考虑内部温度历史的大坝混凝土强度发展

钱文勋[1,2]，张燕迟[1,2]，蔡跃波[1,2]，丁建彤[1,2]

（1. 南京水利科学研究院，江苏 南京 210029；2. 水利部水工新材料工程技术研究中心，江苏 南京 210029）

摘要： 考虑温度历史的大坝混凝土强度发展与标准养护方式下区别显著，在混凝土配合比设计中需考虑该影响. 本文采用温度匹配养护方式模拟典型的大坝混凝土内部温度历史，研究大坝混凝土的强度发展. 结果表明，对于粉煤灰掺量为35% ~50%的大坝混凝土，采用温度匹配养护在7 ~90 d龄期内抗压强度较标准养护可提高18% ~48%；较多粉煤灰掺量和较大水胶比的混凝土对养护温度更为敏感，采用温度匹配养护方式能更合理体现大坝内部混凝土实际的强度发展.

关 键 词： 温度匹配养护；大坝混凝土；抗压强度；温度敏感性

中图分类号： TV431：TU502 **文献标识码：** A **文章编号：** 1009-640X(2008)04-0050-05

Compressive strength development of wet-screened concrete considering interior temperature history

QIAN Wen-xun[1,2], ZHANG Yan-chi[1,2], CAI Yue-bo[1,2], DING Jian-tong[1,2]

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute*, *Nanjing* 210029, *China*; 2. *Research Center on New Materials in Hydraulic Structures*, *Ministry of Water Resources*, *Nanjing* 210029, *China*)

Abstract: The beneficial effect of real temperature history upon the strength of dam concrete is worth considering when mixture proportion is selected. Compressive strength development of dam concrete is investigated under temperature matched curing (TMC) condition simulating typical interior temperature history in large concrete dams. The strength of dam concrete with 35% ~50% of fly ash increases faster by 18% ~48% at the age of 7 days to 90 days in real interior temperature condition than in standard curing condition. Besides, fly ash content or water-binder ratio is sensitive to temperature of curing in dam concrete. Temperature match curing is more reasonable for the appraisal of the in situ strength development of dam interior concrete.

Key words: temperature match curing (TMC); dam concrete; compressive strength; temperature sensitivity

混凝土配合比设计试验中，一直采用20℃左右的标准养护方式，而实际大坝混凝土中，胶凝材料水化热

收稿日期： 2008-01-03

基金项目： 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金项目(50539040)；水利部公益性行业科研专项经费项目(200701014)

作者简介： 钱文勋(1977-)，男，江苏无锡人，硕士，主要从事水泥基改性材料研究与应用. E-mail：wxqian@nhri.cn

所产生的温度场可持续相当长的时间. 如二滩坝体内部混凝土实测温度超过 25℃ 的时间达 70 d，最高温度约 33℃[1]. 目前，国内大型水电工程对大坝混凝土内部温度都开展了实时监测，资料[1-4]显示，在养护早期，混凝土的内部温度均远远超过标准养护温度.

温度对胶凝材料的水化反应速率影响显著，尤其是粉煤灰的水化反应[5-8]. 因此，在实际温度历程下养护的混凝土性能发展与标准养护方式下的结果就会有显著差别[9,10]，大坝内部混凝土的实际强度发展就可能远远超过预期设计. 前期研究工作表明，提高养护温度对水泥-粉煤灰胶凝体系的强度发展作用显著. 图 1 为掺 50% 粉煤灰的水泥胶砂强度试件在不同养护温度下的强度发展曲线.

