

MgO 混凝土自生体积变形与压蒸膨胀值的相关性

李承木¹ 李万军² 陈学茂¹

(1. 贵州中水建设项目管理公司, 贵州 贵阳 550002; 2. 四川水利水电勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

摘要 进行了高掺 MgO 水泥净浆、砂浆和混凝土试体的压蒸安定性和体积变形试验研究, 并分析了净浆、砂浆和混凝土自生体积变形的基本特性和规律。揭示了压蒸膨胀值及试验变化过程以及超掺 MgO 时的突变现象与净浆、砂浆和混凝土自生体积变形之间存在着极其密切的相关关系, 即存在相同的直线变化过程和相类似的急剧增大的变化规律。研究还表明, 压蒸安定性试验方法是鉴定外掺 MgO 水泥混凝土体积长期安定性的唯一的有效方法, 为确定安全的 MgO 允许最大极限掺量提供了试验依据。

关键词 MgO 混凝土; 自生体积变形; 压蒸试验; 体积安定性; 压蒸膨胀值

中图分类号 TV431 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2007)06-0013-05

Correlation between autogenous volume change of concrete mixed with MgO and pressure-braise expansion value// LI Cheng-mu¹, LI Wan-jun², CHEN Xue-mao¹ (1. Guizhou-Zhongshui Construction Project Management Co., Ltd., Guiyang 550002, China; 2. Sichuan Hydroelectric Investigation & Design Institute, Chengdu 610072, China)

Abstract: Experimental study was performed on the pressure-braise stability and volume change of cement grout, cement mortar and concrete samples mixed with high-content MgO. The characteristics and rules of pressure-braise expansion and autogenous volume changes of the samples as well as their sudden changes due to over-mixing of MgO were analyzed. It is concluded that the autogenous volume changes of the three kinds of samples follow the same linear rules and undergo the similar sharp increase. It is also showed that the pressure-braise stability experimental method is the only effective way to evaluate the long-term stability of concrete mixed with MgO, providing an experimental basis for determination of the maximum amount of MgO to be mixed.

Key words: concrete mixed with MgO; autogenous volume change; pressure-braise test; volume stability; pressure-braise expansion value

在 MgO 混凝土筑坝技术中, 自生体积变形和水泥压蒸安定性是两项重要的技术指标。压蒸膨胀值通常可用来评估 MgO 的极限膨胀能力, 外掺 MgO 水泥体积安定性合格是一项必须满足和严格控制的技术标准与应用条件。混凝土的自生体积变形是温度徐变应力计算和仿真分析设计中不可缺少的重要资料, 又是反映 MgO 膨胀性能的综合性指标。过去在研究极限压蒸膨胀值(即压蒸安定性标准)时, 都未曾发现自生体积变形与极限压蒸膨胀值之间的相关关系, 究其原因是: 系统的试验研究太少, 通常 MgO 掺量又较低, 往往未达到安定性标准所对应的极限掺量范围。本文通过高掺 MgO 水泥压蒸安定性试验和混凝土自生体积变形试验结果, 揭示了自生体积变形与压蒸膨胀值之间存在着密切的相关关系。这与水泥净浆和砂浆压蒸膨胀值的变化过程及规律

一样, 当 MgO 的掺量达到或超过某一极限掺量时, 混凝土的自生体积膨胀变形也会急剧增大或产生突变现象。这对研究压蒸安定性标准的科学合理性以及确定安全的 MgO 允许最大极限掺量意义重大。

1 试验概况

a. 原材料。①水泥: 云浮金鹰牌 42.5P II 型硅酸盐水泥; ②粉煤灰: 黄浦热电厂生产的 II 级粉煤灰; ③外加剂: 浙江龙游外加剂厂生产的高效复合型(ZB-1A)减水剂和广东水电二局产的糖蜜(TG)减水剂; ④氧化镁: 辽宁海城析木东方滑镁公司生产的 MgO 膨胀材料, 活性指标 235 ~ 239 s, 细度筛余小于 3%; ⑤粗细骨料: 长沙坝区料场花岗岩加工的碎石, 最大粒径 80 mm, 细料: 坝区的天然河砂(中砂偏粗)。

b. 混凝土配合比 龄期 90 d 的混凝土设计强度

基金项目: 广东省水利厅科研项目(2000-21)

