

膨胀剂在大体积混凝土环境下的膨胀效能研究

李国新, 张 歌, 史 琛, 黄汝杰

(西安建筑科技大学材料与矿资学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 大体积混凝土极易产生收缩裂缝, 因此常使用膨胀剂补偿收缩; 矿物掺合料在大体积混凝土中使用, 能降低水化热和温升, 对避免温度裂缝的产生起到重要作用。但是, 矿物掺合料的加入可能会影响膨胀剂的膨胀效能。研究了在模拟大体积混凝土温度下, 粉煤灰掺量、补加石膏对限制膨胀率和强度的影响规律, 并采用 X-射线衍射(XRD)、热分析(TG-DTG)和扫描电子显微镜(SEM)进行了进一步分析。结果表明: 在模拟大体积混凝土温度养护条件下, 随着粉煤灰掺量的增加, 限制膨胀率和强度降低; 补加石膏可促进钙矾石(Aft)的生成, 从而提高大掺量粉煤灰试件的限制膨胀率和强度。

关键词: 大体积混凝土; 粉煤灰; 硫铝酸盐膨胀剂; 钙矾石

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)02-0289-07

The effects of fly ash dosage and adding gypsum on the expansion effect of expansive agent at simulation large volume concrete environment

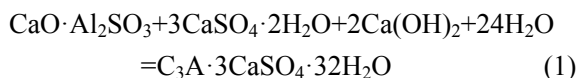
LI Guoxin, ZHANG Ge, SHI Chen, HUANG Rujie

(School of Materials and Mineral Resources, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Shrinkage cracks usually occur in mass concrete easily, so the expansive agent is often used to compensate the shrinkage. Both the heat of hydration and temperature rise in the mass concrete can drop due to using the mineral admixtures which benefit to avoiding the produce of temperature crakes. However, the adding of mineral admixture may significantly affect the expansive agent. The effects of the fly ash dosage and adding gypsum on the limit expansion rate and compressive strength under the simulated mass concrete temperature were researched. Furthermore, the methods of XRD, TG-DTG, and SEM were used to research the reasons. The results show that as the dosage of fly ash increased, the limit expansion rate and compressive strength reduced, and both the limit expansion rate and strength were improved by adding dehydrates gypsum due to the more ettringite.

Key words: mass concrete; fly ash; sulphate aluminate expansive agent; ettringite

大体积混凝土由于其构件尺寸和体积大, 水化产生的热量高, 容易导致较大的化学收缩、温度变形及后期的干缩, 从而使混凝土有开裂的风险。为了避免大体积混凝土开裂, 工程上一般采用膨胀剂来补偿这部分变形, 使混凝土免于开裂。现在常用的膨胀剂, 其矿物组成以硫铝酸盐为主, 其膨胀源为硫铝酸盐、石膏及氢氧化钙生成的钙矾石(Ettringite, Aft), 硫铝酸盐生成钙矾石的反应如式(1)所示^[1]。



为了降低大体积混凝土的水化热, 在大体积混凝土中还会掺入粉煤灰等矿物掺合料。但是, 冯竟竟等^[2]研究表明, 在标准养护下, 粉煤灰等矿物掺合料的掺入会降低硫铝酸盐膨胀剂的膨胀效应。此外, Quan^[3]研究认为硫铝酸盐膨胀剂的膨胀效应与水泥水化产物的量非常相关, 膨胀剂在生成钙矾石的过程中, 需要消耗水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 而在

水泥水化早期, 由于混凝土中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量较少, 因而膨胀剂的膨胀效应也就不明显; 在水泥水化后期, 由于粉煤灰的火山灰活性需要 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 来激发, 从而导致混凝土中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量也很少, 最终导致膨胀剂的膨胀效应减弱。这均说明, 在混凝土中掺入粉煤灰, 可能会降低膨胀剂的膨胀效应。

此外, 大体积混凝土的内部温度常在 2 d~3 d 内达到 70~80 °C, 在此温度下, 膨胀剂的膨胀源钙矾石还会分解为单硫型硫铝酸钙(Calcium aluminate sulfate hydrate, AFm)而导致混凝土的膨胀率降低; 当混凝土的温度降低后, AFm 又会与混凝土中的石膏再次反应生成延迟钙矾石(Delayed ettringite formation, DEF), 使混凝土具有膨胀开裂的风险^[4]。

彭江^[5]研究了矿物掺合料对膨胀效能的影响, 结果表明, 由于体系中内部碱度过低, 矿物掺合料会降低大体积混凝土的膨胀效能。但是, 阎培渝^[6]认为, 掺矿物掺合料的由于其水化进程较慢, 导致膨胀能消耗; 而较高的温度可以促进矿物掺合料的

水化速率,有利于膨胀的发展.因此,在大体积混凝土较高的温度下,这两种相反效果的叠加对膨胀效能的影响还需进一步研究.

