

拱坝低热水泥混凝土抗裂效果仿真

吴航通,郭传科,徐建荣,何明杰,张伟狄

(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,浙江 杭州 311122)

摘要:为了研究低热水泥混凝土在白鹤滩大坝中的抗裂效果,对比了低热硅酸盐水泥混凝土和常规中热水泥混凝土的热力学性能,并在典型坝段上设计温控方案。通过有限元仿真计算温度和应力,分析比较了两者在早期、一期冷却、二期冷却及封拱后等关键时段的温度、应力以及表面抗裂效果。结果表明,不同季节浇筑的混凝土应力过程线趋势一致。相比中热混凝土,低热混凝土在各不同时期均具有更高的抗裂安全系数,温控防裂的重点仍在二期冷却末。对于昼夜温差大的情况,低热水泥在早龄期需要更好的保温措施来达到表面抗裂效果。

关键词:低热水泥;大体积混凝土;拱坝;抗裂效果;仿真计算

中图分类号:TV431 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)05-0076-05

Simulation of crack resistance effect of low heat cement concrete for arch dams//WU Hangtong, GUO Chuanke, XU Jianrong, HE Minjie, ZHANG Weidi (*PowerChina, Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China*)

Abstract: To investigate the crack resistance effect of low-heat cement concrete in the Baihetan Dam, the thermodynamic performances of low-heat cement concrete and regular medium hot cement were compared, and the temperature control scheme was designed on a typical dam section. The temperature and stress were calculated by finite element simulation, and their effects on temperature, stress and surface crack resistance were analyzed and compared in the critical periods of early cooling, primary cooling, secondary cooling and arch sealing. The results show that the stress process trend of concrete is consistent in different seasons. Compared with medium hot concrete, low-heat cement concrete has higher safety factor of crack resistance, but the key point of temperature control and crack prevention is still at the end of the secondary cooling. In addition, for the case of large temperature difference between day and night, the low-heat cement needs better insulation measures at the early age to achieve the surface anti-cracking effect.

Key words: low-heat cement; mass concrete; arch dam; crack resistance effect; simulating calculation

大体积混凝土在现代工程建设特别是水利水电建设中占有重要地位,我国每年仅在水利水电工程中所浇筑的大体积混凝土就在1 000万m³以上^[1]。大体积混凝土裂缝则是长期困扰工程界的问题之一。裂缝产生的主要原因是大体积混凝土中水泥水化热长期聚集在其内部不易散发,在外界边界条件和混凝土内部的共同约束下,产生温度收缩,继而出现裂缝。白鹤滩双曲拱坝属于300 m级特高拱坝,结构受力复杂,裂缝的出现会影响工程的安全性和耐久性,一旦裂缝产生,想要修补困难巨大,因此温控防裂问题十分重要。为了降低混凝土内部的水化温升,减小温度变形,应优先选用低水化热的水泥。低热水泥以硅酸二钙为主导矿物,熟料的煅烧温度较低,对环境的污染少,是一种低热高性能的节能环保

型水泥,具有水化热较低,后期强度增长率大,耐久性好等特点^[2-3],可有效改善水工大体积混凝土的抗裂性能。

低热硅酸盐水泥具有广阔的应用前景,但主要存在早期强度较低的缺陷^[4]。国内外学者也对此做了大量研究,主要研究内容包括水泥熟料^[5]、碳化影响^[6]、C-S-H凝胶^[7-8]、水化模型^[9]、稳定性影响^[10]等,取得了一系列成果。在基础研究之上,低热硅酸盐水泥已经应用于三峡大坝、胡佛大坝、天然气平台^[11-13]等大型工程上,发挥了较好的效果。但在这些工程中的使用经验显示,各个工程的工况有所不同,所要配置和设计的低热水泥也有差异,尤其是在一些特高拱坝中,其施工期裂缝和温度控制方法都有更加严格的要求^[14-17]。因此,本文针对白鹤滩混凝土双曲

