

双源膨胀体系对混凝土收缩性能的影响研究

Study on the Influence of Dual-Source Expansion System on the Shrinkage Performance of Concrete

周月霞¹, 方博², 隋玉朋³, 赵娟², 朱国军²

(1. 武汉源锦建材科技有限公司, 武汉 430083; 2. 武汉三源特种建材责任有限公司, 武汉 430083;
3. 中国二十二冶集团有限公司, 唐山 063000)

摘要: 为分析膨胀剂在不同环境的膨胀效果及适用工况, 研究了钙源膨胀剂和镁源膨胀剂以及两者复合双源膨胀体系在不同养护温度、养护制度的混凝土限制膨胀率, 并且测试了混凝土厚度 300、800 和 1300 mm 三种典型工况条件的温度历程, 研究了双源膨胀体系在模拟上述工况下的混凝土限制膨胀率和开裂情况。结果表明: 在 20、40 和 60 °C 不同养护温度下分别是钙源膨胀剂、钙源与镁源膨胀剂比例 35:65 的双源膨胀剂、镁源膨胀剂的 28 d 混凝土限制膨胀率最高; 在不同养护湿度下, 湿度越高掺有膨胀剂混凝土的限制膨胀率越高; 在模拟工况下, 混凝土厚度 300、800 和 1300 mm 的温峰值分别为 55、63 和 75 °C, 最佳膨胀体系前者为钙源与镁源膨胀剂比例 35:65 的双源膨胀剂, 后两者均为镁源膨胀剂, 说明在不同工况下的最佳膨胀体系不同, 为不同工况下选用合适膨胀体系提供基础数据和技术支持。

关键词: 双源膨胀体系; 混凝土; 模拟工况, 限制膨胀率; 抗裂

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 02-0025-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.005

ZHOU Yuexia¹, FANG Bo², SUI Yupeng³, ZHAO Juan², ZHU Guojun²

(1. Wuhan Ujoin Building Material Technology Co., Ltd., Wuhan 430083, China;

2. Wuhan Sanyuan Special Building Materials Co., Ltd., Wuhan 430083, China;

3. China MCC22 Group Co., Ltd., Tangshan 063000, China)

Abstract: To analyze the expansion effect of expansive agents in different environments and their applicable working conditions, the concrete limited expansion rate of calcium source expansion agent, magnesium source expansion agent and their composite dual-source expansion system under different curing temperature and curing system conditions was studied. The temperature history of three typical working conditions of concrete thickness of 300, 800 and 1300 mm was tested, and the concrete limited expansion rate and cracking of the dual-source expansion system under the above working conditions were studied. The results show that under different curing temperatures of 20, 40 and 60 °C, the 28-d concrete limit expansion rate is the highest for calcium-based expansive agents, dual-source expansive agents with a calcium to magnesium ratio of 35:65, and magnesium-based expansive agents, respectively; under different curing humidities, the higher the humidity, the greater the restricted expansion rate of concrete with expansive admixture. Under three typical working conditions of concrete thickness of 300, 800

作者简介: 周月霞 (1993—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 混凝土性能提升技术研究。

通信作者: 朱国军 (1981—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向: 硅酸盐固废节能材料研究与技术应用。

收稿日期: 2023-10-24

材料科学

and 1300 mm, the peak temperatures are 55, 63 and 75 ℃, respectively. The optimal expansion system for the former is a dual – source expansive agent with a calcium to magnesium ratio of 35 : 65, while for the latter two, it is a magnesium – based expansive agent, indicating that the optimal expansion system varies under different conditions, which provides basic data and technical support for the selection of appropriate expansive systems under different working conditions.