作者简介: 李承木(1939—), 男, 四川内江人, 教授级高级工程师, 从事水工建筑材料科学和 MgO 混凝土筑坝技术研究。

为 C20 ,为Ⅲ级配混凝土 ,大、中、小石的比例为 50:30:20。两种混凝土水胶比分别为 0.55 和 0.52 ,砂率分别为 30%和 27% ,粉煤灰均掺入 30% ,外加剂型号分别为 TG0.2%和 ZB-1A0.6% ,外掺 MgO 均为 2%~8% ,单方胶材用量分别为 265 kg 和 229 kg。两种混凝土 90 d 龄期的实测抗压强度分别为 41.1 MPa 和 39.1 MPa ,力学性能比较接近。

c. 试验条件和方法 :①试验养护温度为 40℃ ;②试验方法按照 SD 105—82《水工混凝土试验规程》有关规定进行。

2 外掺 MgO 水泥压蒸安定性试验研究

2.1 试验结果

外掺 MgO 水泥的压蒸安定性试验参照 GB/T750—92《水泥压蒸安定性试验方法》进行。净浆试体按标准稠度需水量进行成型 ,试体尺寸为 10 mm×10 mm×40 mm 或 25 mm×25 mm×280 mm。砂浆试体用砂为标准砂 ,水胶比为 0.50 ,灰砂比为 1:3 ,试体尺寸为 20 mm×20 mm×80 mm 或 30 mm×30 mm×280 mm。试体在压力 2.0 MPa 及温度 216℃ (标准压蒸)条件下压蒸 3 h ,并用螺旋测微计测长。当粉煤灰硅酸盐水泥的压蒸膨胀率不大于 0.5%、硅酸盐水泥的压蒸膨胀率不大于 0.8% 时 ,认为该水泥的体积安定性合格 ;反之为不合格。该云浮金鹰牌 42.5PⅡ 型硅酸盐水泥外掺 MgO 膨胀剂的范围为 2%~8% ,试验结果见表 1。

从表 1 可以看出 ,水泥净浆和砂浆试体的压蒸膨胀值都随 MgO 掺量的增加而增大 ,其膨胀值均会在某一 MgO 掺量时发生突变 ,在此掺量前 ,膨胀值变化幅度较小 ,当 MgO 超过该掺量时 ,其膨胀值急剧增大 ,直至试体产生开裂破坏。但在相同 MgO 掺量时 ,砂浆试体的膨胀值远小于净浆试体的膨胀值 ,其原因是砂浆试体中 MgO 的含量比净浆试体少得多 ,而砂浆的线膨胀系数又比净浆的小 ,砂浆的结构约束不利于膨胀的发展。大量研究表明 ,掺粉煤灰趋向于降低压蒸试体的膨胀值 ,其掺量越大 ,压蒸膨胀值降低得越多。参照 GB/T750—92 规定 ,掺粉煤灰水泥的压蒸膨胀率不大于 0.5% ,据此规定 ,本试验水泥中 MgO 安全合格的最大极限掺量应为

