8] 汤洁, 卞建民, 李昭阳, 等. 松嫩平原氟中毒区地下水氟分布规律和成因研究[J]. 中国地质, 2010, 37(3): 614-620.

[9] 侯建军. 内蒙古腾格里地下水化学特征及高氟、高矿化水成因探讨[J]. 西部资源, 2011(6): 83-85.

[10] 梁秀娟. 吉林西部洋沙泡水库水土环境中氟的迁移转化机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.

[11] 陈文婧. 河北平原浅层地下水水地球化学评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.

[12] 杨军耀. 水土系统氟迁移影响因素分析[J]. 工程勘察, 1998(3): 42-44.

[13] 张崇伦, 韩行瑞. 氟的水文地球化学特征初探[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 171-172.