

混凝土的裂缝与控制

缪昌文^{1,2}, 刘建忠^{1,2}, 田 倩²

(1. 东南大学材料科学与工程学院, 南京 210096; 2. 高性能土木工程材料国家重点实验室, 南京 210008)

[摘要] 在分析混凝土开裂的危害和产生原因的基础上, 提出裂缝控制新技术。采用双亲性单分子膜, 减少混凝土早期的水分蒸发, 抑制混凝土早期因失水太快而产生的塑性收缩裂缝; 采用减水与减缩共同作用, 控制混凝土壳体及薄壁结构的早期开裂; 采用调控水泥水化过程中的放热量, 提高大体积混凝土的温控能力; 采用遥爪聚合型增韧剂, 增加混凝土的韧性, 减少混凝土的脆性开裂。

[关键词] 混凝土; 裂缝; 收缩; 水化热; 韧性

[中图分类号] TU755.7 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)04-0030-06

1 前言

混凝土是土木、水利等建筑工程的基础材料, 混凝土开裂现已成为土木建设工程的通病。在相对湿度(RH) < 65%时裂缝宽度小于0.5 mm, 在RH > 65%时裂缝宽度小于0.3 mm, 尽管这对混凝土结构不会带来大的危害, 但混凝土结构受到载荷作用后, 裂缝将会变宽, 无害或少害裂缝将会变成有害裂缝。有害裂缝不仅影响到混凝土结构的使用安全, 同时也会缩短混凝土构筑物的服役寿命, 带来巨大的经济损失。

2 混凝土开裂的危害性

混凝土在未开裂前是一个不透水, 但存在不连续微裂缝且多孔的结构。虽然随着龄期的增长, 水泥水化强度增大, 但水泥水化产物大多是自然界中原先不存在的, 因而必然会受到环境介质对它的侵蚀作用, 并导致其损伤劣化。其中, 最常见的现象是混凝土开裂、表面剥落, 甚至整体服役性能的丧失。

2.1 混凝土开裂, 结构承载能力下降

1) 混凝土开裂将改变结构的受力条件, 导致结构局部甚至整体发生破坏(见图1^[1])。

2) 裂缝随着环境载荷作用的不断变化将削弱

混凝土建筑物的刚度(见图2)。

3) 混凝土开裂会降低结构的抗震能力, 威胁结构的整体稳定性和安全性。

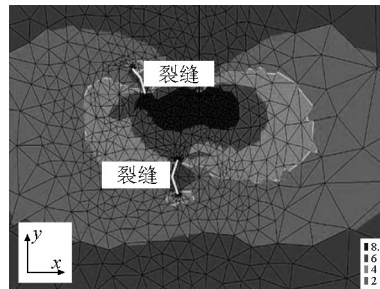


图1 带裂缝试件的受力状态^[1]

Fig.1 Stress state of concrete with microcracks^[1]

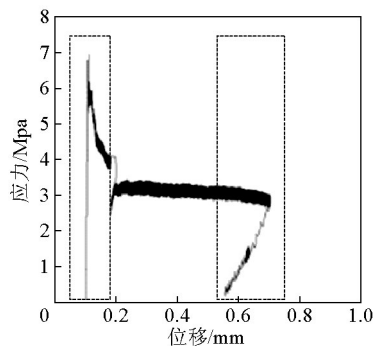


图2 裂缝对混凝土荷载—位移曲线的影响

Fig.2 Effects of the crack on load-displacement curve

[收稿日期] 2012-11-06

[基金项目] 国家重点基础研究发展计划(“973”)资助(2009CB623200)

[作者简介] 缪昌文(1957—), 男, 江苏姜堰市人, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 主要从事土木工程材料研究; E-mail: mcw@cnjsk.cn

2.2 混凝土开裂,结构耐久性能劣化

混凝土劣化过程大致可分为3个阶段(见图3^[2])。

1)阶段I:混凝土的损伤及开裂增大了渗透性,降低了结构保护层的有效厚度;

2)阶段II:渗透性的增加加速了环境中侵蚀性介质、空气及水分在混凝土结构中的传输;