6.17%。研究表明 ,在此范围的膨胀值对砂浆试体的抗折和抗压强度不仅没有明显的影响 ,而且还稍有提高 ,一般可提高 10%左右。

2.2 检验外掺 MgO 水泥体积安定性的方法

MgO 水泥压蒸安定性试验的原理是在饱和水蒸气条件下提高试验温度和压力使水泥中的方镁石在较短时间内完全或绝大部分水化 ,并用试体的相对形变率来判断水泥浆体(即砂浆或混凝土)的体积安定性 ,反映了水泥或混凝土抵抗由于化学反应而产生裂纹开裂和崩解的能力。换句话说 ,反映水泥硬化后体积变化均匀性的物理性质即是水泥的体积安定性。研究表明 ,安定性是 MgO 微膨胀混凝土的一项重要质量指标。世界各国在控制水泥质量指标时 ,对体积安定性都十分重视。由于高镁水泥的延迟性膨胀要持续很多年 ,人们为了了解并掌握其最终是否安定 ,采用了一种加速试验法 ,即压蒸安定性试验方法。但对这种方法工程界的认识迄今尚未统一。如对原水泥净浆采用压蒸法 ,过去普遍认为压蒸标准太严格 ,试验条件太苛刻 ,又与工程实际情况不相符。最近几年来 ,广东省水利厅从工程实际出发 ,针对应用中的若干技术问题 ,通过大量试验研究 ,提出采用工程原材料 ,用砂浆和一级配混凝土作压蒸试体 ,经过沸煮及预热处理后再进行压蒸试验 (参见表 1 中的混凝土成果 ,其最大极限掺量为 6.80%)。该试验总的技术思路是 :紧密结合工程实际 ,设法提高基体强度 ,以压蒸试体的强度不降低为依据 ,以相应砂浆或混凝土的压蒸膨胀率不超过 0.5% 为标准 ,增强实用性与科学合理性。该方法已经专家评审确认 ,这项科研成果已顺利通过了省部级技术鉴定 ,总体评价居国际领先水平^[1] ,并已获得广东省科技进步一等奖。

在 MgO 混凝土筑坝技术中 ,外掺 MgO 水泥体积安定性合格是一项必须满足的技术指标和严格控制的应用条件。大量研究结果表明 ,压蒸试验方法是检测外掺 MgO 水泥砂浆或混凝土体积安定性的唯一方法 ,其他方法均不适用于外掺 MgO 技术^[1]。因为压蒸试验能在很短时间内使 MgO 完全水化且膨胀完 ,能够确定 MgO 的最大极限掺量 ,能判断 MgO 水泥砂浆或混凝土的体积安定性是否合格 ,而压蒸

表 1 水泥净浆和砂浆试件的压蒸膨胀率 %

类别	在水泥基材料中所占比例		不同 MgO 膨胀剂掺量时水泥净浆和砂浆的膨胀率										
	水泥	粉煤灰	2.0%	2.5%	2.7%	3.0%	3.3%	3.5%	4.0%	5.0%	6.0%	7.0%	8.0%
净浆	70	30	0.180	0.300	0.440	0.885	1.560	2.076	3.664				
	80	20	0.070	0.086		0.088		0.099	0.120	0.215	1.870	4.739	
砂浆	75	25	0.065	0.078		0.085		0.098	0.116	0.137	0.496	3.117	4.806
	70	30	0.041	0.049	0.059	0.074		0.090	0.107	0.130	0.270	1.590	3.110
混凝土	70	30				0.040		0.050	0.060	0.090	0.146	0.544	0.922

膨胀值通常又可用来评估 MgO 的极限膨胀能力。至于其他试验方法,均无法达到和满足这些要求,如沸煮试饼法和 $L \cdot C$ 测长法^[2]以及变形与强度关系等方法都不能回答和解决上述问题。另据文献^[3]的研究结果,采用降低压力(0.8 MPa)和温度(173 ℃),延长恒压时间(8 h)的方法做湿筛混凝土的压蒸试验, MgO 掺量为 4%、6%、8% 的 I 级配混凝土试体,经过 7 次循环压蒸,即进行了 56 h 的压蒸试验,其压蒸膨胀值只相当于标准压蒸试验膨胀值的 65%~70%。另外,文献^[1]用同样方法只做 1 次压蒸试验的结果也与该结果一致。这表明在压蒸试验过程中,温度和压力(即高温高压条件)是影响水化膨胀值的最主要的决定因素,否则方镁石是很难水化完的,所以其他试验方法均不适用,不可能取代压蒸试验方法。因此,外掺 MgO 混凝土筑坝技术必须采用混凝土或砂浆试体压蒸法才具有指导工程应用的实际意义,并达到真实可靠控制安定性的目标。压蒸试验是检验外掺 MgO 水泥体积安定性的唯一方法。

