高强混凝土的组成与力学特性

刘　冰,杜成斌,李栋梁

(河海大学土木工程学院,江苏 南京　210098)

摘要:简要介绍高强混凝土的发展现状,阐述其组成特点、力学特性和高强机理,并展望了高强混凝土的研究和发展前景.认为今后高强混凝土的主要研究方向是:提高高强混凝土的耐久性和韧性,研究高强混凝土的性能检测手段,结合试验进行配比设计,同时配置合适的外加剂,从细观角度研究高强混凝土的高强机理.

关键词:高强混凝土;HSC;力学特性;高强机理;综述

中图分类号:TU528.31　　文献标识码:A　　文章编号:1006-7647(2005)S1-0172-05

世界各地的结构工程中,使用最为广泛的、用量最多的就是混凝土材料.它在建造和使用过程中的安全性和经济性显然有着重要的社会和经济意义.为此各国研究人员对混凝土的材料组成、受力性能、数值模拟的方法和可靠度的分析等方面进行了大量的试验和理论研究[1].

混凝土主要是由水硬性胶结材料——水泥和骨料,加水混合,经过搅拌均匀、浇注成型、振捣密实和温湿养护等工序后逐渐凝固而成的人工建筑材料.高强混凝土(HSC)概念是相对的,它是与当前的混凝土技术的一般水平比较而言的.吴中伟院士认为,HSC 是一种新型高技术混凝土,是在大幅度提高普通混凝土强度的基础上,采用现代混凝土技术,选用优质原材料,在严格的质量管理条件下制成的[2].在我国现阶段,通常是把用普通水泥、砂、石、水及外加剂、掺和料等材料和常规工艺生产的,强度等级在 60 MPa 以上的混凝土称为 HSC.当然,它的强度指标也在逐步提高.C80 ~ C90 的 HSC 可以掺超细矿渣为主,C60 ~ C70 的 HSC 可以掺优质粉煤灰为主[3].

HSC 是一种能够反映当代技术水平的结构材料,无论是发达国家还是发展中国家都给予极大关注,投入资金和力量对它进行研究.我国土木工程学会于 1991 年组织成立了高强与高性能混凝土委员会,迄今已举行过 4 届学术讨论会.1994 年土木工程学会高强混凝土委员会编制了《高强混凝土结构设计与施工指南》,1999 年我国工程建设标准化协会批准了 CECS 104:99《高强混凝土结构技术规程》[4].20 世纪 90 年代以后,新修订的各专业混凝土结构设计规范,也引入 C60 ~ C80 HSC 的有关规定.

HSC 是以高强度为基础,其特点是耐久性好、流动性好、可泵性好、低坍落度损失,而且抗渗标号有的已达 40;抗冻性能也远远高于普通混凝土.

由于混凝土的一些明显缺点,如自重较大、抗拉强度低及易于开裂等,它在建筑工程中的应用受到了一些限制[5,6].直到十几年前,国际上对减水剂或超塑化剂的研究和应用,尤其是高效减水剂的使用,才使混凝土的应用和发展有了突破.目前在国际上普遍使用抗压强度在 100 ~ 150 MPa 的 HSC.随着 HSC 多项性能的改善以及我国高标号水泥的生产发展,高强高性能混凝土已成为我国混凝土结构一个主要的发展方向[7].

1　HSC 的组成材料

从宏观角度来看,硬化后的混凝土可分为水泥基相、骨料和界面过渡层等 3 个组成要素.

1.1　水泥基相

对不同高强度要求的混凝土,可以选择不同品种的水泥.对一般的高强混凝土,主要选择硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥并加入规定数量的高质量掺合料.其基本特征是比表面积和孔隙构造,它们与混凝土的强度和耐久性有着密切的关系,甚至和水泥的

基金项目:江苏省建设管理局资助项目(J5200348)

作者简介:刘冰(1980—),女,河南商水人,硕士研究生,从事高强混凝土高强机理研究.

水化热、水化反应速度与混凝土的开裂特性都有着密切的关系.

如上所述,HSC 必须使用强度等级在 42.5 级以上的硅酸盐水泥和中热硅酸盐水泥等.随着水泥生产技术的日益进步,为了混凝土的高强化与高性能化,国外已经出现了球状水泥、调粒水泥以及活化水泥等[8].球状水泥是将一般水泥用高速气流使水泥颗粒互相碰撞而成的.这些新品种水泥的一个很大特点是,在相同的标准稠度下,用水量很低.