拱坝中应用的低热水泥进行研究,采用仿真计算的方法分析其在实际工程中抗裂的效果,以进一步推广低热硅酸盐水泥在大坝混凝土中的应用。

1 工程概况与材料性能

1.1 工程概况

混凝土双曲拱坝坝顶高程 834.00 m,最大坝高 289.00 m,坝顶厚度 14.0 m,最大拱端厚度 83.91 m,含扩大基础最大厚度 95 m,坝体混凝土方量约 803 万 m³。大坝坝顶弧长约 709.0 m,分 30 条横缝,共 31 个坝段。

白鹤滩水电站地处亚热带季风区,坝址区多年平均气温 21.9℃,极端气温温差大、昼夜温差变化明显。白鹤滩气象站多年平均气温为 21.95℃,最低月平均气温 13.3℃,较为温和,不存在寒冷地区冬季施工的问题,但全年有 8 个月月平均气温超过

20℃,高温季节时间长。

1.2 原材料与配合比

试验采用的主要原料为 42.5 中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥、I 级粉煤灰、二级配灰岩人工骨料、萘系高效减水剂和引气剂。试验采用四级配混凝土,控制湿筛二级配混凝土的坍落度为 3.0 ~ 5.0 cm,含气量为 4.0% ~ 5.0%;混凝土配合比设计依据 DL/T 5144—2001《水工混凝土施工规范》,配合比计算采用绝对体积法,砂石骨料均以饱和面干状态为基准。大坝混凝土强度保证率采用 85%,C₁₈₀30、C₁₈₀35、C₁₈₀40 混凝土的配制强度分别为 34.7 MPa、39.7 MPa、45.2 MPa。强度等级为 C₁₈₀30、C₁₈₀35、C₁₈₀40 的大坝四级配混凝土分别采用 0.50、0.46、0.42 水胶比、中热水泥和低热水泥进行对比试验,粉煤灰掺量为 35%。试验配合比见表 1。

表 1 混凝土配合比

编号	水泥品种	设计强度	水胶比	粉煤灰/%	外加剂掺量/%		混凝土材料用量/(kg·m ⁻³)				
					减水剂	引气剂	水	水泥	粉煤灰	砂	石
C1-40	中热	C ₁₈₀ 40	0.42	35	0.60	0.040	80	123.8	66.7	505	1710
C2-40	低热				0.60	0.069	80	123.8	66.7	505	1711
C1-35	中热	C ₁₈₀ 35	0.46		0.60	0.034	80	113.0	60.9	531	1700
C2-35	低热				0.55	0.058	80	113.0	60.9	531	1701
C1-30	中热	C ₁₈₀ 30	0.50		0.60	0.033	80	104.0	56.0	556	1688
C2-30	低热				0.55	0.058	80	104.0	56.0	556	1689

1.3 混凝土性能

混凝土力学性能、热学性能试验按照 DL/T 5150—2017《水工混凝土试验规程》进行。混凝土各龄期抗压强度和劈裂抗拉强度试验结果见表 2。

表 2 混凝土力学性能

编号	抗压强度/MPa				劈裂抗拉强度/MPa			
	7 d	28 d	90 d	180 d	7 d	28 d	90 d	180 d
C1-40	18.1	33.0	45.3	49.4	1.47	2.47	3.10	3.52
C2-40	12.1	30.1	48.5	55.5	1.10	2.30	3.34	4.09
C1-35	15.9	27.6	43.3	48.5	1.37	2.00	2.85	3.30
C2-35	11.3	27.1	46.4	53.5	0.85	2.01	3.20	3.58
C1-30	14.7	23.4	33.4	46.4	1.23	1.90	2.79	3.24
C2-30	9.2	23.0	38.6	48.6	0.73	1.97	3.00	3.47

