

高掺氧化镁混凝土在某水电站拱坝工程中的应用

陈昌礼¹,赵其兴²,李维维¹,王兴德²,徐 普³,颜少连⁴

(1. 贵州师范大学材料与建筑工程学院,贵州 贵阳 550025; 2. 贵州中水建设管理股份有限公司,贵州 贵阳 550002;
3. 贵州省大坝安全监测中心,贵州 贵阳 550002; 4. 贵州水利科学研究院,贵州 贵阳 550002)

摘要:为了充分发挥 MgO 混凝土筑坝技术的优越性,针对某Ⅳ等小(1)型水电站混凝土拱坝工程,依据压蒸原理,进行水泥-粉煤灰-石粉混合浆体试件压蒸试验,据此将 MgO 的掺量提高到 6.5%,并应用于水电站混凝土拱坝工程。结果表明,高掺 MgO 混凝土进一步提高了坝体混凝土的抗裂能力,简化了大体积混凝土的温控措施,实现了仅设极少诱导缝、不设纵缝、通仓浇筑坝体的混凝土坝体浇筑方式。

关键词:MgO 混凝土;压蒸试验;安定掺量;自生体积变形;拱坝

中图分类号:TV431 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)06-0064-05

Application of concrete with high content of MgO in arch dam of hydropower station//CHEN Changli¹, ZHAO Qixing², LI Weiwei¹, WANG Xingde², XU Pu³, YAN Shaolian⁴(1. School of Materials and Architecture Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Zhongshui Construction Project Management Co., Ltd., Guiyang 550002, China; 3. Guizhou Provincial Dam Safety Monitoring Center, Guiyang 550025, China; 4. Guizhou Water Conservancy Science Research Institute, Guiyang 550002, China)

Abstract: In order to demonstrate the superiority of using MgO-mixed concrete in dam construction, autoclave tests of cement-fly ash-stone dust mixed paste specimens were conducted according to the autoclave principle, and the mixing ratio of MgO in the specimens was increased to 6.5%. This technology was applied to the concrete arch dam of a grade IV small-scale (type 1) hydropower station. The results show that concrete with a high content of MgO can improve the anti-cracking performance of the dam concrete and simplify temperature control measurements of mass concrete, allowing for an improved concrete dam construction method, in which few induced joints are needed, longitudinal joints can be cancelled, and entire concrete blocks of the dam body can be poured.

Key words: MgO-mixed concrete; autoclave test; soundness admixing amount; autogenic volume deformation; arch dam

某Ⅳ等小(1)型水电站的主要任务为发电,其装机容量为2×5.0 MW,总库容为532万m³,挡水建筑物为抛物线双曲拱坝,最大坝高为69 m,拱冠梁处顶厚为4.0 m,底厚为12.0 m,拱坝厚高比为0.174,坝体混凝土体积为45 000 m³。设计单位从节约投资、早日投产的愿望出发,考虑到该工程工期紧张,要求该坝体采用三级配外掺氧化镁(MgO)常态混凝土,不设纵缝,通仓浇筑,混凝土在龄期90 d的强度等级为C20、抗渗等级为W6、极限拉伸值不低于85×10⁻⁶、强度保证率不低于85%,混凝土拌和物的坍落度控制值为20~50 mm。

我国从20世纪70年代末展开对MgO混凝土的研究,至今已在50多座水利水电工程中得到应用,而国外尚无工程应用实例^[1-5]。试验研究和工程实践表明,MgO混凝土具有良好的延迟微膨胀特

性,可在提高混凝土自身抗裂能力、简化水工大体积混凝土的温控措施、加快施工进度、节约工程费用等方面发挥积极作用^[6-8]。但是,按照现行方法^[9-11]确定的MgO掺量一般为4%~5%,用该掺量配制的MgO混凝土的膨胀量不能完全补偿水工混凝土的收缩量^[7,12-14]。为此,本文按照文献[15]提出的石粉模拟法制作水泥-粉煤灰-石粉混合浆体试件,进行压蒸试验,将MgO掺量提高至6.5%,并将试验结果应用于该水电站混凝土拱坝工程中,为充分发挥MgO混凝土筑坝技术的优越性、科学合理突破MgO掺量的限制提供了第一个工程实例。