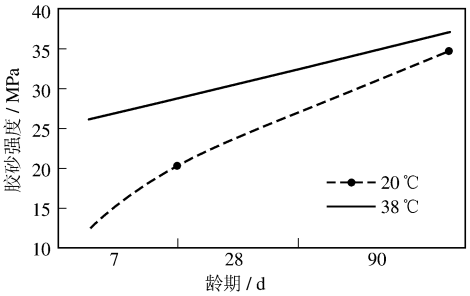


图 1　不同养护温度对胶砂强度的影响

Fig. 1　Influence of curing temperature on mortar strength

如果针对大坝大体积混凝土考虑温度匹配养护（Temperature Match Curing，TMC）方式[11]进行配合比设计，就有可能在设计龄期内满足力学性能要求下，提高粉煤灰掺量或降低水泥用量，进一步降低胶凝材料总的水化热，控制大坝混凝土内部温升，减少大坝混凝土的热裂风险. 本文就锦屏一级水电站采用的混凝土原材料和全级配配合比，开展温度匹配养护方式对全级配湿筛混凝土强度发展的影响研究，同时探讨不同粉煤灰掺量和水胶比下强度发展对养护温度的敏感性.

1　原材料及配合比

1.1　原 材 料

试验用水泥为双马中热硅酸盐水泥，粉煤灰为曲靖 Ⅰ 级灰，其物理化学性能见表 1. 试验细骨料为雅砻江地区人工大理岩砂，细度模数 3.1；粗骨料为雅砻江地区人工砂岩，分为小石（粒径 5 ~ 20 mm）、中石（粒径 20 ~ 40 mm）、大石（粒径 40 ~ 80 mm）和特大石（粒径 80 ~ 160 mm）4 种. 外加剂为 ZB-1A 萘系缓凝高效减水剂和 AEA202 引气剂.

表 1　原材料物理化学性能

Tab. 1　Physical properties and chemical compositions of materials

	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	烧 失 量
P·MH42.5	20.0	5.4	5.3	61.1	3.8	2.4	0.5
粉 煤 灰	51.6	7.3	29.2	4.4	1.1	0.4	0.6

1.2　配 合 比

试验采用全级配大坝混凝土配合比（见表 2）. 为研究不同粉煤灰掺量和混凝土强度等级对养护温度的敏感性，试验设计了不同粉煤灰掺量和不同水胶比的配合比平行试验组.

表 2　全级配混凝土配合比

Tab. 2　Mixture proportions of fully graded concrete

	水 胶 比	水 /(kg·m^{-3})	水 泥 /(kg·m^{-3})	粉 煤 灰 /(kg·m^{-3})	砂 /(kg·m^{-3})	石 /(kg·m^{-3})	外 加 剂 /(kg·m^{-3})
TH38-A			140	76	439	1732	
TH38-B	0.38	82	129	86	438	1728	1.08
TH38-C			108	108	436	1723	
TH48-A			112	61	491	1719	
TH48-B	0.48	83	104	69	491	1716	0.86
TH48-C			86	86	489	1711	

全级配混凝土拌合物经 40 mm 筛湿筛后成型 150 mm×150 mm×150 mm 立方体试件.

2 养 护 方 式

结合二滩拱坝混凝土内部的实测温度[1]和三峡大坝上游面内部混凝土监测温度[2]成果分析,常态大坝混凝土内部温度一般在 7 d 前后达最高(30℃左右),随后缓慢递减. 因此,本文采用的混凝土温度匹配养护曲线如图 2 所示. 图 2 为 20 d 龄期前的温度匹配养护曲线,20 d 后每 3 d 温度减 0.5℃,50 d 后恒定于 25℃.

试验采用可程式恒温恒湿养护箱,通过多段温度输入以及恒定湿度(RH≥95%)控制完成温度匹配养护,同配合比的对比试件置于标准养护室养护;所有混凝土试件的强度测试龄期为 7 d,28 d,90 d 和 180 d.

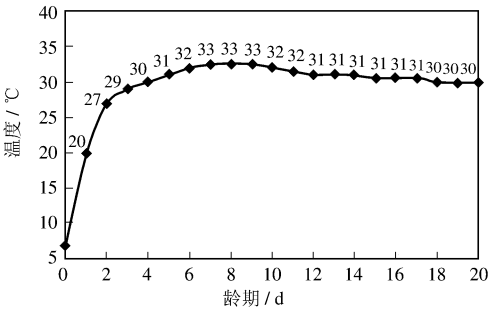


图 2 大坝混凝土温度匹配养护曲线

Fig. 2 TMC curve of dam concrete

3 试验结果及分析

混凝土试件抗压强度试验结果见表 3,试验结果数据分析见图 3 和图 4.