表 2 中结果显示 7 d 龄期时低热水泥混凝土的抗压强度为 9.2 ~ 12.1 MPa,中热水泥混凝土为 14.7 ~ 18.1 MPa,两种混凝土均能满足施工对早期强度的要求;28 d 龄期时低热水泥混凝土的强度与中热水泥混凝土的接近;90 d 龄期后低热水泥混凝土的强度明显高于中热水泥混凝土,抗压强度比中热水泥提高 7% ~ 16%,充分体现了低热水泥后期强度增长率高的优势。

根据混凝土绝热升温试验和力学材料性能试

验,得到混凝土热学性能参数如表 3 所示(表中 t 为龄期)。

表 3 混凝土热学性能参数

编号	绝热温升/℃	导温系数/(10 ⁻³ m ² ·h ⁻¹)	导热系数/(kJ·(m·h·℃) ⁻¹)	比热/(kJ·(kg·℃) ⁻¹)	线膨胀系数/(10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹)
C1-40	$\frac{28t}{t+2.39}$	2.90	6.41	0.865	6.5
C2-40	$\frac{26t}{t+3.26}$	2.95	6.53	0.851	6.5
C1-35	$\frac{26t}{t+2.41}$	3.04	6.78	0.873	6.5
C2-35	$\frac{25t}{t+4.35}$	3.04	6.78	0.873	6.5
C1-30	$\frac{24t}{t+2.63}$	3.04	6.95	0.873	6.5
C2-30	$\frac{24t}{t+2.9}$	3.06	6.78	0.842	6.5

2 仿真温控计算

2.1 计算模型

根据坝体混凝土结构形式和温控措施方案,分析坝体低热水泥掺粉煤灰混凝土在早期(5 d、7 d、14 d、28 d 龄期)、一期冷却、二期冷却及封拱后等关键时段的温度、应力、抗裂安全系数,对比中热水泥

混凝土的效果,分析研究低热水泥坝体混凝土在施工期和运行期的温控防裂特性。

计算软件采用 FORTRAN 程序编制的计算大体积混凝土结构温度场与应力场的计算程序 SAPTIS^[18],可用于分析二维,三维问题。在一套网格内用有限元法求解温度场、应力场。

选取 28 号陡坡坝段为例。计算时为更真实反映边界条件,选取左、右各一个坝段作为计算模型,即 27 号、29 号坝段为 28 号坝段约束边界条件。一般情况下,外界气温边界条件为月平均气温+2℃ 辐射热。地基底部全约束,地基侧面法向约束,灌浆后边界坝段横缝临空面轴向法向约束。计算网格坝体总单元数 69 958,总节点数 89 588。三维模型如图 1 所示。

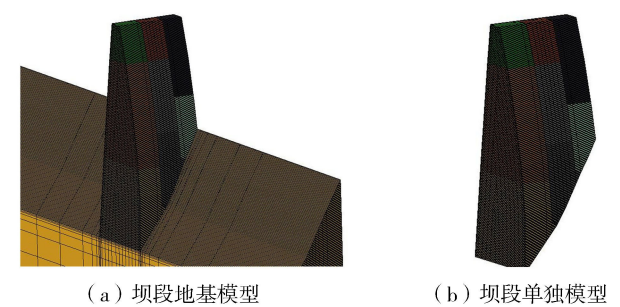


图 1 28 号坝段计算模型

考虑 28 号陡坡坝段坝体约束区范围为 666.5 ~ 740.0 m 高程,740 m 高程以上为自由区。666.5 ~ 735.0 m 高程选用 C₁₈₀40 混凝土,735.0 ~ 800.0 m 高程选用 C₁₈₀35 混凝土,800 m 高程以上选用 C₁₈₀30 混凝土。

低热水泥混凝土具有早期强度偏低的特点,白鹤滩坝址区年平均昼夜温差为 9.7℃,历年最大昼夜温差为 25.1℃,因此可能面临表面拉应力超标的问题。采用平面有限元方法对低热水泥、中热水泥混凝土进行了昼夜温差 20℃ 时的温度应力分析,分析模型如图 2 所示,表面网格尺寸为 10 cm。