1.2 骨 料

HSC 的抗拉强度由灰泥强度决定,而抗压强度则主要受粗骨料的强度和表面性质的影响[9].配制 HSC 的骨料与普通混凝土的要求不同,骨料本身的强度要求高,一般采用花岗岩、硬质砂岩以及石灰岩等,特别是试验已经证明,卵石不能配制 HSC.

骨料的性质与混凝土的表观密度、弹性模量和体积变形关系甚大,为此通常对骨料的粒径、粒形、强度以及吸水率的要求比其化学、矿物学方面的性质更加重要.HSC 中骨料的体积约占混凝土体积的 60%左右.而且随着混凝土强度增加,石子最大粒径还要减小,因为:①最大粒径较小,则骨料-水泥浆界面应力差也较小,应力差可能会引起微裂缝;②较小骨料颗粒强度比大颗粒强度高,因为岩石破碎时消除了控制强度的最大裂隙[10].冯乃谦指出[2],对 W/C(水灰比)为 0.25 和 0.45 的高性能混凝土 HPC 的试验表明,粗骨料的质量对混凝土抗压强度的影响很明显.

一般情况下,普通混凝土受压破坏时,裂缝沿着界面,骨料不会破坏,而 HSC 破坏时,裂缝穿过骨料.因此骨料粒径不易太大,一般最大粒径为 12~15 mm 时获得最高的混凝土强度.所以,HSC 的骨料最大粒径一般限制在 20 mm,最大不超过 25 mm,且宜采用连续级配[11].而且骨料石子的粒径、粒形、表面状况、级配以及软弱颗粒和石分含量等既会影响混凝土的强度,又影响新拌混凝土的和易性.因此,正确合理地选择骨料的品种和性能,使其符合有关技术标准的要求,是配制高性能混凝土的基础.

1.3 界面过渡层

界面过渡层是指硬化水泥浆和骨料之间的部分,即目前所知的混凝土的第三相.对于普通混凝土来说,由于界面过渡层是薄弱环节,因此断裂的引发、扩展往往始于界面过渡层.显然,要提高混凝土的强度,界面过渡层是个重要环节.在高性能混凝土中,界面过渡层也是相当薄弱的环节,如何改善与提高界面过渡层的性能,是提高 HSC 的抗渗性与耐久性技术的关键.而从 HSC 的破坏过程来看,随着强度的提高,大量的裂缝倾向于直接穿过骨料.因此,HSC 中的界面过渡层不再是普通水泥石与骨料的界面过渡层了.进一步提高 HSC 强度的研究重点应该放在骨料的改性上.

HSC 的界面层厚度最大约为 15 μm,远小于普通混凝土的最大界面层厚度 50 μm.对高强混凝土,抑制和改善界面过渡层是十分必要的.骨料周围的空隙,对混凝土的强度、抗渗性和抗冻性等有不良影响.因此 HSC 必须使骨料周围的空隙越少越好.这样就必须降低混凝土的单方用水量,提高水泥浆体的黏度,因此矿物质超细粉和高效减水剂就成为必要的组分了.

1.4 高效减水剂

混凝土的流动性、耐久性和强度等方面的性能,主要受单方混凝土中用水量、水泥用量和矿物质超细粉的影响.使混凝土达到高性能的基本思路是:在适合于施工作业的工作范围内,尽可能地降低单方混凝土的用水量.单方用水量少的混凝土具有以下几个特点:①混凝土拌和物不易离析分层;②在达到强度要求的前提下,得到经济的混凝土;③容易制造出高耐久性和不透水性的混凝土;④干燥收缩小.

使用高效减水剂或高效减水剂与矿物质超细粉双掺,是降低单方混凝土用水量的主要途径.也是使混凝土获得高性能的途径.因此高效减水剂已成为高性能混凝土中不可或缺的组成材料.值得注意的是高效减水剂对高性能混凝土具有一定的适应性要求.

1.5 矿物质超细粉

矿物质超细粉是指粒径 $d < 10\ \mu m$ 的矿物粉体材料.超细粉掺入水泥中起微观的填充作用,并给混凝土带来了许多新的特性.作为 HSC 超细粉的品种有硅粉、粉煤灰和超细矿渣等.使用超细粉材料可使混凝土达到最优存储密度,改善混凝土的性能[13].因此,混凝土界面过渡层的改善、空隙率的降低与改善都与矿物质超细粉有密切关系.