表 3 混凝土试件抗压强度

Tab. 3 Compressive strength of concrete (单位: MPa)

	7 d	28 d	90 d	180 d
TH38-A	24.0 / 20.3	40.4 / 32.9	48.5 / 47.0	53.0 / 50.9
TH38-B	20.4 / 17.3	38.5 / 32.0	46.3 / 42.6	46.3 / 48.4
TH38-C	19.3 / 15.2	35.8 / 27.0	41.5 / 37.3	46.2 / 44.5
TH48-A	16.5 / 13.2	30.3 / 23.8	37.8 / 31.9	39.2 / 38.3
TH48-B	15.4 / 12.3	28.5 / 21.4	35.6 / 31.9	38.2 / 37.6
TH48-C	13.4 / 9.6	26.2 / 17.7	34.2 / 28.3	36.3 / 36.1

注:"/"前后分别为温度匹配养护(TMC)和标准养护(SC)下的试验结果.

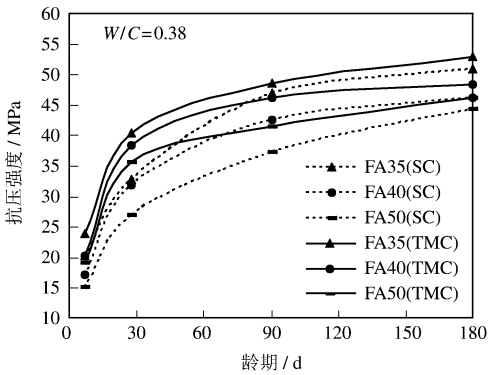


图 3 温度匹配养护(TMC)与标准养护(SC)混凝土试件强度比较(W/C=0.38)

Fig. 3 Development of concrete strength under TMC condition and SC condition (W/C=0.38)

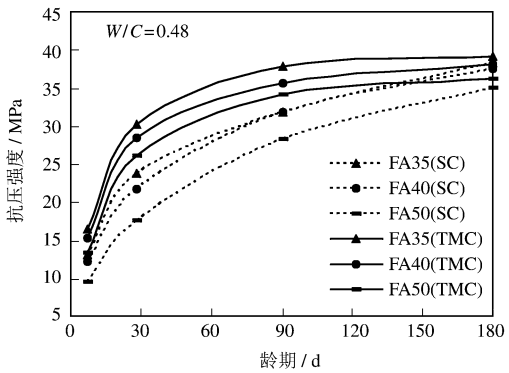
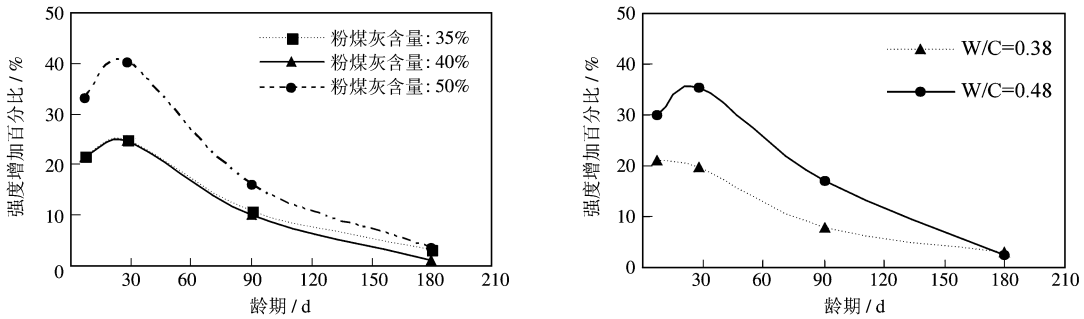