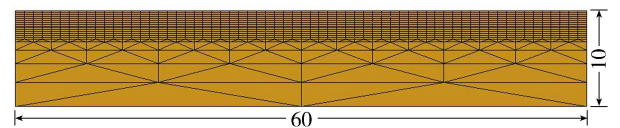


图 2 气温变化温度应力分析模型(单位:m)

2.2 温控措施与计算参数

推荐温控措施控制浇筑层厚度为 3 m,浇筑温度 13℃。水管布置间距 1.5 m×1.5 m,一期冷却水温 10℃,冷却时间 21 d,中期冷却水温 15℃,冷却时间 28 d,二期冷却水温 10℃,冷却时间 30 d,间歇时间为 7 ~ 14 d,一期冷却降温速率 0.5℃/d,流量 1.2 m³/h;中期冷却降温速率 0.3℃/d,流量 0.5 m³/h,达到目标温度后进行控温;二期冷却降温速率 0.3℃/d,流量

1.0 m³/h。上游坝面、下游坝面、仓面进行保温处理,等效放热系数 β 分别为 2.8 kJ/(m² · h · ℃)、5.0 kJ/(m² · h · ℃)、6.7 kJ/(m² · h · ℃)。根据材料性能参数和推荐温控措施,分别计算低热、中热混凝土起始浇筑月份为 1 月、3 月和 7 月的工况。

3 温控防裂效果对比分析

3.1 计算结果分析

图 3 为采用低热水泥混凝土在 7 月浇筑工况的计算结果。从图 3(a)中可以观察到不同高程的最高温度都比较接近,在 22 ~ 26℃ 范围内。图 3(b)中显示应力沿高程向上呈减小的趋势,顺河向大应力区域出现在基础约束区,最大应力 1.5 ~ 1.6 MPa。

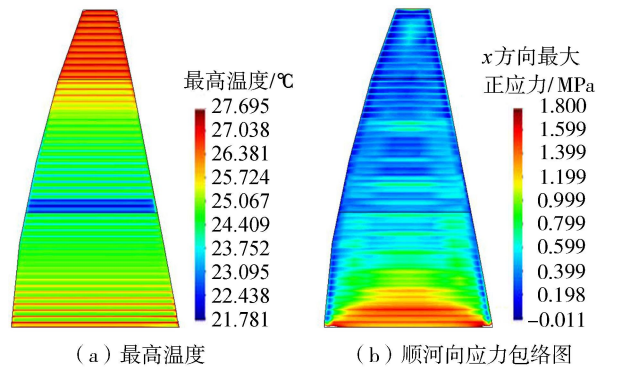


图 3 坝体中面计算结果

高程应力过程线将计算得到的不同浇筑月份的应力汇总,选择典型的 686 m 高程应力分析,并使用安全系数 K_t=1.8 计算允许应力,汇总得到图 4。分析其抗裂安全性,图 4 中可以观察到采用低热水泥浇筑的混凝土,其抗裂安全性能较好,应力过程线均在允许应力范围内。3 条应力过程线对比发现,不同月份浇筑的混凝土,其应力过程线趋势基本一致。一期冷却主要为削峰的作用,控制混凝土最高温度,同时降温至一期冷却目标。中期冷却控温阶段,拉应力水平缓慢下降。二期冷却末,混凝土温度降至封拱温度,混凝土拉应力达到峰值,抗裂安全系数也