采用模拟大体积混凝土的温度环境,研究了在不同外加剂情况下粉煤灰的掺入对硫铝酸盐类膨胀剂膨胀效应和强度的影响;为了降低粉煤灰对膨胀效应的负面影响,采用补加适量石膏的方法来促进 AFt 的生成和代替 Ca(OH)₂ 对粉煤灰激发作用.

1 原材料、配比及试验方法

1.1 原材料性质

水泥:陕西尧柏特种水泥有限公司生产,PO42.5 级,品质符合 GB175-2007《通用硅酸盐水泥》规定;粉煤灰(FA),陕西省正元粉煤灰有限公司,II 级,品质符合 GB1596-2005《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》的规定.其化学成分见表 1,表

1 中及本文中的成分、掺量等均为质量分数.

膨胀剂(UEA):天津豹鸣外加剂生产的硫铝酸盐型,其 SO₃ 含量为 12.7%,其品质如表 2 所示,均符合 GB23439-2009《混凝土膨胀剂》的规定.

萘系高效减水剂(BNS):粉剂,陕西隆生建材有限公司生产;聚羧酸高效减水剂(PC):液体,固含量 20%,江苏苏博特新材料股份有限公司生产;葡萄糖酸钠(SG):纯度 99.5%,国药集团化学试剂有限公司;二水石膏(Gyp):99.0%,国药集团化学试剂有限公司.

1.2 试验配合比

砂浆配合比:胶砂比为 2.0,水胶比为 0.35,膨胀剂按 10%等量取代水泥,粉煤灰掺量分别为 20%、30%、40%、50%,以不掺粉煤灰试样作为空白样,砂浆试件的组成见表 3.

表 1 试验所用原材料的化学成分
Tab.1 Chemical compositions of the materials used

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Lost
P·O 42.5 cement	22.32	5.84	3.15	61.23	2.02	0.39	0.15	2.00	1.66
Fly ash	51.42	38.00	5.21	2.60	0.81	1.36	0.46	0.32	2.25

表 2 膨胀剂的性能指标
Tab.2 The performance index of the expansive agent

Item	Index	Measured value
Expansive rate/%	Water curing	
	7 d ≥	0.025
	28 d ≤	0.100
	Air curing	
	21 d ≥	-0.020
	Standard curing	
	21 d ≥	-
Compressive strength/MPa	7 d	20.0
	28 d	40.0
Flexural strength/MPa	7 d	3.5
	28 d	3.5

表 3 砂浆试件的组成
Tab.3 Compositions of the mortars

Code	FA/%	UEA/%	BNS/%	PC/%	SG/%	Gyp/%	W/B	B/S
PC0	0	10	-	0.75	-	-	0.35	2.0
PC1	20	10	-	0.75	-	-	0.35	2.0
PC2	30	10	-	0.75	-	-	0.35	2.0
PC3	40	10	-	0.75	-	-	0.35	2.0
PC4	50	10	-	0.75	-	-	0.35	2.0
BNS0	0	10	1.00	-	0.06	-	0.35	2.0
BNS1	20	10	1.00	-	0.06	-	0.35	2.0
BNS2	30	10	1.00	-	0.06	-	0.35	2.0
BNS3	40	10	1.00	-	0.06	-	0.35	2.0
BNS4	50	10	1.00	-	0.06	-	0.35	2.0
PC1+	20	10	-	0.75	-	0.70	0.35	2.0
PC2+	30	10	-	0.75	-	1.10	0.35	2.0
PC3+	40	10	-	0.75	-	1.50	0.35	2.0
PC4+	50	10	-	0.75	-	1.90	0.35	2.0
BNS1+	20	10	1.00	-	0.06	0.70	0.35	2.0
BNS2+	30	10	1.00	-	0.06	1.10	0.35	2.0
BNS3+	40	10	1.00	-	0.06	1.50	0.35	2.0
BNS4+	50	10	1.00	-	0.06	1.90	0.35	2.0

注: PC 表示掺入聚羧酸减水剂、BNS 表示掺入萘系高效减水剂和葡萄糖酸钠、PC+表示聚羧酸减水剂并补加石膏、BNS+表示掺入萘系减水剂并补加石膏.