3)阶段III:混凝土性能劣化,内部钢筋锈蚀,结构服役寿命缩短。

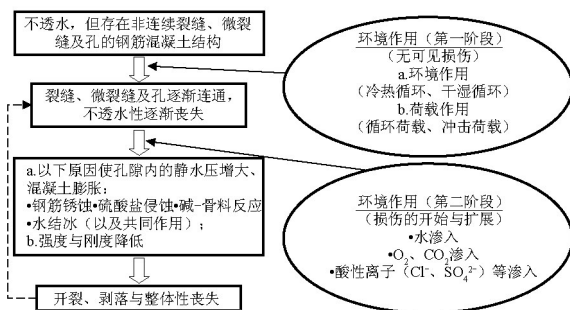


图3 钢筋混凝土的劣化过程^[2]

Fig.3 Degradation process of reinforced concrete^[2]

3 混凝土开裂的深层原因

导致混凝土开裂的因素很多,从受力角度分析,主要来自如下3个方面:a.直接应力的作用;b.间接应力的作用;c.混凝土早期变形产生的应力作用。混凝土的早期开裂大多是由混凝土的变形引起的。混凝土的早期变形主要来自于其胶凝材料水化过程中的体积变形,包括膨胀和收缩。钢筋混凝土产生的膨胀和收缩为限制膨胀和限制收缩。早期限制膨胀对混凝土不仅无害反而有益,它可使混凝土产生一定的预压应力,提高其抗裂能力。而混凝土的限制收缩则是一种背向变形,当收缩应力大于混凝土的抗拉强度时,混凝土便会开裂。

1)塑性收缩。混凝土处于塑性状态时,由于水分蒸发过快,泌水率小于表面水蒸发率,引起表面水分蒸发过快,表面变干之后,进一步水分蒸发将产生弯液面,引起孔隙负压并产生收缩,其开裂机理如图4^[3]所示,图中 Δp 为收缩应力; R 为半径; γ 为液体表面张力; θ 为液体和水泥基材料间的化学接触角。

2)自收缩。自收缩是指浇筑成型以后的混凝土在密封条件下表观体积的减小。自收缩的根本

原因是水泥在水化过程中,体系总体积减小。混凝土自收缩的发展大体可以分为以下3个阶段(见图5^[4]):a.第I阶段:自收缩等于化学收缩,且与水化程度成线性关系;b.第II阶段:混凝土的骨架初步形成(凝结),自收缩受到限制,自收缩小于化学收缩;c.第III阶段:混凝土硬化,自收缩与化学收缩相比越来越小。

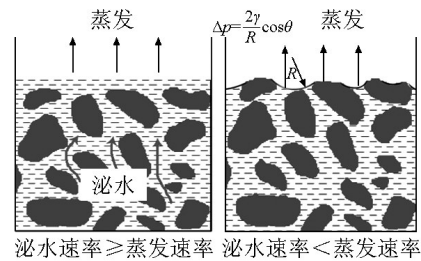


图4 水泥基材料塑性收缩开裂机理^[3]

Fig.4 Mechanisms of plastic cracking for cement-based materials^[3]

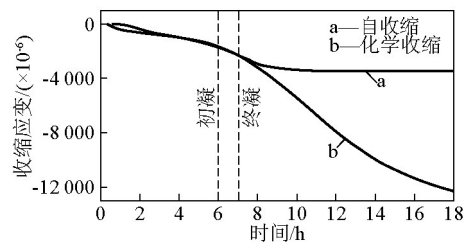


图5 混凝土化学收缩和自收缩^[4]

Fig.5 Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of concrete^[4]

混凝土强度等级小于C30时,混凝土的自收缩很小,随着混凝土强度等级的提高,混凝土自收缩增大,占混凝土总收缩量的比例也随之增大。

3)温度收缩。温度收缩是由混凝土中热量的散失或温度下降引起的。水泥等水化时将会产生放热反应,水泥的水化放热量越大、放热速率越快,混凝土的内外温差越大,产生的收缩量也越大。温度收缩是混凝土开裂的主要诱因之一。

4)沉降收缩。沉降收缩指的是混凝土成型后,颗粒沉降产生的体积收缩。这种收缩在骨料级配较差、加水量过多、混凝土结构厚度较大、硬化较慢以及振捣不足的情况下容易产生。

5)碳化收缩。由混凝土碳化引起的收缩仅限于表层,易导致混凝土表层开裂。

4 混凝土裂缝控制新技术

4.1 水分蒸发抑制技术

以抑制混凝土水分蒸发为目的的养护措施是降低混凝土早期开裂风险并实现其设计性能的关键工序。按照混凝土力学性能的发展,养护可以划分为塑性阶段养护和硬化阶段养护。在塑性阶段,混凝土强度较低,传统的养护方法(洒水、覆膜等)会对混凝土表层造成负面影响^[9],而普通养护剂则不能在存在泌水的混凝土表面成膜。针对上述问题,通过引入双亲性分子结构,在高盐、高碱的混凝土表面泌水层上实现自组装,并形成稳定单分子膜(见图6)。所形成的单分子膜在温度为40℃、湿度为30%、风速为5 m/s的条件下,可抑制水泥基材料水分蒸发达75%(见图7)。