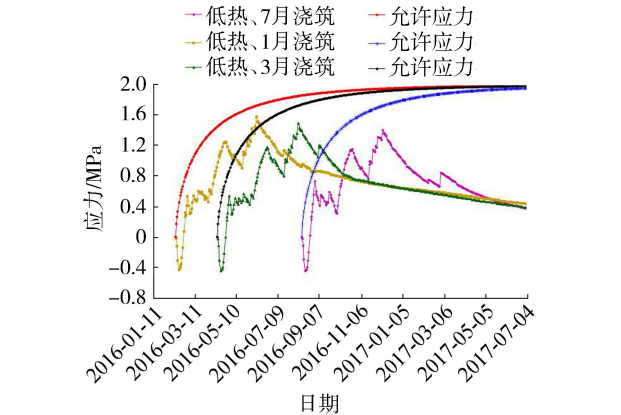


图 4 低热水泥 28 号坝段坝体 686 m 高程应力

降到最低。封拱灌浆完成后,由于计算模拟了2个月的继续通水控温措施,混凝土拉应力呈缓慢下降趋势,随着通水的结束,混凝土温度逐步上升,拉应力逐渐下降。因此,对于低热水泥混凝土来说,二期冷却末是温控防裂的重点。

图5为采用中热水泥混凝土在7月浇筑工况的计算结果。从图5(a)中可以观察到不同高程最高温度在22~28℃范围内,其中720~780 m高程温度较低,坝顶与基底温度较高。图5(b)中显示应力沿高程向上呈减小的趋势,顺河向大应力区域出现在基础约束区,最大应力在1.5~1.6 MPa。

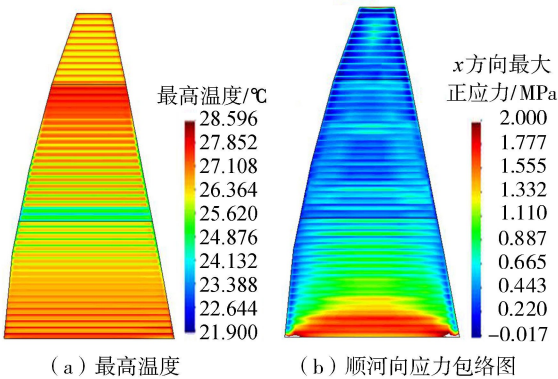


图5 工况28-2坝体中面最高温度、顺河向应力包络

图6为中热水泥的应力汇总计算结果。图中可以观察到应力过程线均在允许应力范围内,不同月份浇筑的混凝土,其应力过程线趋势也基本一致。中热水泥浇筑的混凝土在二期冷却和中期冷却应力降幅较明显,在二期冷却末,混凝土拉应力达到峰值,1月浇筑的应力峰值基本接近了容许应力,此时抗裂安全系数最低。

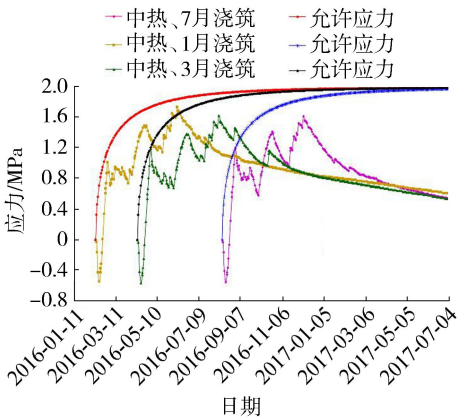


图6 中热水泥28号坝段坝体686 m高程应力过程线

3.2 低热中热水泥对比

将低热、中热水泥计算的最高温度、最大应力 σ_x 和抗裂安全系数 k 汇总得到表4。低热水泥和中热水泥的计算结果对比显示,两种水泥混凝土的最高温度都能满足最高温度控制要求。在同等条件下,低热、中热水泥混凝土的最高温度相比中热水泥