1.3 试样制备与测试分析方法

1.3.1 限制膨胀率与强度试样制备与测试

按照表 3 中的配合比制作胶砂试件, 胶砂试件的搅拌、成型均按照 GB/T17671-1999《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》中规定方法进行. 试验与分析所用试样分为以下两类:

(1) 限制膨胀试件: 本研究采用测量试件的限制膨胀率来反应宏观体积的变化. 限制膨胀率的测定参考 GB23439-2009《混凝土膨胀剂》中的“混凝土膨胀剂的限制膨胀率试验方法”, 制作 40 mm×40 mm×140 mm 砂浆棒, 用最小刻度为 0.001 mm 的测量仪定期测量其长度.

(2) 强度试件: 试件尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm, 测试 3 d、7 d 及 28 d 的抗压强度.

1.3.2 微观测试分析

微观测试样品采用与砂浆同配比的胶凝材料净浆, 与胶砂试件同条件养护. 至相应龄期时, 将净浆样品取出, 以无水乙醇洗涤数遍, 置于真空干

燥箱中, 在 40 ℃ 环境下干燥后, 用玛瑙研磨磨细.

(1) X-射线衍射分析(XRD): 采用日本理学公司生产的 D/MAX-2400 型 X-衍射仪(Cu 靶)予以测试, 测试条件为 40 kV、100 mA, 扫描角度 3~90°, 扫描步长 0.02°.

(2) 热重分析(TG-DTG): 试样制备同 XRD 试样. 采用美国 TA 仪器公司生产的 SDT Q600 热分析仪予以测试, 升温速率为 10 ℃/min, 气氛为氮气气氛.

(3) 扫描电镜显微镜分析(SEM): 试样制备同 XRD 试样. 采用荷兰生产的 FEZ-Quanta200 型环境扫描电镜予以测试, 测试工作电压为 20 kV.

1.4 养护制度

设计模拟大体积混凝土内部温度变化的热养护制度如表 4 所示: 试件成型后在标准养护下养护 24 h, 脱模后放入养护箱中变温湿热养护至 14 d, 从养护箱中取出, 再放在空气中干燥养护 21 d.

表 4 胶砂试件的养护制度
Tab. 4 Curing schedules of the mortars

Parameter	Age/d								
	0~1	1~2	2~4	4~6	6~8	8~10	10~12	12~14	14~35
Temperature/℃	20	40	63	50	45	35	30	20	20
Humidity/%	≥95	≥95	≥95	≥95	≥95	≥95	≥95	≥95	60

2 实验结果与分析

2.1 不补加石膏时粉煤灰掺量对限制膨胀率和强度的影响

2.1.1 不补加石膏时粉煤灰掺量对限制膨胀率影响

粉煤灰在不同掺量时, 试件的限制膨胀率随龄期的变化如图 1 所示, 其中图 1(a)为掺聚羧酸高效减水剂试件, 图 1(b)为掺萘系高效减水剂/葡萄糖酸钠试件. 由图 1 可见, 在粉煤灰掺量为 0~30%、相同养护龄期时, 掺聚羧酸减水剂试件较掺萘系减水剂/葡萄糖酸钠试件的限制膨胀率相当, 但当粉煤灰掺量达到 40%和 50%时, 掺萘系减水剂/葡萄糖酸钠试件较掺聚羧酸减水剂试件的限制膨胀率有一定程度的降低; 试件在不同龄期的限制膨胀率均随粉煤灰掺量的增大而膨胀率降低; 试件在 40 ℃ 蒸汽下养护 2 d, 其限制膨胀率发展迅速; 但经过 63 ℃ 蒸汽养护后, 其限制膨胀率明显下降; 而经过 50℃ 蒸汽养护 2 d、45 ℃ 蒸汽养护 2 d 后, 试件的限制膨胀率又恢复; 在干燥环境中膨胀率逐渐降低, 残余的膨胀率随粉煤灰掺量增大而减小.