3 高掺 MgO 水泥净浆和砂浆试体的膨胀变形

外掺不同 MgO 水泥净浆和砂浆试体的膨胀变形试验所用的水泥等原材料、试体尺寸和成型方法与压蒸试验完全相同。本试验将所有试体都养护在 50 ℃ 的水中,以获取高掺 MgO 水泥净浆和砂浆试体在较低养护温度(与压蒸比)条件下膨胀变形的发展规律,进而寻求膨胀变形与压蒸膨胀值之间的相关关系。水泥净浆和砂浆试体的试验结果分别见图 1 和图 2。

从图 1~2 中曲线和相关试验可以看出,水泥净浆和砂浆试体的膨胀值都随着 MgO 掺量和龄期的增加而趋于增大;当 MgO 掺量相同时,都随粉煤灰掺量的增加 MgO 水化引起的膨胀趋于减小,也就是说,粉煤灰对 MgO 水化产生的膨胀具有抑制作用。如 MgO 掺量为 8%,90 d 龄期时不含粉煤灰和含 30% 粉煤灰的砂浆试体的膨胀值分别为 0.318% 和 0.061%。又如都掺入 6% 的 MgO ,180 d 龄期时不含粉煤灰的净浆和砂浆试体的膨胀值分别为 0.684% 和 0.139%。

根据压蒸规则及从表 1 可知,水泥净浆试体中 MgO 的允许最大掺量应小于 3%。由图 1 可以看出,当 MgO 掺量在 3% 以内,膨胀变形曲线的斜率基本上是一致的;当 MgO 掺量超过 3% 以后,膨胀量及变形曲线的斜率明显增大;当 MgO 掺量增加到 6% 时,膨胀量及变形曲线的斜率急剧增大。图 2 与图 1 具有相似的膨胀变形规律,在砂浆试体中 MgO 的