Key words: double – source expansion system; concrete; simulation conditions; the restrained expansion rate; crack

0 引言

混凝土作为一种广泛应用于建筑领域的材料,其性能的优劣直接影响到结构的安全性和使用寿命^[1]。在混凝土水硬化过程中,由于水分的蒸发和水泥石的体积变化,会产生一定程度的收缩^[2]。当这种收缩产生的应力大于混凝土自身的抗拉强度时,就会导致裂缝的产生^[3]。裂缝的出现会破坏混凝土的连续性,降低其强度和密实性,影响结构的使用性能和耐久性^[4]。

控制混凝土裂缝,降低收缩是关键^[5]。常见混凝土降低收缩的方法主要是在混凝土拌和过程中添加一定量的膨胀剂,利用膨胀剂在水化过程中产生的膨胀应力抵消混凝土的收缩应变,起到补偿混凝土收缩的作用^[6-7]。目前常用的膨胀剂种类主要有硫铝酸钙 – 氧化钙类膨胀剂(下文简称“钙源膨胀剂”)^[8-9]和氧化镁类膨胀剂(下文简称“镁源膨胀剂”)。其中,钙源膨胀剂具有早期反应速率快而后期基本无膨胀的特点^[10-11];镁源膨胀剂水化速度相对较慢,早期膨胀相对较小而后期在有水分子的情况下持续膨胀,并且具有常温活性较小高温活性大的特点^[12-13]。然而,混凝土在各个龄期收缩持续进行,在各种工况下的收缩程度不同,单一种类的膨胀剂不能补偿混凝土全生命周期各工况条件下的收缩需求,例如,钙源膨胀剂主要在混凝土早期塑性收缩和部分自收缩阶段发挥作用,而对于混凝土后期其他收缩,如温降收缩和干燥收缩则效果有限^[14]。镁源膨胀剂虽然在后期有持续膨胀的能力,但其早期膨胀能较小,且在低温条件下膨胀能发挥不足^[15]。因此,开发一种能够补偿混凝土各龄期和各工况下不同程度收缩的产品显得尤为重要,这将有助于从根本上解决混凝土开裂的问题。基于这一需求,研究钙源膨胀剂、镁源膨胀剂以及双源膨胀体系在混凝土中的膨胀特性,对于选择适合特定施工环境的膨胀剂,满足混凝土补偿收缩和控制裂缝的要求

具有重要意义。

基于此,结合不同膨胀体系在不同厚度混凝土的实际温升曲线,在环境模拟养护箱内模拟温湿度工况,研究双源膨胀体系在不同工况混凝土中的限制膨胀率和开裂性能。研究成果为实际工况条件下补偿混凝土全生命周期不同程度收缩提出了新思路,为双源膨胀体系在不同工况条件下混凝土中的应用给出了基础数据,有助于混凝土收缩补偿和裂缝控制。

1 试验

1.1 原材料

水泥采用 P · O 42.5 普通硅酸盐水泥,水泥的物理性能见表 1;粉煤灰:Ⅱ级,45 μm 筛筛余 15%;矿粉:S95 级,28 d 活性指数 104%;钙源膨胀剂和镁源膨胀剂:双源膨胀体系是通过钙源膨胀剂和镁源膨胀剂按照一定比例复合而成;粗骨料粒径为 5 ~ 31.5 mm,连续级配,含泥量 0.5%;细骨料采用当地河砂,中砂,细度模数 2.7,含泥量 1%;水为自来水;减水剂:聚羧酸高性能减水剂,减水率 20%。水泥、粉煤灰、矿粉、钙源膨胀剂和镁源膨胀剂的主要化学组成见表 2。

表 1 水泥的物理性能							
Table 1 Physical properties of cement							
凝结时间/min		抗折强度/MPa			抗压强度/MPa		
初凝	终凝	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
201	275	4.1	6.3	8.9	17.1	33.2	49.5

表 2 原材料主要化学组成							
Table 2 Main chemical composition of raw materials							
材料	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Loss
水泥	63.45	1.01	2.34	5.29	20.36	1.68	0.55
粉煤灰	2.87	0.32	2.75	30.12	51.11	0.38	0.85
矿粉	42.33	8.02	0.72	15.45	32.05	0.06	0.96
钙源膨胀剂	77.00	1.23	1.95	4.68	6.19	7.60	1.31
镁源膨胀剂	2.74	85.78	1.32	2.49	3.20	3.15	0.94

1.2 混凝土配合比

配制 C40 混凝土,配合比见表 3。根据工程实际使用情况及相关规定,双源膨胀体系代替部分粉煤灰以内掺的形式掺入,掺量占胶凝材料质量的 8%^[16]。

表中 S00 为未掺膨胀剂的基准组混凝土, S01 为掺纯钙源膨胀剂的混凝土, S02 和 S03 分别为钙源膨胀剂与镁源膨胀剂比例为 65 : 35 和 35 : 65 的双源膨胀体系混凝土, S04 为掺纯镁源膨胀剂的混凝土。