图 4 温度匹配养护(TMC)与标准养护(SC)混凝土试件强度比较(W/C=0.48)

Fig. 4 Development of concrete strength under TMC condition and SC condition (W/C=0.48)

从图 3 和图 4 可见，采用温度匹配养护方式后，混凝土各龄期强度较标准养护方式均有所提高，在早期和中期强度增加幅度较大，其中 W/C=0.48，粉煤灰掺量为 50% 的混凝土试件组 7 d 强度值增加 40%，28 d 强度值增加 48%，90 d 强度值增加 21%；混凝土后期强度（180 d）较标准养护增加不显著，平均增幅仅为 3% 左右；如果以本文中 W/C=0.48，粉煤灰掺量为 30%，采用标准养护的试件强度（38.3 MPa）为基准，同样 W/C=0.48，粉煤灰掺量为 35%，采用温度匹配养护的试件强度为 38.2 MPa. 这说明考虑温度历史后，在满足设计强度条件下，可提高混凝土配合比中粉煤灰的掺量，有利于降低总胶凝材料的水化热.

本文还分析了不同粉煤灰掺量和混凝土水胶比下强度发展对养护温度的敏感性. 从表 3 可见，不同粉煤灰掺量的混凝土试件在采用温度匹配养护方式后，其抗压强度发展有明显差别（见图 5（a）），尤其当粉煤灰掺量达 50% 时，其 7 d，28 d 和 90 d 抗压强度提高幅度较大. 这说明粉煤灰对温度更为敏感，采用温度匹配养护方式有利于大掺量粉煤灰混凝土抗压强度发展. 图 5（b）显示的是不同水胶比的混凝土配合比对养护温度的敏感性反应，图中数据为表 3 中不同水胶比、不同粉煤灰掺量的配合比试件，采用温度匹配养护后较标准养护强度的平均增幅. 结果显示，较大水胶比的大坝混凝土在采用温度匹配养护方式后，其强度发展较标准养护方式增幅较大. 这说明较大水胶比的大坝混凝土对温度更为敏感，采用温度匹配养护方式对其强度发展更为有利.



（a）　不同粉煤灰掺量下强度发展　　（b）　不同水胶比掺量下强度发展

图 5　不同粉煤灰掺量、不同水胶比试件采用温度匹配养护后的强度增幅

Fig. 5　Strength amplitude of the concrete with different fly ash contents and W/C ratios under TMC condition

大坝混凝土配合比设计考虑的不仅仅是强度，采用温度匹配养护方式是否会对混凝土热学性能和耐久性能产生影响，还需进一步探讨.

4　结　语

考虑温度历史的大坝混凝土强度发展与标准养护方式下区别显著，这在配合比设计和温控计算中不容忽视. 掺粉煤灰的大坝混凝土采用温度匹配养护方式在相当长的龄期内较标准养护更有利于混凝土的强度发展. 对于按 90 d 以内强度设计的大坝混凝土来说，温度匹配养护下混凝土的各龄期的强度值较标准养护要高的多，使设计的配合比能降低大坝混凝土温度应力带来的开裂风险；对于按 180 d 强度来设计的混凝土配合比，虽然温度匹配养护的混凝土强度最终结果与标准养护差别较小，但是其早期发展过程明显加快，这在混凝土温控等结构计算中需引起注意.

较多粉煤灰掺量和较大水胶比的混凝土对养护温度更加敏感. 本文试验结果表明，较多粉煤灰掺量或者较大水胶比的大坝混凝土配合比，采用温度匹配养护方式更加有利于其抗压强度的发展. 掺粉煤灰混凝土配合比设计时如果采用标准养护，则可能会出现由于大量掺入粉煤灰后，混凝土早期强度不够而提高原配合比

设计强度的情形,如考虑混凝土实际养护温度历史过程就可以避免这种情况.