1 MgO混凝土的配合比设计

1.1 试验用原材料

a. 水泥:P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,密度为

3.06 g/cm³,比表面积为317 m²/kg,标准稠度用水量为26.0%,安定性合格。水泥品质符合现行规范要求。

b. 粉煤灰:取自工地从贵州某火电厂购买来的成品干灰,密度为2.45 g/cm³,细度为13.55%,需水量比为90.8%,烧失量为3.57%。粉煤灰品质达到DL/T5055—2007《水工混凝土掺用粉煤灰技术规范》规定的F类Ⅱ级粉煤灰的技术要求。

c. 氧化镁:水工混凝土专用材料,辽宁海城东方滑镁公司生产,密度为3.23 g/cm³,细度(0.045 mm 筛的筛余)为25.5%,活性指数为216 s。

水泥、粉煤灰、氧化镁的主要化学成分见表1。

d. 骨料:取自工地的灰岩人工砂和碎石。人工砂的细度为3.03,级配较好;粗骨料由灰岩加工成小石(5~20 mm)、中石(20~40 mm)、大石(40~80 mm)三级。

e. 外加剂:萘系高效减水剂,其品质符合现行规范要求。

1.2 MgO 极限掺量的确定

确定水工混凝土的MgO掺量时,遵循压蒸原理,采用压蒸试验。参考现行方法,试件尺寸为25 mm×25 mm×280 mm,分别采用不掺粉煤灰的水泥净浆、掺30%粉煤灰的水泥-粉煤灰浆体^[9]、掺30%粉煤灰的水泥-粉煤灰砂浆^[10]、掺30%粉煤灰的水泥-粉煤灰-石粉混合浆体制作。水泥-粉煤灰-石粉混合浆体按参考文献[15]提出的石粉模拟法制作,并根据工程拟用的三级配混凝土配合比,将其中的粗细骨料用等量的石粉代替,同时通过调节高效减水剂掺量,使其与其他浆体的稠度基本一致。试验结果如图1所示。

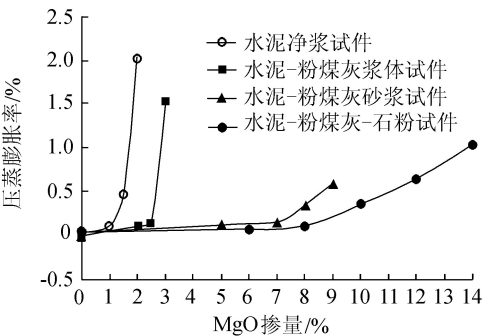


图1 不同水泥基材料试件的压蒸膨胀率随MgO掺量的变化曲线

从图1可见,当MgO掺量在一定范围内时,水泥净浆、水泥-粉煤灰浆体、水泥-粉煤灰砂浆、水泥-粉煤灰-石粉混合浆体等4种不同水泥基材料试件的压蒸膨胀率均随MgO掺量的增大而缓慢增加;当MgO掺量超过某一定量时,试件的压蒸膨胀率急剧增大,在曲线图上出现明显拐点。在不同水泥基材料试件的压蒸膨胀率随MgO掺量变化的曲线上,其拐点对应的MgO掺量不同,其值从大到小的顺序为水泥-粉煤灰-石粉试件、水泥-粉煤灰砂浆试件、水泥-粉煤灰浆体试件、水泥净浆试件。若以压蒸膨胀率为0.5%时对应的MgO掺量作为混凝土的MgO极限掺量,则水泥净浆、水泥-粉煤灰浆体、水泥-粉煤灰砂浆、水泥-粉煤灰-石粉浆体的MgO极限掺量依次为1.5%、2.6%、8.7%、11.2%;若以图1中各曲线拐点对应的MgO掺量作为混凝土的MgO极限掺量,则采用水泥净浆、水泥-粉煤灰浆体、水泥-粉煤灰砂浆、水泥-粉煤灰-石粉浆体确定的MgO极限掺量依次为1.0%、2.5%、7.0%、8.0%。