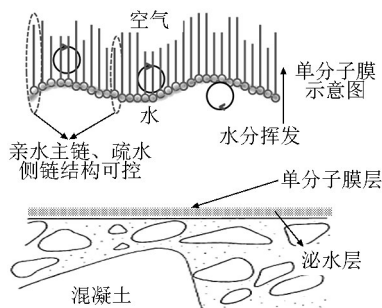


图6 双亲性单分子膜作用机理

Fig.6 Mechanism of the function of amphiphilic monolayer on concrete surface

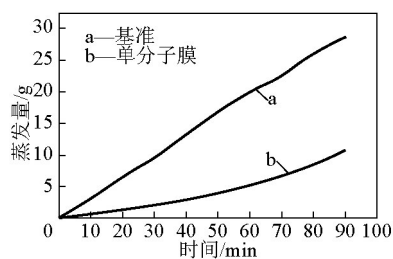


图7 双亲性单分子膜对混凝土水分蒸发的影响
Fig.7 Effect of amphiphilic monolayer on water evaporation of concrete

塑性阶段水分蒸发速率的降低大大推迟了该阶段收缩驱动力(孔隙负压)的出现时间,如图8所示,可以推迟1倍以上,并降低横向塑性收缩一半左右(见图9)。此外,由于该技术基于单分子膜技术,因此并不会对塑性阶段较为脆弱的水泥基材料表面造成负面影响,可有效减少混凝土表面起皮和结壳等现象(见图10)。

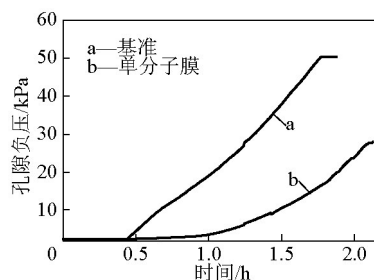


图8 双亲性单分子膜对孔隙负压的影响
Fig.8 Effect of amphiphilic monolayer on the development of pore water pressure

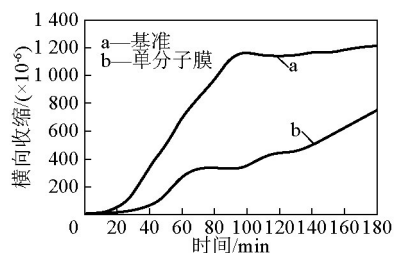


图9 双亲性单分子膜对混凝土塑性收缩的影响
Fig.9 Effect of amphiphilic monolayer on plastic shrinkage of concrete

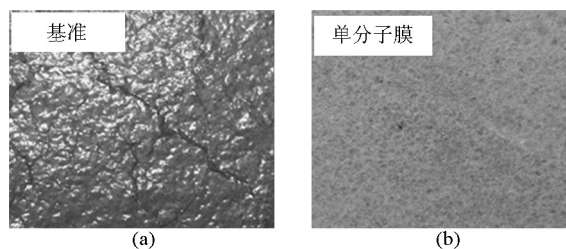


图10 双亲性单分子膜对混凝土表面形貌的影响
Fig.10 Effect of amphiphilic monolayer on the morphology of the plastic concrete surface

4.2 减缩抗裂技术

掺加减缩剂以降低混凝土的收缩是抑制混凝土壳体、薄壁结构等大面积暴露结构的重要技术措施,但传统缩聚型减缩剂存在成本高且降低混凝土强度等缺点。利用分子裁剪技术将具有减缩功能和提供空间位阻效应的烷基聚醚接枝到共聚物主链中,结构示意图如图11所示,由此实现了减缩与减水功能的统一。