混凝土低1.4~1.9℃,对比图3和图5可以观察到,整个坝段中低热水泥混凝土高温范围区明显小于中热水泥混凝土。

表4 基础约束区各冷却期温度、应力计算结果

水泥	起浇月份	最高温度/℃	一期冷却		中期冷却		二期冷却	
			σ_x /MPa	k	σ_x /MPa	k	σ_x /MPa	k
低热	7月	25.2	0.73	2.49	1.15	2.66	1.63	2.21
低热	1月	25.1	0.53	3.25	1.24	2.45	1.66	2.17
低热	3月	25.1	0.54	3.19	1.18	2.58	1.67	2.16
中热	7月	26.8	1.02	2.12	1.38	2.25	1.78	1.85
中热	1月	27.0	0.74	2.81	1.64	1.89	1.90	1.74
中热	3月	26.7	0.96	2.25	1.47	2.11	1.78	1.85

一期冷却阶段,低热水泥混凝土降至同一目标温度时,采用低热水泥混凝土因温度峰值低,降温幅度也较小,低热水泥混凝土最大拉应力较中热水泥低28%~44%,低热水泥混凝土抗裂安全系数比中热水泥混凝土高0.37~0.94。中期冷却阶段,中、低热水泥混凝土的降温幅度相同条件下,从温度、应力过程线可以看出,中期冷却控温阶段拉应力水平缓慢下降。低热水泥混凝土最大拉应力较中热水泥低17%~24%,低热水泥混凝土的抗裂安全系数大于2.4,中热水泥混凝土抗裂安全系数大于1.8,都具有良好的抗裂性能。二期冷却末,采用低热水泥混凝土各工况的最大拉应力达到1.63~1.67 MPa,相比中热水泥降低了6.2%~12.6%。

对比不同月份的起浇结果可以发现,7月浇筑的混凝土由于气温较高,一期冷却阶段安全系数相对较低,但在中期和二期冷却阶段具有较高的安全系数。而1月浇筑的混凝土则相反,在一期冷却阶段安全系数较高,在中期和二期冷却阶段安全系数较低。3月份浇筑时,低热水泥相比中热水泥在一期冷却时抗裂性能提升幅度最大,但在二期冷却阶段提升幅度则较小。

3.3 早龄期混凝土表面抗裂性能

表5为各龄期不保温、保温等效散热系数为20 kJ/(m²·h·℃)(表中简称保温条件1)、保温等效散热系数为10 kJ/(m²·h·℃)(表中简称保温条件2)时C₁₈₀40混凝土的表面应力。表5中计算结果显示,在无保温情况下,低热、中热水泥混凝土在28 d以内龄期遇昼夜温差20℃的情况下均不满足抗裂安全系数要求。无保温情况下,在14 d龄期以前,低热水泥混凝土的拉应力低于中热水泥混凝土,但由于低热水泥混凝土的早期抗拉强度相对更低,即允许拉应力更低,因此低热水泥混凝土的表面抗裂安全系数降低了。相比中热水泥,低热水泥虽然强度增长较慢,但同时弹性模量增长也慢,极限拉伸变形也较小,这对早期的坝体材料约束更小,从这

表 5 混凝土表面拉应力计算结果

龄期/d	低热						中热					
	拉应力/MPa				极限拉伸/ 10^{-6}	弹性模量/GPa	拉应力/MPa				极限拉伸/ 10^{-6}	弹性模量/GPa
	允许拉应力	无保温	保温条件 1	保温条件 2			允许拉应力	无保温	保温条件 1	保温条件 2		
3	0.34	0.72	0.44	0.26			0.56	0.86	0.48	0.28		
7	0.55	0.96	0.58	0.35	58	24.5	0.91	1.04	0.58	0.33	66	26.4
14	0.83	1.18	0.71	0.43			1.12	1.18	0.65	0.38		
28	1.15	1.39	0.83	0.50	73	31.0	1.29	1.31	0.73	0.42	84	31.1

方面来说对抗裂是有利的。

考虑保温的情况时,中热水泥混凝土表面散热系数达到 $20\text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$ 时,拉应力水平即低于混凝土允许拉应力,而低热水泥混凝土表面散热系数需达到 $10\text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$ 时,才能保证表面拉应力不超标。因此,相同的龄期条件下,低热水泥混凝土需要的保温措施更强。