为安全起见,经与设计方共同研究,以曲线拐点对应的MgO掺量作为混凝土的MgO极限掺量,以水泥-粉煤灰-石粉浆体压蒸试件确定的MgO极限掺量8.0%乘以折减系数(约0.8)的结果作为该工程混凝土的MgO外掺量,即MgO外掺量采用6.5%。

1.3 MgO 混凝土的配合比及性能实验

按照DL/T5330—2005《水工混凝土配合比设计规程》,结合以往设计MgO混凝土的经验,初选水胶比分别为0.50、0.55、0.60,控制用水量不超过135 kg/m³和胶凝材料用量在200 kg/m³左右,粉煤灰掺量为30%、40%,砂率为32%~36%,粗骨料级配按照紧密堆积密度较大、混凝土用水量较小的原则,初选为30:30:40和30:40:30,在实验室进行了一系列混凝土的配合比及性能试验。典型的外掺MgO混凝土的配合比如表2所示(表中编号H58-40-65表示混凝土的水胶比是0.58、粉煤灰掺量为40%、MgO掺量为6.5%,其余配合比编号含义以此类推),混凝土的自生体积变形随龄期的变化过程如图2所示,主要配合比的力学性能如表3所示。

需要说明的是,PH55、PH60系列混凝土使用的砂是细度模数分别为2.98和2.80的机制中砂;H60和H58系列混凝土使用的砂均为工地运来的细度模数为3.30左右的原样粗砂。

表1 试验用原材料化学成分的质量分数

原材料名称	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	f-CaO	烧失量
水 泥	58.15	21.23	6.34	3.81	3.01	2.70	0.19	0.30	0	3.78
粉煤灰	4.20	51.81	22.12	14.33	2.69	0.80	0.66	1.12	0	3.57
氧化镁	1.42	3.12	1.32	0.84	91.02	0.70	0	0	0	3.73

表 2 MgO 混凝土的典型配合比

配合比编号	水胶比	成型室 温/℃	混凝土的原材料用量/(kg·m ⁻³)								
			水	水泥	粉煤灰	砂子	小石	中石	大石	MgO	外加剂
PH55-30-0	0.55	18~20	110	140	60	706.2	430.14	430.14	573.52	0	1.60
PH55-30-6	0.55	18~20	110	140	60	706.2	430.14	430.14	573.52	12.00	1.80
PH55-30-8	0.55	18~20	110	140	60	706.2	430.14	430.14	573.52	16.00	2.00
PH55-30-10	0.55	10~11	110	140	60	706.2	430.14	430.14	573.52	20.00	2.40
PH60-30-0	0.60	8~10	117	136.5	58.5	684.16	436.15	436.15	581.54	0	1.37
PH60-30-6	0.60	8~10	117	136.5	58.5	684.16	436.15	436.15	581.54	11.70	1.76
H60-30-65	0.60	24~26	120	140	60	766.80	408.96	408.96	545.28	13.00	2.00
H58-40-0	0.58	24~26	134	138	92	702.44	409.07	409.07	545.42	0	1.84
H58-40-65	0.58	20~22	134	138	92	702.44	409.07	409.07	545.42	14.95	2.07

表 3 MgO 混凝土在典型龄期的主要力学性能

配合比 编号	抗压强度/MPa		劈拉强度/MPa		抗压弹性模量/GPa		极限拉伸/10 ⁻⁶	
	28 d	90 d	28 d	90 d	28 d	90 d	28 d	90 d
PH55-30-6	24.11	35.39	1.86	2.50	36.08	38.36	68	79
PH55-30-8	26.49	35.03	2.04	2.65				
PH60-30-6	22.31	33.74	1.76	2.43	33.45		85	
H60-30-65	20.17	28.11	1.85	1.99	28.98	36.35	74	95
H58-40-65	17.96	28.36	1.56	2.07	28.27	32.45 [*]	84	90 [*]