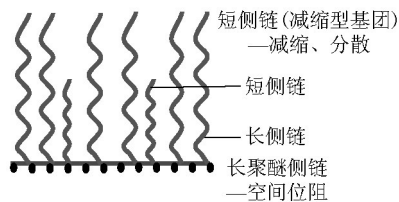
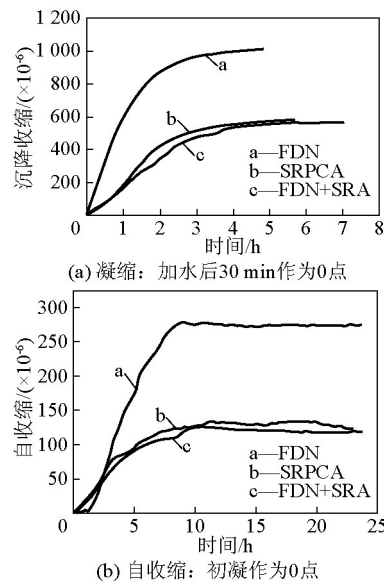


图11 减缩型减水剂结构示意图
Fig.11 Structure of shrinkage reducing superplasticizer

减缩型减水剂对早期收缩及后期收缩的影响如图12和图13所示。试验研究表明,相对于掺萘系减水剂,掺加减缩型减水剂的试件,早期凝缩降低了43%;1 d前自收缩降低了52%;28 d干燥收缩降低了42%;28 d的自收缩则降低了53%。此外,减缩型减水剂的减缩效果接近传统萘系减水剂加

减缩剂体系的减缩效果。减缩型减水剂对混凝土塑性开裂及干燥开裂的影响如表1和表2所示。结果表明,掺加减缩型减水剂混凝土的塑性开裂面积仅为掺萘系减水剂混凝土的13%,而混凝土干燥开裂的裂缝宽度相比掺萘系减水剂混凝土则降低了45%以上。



FDN—萘系减水剂;SRPCA—减缩型减水剂;FDN+SRA—萘系减水剂和传统减缩剂复合体系(减缩剂掺量均为胶凝材料的2%)

图12 减缩型减水剂对早期收缩的影响

Fig.12 Effect of shrinkage reducing superplasticizer on the early age shrinkage

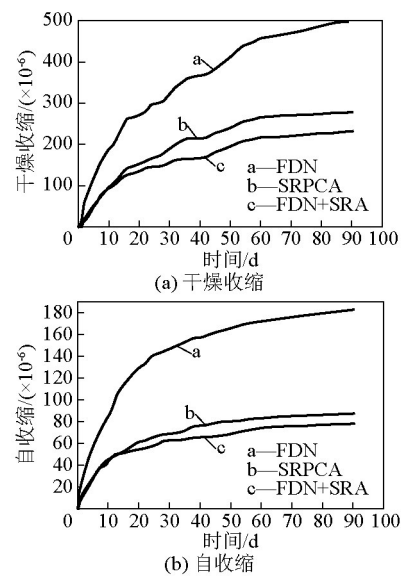


图13 减缩型减水剂对后期收缩的影响

Fig.13 Effect of shrinkage reducing superplasticizer on long-term shrinkage

注:图中以1 d作为0点

表1 减缩型减水剂对塑性开裂的影响(平板法)

Table 1 Effect of shrinkage reducing superplasticizer on the plastic cracking (slab test)

外加剂	开裂时间/min	最大裂缝宽度/mm	裂缝面积/mm ²
SRPCA	380	0.27	100.15
FDN	190	1.0	763.32
FDN+SRA	280	0.6	293.05

表2 减缩型减水剂对干燥开裂的影响(圆环法)

Table 2 Effect of shrinkage reducing superplasticizer on the drying cracking (ring test)

减水剂	开裂时间/d	裂缝宽度/mm					
		0 d	1 d	3 d	7 d	14 d	28 d
SRPCA	6.5	0.397	0.535	0.744	0.936	1.093	1.134
FDN	4.5	0.989	1.261	1.75	1.824	2.022	2.033
FDN+SRA	7.0	0.693	0.767	0.846	0.933	1.106	1.155

4.3 水泥水化放热过程的调控

大体积混凝土温度开裂原因除了由于其尺寸

较大、温控较难等因素外,现代混凝土材料自身的特点也是不可忽视的重要因素。现代水泥的细度

越来越高,造成水泥早期水化速率越来越快,水泥水化放热过程越来越集中,使得混凝土的温控问题变得更为突出。水泥早期快速放热过程主要是由水泥中铝酸三钙(C_3A)和硅酸三钙(C_3S)快速水化所引起。针对该问题,在外加剂分子中引入含多羟基的功能材料,一方面通过分子中羟基的钙离子螯合作用抑制 $Ca(OH)_2$ 结晶,以此调节水泥基材料的凝结时间;另一方面,通过羟基在水泥颗粒表面的吸附作用,降低水分向水泥颗粒表面的迁移速率,以此抑制 C_3A 相和 C_3S 相快速水化过程,降低水泥加速期的水化速率,调控水泥的水化放热进程。