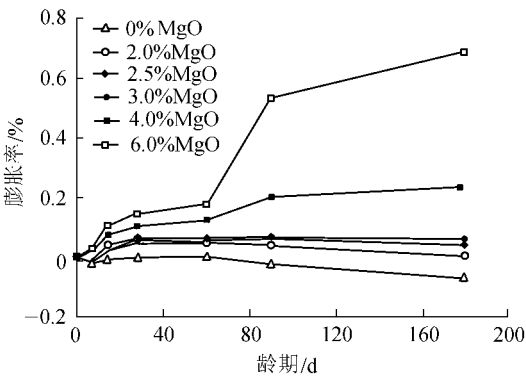


图 1 掺 15% 粉煤灰的水泥净浆的膨胀率

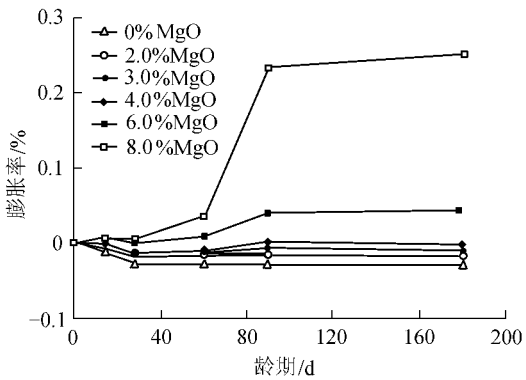


图 2 掺 10% 粉煤灰的水泥砂浆的膨胀率

允许最大掺量应小于 6.17%,超过此值膨胀量和变形曲线的斜率急剧增大。很显然不同粉煤灰掺量的膨胀值不同,但其膨胀变形的规律和图形基本上是相类似的。

4 高掺不同 MgO 混凝土自生体积变形的基本规律

4.1 外掺 MgO 混凝土自生体积膨胀变形的特性
大量试验研究结果表明,外掺 MgO 混凝土自生体积变形的特性可归纳如下:① MgO 混凝土自生体积膨胀变形的延迟性和长期稳定性,即主要膨胀量应发生在水化热最高温升之后混凝土显著的降温收缩期间,其后期的膨胀变形逐渐趋于长期稳定状态,不会发生无限膨胀。② MgO 混凝土的自生体积膨胀是一种不可逆的变形,因它是 MgO 水化所释放的化学能所致,这种随着龄期和温度增加而增大的膨胀变形量是永久性的。③ MgO 混凝土的自生体积变形与湿度基本无关,受温度的影响比较大,即温度越高,膨胀量越大,不同温度的自生体积变形的最终稳定值各异^[4]。 MgO 在低温条件下也能产生膨胀,但在低温时的水化膨胀速率要迟缓得多。其膨胀与湿度无关,即只要 MgO 水化膨胀完了,不受外界环境温湿度变化的影响。然而这种膨胀只有在约束条件下产生了预压应力,才能起到补偿效应作用。④ 外掺特制的轻烧 MgO 水泥混凝土的长期自生体积膨胀变形是很稳定

的,不会产生二次膨胀。长期的力学性质也是安定的,微膨胀对混凝土力学性能的影响不大。⑤补偿应力长期稳定,因为它是上述各特性的综合体现,又是利用 MgO 混凝土的限制膨胀来补偿混凝土的限制收缩,所以这种应力补偿是非常稳定的。另外,其膨胀量大小还与水泥的质量组成与性能、MgO 的质量与掺量、混合材料的种类与掺量、单方胶材用量与级配材料组成等诸多因素有关。

4.2 高掺不同 MgO 混凝土自生体积变形的基本规律
在 40℃ 试验温度条件下,外掺 MgO 为 2%~8% 时, MgO 混凝土自生体积变形随龄期 τ 的变化规律见表 2,随 MgO 掺量增加而增大的曲线变化斜率见图 3。从表 2 和图 3 可以看出:

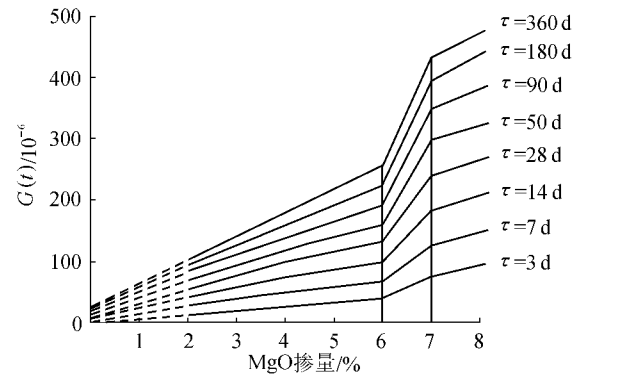


图 3 混凝土的自生体积变形与 MgO 掺量和龄期的关系

a. 在相同试验温度条件下,混凝土的自生体积变形随着 MgO 掺量的增加和观测龄期的延长而增大(见表 2),当 MgO 掺量相同时,自生体积变形与水泥品种、胶材用量、MgO 膨胀材料的质量、混合材料的种类与掺量、试体配比的灰浆率等因素有较大的关系。如白花(膨胀型)和夹江(收缩型)两种 42.5 号中热水泥^[5-6],含粉煤灰 30%,掺 MgO5%,温度 40℃,360 d 龄期的自生体积变形分别为 210×10^{-6} 和 131×10^{-6} ,两者相差达 60% 以上;当 MgO 掺量为 6%,360 d 龄期时两者的自生体积变形分别为 250×10^{-6} 和 185×10^{-6} ,后者的膨胀量只相当于前者掺 4% MgO 时的膨胀值(即 185×10^{-6})。当两种水泥都不掺粉煤灰时,掺 5% MgO 的自生体积变形分别为