对于粉煤灰掺量对试件限制膨胀率的影响原

因, 根据文献^[7], Ca^{2+} 、 OH^- 、 SO_4^{2-} 浓度均会影响 AFt 的生成, 这些离子浓度的升高有利于 AFt 生成量的增加, 反之则会减少 AFt 的生成量. 粉煤灰的引入导致体系中 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度的降低, 并消耗 OH^- 以激发火山灰活性, 从而对 AFt 的生成量产生影响. 彭江^[5]认为, 含矿物掺合料的砂浆强度发展缓慢, 使一些膨胀能消耗在塑性变形中, 导致了膨胀能的损失, 使试件体积膨胀值降低; 并且, 当体系中 OH^- 浓度低时, 会使 AFt 形成没有膨胀性的长条形晶体.

对于温度对试件限制膨胀率的影响原因, Feng^[8]认为, 随着温度的升高, 膨胀剂的水化速率加快, 膨胀率增大; 且 40 ℃ 是硫铝酸盐膨胀剂使用的最合适温度, 在此温度下膨胀剂快速水化生成 AFt, 这导致在 40 ℃ 蒸汽养护 2 d 后膨胀率即达到试件的极限膨胀率. 当经过 63 ℃ 养护后, 部分膨胀源 AFt 分解为不具有膨胀效应的 AFm, 宏观表现为限制膨胀率急剧下降; 当温度降低后, AFm 峰消失, 即重新生成 AFt, 宏观表现为限制膨胀率恢复.

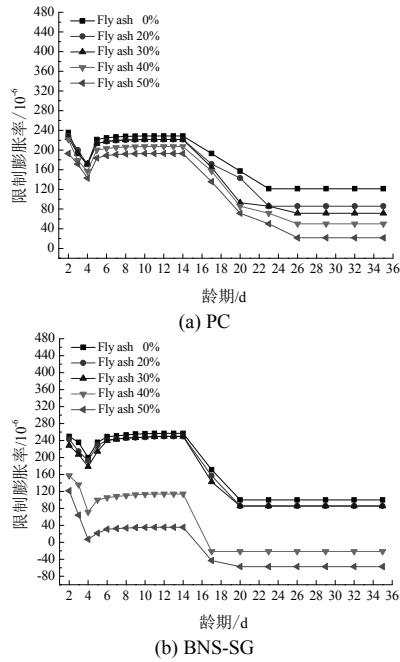


图1 粉煤灰掺量对限制膨胀率的影响
Fig.1 Effects of the content of fly ash on the variation of restrained mortar prism

2.1.2 不补加石膏时粉煤灰掺量对抗压强度的影响

粉煤灰在不同掺量时,试件的抗压强度随龄期的变化如图2所示,其中图2(a)为掺聚羧酸高效减水剂试件,图2(b)为掺萘系高效减水剂/葡萄糖酸钠试件。

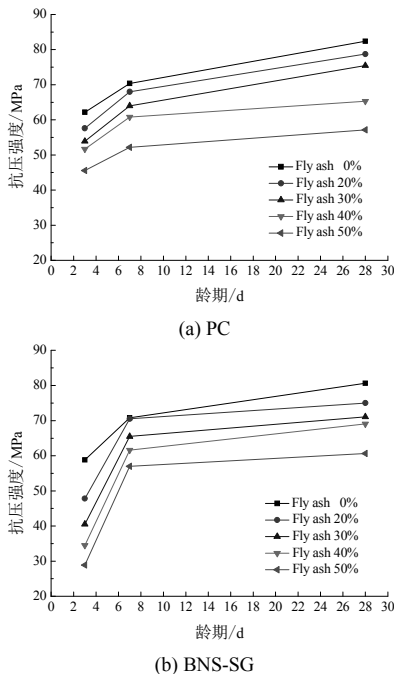


图2 粉煤灰掺量对抗压强度的影响
Fig.2 Effects of the content of fly ash on the compressive strength