2 HSC 的力学特性

混凝土的力学特性包括抗压强度、抗拉强度、握裹强度、弹性模量、泊松比等,当然还有抗剪强度、抗磨损和疲劳强度及其他.

2.1 强 度

混凝土的强度有抗压、抗拉、抗弯、抗剪、抗疲劳、粘结、局部承压等.由于混凝土是一种非均质材料,强度受到许多因素的影响,需要分别定义,并进行相关试验.此外,混凝土的各种强度受水灰比、骨料性能、龄期、试件尺寸、加载速率、混凝土浇注方向、获得加载方向以及试验方法等影响.但各种强度

之间又存在一定的关系，一般可以用抗压强度的对比关系表现出来.

在 HSC 的抗压强度理论方面，我国现行的钢筋混凝土结构设计规范中有关混凝土强度等级，是按标养 28 d 的 15 cm × 15 cm × 15 cm 试件来测定的. 但高性能混凝土粗骨料粒径不足 25 mm，一般采用 10 cm × 10 cm × 10 cm 试件，因此，需要换算成标准试件.

由试验知，对普通混凝土在 $W/C = 0.4 \sim 0.6$ 的范围内，抗压强度与 W/C 值近似地呈线性关系，而对掺硅粉的 HSC，在 $W/C = 0.3 \sim 0.4$ 的范围内，也几乎呈线性关系[14]. 掺硅粉时起初对抗压强度提高效果较好，这种效果在掺量为 10% ~ 20% 时随掺量增多而逐渐减弱.

混凝土由骨料和砂浆组成，当其受力时它们共同作用，在界面粘结强度得到保证条件下，变形必须协调，在骨料与砂浆界面处将产生拉应力和剪应力. 当骨料强度不足时混凝土的破坏可能是由于骨料被压碎而引起的. 在 HSC 内，由于界面粘结强度被提高，骨料被压碎的几率较普通混凝土显著增大. 因此，骨料的强度越高，则可配制出强度更高的混凝土. 在骨料、砂浆粘结强度一定时，如骨料弹性模量增大，以致引起界面拉应力过大而显得界面粘结强度不足时，则混凝土会出现界面破坏. 这时，骨料弹性模量越大越不利于混凝土强度的提高.

HSC 中孔隙和先天裂缝比普通混凝土少. HSC 中水泥石和骨料的强度比较接近，由薄弱界面扩展而来的裂缝有可能穿过粗骨料. HSC 的断裂面较平整，即裂缝在混凝土中沿较直的方向发展，破坏速度较快[15,16]. 普通混凝土中沿薄弱界面发展来的裂缝穿过水泥石后会围绕骨料面发展，断裂面凸凹不平[17].

2.2 弹性模量与泊松比

a. 弹性模量. 随着水灰比的降低，弹性模量增大，这与使用材料及养护条件有关，尤其受粗骨料、细骨料的影响大. 不同(粗)骨料的强度和弹性模量以及泊松比都是不同的. 砂浆和水泥石也因水泥品种和砂的不同而不同. 混凝土内骨料的弹性模量一般都大于砂浆和水泥石的，而骨料的泊松比一般都小于砂浆和水泥石的.

一般地说，强度提高弹性模量增大. 但抗压强度超过 40 ~ 60 MPa 时，弹性模量与抗压强度的关系十分复杂. 对于这方面的研究还有待进一步的深入. 在通常的强度范围内动弹模与静弹模成一定比例，而且动弹模偏高，但随着强度的提高，两者大体上相同.

b. 应力-应变关系. HSC 的应力-应变曲线直到破坏几乎一直为线性，根据实验结果，HSC 的应力-应变曲线近似于梯形. 随着强度的提高，应力-应变曲线近似于完全弹性-脆性破坏，达到最大荷载以后，下降段斜率很大，迅速下降. 由试验知 HSC 抗弯区极限应变大约是普通混凝土的 0.3%[18]，随着高强化，对于抗弯破坏的承载能力，混凝土的影响程度就降低了. 影响应力-应变曲线形状的主要因素，除了强度外，还有粗骨料的种类、粒形、粒径等[20]. 随着粗骨料的粒径增大及在混凝土中的体积含量增大，应力-应变曲线呈脆性破坏的形状.