表 3 混凝土试验配合比
Table 3 Test mix proportion of concrete / (kg/m³)

组别	水泥	粉煤灰	矿粉	双源膨胀体系		石	砂	水	减水剂
				钙源	镁源				
S00	285	85	60			1 040	740	165	6.0
S01	285	50.6	60	34.40		1 040	740	165	6.8
S02	285	50.6	60	22.36	12.04	1 040	740	165	6.8
S03	285	50.6	60	12.04	22.36	1 040	740	165	6.8
S04	285	50.6	60		34.40	1 040	740	165	6.8

1.3 测试方法

(1) 粒径表征：通过 BT-901 干法分散进样系统进样, BT-2001 激光粒度分布仪测试, 并通过 Bettersize Laser Particle Size Analyser System Ver 7.1 软件统计分析样品的粒度分布。

(2) 混凝土工作性测试：按照 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》测试混凝土的坍落度和扩展度。

(3) 混凝土限制膨胀率测试：按照 GB/T 23439—2017《混凝土膨胀剂》中 A 法通过 HSY-540 型混凝土收缩膨胀仪测试混凝土限制膨胀率。

(4) 混凝土实体结构温升测试：通过埋入温度传感器测试并通过外连温度传感记录仪记录混凝土温度历程。

(5) 模拟实体结构温升环境下混凝土性能测试：采用步入式环境模拟养护箱模拟工程现场的温湿度条件, 将混凝土限制膨胀率试件和平板试件从成型完成时起养护于步入式环境模拟养护箱内, 按照 GB/T 23439—2017《混凝土膨胀剂》测试混凝土各龄期限制膨胀率; 通过 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中平板法测试混凝土早期裂缝, 不同的是平板表面风速为养护箱内空气静止状态, 测试龄期 14 d 的裂缝情况。

2 结果与分析

2.1 钙源膨胀剂和镁源膨胀剂的粒径表征

钙源膨胀剂和镁源膨胀剂的粒径分布测试结果如图 1 所示。结合图 1 和表 4 可知, 钙源膨胀剂和镁

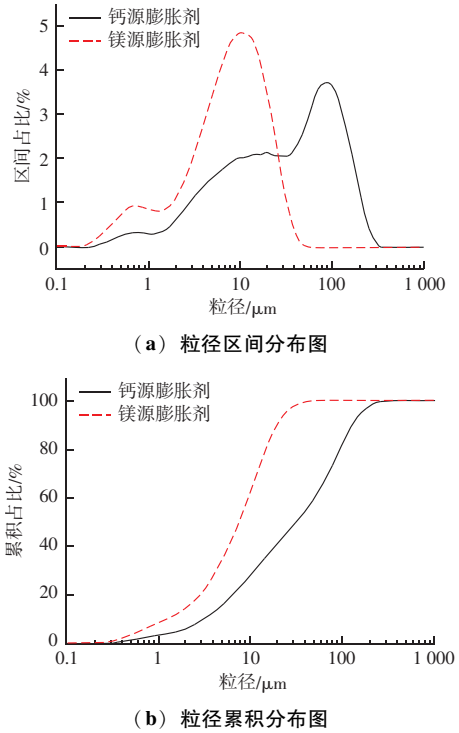


图 1 钙源膨胀剂和镁源膨胀剂的粒径分布
Fig. 1 Particle size distribution of calcium-based and magnesium-based expansion agents

表 4 钙源膨胀剂和镁源膨胀剂粒径统计表
Table 4 Particle size distribution statistics table for calcium-based and magnesium-based expansive agents

类别	体积平均径 /μm	面积平均径 /μm	比表面积 / (m ² /kg)
钙源膨胀剂	56.08	7.61	235.1
镁源膨胀剂	10.20	3.32	504.8