由图2可见,随着粉煤灰掺量的增加,试件的3 d、7 d及28 d抗压强度均降低。粉煤灰掺量越大,即体系中水泥含量越少,水泥的水化产物总量越

少;并且,能激发粉煤灰的火山灰效应的水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 也减少,因此,试件的抗压强度随着粉煤灰掺量的增加而降低。

2.2 补加石膏时粉煤灰掺量对限制膨胀率和强度的影响

为了弥补因掺入粉煤灰造成体系中的 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度降低,研究了补加石膏对试件限制膨胀率和抗压强度的影响。

2.2.1 补加石膏时粉煤灰掺量对限制膨胀率的影响

补加二水石膏后,试件的限制膨胀率随龄期的变化如图3所示,其中图3(a)为掺聚羧酸高效减水剂试件,图3(b)为掺萘系高效减水剂/葡萄糖酸钠试件。对于掺入不同减水剂的试样,其限制膨胀率的变化情况有所不同。图3(a)掺聚羧酸高效减水剂的试件,补加二水石膏后,限制膨胀率明显增大;图3(b)掺萘系高效减水剂/葡萄糖酸钠的试件,在补加二水石膏后,限制膨胀率均有所降低。其原因需结合TG-DTG、SEM予以分析。

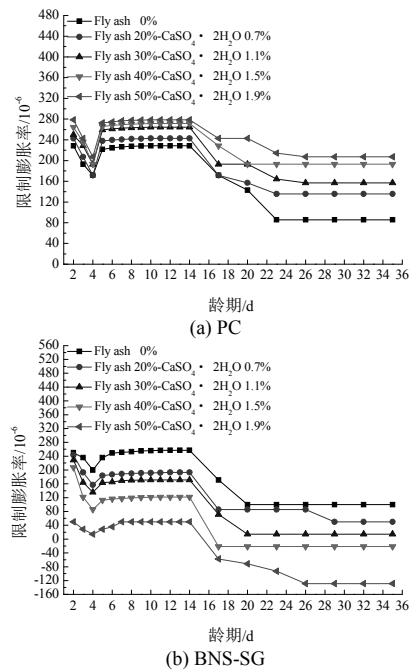
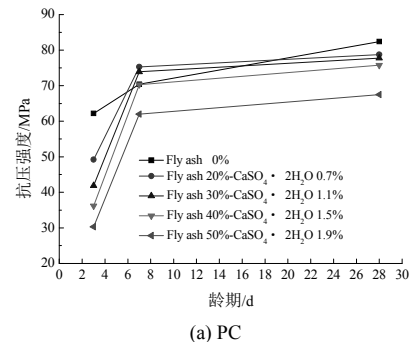


图3 二水石膏对限制膨胀率的影响
Fig.3 Effects of gypsum on the variation of restrained mortar prism

2.2.2 补加石膏时粉煤灰掺量对强度的影响



(a) PC

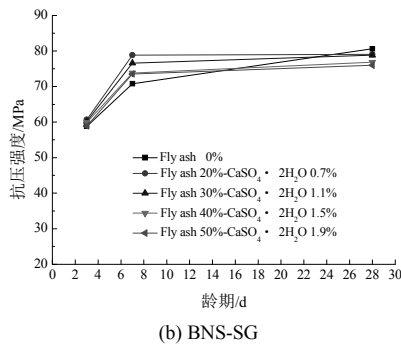


图 4 二水石膏对抗压强度的影响
Fig.4 Effects of gypsum on the compressive strength

补加二水石膏后, 试件的抗压强度随龄期的变化如图 4 所示, 其中图 4(a)为掺聚羧酸高效减水剂试件, 图 4(b)为掺萘系高效减水剂/葡萄糖酸钠试件. 由图 4 可见, 在相同粉煤灰掺量下, 补加二水石膏可明显提高试件的 28 d 抗压强度.

2. 3 补加石膏和粉煤灰掺量对水化产物的影响
2.3.1 XRD 测试结果与分析

图 5 为不掺粉煤灰样品在 2 d、4 d 和 8 d 时水化产物的 XRD 图.