参 考 文 献:

[1] 王成祥. 二滩拱坝混凝土温度控制[J]. 水电站设计, 1997, (4): 107-110.

[2] 蔡德所, 戴会超, 蔡顺德, 等. 分布式光纤传感监测三峡大坝混凝土温度场试验研究[J]. 水利学报, 2003, (5): 88-91.

[3] 陈 强. 官地碾压混凝土重力坝温控防裂研究[J]. 水电站设计, 2006, 22(2): 42-45.

[4] 吴 刚, 庞国伟. 三峡三期工程主坝大体积混凝土内部温度控制[J]. 西北水电, 2006, (3): 51-56.

[5] 李东旭, 陈益民, 沈锦林. 温度和碱对低钙粉煤灰的活化和结构的影响[J]. 硅酸盐学报, 2000, 28(6): 523-528.

[6] Maltais Y, Marchand J. Influence of Curing Temperature on Cement Hydration and Mechanical Strength Development of Fly Ash Mortars[J]. **Cement Concrete Research**, 1997, 27: 1009-1020.

[7] Hanehara S, Tomosawa F, Kobayakawa M, *et al*. Effects of water/powder ratio, mixing ratio of fly ash, and curing temperature on pozzolanic reaction of fly ash in cement paste[J]. **Cement Concrete Research**, 2001, 31: 31-39.

[8] Kim J K, Han S H, Song Y C. Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete(Part I) Experimental results[J]. **Cement Concrete Research**, 2002, 32: 1087-1094.

[9] Dhir R K, Jones M R. PFA Concrete: Influence of Simulated in Situ Curing on Elasto-Plastic Load Response[J]. **Magazine of Concrete Research**, 1993, 45(163): 139-146.

[10] 江京平. 掺粉煤灰大体积混凝土内部温升对其强度影响的探讨[J]. 粉煤灰, 2000, (5): 24-25.

[11] Wen H X, Bagheri A R, Plum D R. The strength development of silica fume concrete and its prediction under varying temperature conditions [J]. **Magazine of Concrete Research**, 1989, 41(145): 199-204.

《海洋工程》征订启事

《海洋工程》(季刊)是中国海洋学会主办,南京水利科学研究院和上海交通大学共同承办的既有理论研究又有实用科学并侧重于工程技术的学术刊物,旨在向国内外介绍我国海洋工程有关研究、规划、设计、试验、施工、管理最新进展和学术动态,主要刊登深海工程、近海工程、海岸工程、河口工程、海洋能源开发与利用工程、海洋水下工程以及潜水救捞技术等领域的文章. 稿件形成:学术论文、综合评论、调查报告、成果介绍以及学术动态报导.

目前《海洋工程》被美国《剑桥科学文摘》(Cambridge Scientific Abstracts, CSA)、《土木工程文摘》(Civil Engineering Abstracts, CEA)、联合国《水科学和渔业文摘》(Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts)收录为"核心期刊". 该刊在国内被《中国学术期刊(光盘版)》全文收录,刻于理工 A 辑;经过多项学术指标综合评定及同行多位专家推荐,被收录为国家科技部"中国科技论文统计源期刊"(中国科技核心期刊);被收录于中国知识资源总库的"中国科技期刊精品数据库";在"万方数据-数字化期刊群"全文上网;被《中国核心期刊(遴选)数据库》收录;被"中国期刊全文数据库"全文收录期刊;作为"中国学术期刊综合评价数据库"统计源期刊和"中国科学引文数据库"来源期刊;被"中国科技期刊数据库"和《中国学术期刊文摘》收录.

《海洋工程》适宜从事海洋工程领域的科研人员、工程技术人员、管理人员、大专院校的教师和学生以及关心海洋工程领域的人士阅读.《海洋工程》自办发行,全年定价 80 元/本,欢迎单位及个人订阅.

地址:南京市虎踞关 34 号《海洋工程》编辑部,邮编:210024

电话:25-85829332,传真:025-85829390,邮箱:oe@ nhri. cn