注：* 表示实际测试龄期为 82 d(因实验室搬迁至新校区造成)。

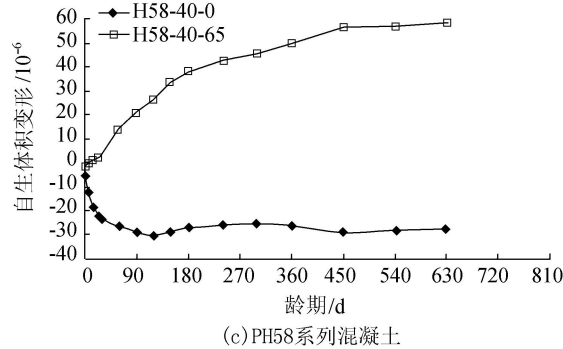
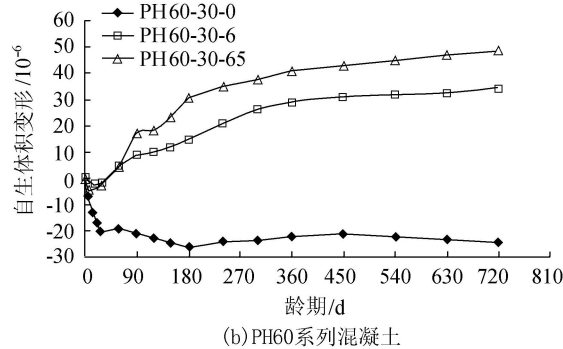
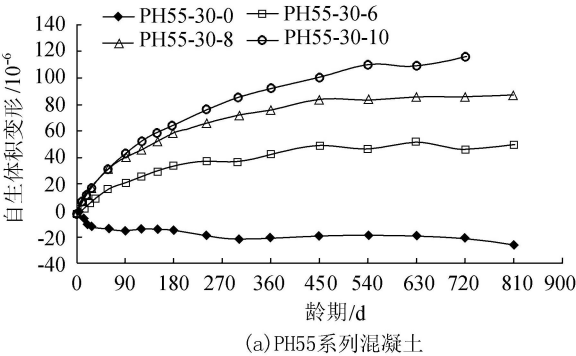


图 2 外掺 MgO 混凝土的自生体积变形随龄期的变化

从图 2 可以看出,未掺 MgO 混凝土的自生体积

变形呈收缩状态,掺 MgO 混凝土的自生体积变形呈膨胀状态,且变化量均随龄期的增长而增大,前期变化快,后期变化慢;相同条件下,掺 MgO 混凝土的自生体积变形随 MgO 掺量的增大而增大。对于水胶比为 0.60、粉煤灰掺量为 30%、MgO 掺量为 6.5% 的混凝土,在龄期 180 d、360 d、540 d 的自生体积膨胀量分别为 30.14×10^{-6} 、 40.16×10^{-6} 、 49.85×10^{-6} 。

从表 3 可以看出,各混凝土在龄期 90 d 的抗压强度,以及 H60-30-65 和 H58-40-65 在龄期 90 d 的极限拉伸值满足设计要求。掺 MgO 8% 的 PH55-30-8 混凝土的抗压强度、劈拉强度比同等条件下掺 6% MgO 的 PH55-30-6 混凝土高近 10% 或相近,原因在于较大 MgO 掺量的混凝土膨胀挤压力较大,导致混凝土密实度增大。但是,掺 6.5% MgO 的 H60-30-65 混凝土的抗压强度、劈拉强度、抗压弹性模量值比掺 6% MgO 的 PH60-30-6 混凝土低约 15% 或接近,这可能是由于 H60-30-65 混凝土用水量比 PH60-30-6 混凝土高 3 kg/m^3 所致。一般而言,用水量增加,硬化混凝土的空隙增多,密实度降低,强度下降^[16],且这种强度下降大于因 MgO 增加 0.5% 引起的混凝土强度增长。另外,H60-30-65 混凝土所用砂料的级配比 PH60-30-6 混凝土稍差,估计也是一个原因。