源膨胀剂的体积平均径分别为 56.08 和 10.20 μm, 面积平均径分别为 7.61 和 3.32 μm, 比表面积分别为 235.1 和 504.8 m²/kg。因此, 钙源膨胀剂较镁源膨胀剂的平均粒径更大, 比表面积更小, 两者粒径的选择主要受限于两者的水合膨胀机理: 钙源膨胀剂水化速率较快, 小粒径钙源膨胀剂的水化速率过快会导致在混凝土塑性阶段产生较大膨胀能损失; 而镁源膨胀剂的水合膨胀速率较缓, 小粒径镁源膨胀剂会提高膨胀速率有利于膨胀能释放, 因此, 根据膨胀需求使用较大粒径的钙源膨胀剂和较小粒径的镁源膨胀剂。

2.2 混凝土工作性测试

混凝土坍落度和扩展度见表 5。

材料科学

表 5 膨胀剂对混凝土坍落度和扩展度的影响
Table 5 The impact of expansive agents on the slump and spread of concrete

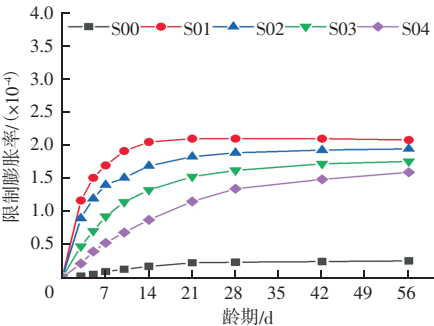
组别	坍落度/mm		扩展度/mm	
	初始	1 h	初始	1 h
S00	215	190	530	390
S01	220	180	520	350
S02	215	185	510	340
S03	215	180	520	310
S04	210	170	500	310

初始坍落度通过减水剂均控制在 (210 ± 10) mm, 减水剂用量分别为 6.0、6.8、6.8、6.8、6.8 kg/m³, 掺膨胀剂的试验组较基准组的减水剂用量增加了 13% 左右, 说明膨胀剂的掺入导致混凝土需水量增大, 需要更多减水剂以保证工作性。这主要由于膨胀剂与水反应消耗部分混凝土拌合水, 为了保证混凝土流动性, 需要更多的减水剂。

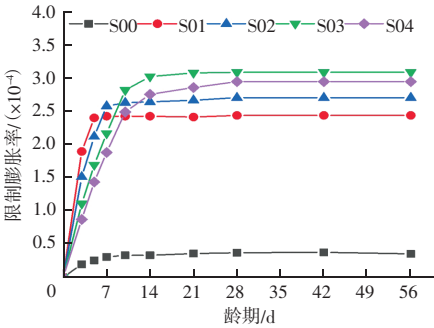
对于坍落度性能, S00 ~ S04 的初始坍落度均在 (210 ± 10) mm 范围内, 1 h 坍落度经时损失在 20 ~ 40 mm 之间, 坍落度经时损失差异不大; 对于扩展度性能, S00 的初始扩展度为 530 mm, 1 h 经时损失 140 mm, 而 S01 ~ S04 的初始扩展度较 S00 减小, 1 h 经时损失增大, 在 170 ~ 200 mm 之间。说明膨胀剂对混凝土的工作性有一定负面影响。这主要归因于膨胀剂水化早期消耗水份导致自由水降低, 并且产生的水化产物增大黏度, 从而降低混凝土流动性。镁源膨胀剂较钙源膨胀剂的负面影响稍大, 这主要由于镁源膨胀剂较钙源膨胀剂粒径更小, 并水化需水量更大, 导致扩展度经时损失更大。

2.3 温度对混凝土限制膨胀率的影响

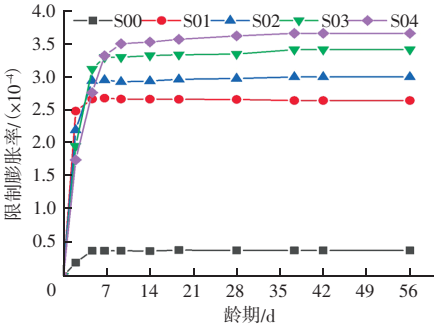
不同水养温度对混凝土限制膨胀率的影响如图 2 所示。在 20 ℃ 水养条件下, 混凝土限制膨胀率不同龄期的大小依次为 S01 > S02 > S03 > S04 > S00, 并且 S01 的限制膨胀率在 14 d 增长趋于稳定, S04 的限制