水化热调控材料对水泥放热进程的影响如图14所示。从图中可以看出,水化热调控材料可以降低水化速率峰值50%以上,且随着掺量的增加,诱导期显著延长,有效实现了放热速率和凝结过程的双重调控。

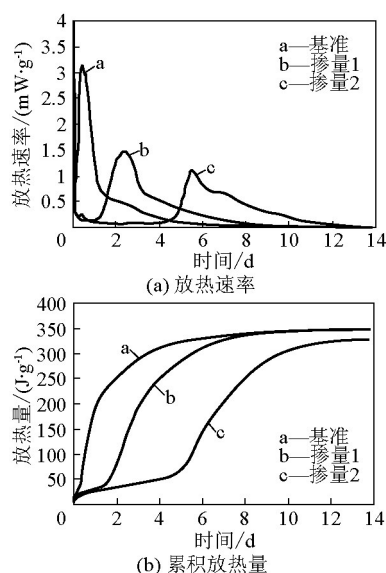


图14 水化热调控材料对水泥放热进程的影响
Fig.14 Effect of hydration heat controlling material on hydration of cement

水泥早期放热速率的降低显著降低了水泥早期的放热总量,有效优化了水泥的放热历程,可以使混凝土结构充分利用结构的散热条件(自身散热、外部冷却设施等)为结构散热赢得时间,实现放热过程和散热过程的协调统一,进而达到大幅度缓解水化集中放热程度、削弱温峰和温降过程的目的。如图15模拟结果所示(图中所选取的混凝土单元的厚度为6 m,且在混凝土内部埋设有间距为1 m的冷却水管),采取水化热调控材料可以降低结构

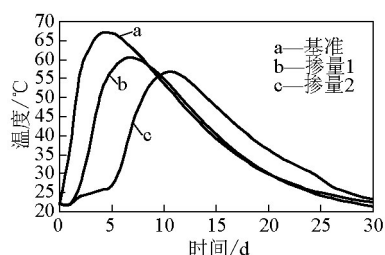


图15 水化热调控材料对大体积混凝土温升性能影响的模拟结果

Fig.15 Simulation results of the effect of the hydration heat controlling material on the temperature rise of mass concrete

温升9.6%~15.6%,大大提高大体积混凝土的温控效能。

4.4 遥爪聚合型增韧技术

现代工程对作为承重结构的混凝土性能要求越来越高。然而,在追求高强度的同时,由于混凝土脆性所导致的开裂破坏也越发突出。传统的如掺加聚合物乳液和添加纤维的技术,由于材料成本高,且掺入材料与混凝土自身属性差异较大,虽然改善了韧性,但也会损害混凝土的其他性能,如工作性和强度等。已有的增韧技术多基于毫米层次,不能从根本上改善水泥基材料的韧性。从微纳米层次出发,设计新型遥爪聚合型增韧材料,可通过改善C—S—H凝胶韧性来改善混凝土的韧性。

遥爪聚合型增韧材料分子设计思路如图16所示。分子中部的嵌段结构吸收变形过程中的能量,并提供强度及韧性,分子两端则是为含有强电荷极性的遥爪官能团。增韧材料加入水泥基材料内,遥爪官能团中的Si—O键和C—S—H凝胶Si—O键反应形成有机和无机杂化结构,并以此提高C—S—H的韧性。掺加增韧材料的混凝土断裂能试验结果(按DL/T 5332—2005^[6]中的楔入劈拉法进行)如图17和表3所示。