同时,PH55-30-6、H58-40-65 混凝土 90 d 龄期的抗渗试验结果表明,混凝土试件的抗渗等级高于 W6,满足工程对混凝土的抗渗要求;PH55-30-6 混凝土的绝热温升试验表明,28 d 绝热温升值为 24.5°C 。

考虑到本工程是首次将混凝土的 MgO 掺量突破 6.0%,为安全起见,经与设计方共同研究,推荐的混凝土实验室配合比列于表 4。

表 4 推荐用于工地生产的 MgO 混凝土的实验室配合比

编号	水灰比	混凝土的原材料用量/(kg·m ⁻³)								
		水	水泥	粉煤灰	砂子	小石	中石	大石	MgO	外加剂
1	0.57	114	140	60	770.76	411.07	411.07	548.10	13.00	1.80~2.00
2	0.57	131	138	92	702.44	409.07	409.07	545.42	14.95	2.07

2 工程应用

工程采用 1 号配合比,共浇筑坝体 MgO 混凝土 43 750 m³。在坝体混凝土浇筑期间,混凝土试验单位抽检水泥 6 次,测得其内含 MgO 量为 2.04%~3.44% (均值为 2.71%)、比表面积为 268~334 m²/kg(均值为 305 m²/kg)、标准稠度用水量为 24.7%~26.3% (均值为 25.8%) ,质量符合国家标准;抽检粉煤灰 6 次,细度为 6.9%~21.0% (均值为 15.77%)、烧失量为 3.57%~6.58% (均值为 5.31%)、需水量比为 90.4%~102.9% (均值为 94.14%) ,质量符合国家 F 类 II 级粉煤灰标准;抽检 MgO 8 次,纯度为 82.87%~93.36% (均值为 87.64%) ,满足 DL/T5296—2013《水工混凝土掺用氧化镁技术规范》的纯度要求;砂料为石灰岩机制砂,抽检 7 次,石粉含量为 11.75%~18.53% (均值为 12.43%) ,细度模数为 3.15~3.77(均值为 3.35) ,颗粒级配属于 I 区。

工地生产 MgO 混凝土时,采用强制式搅拌机。先将人工称量的 MgO、减水剂混合,接着倒入混凝土拌合物中共同搅拌 120~150 s,将搅拌后的混凝土采用自卸汽车运输到大坝。在高程 810 m 以下,采用自卸汽车直接将混凝土运入仓内;高程 810 m 以上,先将混凝土用自卸汽车运至位于左岸高程 855 m 的榴槽口,再经榴槽输送到位于仓内的自卸汽车中,自卸汽车再将混凝土运至仓内指定地点。混凝土入仓后,采用反铲平仓、振捣棒振实。浇筑坝体混凝土时,全坝未设纵缝;在高程 837.5 m 以上、坝顶面距左坝肩 10.633 m 和距右坝肩 15.245 m 处各设置 1 道竖向诱导缝;在高程 837.5 m 以下不设横缝,通仓浇筑。仓内铺料层厚度为 0.5 m,分层厚度为 2.2 m,浇筑层间歇期为 7 d,上下混凝土浇筑层间采用 20 mm 厚的同强度等级砂浆搭接。

根据设计文件,在坝体混凝土浇筑中,共埋设无应力计 13 支、温度计 16 支、测缝计 8 支。从截至 2016 年 2 月 29 日的观测结果看,部分测点的龄期已超过 360 d。在龄期 90 d、180 d 和 360 d,坝体混凝土的自生体积膨胀变形分别为 18.90×10⁻⁶~58.51×10⁻⁶、26.03×10⁻⁶~73.66×10⁻⁶和 32.05×10⁻⁶~101.97×10⁻⁶,平均值分别为 41.38×10⁻⁶、51.55×10⁻⁶和 62.46×10⁻⁶,最高温度为 43.6℃,温升为