由以上对比分析可见,对于早龄期混凝土的保温尤为重要,相同龄期下尤其是7 d 以前,低热水泥混凝土拉应力值较低,但因强度低更容易超标,保温措施需比中热水泥混凝土的要求更高,才可满足表面抗裂安全要求。

4 结 论

a. 采用低热水泥混凝土在一期冷却、中期冷却产生的拉应力均低于中热水泥混凝土,拉应力降幅达6.2%~44%,具有更高的安全系数。虽然低热水泥混凝土早期强度低于中热水泥混凝土,但低热水泥混凝土因温度峰值低、降温幅度相对较小,在冷却降温阶段早期抗裂安全系数仍大于中热水泥混凝土。

b. 采用低热水泥混凝土,二期冷却末仍然是拉应力水平最高、安全系数最低的时刻,对于低热水泥混凝土来说,二期冷却末仍是温控防裂的重点。相应的抗裂安全系数为2.16~2.21,满足设计要求。

c. 对于28 d 龄期以前混凝土的早期抗裂性而言,虽然低热水泥混凝土在昼夜温差较大时表面应力低于中热水泥混凝土,但因早龄期低热水泥混凝土抗拉强度相对中热水泥混凝土更低,为保证拉应力不超标,低热水泥混凝土需要采取更强的保温措施。

参考文献:

[1] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 2 版. 北京:中国水利水电出版社, 2012.

[2] 计涛, 纪国晋, 陈改新. 低热硅酸盐水泥对大坝混凝土性能的影响[J]. 水力发电学报, 2012, 31(4):207-210. (JI Tao, JI Guojin, CHEN Gaixin. Influence of low-heat Portland cement on properties of dam concrete [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31 (4):207-210. (in Chinese))

[3] 隋同波, 范磊, 文寨军, 等. 低能耗、低排放、高性能、低热硅酸盐水泥及混凝土的应用[J]. 中国材料进展, 2009, 28(11):46-52. (SUI Tongbo, FAN Lei, WEN Zhaijun, et al. Low energy & low emission cement with high performance & low hydration heat and its concrete application[J]. Materials China. 2009, 28(11):46-52. (in Chinese))

[4] 吴中伟. 高性能混凝土[M]. 北京:中国铁道出版社, 1999.

[5] 李华, 吴笑梅, 樊粤明. 熟料中 SO_3 含量对低热水泥性能的影响及机理研究[J]. 水泥, 2008(5):12-15. (LI Hua, WU Xiaomei, FAN Yuemin. Study on the effect of SO_3 content in clinker on the properties of low heat cement and its mechanism[J]. Cement, 2008(5):12-15. (in Chinese))

[6] 邱满, 管学茂, 刘松辉, 等. 碳化技术提升低热水泥的早期强度[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(10):3265-3267. (QIU Man, GUAN Xuemao, LIU Songhui, et al. Lifting early strength of low heat cement with carbonation technology[J] Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(10):3265-3267. (in Chinese))

[7] MULLER A C A, SCRIVENER K L, GAJEWICZ A M, et al. Use of bench-top NMR to measure the density, composition and desorption isotherm of C-S-H in cement paste[J]. Microporous & Mesoporous Materials, 2013, 178(10):99-103.

[8] WANG L, YANG H Q, ZHOU S H, et al. Hydration, mechanical property and C-S-H structure of early-strength low-heat cement-based materials[J]. Materials Letters, 2018, 217:151-154.

[9] THOMAS J J, BIERNACKI J J, BULLARD J W, et al. Modeling and simulation of cement hydration kinetics and microstructure development [J]. Cement & Concrete Research, 2011, 41(12):1257-1278.

[10] 李光伟. 低热硅酸盐水泥对大坝混凝土体积稳定性影响试验[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(6):23-26. (LI Guangwei. Investigate the effect of low heat Portland cement on concrete dam volume stability [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34 (6):23-26. (in Chinese))

(下转第 88 页)