HSC 即使抗压强度提高，通过重复加载后承载能力也明显下降. HSC 对重复加载的抵抗性是差的.

c. 泊松比. 随着混凝土的高强化，泊松比有增大的趋势. 由于使用的粗骨料的种类不同，泊松比增大的趋势也不同. 此外，随着应力的增加，泊松比的变化，因混凝土的强度而稍有所不同，但变化的趋势与普通混凝土几乎差不多. 当达到抗压强度的 80% ~ 90% 的应力水平时泊松比迅速增大. 对于高性能混凝土，在弹性范围内，泊松比取 0.2 比较合适.

3 HSC 的研究和发展

3.1 研究内容

目前对普通混凝土力学性能的研究已经相当成熟. 但对 HSC 的力学性能问题，如高温、疲劳及地震作用下的抗力性、抗冻性和抗渗性的研究以及 HSC 的高强机理研究还处于较为空白的阶段[21].

a. 合理评定 HSC 的耐久性和韧性问题. 我们应该引入以耐久性为主的结构设计思想. HSC 除常用的组成材料(水泥、砂、石、掺合料和水)外，还需加入超塑化剂、膨胀剂、增稠剂等外加剂[22,23]. 需开发检查 HSC 耐久性及其他性能的系统，研究 HSC 耐久性的机理和影响耐久性的动力学因素. 目前，普通混凝土的韧性问题通过纤维、聚合物的掺入得到了一定的改善，但在掺纤维等改善韧性的同时与工作性能的矛盾还没得到很好的解决，特别是随强度的提高混凝土脆性增大是对 HSC 全方位应用的一大障碍[24,25]

b. 进一步研究 HSC 的性能检测手段[26]. 我国的不少研究和施工部门侧重于 HSC 的配制和施工技术方面的研究，而较少考虑 HSC 的性能检测. 随着 HSC 在我国土建工程中推广应用，必然会碰到现有普通混凝土抗压强度试验对其是否适用的问题. 对现场 HSC 强度无损检测曲线的应用应该成为我们新的研究课题

c. 结合试验进行配比设计，同时配制合适的外加剂，对 HSC 的高强机理进行探讨，从细观角度研究 HSC 的高强机理[27]. 以往对混凝土力学性能研究

多偏重宏观方面，忽视了混凝土结构的内部组成，实际上混凝土结构的破坏是其内部微结构微裂缝萌生、扩展和失稳的结果[19]．许多学者都已认为采用宏、细观相结合的方法是研究混凝土的破坏和力学机理的有效途径[41]．

HSC 在工程应用中也有很多缺陷，典型的是由于 HSC 的水胶比小，水泥和粉状掺合料等胶凝材料的使用量大，胶凝材料组分的水化造成的内部干燥会引起较大的自收缩[28]，这种自收缩在早期的发展速度快[29]．因此，与普通混凝土不同，HSC 早期硬化过程中会受到温度变化、干燥收缩及自收缩的复合作用[30]，它将比普通强度的混凝土更倾向于早期开裂[31]，寻求其控制对策将是混凝土发展中一个重要的研究方向．

3.2 发展及成果

高性能混凝土是从 HSC 发展而来的．提高混凝土的强度是发展高层结构、高耸结构、大跨度结构的重要措施．采用 HSC 可以减小截面尺寸，从而减轻自重，并能获得较大的经济效益．我国土木工程已采用 C100 混凝土．英国帝国公司与牛津大学合作研制成功的无宏观缺陷（MDF）水泥，其抗压强度达 300 MPa，抗折强度达 150 ~ 200 MPa．近几年来，国际上又出现了活性粉末混凝土，其抗压强度已达 800 MPa[32]．在实际工程中，美国西雅图双联广场泵送混凝土 56 d 抗压强度达到了 133.5 MPa．

当前 HSC 的发展方向主要有：超高强混凝土（Ultra HSC）、绿色高性能混凝土（Green HPC）[33]和承受高温的高强混凝土[34]．

超高强混凝土，抗压强度达 200 ~ 800 MPa，抗拉强度 25 ~ 150 MPa．其技术途径是减小颗粒的最大尺寸、改善混凝土的均匀性．使用超细粉，以达到混凝土的最优存储密度，日本建议超高强混凝土石子最大粒径在 10 mm 以下[35]．减少混凝土的单位用水量，使用非水化水泥颗粒作为填料以增大存储密度．过去我国对超高强高性能混凝土的研究尚未涉及．但近 10 年来，蒲心诚等以常规的原材料及通用的工艺方法研制成功了强度达 100 ~ 165 MPa、流动性能优良的超高强高性能混凝土．