352×10^{-6} 和 162×10^{-6} ,两者相差达 1 倍以上。由此可知, MgO 掺量与自生体积的膨胀变形量是不成正比的线性关系的。这些差异在工程实践中应引起注意,尤其在建立数学模型时更应注意它的实际意义。另外,从这些试验研究结果不难看出,通过优选水泥品种,对拱坝适当增加胶材用量,在安定性合格条件下尽量提高 MgO 掺量和膨胀性能,加强保温养护,采取综合性措施,使外掺 MgO 混凝土的自生体积膨胀变形达到温控要求的膨胀量,即达到 $150 \times 10^{-6} \sim 250 \times 10^{-6}$ 是完全可能的。

b. 从图 3 可见,当 MgO 掺量不大于 6% 时,即掺入 2%~6% 的 MgO 混凝土自生体积变形的连线基本上是一条直线,各直线段的斜率也几乎是相同的。各种掺量在不同龄期的膨胀值不同,也就是说,不同龄期的膨胀值连线的斜率各不相同,因而它的规律是,各直线段的斜率是趋于逐渐增大的。另外,当 MgO 掺量每增加 1% 时(除 7% 以外),直到 360 d 龄期,自生体积变形各自的增加值都大约在 40×10^{-6} 以内。

c. 由图 3 可知,当 MgO 掺量大于 6% 时,混凝土的自生体积膨胀变形呈极快速增长趋势,如 MgO 掺量为 6%,7%,8% 时,360 d 龄期的自生体积变形分别达到了 256×10^{-6} , 432×10^{-6} 和 474×10^{-6} 。当 MgO 掺量在 6%~7% 之间时,不同龄期的自生体积膨胀变形呈急剧增长趋势,如 7 d,28 d 和 360 d 龄期的增长值分别达到 60×10^{-6} , 109×10^{-6} 和 176×10^{-6} 。并且随着龄期的增长该直线段的斜率迅速增大,其膨胀变形出现了突变,该线段也成了折线。当 MgO 掺量在 7%~8% 之间时,自生体积变形随着龄期的增长变化相对平缓,但其增长斜率稍大于 MgO 掺量不大于 6% 时的斜率。

d. 根据压蒸安定性试验结果,外掺 MgO 水泥砂浆(或混凝土)试体压蒸安定性合格的 MgO 的最大极限掺量为 6.17%(或 6.80%)。从本试验混凝土自生体积膨胀变形的规律看:在压蒸安定性合格范围内,外掺 MgO 水泥混凝土的自生体积变形随着龄期延长而正常增长。在压蒸安定性合格而 MgO

表 2 外掺不同 MgO 混凝土的自生体积变形 $\alpha(t)$ 10^{-6}

MgO 掺量/%	3 d	7 d	14 d	28 d	50 d	90 d	120 d	180 d	250 d	360 d
2.0	12	27	40	52	68	83	88	94	98	104
3.5	25	45	67	87	106	126	134	144	152	159
4.0	28	50	74	100	120	140	148	160	170	180
4.5	32	54	80	107	132	152	162	174	185	199
5.5	37	65	93	124	151	178	192	208	221	238
6.0	40	68	98	132	160	190	204	224	238	256
7.0	76	128	184	241	298	350	373	395	412	432
8.0	95	147	206	264	320	380	408	440	454	474

为临界掺量时,其自生体积变形有快速增长的趋势。当 MgO 超过安定性合格的临界掺量时,混凝土的自生体积变形产生突变,呈急剧增长趋势,这时的自生体积变形随龄期和 MgO 掺量的增加而迅速增大。其后再增加 MgO 掺量时,混凝土的自生体积变形的增长速率反而相对平缓得多。这个试验说明,外掺 MgO 混凝土的自生体积膨胀变形也会产生急剧增长和突变现象,这与压蒸试验过程和重烧镁超过某一掺量时所产生的膨胀现象和规律相同。该研究结果为在实际工程中确定 MgO 的允许最大极限掺量提供了试验依据,从图 3 可知,取直线段不仅是最安全的,而且还留有一定安全富余度。另外,也证明了过去将 MgO 的最大压蒸极限掺量再考虑乘以一个小于 1 的折减安全系数的做法既合理又正确,符合客观实际。