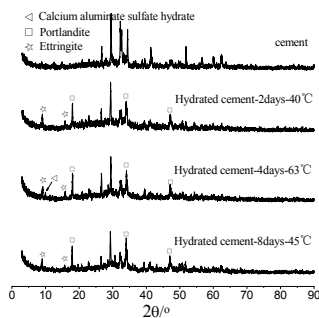


图 5 水泥及不同龄期水化产物的 XRD 图
Fig.5 XRD of cement and hydrated cement at different ages
由图 5 可知, 经过 63 °C 养护后, 部分膨胀源 AFt 分解为不具有膨胀效应的 AFm, 宏观表现为限制膨胀率急剧下降; 当养护温度降低后, AFm 峰消

表 5 样品在不同龄期的 AFt 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量
Tab.5 the content of Aft and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ at different ages

Code	AFt /%			$\text{Ca}(\text{OH})_2$ /%		
	2d	4d	8d	2d	4d	8d
BNS0	24.49	20.29	21.09	8.59	9.70	9.29
BNS2	21.01	19.70	21.11	7.19	6.74	6.17
BNS4	20.60	20.29	20.94	6.82	6.25	5.39
BNS2+	22.89	20.23	22.03	4.73	4.56	4.07
BNS4+	24.91	21.83	27.03	4.81	4.44	3.66

表 6 不同掺量粉煤灰对初凝时间的影响
Tab.6 The effects of the content of fly ash on the initial setting time

Code	Initial setting time/min	Code	Initial setting time/min	Code	Initial setting time/min	Code	Initial setting time/min
PC0	368	-	-	BNS0	388	-	-
PC1	420	PC1+	442	BNS1	436	BNS1+	566
PC2	573	PC2+	600	BNS2	722	BNS2+	850
PC3	623	PC3+	653	BNS3	820	BNS3+	988
PC4	660	PC4+	675	BNS4	922	BNS4+	1 020

失, 即重新生成 AFt, 宏观表现为限制膨胀率恢复.

2.3.2 TG-DTG 测试结果与分析

图 6 为样品 BNS0 的 TG-DTG 曲线, 60~150 °C 脱水的物质为 AFt, 400~500 °C 脱水的物质为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 经计算, 可得到样品中 AFt 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量, 同理可得样品 BNS2、BNS4、BNS2+和 BNS4+的 AFt、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量, 其结果见表 5.

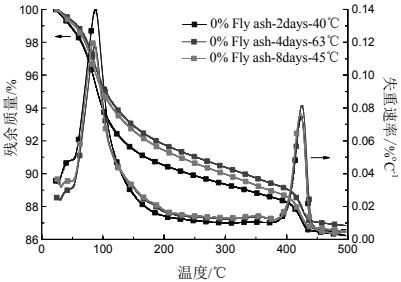


图 6 样品 BNS0 的 TG-DTG 曲线
Fig.6 TG-DTG of sampleBNS0

由表 5 可知, 随着粉煤灰掺量的增加, AFt 的生成量略有降低. 结合样品 BNS4 的 AFt 生成量及样品的初凝时间(表 6)可得, BNS4 试样的 AFt 生成量并不低, 但其凝结时间远长于同掺量的 PC4, 由此可知, 导致 BNS4 试样限制膨胀率低的原因是早期大量膨胀能消耗在塑性变形中, 不能产生膨胀效应.

补加二水石膏后, 体系中 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度提高, 促使 AFt 生成量增加, 因此 BNS2+、BNS4+ 较 BNS2、BNS4 试样 AFt 的含量多. 补加石膏后, 虽然 AFt 含量增加了, 但对应的限制膨胀率降低, 结合表 6 来看, 补加石膏对掺萘系高效减水剂/葡萄糖酸钠的大掺量粉煤灰试样有较大影响, 导致其凝结时间大大增长, 膨胀能消耗, 从而无法产生膨胀效应.

对于水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量,不掺粉煤灰试件与掺粉煤灰试件的变化规律有所不同.由表6可得,试样 BNS0 的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量从 2 d 到 4 d 增加,从 4 d 到 8 d 减少,而掺粉煤灰试样 BNS2、BNS4 的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量从 2d 到 8d 持续下降.对于不掺粉煤灰试件 BNS0,仅有膨胀剂的水化需要消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$.在 2 d~4 d 的 63 °C 养护下,水泥继续水化生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,部分 AFt 分解,此时膨胀剂很少发生水化反应、消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$;在 4 d~8 d 的 50 °C、45 °C 养护下,水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量远少于膨胀剂消耗的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量,使总 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量减少.而对于掺粉煤灰试件 BNS2 和 BNS4,膨胀剂和粉煤灰的水化都需要消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,因此,掺粉煤灰使试样中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量随龄期的变化持续降低.并且 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量随粉煤灰掺量的增大而减小,这与一些研究结果^[9]相吻合.补加二水石膏后,促进了 AFt 的生成,使膨胀剂消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的量更多.