承受高温的 HSC．HSC 密实性好，但却降低了防火能力．这是因为在高温（火灾）时，砂浆中的自由水和化学粘结水转变为水汽，但却不能从密实的混凝土中逸出，从而形成气压，导致柱子保护层剥落，严重降低了柱的承载力．解决这个问题的一种方法是，在每 $1m^3$ 混凝土中加 2kg 聚丙烯纤维，在高温（火灾）时，纤维熔化，形成了能使水汽从边界区逸出的通道，减小了气压，防止柱的保护层剥落[36]．

绿色混凝土这个概念由我国著名的混凝土专家吴中伟院士提出，指可再生、可循环利用的混凝土材料．它不但能更多地掺加以工业废渣为主的细掺料，还能更多地节约水泥熟料[37]，从而减少污染．不可否定，绿色高性能混凝土是高性能混凝土的发展方向，也是混凝土的未来．据预测，将来的绿色高性能混凝土中，最大的胶凝组分是磨细工业废渣而不是熟料水泥[38 ~ 41]．

参考文献：

[1] 赵铁军，李秋义，田砾，等．高强与高性能混凝土及其应用[M]．北京：建筑工业出版社，2004．

[2] 陈杨生．高强混凝土（HSC）的性能及应用研究[J]．房材与应用，2004(4)：8-9．

[3] 陈肇元．高强与高性能混凝土的发展及应用[J]．土木工程学报，1997，30(5)：2-11．

[4] CECS 104：99，高强混凝土结构技术规程[S]．

[5] MOR A．High-performance concrete becoming a practical option[J]．Concrete Construction，1992，37(5)：12-15．

[6] GERWICK JR B C．High-performance concrete：present and future[J]．Concrete Construction，1992，37(5)：61-64．

[7] 陈肇元，朱金铨，吴佩刚．高强混凝土及其应用[M]．北京：清华大学出版社，1992．

[8] 冯乃谦．高性能混凝土结构[M]．北京：机械工业出版社，2004．

[9] BESHR H．Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete[J]．Construction and Building Materials．2003(17)：97-103．

[10]] RUETTERS A E，VIDAI N，WING S P．An investigation of the permeability of mass concrete with particular reference to bouider dam[J]．Journal of ACI，1983(4)：112-116．

[11] 张欣，等．高强混凝土的特点及其应用[J]．山西水利科技，2003(1)：69-71．

[12] METHTA P K．Advancement in concrete technology[J]．Concrete International．1999(6)：21-25．

[13] GB 8076—1997，混凝土外加剂[S]．

[14] 丁大钧．高性能混凝土工程特性（二）[J]．工业建筑，1996，26(11)：48-60．

[15] PUNKI J，GOLASZEWAKI J，GJORV O E．Workability loss of high-strength concrete[J]．ACI Materials Journal，2002，93(5)：427-431．

[16] TAMIN A SAMMAN．Plastic shrinkage cracking of normal and high-strength concrete：a comparative study[J]．ACI Materials，1996：36-40．