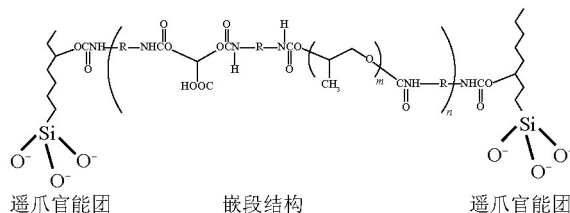
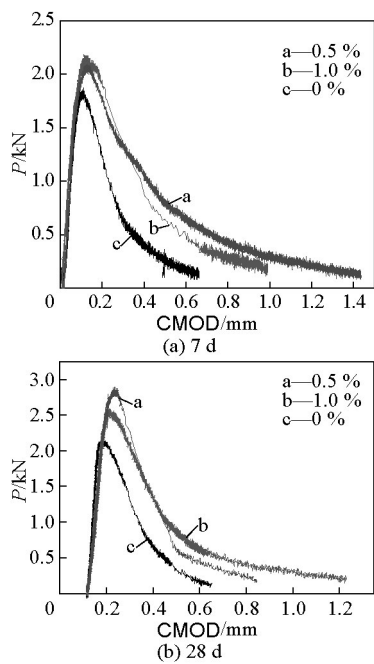


图16 遥爪聚合型增韧材料分子结构
Fig.16 Structure of telechelic toughening material



P—荷载;CMOD—裂缝口张开位移

图17 P—CMOD曲线

图17 Curves of P—crack mouth opening displacement (CMOD)

表3 断裂韧性测试结果

Table 3 Experimental results of the fracture toughness

龄期/d	掺量/%	$P_{h,max}/kN$	$K_{Ic}/(MPa \cdot m^{1/2})$	$G_f/(N \cdot m^{-1})$
7	0	3.26	0.81	96
	0.5	3.96	0.98	179
	1	3.82	0.94	213
28	0	4.04	1.00	115
	0.5	4.70	1.16	231
	1	5.22	1.29	213

注: $P_{h,max}$ 为最大水平荷载; K_{Ic} 为断裂韧性; G_f 为断裂能

实验结果表明,增韧材料掺量为0.5%时,混凝土7d和28d的断裂能分别提高86%与101%,而掺量为1.0%时,混凝土7d和28d的断裂能则分别提高了122%和85%。因此,遥爪聚合型增韧材料在较低掺量下即对混凝土韧性有明显的提升作用。增韧材料对塑性开裂及冲击性能的影响如表4和表5所示。结果表明,增韧材料的掺加减小了砂浆最大裂缝宽度、平均裂缝宽度以及总裂缝面积,增强了材料的抗塑性开裂性能。此外,增韧材料对砂浆抗冲击性能的提高较为显著,可以达到聚丙烯纤维的效果。

表4 塑性开裂试验结果

Table 4 Experimental results of the plastic cracking

序号	最大裂缝宽度/mm	平均裂缝宽度/mm	总裂缝面积/mm ²
1	3.83	2.08	450
2	0.88	0.29	67.4

表5 抗冲击实验结果(28d)

Table 5 Experimental results of impact resistance (28 d)

编号	冲击次数/次	抗冲击耗能/J
基准	16	352
增韧(0.5%)	43	946
纤维(0.9 kg/m ³)	33	726

5 结语

1) 双亲性单分子膜水分蒸发抑制技术可减少水分蒸发达75%,降低塑性收缩达50%,显著提高混凝土抗塑性开裂能力;

2) 新一代接枝共聚物可进行分子结构设计,实现减水和减缩功能的统一,控制混凝土壳体及薄壁结构的早期开裂;

3) 水化热调控型外加剂可显著降低水泥加速期的水化速率,调控水化放热历程,提高大体积混凝土的温控能力;

4) 混凝土抗压强度提高,拉压强度比下降,可采用原位增韧技术,提高混凝土的断裂能,降低开裂风险。

参考文献

- [1] Denarie E, Cecot C, Huet C. Characterization of creep and crack growth interactions in the fracture behavior of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(3): 571-575.
- [2] Mehta P K. Concrete technology at the crossroads-problems and opportunities[J]. ACI SP, 1994, 144: 1-30.
- [3] Liu Jiaping, Tian Qian, Miao Changwen. Investigation on the plastic shrinkage of cementitious materials under drying conditions: mechanism and theoretical model[J]. Magazine of Concrete Research, 2012, 64(6): 551-561.
- [4] Lura P, Couch J, Jensen O M, et al. Early-age acoustic emission measurements in hydrating cement paste: Evidence for cavitation during solidification due to self-desiccation [J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(10): 861-867.
- [5] ACI Committee 308. Guide to curing concrete (ACI 308R-01) [R]. USA: American Concrete Institute, 2001.
- [6] 水工混凝土断裂试验规程编制组. DL/T 5332—2005 水工混凝土断裂试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

(下转45页)