2.3.3 SEM 测试结果与分析

不同粉煤灰掺量的掺系高效减水剂/葡萄糖酸钠样品在 2d 时的微观形貌对比如图 7 所示.

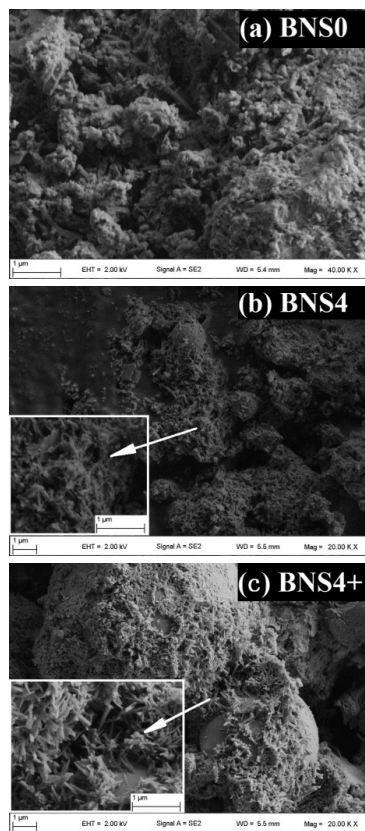


图 7 样品在 2 d 时微观形貌对比

Fig.7 Morphology of samples at 2 days

由图 7(a)可见,未掺粉煤灰样品 BNS0 在 2 d 时,硬化浆体主要由凝胶组成,AFt 针状晶体被包裹在其中,此时胶凝材料和膨胀剂的水化进程较快

且协调发展;由图 7(b)可见,大掺量粉煤灰样品 BNS4 在 2 d 时,球状粉煤灰形貌完整,大量针状 AFt 交错生长,凝胶体量较少,此时胶凝材料水化进程慢,膨胀剂水化进程快,膨胀能消耗在塑性变形中;由图 7(c)可见,补加二水石膏的大掺量粉煤灰样品 BNS4+在 2 d 时,粉煤灰形貌完整,相比不加石膏样品,此时形成的针状 AFt 晶体尺寸更大,晶型更完整,但凝胶体极少,此时胶凝材料水化进程慢,膨胀剂水化进程快. Collepardi M^[10]指出,当膨胀过早产生于混凝土的塑性阶段时,将不会产生有效的压应力.因此在此情况下,膨胀剂的膨胀效能不能发挥.

3 结论

在大体积混凝土中,粉煤灰掺量的增加会使限制膨胀率和强度降低,凝结时间增长.补加二水石膏可补充体系中因粉煤灰的引入而缺少的 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} ,有益于 AFt 的生成及强度的发展.但是,补加二水石膏对于限制膨胀率的影响因外加剂种类有所差异,与 BNS-SG 的协同缓凝作用导致凝结时间大大增长,膨胀能消耗在塑性变形中.

参考文献 References

- [1] NOCUN-Wczelik W, KONIK Z, STOK A. Blended systems with calcium aluminate and calcium sulphate expansive additives [J]. Construction and Building Materials, 2011(25): 939-943.
- [2] 冯竟竟, 苗苗, 阎培渝. 补偿收缩复合胶凝材料的水化与膨胀性能[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(4): 439-444. FENG Jingjing, MIAO miao, YAN Peiyu. Hydration and expansion properties of shrinkage-compensating composite cementitious materials [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(4): 439-444.
- [3] QUAN Liuquan, LI Dongxu, LI Zongjin. Effects of lignin cellulose and expansive agent on microstructure and macroproperty of polymer-modified mortar containing fly ash [J]. Construction and Building Materials, 2009(23): 2467-2471.
- [4] 阎培渝, 覃肖, 杨文言. 大体积补偿收缩混凝土中钙矾石的分解与二次生成[J]. 硅酸盐学报, 2000, 28(4): 105-107. YAN Peiyu, QIN Xiao, YANG Wenyan. Decomposition and delayed formation of ettringite in shrinkage-compensating massive concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2000, 28(4): 105-107.
- [5] 彭江, 徐志全, 阎培渝. 大体积补偿收缩混凝土中膨胀剂的使用效能[J]. 建筑材料学报, 2003, 6(2): 147-152. PENG Jiang, XU Zhiquan, YAN Peiyu. Factors influencing the efficiency of expansive agent in massive shrinkage-compensating concrete [J]. Journal of Building Materials, 2003, 6(2): 147-152.
- [6] 阎培渝, 郑峰. 温度对补偿收缩复合胶凝材料水化放热特性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(8): 1006-1010. YAN Peiyu, ZHENG Feng. Influence of temperature on