[17] 邓寄才．高强混凝土的断裂韧度[J]．混凝土，1995(2)：3-5．

[18] 刘海霞，周兴，刘海龙．高强混凝土的力学性能及其应用[J]．黑龙江交通科技，2003(9)：80-81．

[19] 游宝坤．混凝土膨胀剂及其应用[M]．北京：中国建材工

业出版社,2002:133-137.
[20] GOLDMAN A,BENTUR A. Bond effects in high-strength silica fume concretes[J]. ACI Materials Journal,2001,86(5):440-447.
[21] WANG KEJIN. Plastic shrinkage cracking in concrete materials-influence of fly ash and fiders[J]. ACI Materials Journal,2001:458-464.
[22] 鲁统卫,刘永生,王谦.粉煤灰和膨胀剂配制高性能混凝土的研究及应用[J].混凝土,2002(7):39-42.
[23] 蒲心诚.高效活性矿物掺和料与混凝土的高性能化[J].混凝土,2002(2):2-3.
[24] 朱江.聚丙烯纤维与高强高性能混凝土[J].混凝土,2000(5):49-51.
[25] WIEGRINK K,MARIKUNTE S,SHAH S P. Shrinkage cracking of high strength concrete[J]. ACI Materials Journal,1996,93(5):409-15.
[26] CHUNG D D L. Self-monitoring structural materials[J]. Materials science and engineering,1998,22(2):57-58.
[27] 寺村悟,坂井悦郎.为混凝土高强化而开发的混合材[M]//高强混凝土与高效混凝土译文集(第一册).清华大学,1994:61-67.
[28] PAILLERE A M,BUIL M,SERANO J J. Effect of fiber Addition on the autogenous shrinkage of silica fume concrete[J],ACI Material Journal,1989,86(2):139-144.
[29] YANG Yang,SATO Ryoichi,KAWAI Kenji. Evaluation of autogenous shrinkage and drying shrinkage based on bound water content of cementitious material[J]. Concrete Library International,JSCE,2002(40):193-207.
[30] TAZAWA E,Y,MYAZAWA S. Experimental study on mechanism of autogenous shrinkge of concrete[J]. Cement and Concrete Research,1995,25(8):1633-1638.
[31] 赵国藩.高性能混凝土发展简介[J].施工技术,2002,31(4):1-16.
[32] RICHARD P,CHEYREZY M H. Reactive powder concrete with high ductility and 200 ~ 800 MPa compressive strength [C]//Proceeding V M Malhotra Symposiumon Concrete Technology:Past Presentan Future ACI SP-144. American Concrete Institute,Detroit. 1994:507-5181.
[33] 赵国藩.混凝土及其增强材料的发展与应用[J].建筑材料学报,2000(3):1-5.
[34] 同济大学.混凝土学[M]. 1982.
[35] 赵国藩.高性能材料在结构工程中的发展与应用[J].大连理工大学学报,2003,143(3):257-261.
[36] ZHITOMIRSKY I. Cathodic electrodeposition of ceramic and organoceramic material,fundamental aspects[J],Advances in Colloid and Interface Science,2002,97(1-3):277-315.
[37] THOMAS M D A,SHEHATA M H,SHASHIPRAKASH S G. The use of fly ash in concrete:classification by composition [J]. Cement Concrete and Aggressgates,1999,21(2):501-524.
[38] 李家和,刘铁军,吕毅.高强混凝土收缩及补偿措施研究[J].混凝土,2000,124(2):28-30.
[39] 安明哲,覃维祖,朱金元.高强混凝土的自收缩试验研究[J].山东建材学院学报,1998,12(1):139-143.
[40] DAVIS H E. Antogenous volume change of concrete[C]//Proceeding of the 43th Annul American Society for Testing Material. ASTM,1940:1103-1113.
[41] RUSSEL H G. Long-term properties of high-strength concrete [J]. Concrete Technology Today,1993,14(3):67-81.

(收稿日期:2005-04-01 编辑:马敏峰)

(上接第142页)铺土工膜堤后开导渗沟等堵疏结合的措施,创造两闸坝可按设计水位正常拦蓄运行的条件.当拦蓄水位提高到正常的4.60 m高程时,一是往上游回水,扩大城区的水域面积,城区环境进一步改善;二是闸坝容蓄量增加,既增加可容纳和稀释污染的载体,改善水质,枯水季节还可作为调节补充下游冲淡的水源.

3.2 非工程性措施

提高对生态水量观念的认识,在流域上游的蓄、引水工程,应维持下游河道生态水量的基本平衡.应建立有效的调节机制,对上游汀溪等中小型水库核定生态用水指标,并与主管部门和河道管理单位共同适时调度使用.对策槽等引水工程应限定引流量指标,改变长期以来河道径流大渠首就满引,径流小则全引的做法,让超过灌区灌溉定额的水量(基本上长年超标)径流还归河道,杜绝无节制滥引造成无效弃水(更何况弃水是从流域外入海),而流域自身下游河道却出现生态水源危机的现象.

4 结 语

a. 橡胶坝自身长期处于非正常运行状况,坝面一直受强日照和有害附着物的风化侵蚀,得不到漫溢水流的洗涤和降温,坝袋表层胶质与内层纤维必然会加速老化而影响其使用寿命,建议在坝袋上方架设喷淋装置,适时保养.

b. 由于坝高长期限制水位运行,坝袋充水度不足致使坝体变形,坝袋两端(接头安装部位)及中部产生非结构性褶皱,加上每天受下游潮水顶托,坝袋上下游往复移位增加了各褶皱部位的机械性劳损,在提高坝区节制闸的配套性和泵站充(排)水的时效性之后,坝体按设计充水度运行,使坝袋处于正常的型体与张力状态.

(收稿日期:2005-03-02 编辑:马敏峰)