19.1℃,最大开度为 0.24 mm。

同时,根据已有的资料统计,现场实测混凝土拌合物的坍落度和混凝土在龄期 90 d 的抗压强度、抗渗等级、极限拉伸变形的抽检结果满足设计要求。

3 结 语

从现场抽样检测的统计结果看,外掺 MgO 混凝土的坍落度、90 d 龄期的抗压强度、抗渗等级、极限拉伸变形的抽检结果满足设计要求;从原型观测结果看,坝体 MgO 混凝土的自生体积变形、最高温升同室内测值基本吻合,最大开度及其发生位置与设计时按照提高 MgO 掺量后计算的坝体应力场基本一致。因此,依据压蒸原理,制作水泥-粉煤灰-石粉混合浆体试件进行压蒸实验,不仅能使混凝土的 MgO 掺量科学合理地适当提高,而且混凝土的物理力学性能满足设计要求,坝体混凝土的自生体积膨胀变形、最高温升、坝体最大开裂度均在可控范围内,达到了进一步提高混凝土自身的抗裂能力、简化水工大体积混凝土的温控措施、节省工程投资的目的。

参考文献:

[1] 李承木. 外掺氧化镁混凝土快速筑坝技术综述[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(5): 82-88. (LI Chengmu. Review of quick damming technology of MgO concrete [J]. Journal of Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(5): 82-88. (in Chinese))

[2] MEHTA P K, PIRTZ D. Magnesium oxide additve for producing selfstress in mass concrete[C]//Proceedings of 7th International Congress on the Chemistry of Cement. Paris: Mendeley, 1980.

[3] CHATTERJI S. Mechanism of expansion of concrete due to the presence of dead-burnt CaO and MgO[J]. Cement and Concrete Research. 1995, 25(1): 51-56.

[4] ALI M M, MULLICK A K. Volume stabilisation of high MgO cement; effect of curing conditions and fly ash addition[J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(11): 1585-1594.

[5] CHOI S W, JANG B S, KIM J H, et al. Durability characteristics of fly ash concrete containing lightly-burnt MgO[J]. Construction and Building Materials. 2014, 58: 77-84.

[6] 陈昌礼, 赵振华, 李维维, 等. 长龄期外掺氧化镁混凝土自生体积变形分析[J]. 水利水运工程学报, 2015(5): 54-59. (CHEN Changli, ZHAO Zhenhua, LI Weiwei, et

- al. Analysis of autogenic volume deformation of MgO concrete at long age[J]. Hydro-science and Engineering, 2015(5):54-5. (in Chinese))
- [7] 陈昌礼,唐成书. 氧化镁混凝土在东风拱坝基础中的应用及长期观测成果分析[J]. 水力发电学报, 2006, 25(4): 102-107. (CHEN Changli, TANG Chengshu. The application of MgO concrete in Dongfeng Arch Dam foundation and the analysis of long-term prototype observation results [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(4): 102-107. (in Chinese))
- [8] 赵其兴. 氧化镁混凝土拱坝的宏观变形[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(6): 73-107. (ZHAO Qixing. Macroscopic deformation of MgO concrete arch dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(6): 73-107. (in Chinese))
- [9] GB/T 750—1992 水泥压蒸安定性试验方法[S].
- [10] 曹泽生,徐锦华. 氧化镁混凝土筑坝技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [11] 陈昌礼. 水工混凝土中氧化镁安定掺量的判定方法述评[J]. 水利水电技术, 2015, 46(9): 135-138. (CHEN Changli. Review on methods for determining soundness admixing amount of magnesium oxide in hydraulic concrete [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(9): 135-138. (in Chinese))
- [12] 张国新,杨卫中,罗恒,等. MgO 微膨胀混凝土的温降补偿在三江拱坝的研究和应用[J]. 水利水电技术, 2006,
- 37(8): 20-23. (ZHANG Guoxing, YANG Weizhong, LUO Heng, et al. Application and study of MgO micro-expanding concrete for construction of Sanjiang Arch Dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(8): 20-23. (in Chinese))
- [13] 徐琼. 外掺氧化镁混凝土筑坝技术探讨[J]. 人民长江, 2008, 39(8): 52-53. (XU Qiong. Discussion on damming technology of MgO concrete [J]. Journal of Yangtze River, 2008, 39(8): 52-53. (in Chinese))
- [14] 朱伯芳. 论微膨胀混凝土筑坝技术[J]. 水力发电学报, 2000, 70(3): 1-13. (ZHU Bofang. On Construction of Dams by Concrete With Gentle Volume Expansion [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2000, 70(3): 1-13. (in Chinese))
- [15] 陈昌礼,方坤河. 外掺氧化镁混凝土安定性模拟试验方法的研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 241-244. (CHEN Changli, FANG Kunhe. Study on simulation test method for invariability of concrete with light-burned magnesium oxide [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(5): 241-244. (in Chinese))
- [16] 王金海. 用水量对混凝土强度的影响[J]. 施工技术, 2005, 34(4): 48-50. (WANG Jinhai. Influence of water consumption on concrete strength [J]. Construction Technology, 2005, 34(4): 48-50. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-03-25 编辑: 郑孝宇)