5 结 语

高掺 MgO 水泥净浆和砂浆的压蒸安定性和体积变形以及混凝土的自生体积变形试验证明:压蒸安定性合格试验标准、最大压蒸极限掺量、压蒸试验变化过程及超掺 MgO 时的突变现象等与水泥净浆和砂浆的体积变形及混凝土自生体积变形之间存在

着密切的相关关系,也就是说,存在相同的直线变化过程和相类似的急剧变化规律。这为完善发展 MgO 混凝土筑坝技术以及确定 MgO 的允许最大极限掺量提供了试验依据,同时验证了压蒸安定性试验方法的可靠实用性和科学合理性,并为外掺 MgO 技术制定新压蒸法既创造了条件,又提供了试验依据。

参考文献:

[1] 广东省水利厅,广东省水利水电科学研究院,广东省水利水电勘测设计研究院,等.外掺 MgO 混凝土不分横缝快速筑拱坝新技术应用研究成果总报告[R].广州:广东省水利厅,2005.
[2] MEHTA P K.水泥安定性的历史和现状 C]/MgO 微膨胀混凝土译文集(之二).杭州:华东勘测设计研究院,1991:1-14.
[3] 金红伟.混凝土中外掺 MgO 安定掺量的研究[J].混凝土,2001(7):30-33.
[4] 李承木.掺 MgO 混凝土自身变形的温度效应试验及其应用[J].水利水电科技进展,1999,19(5):33-37.
[5] 李承木.沙牌电站基础深槽回填外掺 MgO 混凝土研究[R].成都:成都勘测设计研究院科研所,1995.
[6] 李承木.高掺粉煤灰对 MgO 混凝土自生体积变形的影响[J].四川水力发电,2000,19(5):72-73.

(收稿日期 2007-03-12 编辑 骆超)

(上接第 12 页)

反而带来更坏的环境影响,这也提示人们,对于自然生态环境的保护应遵循自然的法则,采取科学合理的行为,这是解决人与自然冲突的关键所在。

3 结 语

怒江地区生态环境较脆弱,水电开发可能对经济、社会、生态影响较大,处理好发展与保护的关系是怒江水电开发的关键。从怒江流域水电开发社会经济影响的初步分析可以看出,区域水电开发的社会经济影响涉及诸多方面,在具体分析过程中应该重点把握以下几个方面:

a. 水电开发影响的尺度问题。选取不同的尺度,水电开发可能产生的影响及其作用机制是不一样的。从怒江水电开发在不同尺度范围内的影响来看,其对国家层面、区域层面及流域层面的影响正面效应较大,从时间角度考虑在一定的时期内其对社会经济影响的正面效应也较高。

b. 水电开发的社会经济影响需全面加以考虑。只分析怒江水电开发的社会经济影响,得出的正面

效应较高,而如果考虑生态环境的影响,其开发的综合效应需进一步界定。因此,对于水电开发影响的研究应在分系统研究的基础上,加强不同系统的综合研究,在条件允许的前提下注重水电开发对不同系统影响之间的耦合机制研究。

c. 在全面系统考虑水电开发区域影响的前提下,应对系统中关键影响因子进行重点评价研究。怒江水电开发引发诸多争议,其对“三江并流”世界遗产地的影响是其评价影响的关键因子之一。

参考文献:

[1] 何耀华,冯建昆.科学发展观与怒江水电开发[EB/OL]. [2004-10-13]. <http://www.yunnan.cn/1574/2004/10/13/13@167556.htm>.
[2] 何大明.澜沧江(漫湾)水电开发对怒江开发的启示[EB/OL]. [2004-09-10]. <http://www.xici.net/b2652/d24948621.htm>.
[3] 国家电力公司北京勘测设计研究院,国家电力公司华东勘测设计研究院.怒江中下游水电开发报告:中册[R].昆明:云南省水利水电勘测设计研究院,2003:613-643.

(收稿日期 2007-03-28 编辑 骆超)