- the hydration heat evolution of shrinkage-compensating complex binders [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2006, 34(8): 1006-1010.
- [7] 杨南如, 钟白茜, 董攀. 钙矾石的形成和稳定条件[J]. 硅酸盐学报, 1984, 12(6): 155-160.
YANG Nanru, ZHONG Baiqian, DONG Pan. Ettringite formation and conditions for its stability [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1984, 12(6): 155-160.
- [8] Feng Jingjing, Miao Miao. The effect of curing temperature on the properties of shrinkage-compensated binder [J]. Science China, 2011, 54(7): 1715-1721.
- [9] 阎培渝, 贾耀东, 阿茹罕. 复合胶凝材料水化过程中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量的变化[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(5): 563-567.
YAN Peiyu, JIA Yaodong, A Ruhan. Alteration of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content during hydration process of composite binders [J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(5): 563-567.
- [10] COLLEPARDI M, BORSOI A. Effects of shrinkage reducing admixtures in shrinkage-compensating concretes under non-wet curing conditions [J]. Cement Concrete Composite, 2005, 27(6): 704-708.
- (编辑 吴海西)

(上接第276页)

参考文献 References

- [1] 吴清才, 王宪民. 人体散热稳定度影响因素的理论分析[J]. 航天医学与医学工程, 1998, 11(3): 194-195.
WU Qingcai, WANG Xianmin. Theoretical analysis of factors affecting heat exchange stability of human body with environment[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 1998, 11(3): 194-195.
- [2] 吴清才, 金星国. 人体热平衡的生物物理分析[J]. 中华航空航天医学杂志, 1999, 10(1): 58-61.
WU Qingcai, JIN Xingguo. Biological and physical analysis of heat balance in human body[J]. Chinese Journal of Aerospace Medicine, 1999, 10(1): 58-61.
- [3] 邱曼, 武建民, 顾鼎良, 等. 模拟失重对人体皮肤温度分布和不同部位非蒸发散热的影响[J]. 航天医学与医学工程, 2002, 15(2): 93-97.
QIU Man, WU Jianmin, GU Dingliang, et al. Effects of head-down bedrest on surface temperature distribution and non-evaporative heat dissipation [J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2002, 15(2): 93-97.
- [4] 李绪泉, 生晓燕, 辛岳芝, 等. 低气压环境对人体散热特性影响的研究[J]. 青岛理工大学学报, 2009, 30(5): 8-13.
LI Xuquan, SHENG Xiaoyan, XIN Yuezhi, et al. A primary study on human heat release characteristics under low-pressure environment[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2009, 30(5): 8-13.
- [5] 王丽娟. 人体散热方式与室内热环境参数关系研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
WANG Lijuan. Relationship study between human body heat dissipation and indoor thermal environment parameters[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012.
- [6] Thermal environmental conditions for human occupancy: ANSI/ASHRAE Standard 55-2010[S]. Atlanta, USA: ASHRAE, 2010.
- [7] Standard method for temperature measurement: ANSI/ASHRAE Standard 41.1-2006[S]. Atlanta, USA: ASHRAE, 2006.
- [8] FANGER P O. Thermal comfort: analysis and application in environmental engineering[M]. New York: McGraw-Hill, 1982.
- [9] 刘加平. 建筑物理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 2-3.
LIU Jiaping. Architectural physics[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2009: 2-3.
- (编辑 桂智刚)