(上接第 19 页)

- [12] 徐宗学,李占玲,史晓坤. 石羊河流域主要气象要素及径流变化趋势分析[J]. 资源科学, 2007, 29(5): 121-128. (XU Zongxue, LI Zhanling, SHI Xiaokun. Long-term trends of major climatic variables and runoff in the Shiyang River Basin [J]. Resources Science, 2007, 29(5): 121-128. (in Chinese))
- [13] 赵晶,王乃昂. 近 50 年来兰州城市气候变化的 R/S 分析[J]. 干旱区地理, 2002, 25(1): 90-95. (ZHAO Jing, WANG Naiang. R/S analysis of urbanization effect on climate in Lanzhou [J]. Arid Land Geography, 2002, 25(1): 90-95. (in Chinese))
- [14] 张晓伟,沈冰,黄领梅. 和田河年径流变化规律研究[J]. 自然资源学报, 2007, 22(6): 975-979. (ZHANG Xiaowei, SHEN Bing, HUANG Lingmei. Study on the variation law of the annual runoff in Hotan River [J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(6): 975-979. (in Chinese))
- [15] 燕爱玲,黄强,刘招. R/S 法的径流时序复杂特性研究[J]. 应用科学学报, 2007, 25(2): 214-217. (YAN Ailing, HUANG Qiang, LIU Zhao. Complicated property of runoff time series studied with R/S method [J]. Journal of Applied Sciences, 2007, 25(2): 214-217. (in Chinese))
- [16] 何新林,宋玲,郑旭荣. 径流中长期预报的灰色预测方法[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 1997, 1(3): 234-237. (HE Xinlin, SONG Ling, ZHENG Xurong. A grey forecasting method of mid-long term runoff forecasting [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 1997, 1(3): 234-237. (in Chinese))
- [17] 郭巧玲,杨云松,鲁学钢. 黑河流域 1957—2008 年径流变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(3): 77-81. (GUO Qiaoling, YANG Yunsong, LU Xuegang. Analysis of variation character of annual runoff in Heihe River basin from 1957 to 2008 [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, 22(3): 77-81. (in Chinese))
- [18] 王兆礼,陈晓宏,杨涛. 近 50a 东江流域径流变化及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1365-1372. (WANG Zhaoli, CHEN Xiaohong, YANG Tao. Runoff variation and its impacting factors in the Dongjiang River Basin during 1956—2005 [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(8): 1365-1372. (in Chinese))
- [19] 王云璋,薛玉杰,彭子芳,等. 太阳黑子活动与黄河径流、洪水关系初探[J]. 西北水资源与水工程, 1997(3): 30-36. (WANG Yunzhang, XUE Yujie, PENG Zifang, et al. A preliminary study on the relationship between sunspot activity and Yellow River's runoff and flood [J]. Water Resources and Water Engineering, 1997(3): 30-36. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-11-18 编辑: 骆超)