(a) 20 ℃



(b) 40 ℃



(c) 60 ℃

图 2 不同水养温度条件下混凝土的限制膨胀率
Fig. 2 The restrained expansion rate of concrete under different water curing temperature conditions

膨胀率在 56 d 仍具有增长趋势, 说明在较低温度条件下, 钙源膨胀剂较镁源膨胀剂的膨胀作用更大, 而镁源膨胀剂膨胀缓慢, 并且在 56 d 仍然具有膨胀趋势, 导致混凝土硬化后存在结构稳定性风险。因此, 在 20 ℃ 水养条件下, 钙源膨胀剂较镁源膨胀剂更有助于混凝土补偿收缩。

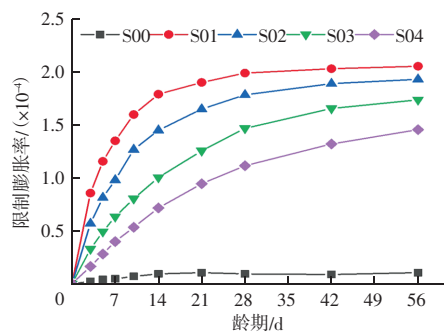
在 40 ℃ 水养条件下, 混凝土限制膨胀率在 5 d 龄期的的大小依次为 S01 > S02 > S03 > S04 > S00, 而在 14 d 龄期后大小依次为 S03 > S04 > S02 > S01 > S00, 并且 S01 的限制膨胀率在 5 d 基本停止增长, S04 的限制膨胀率在 28 d 增长趋于稳定, 说明在不同养护温度条件下, 钙源膨胀剂和镁源膨胀剂的膨胀性能不同。养护温度提高, 钙源膨胀剂反应速率加快, 但 14 d 后限制膨胀率最低; 镁源膨胀剂早期膨胀能不高且持续膨胀时间较长, 在一定程度上, 镁源膨胀剂比例提高有助于提高 7 d 龄期后混凝土限制膨胀率。因此, 在 40 ℃ 养护条件下, 钙源膨胀剂与镁源膨胀剂的比例为 35:65 的双源膨胀体系最佳。

在 60 ℃ 水养条件下, 混凝土限制膨胀率在 7 d 龄期后大小依次为 S04 > S03 > S02 > S01 > S00, 并且膨胀率基本均趋于稳定, 说明养护温度提高能够增

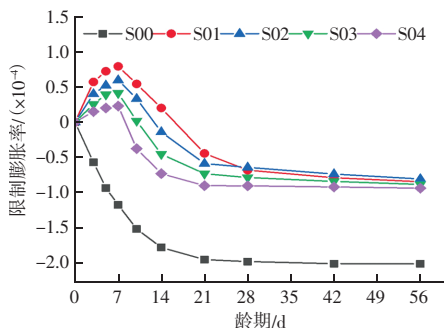
加钙源膨胀剂和镁源膨胀剂的反应速率,减小膨胀稳定时间。钙源膨胀剂在7 d龄期后限制膨胀率最低,这可能由于钙源膨胀剂反应速率加快使早期膨胀能损失较大而导致混凝土膨胀效果不佳。因此,在60℃养护条件下,镁源膨胀剂较钙源膨胀剂更有助于补偿混凝土收缩。

2.4 湿度对混凝土限制膨胀率的影响

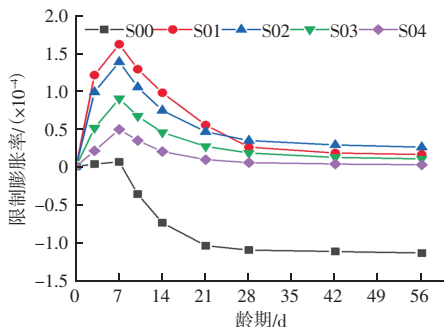
不同养护湿度对混凝土限制膨胀率的影响如图3所示。湿度条件分为标准养护、干燥养护和水养7 d转干养。其中,标准养护的湿度在95%以上,干燥养护的湿度为 $(65 \pm 2)\%$,环境温度均控制在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。



(a) 标准养护



(b) 干燥养护



(c) 水养7 d转干养

图3 不同养护制度下的混凝土限制膨胀率

Fig. 3 The restrained expansion rate of concrete under different curing regimes

不同养护制度对混凝土限制膨胀率具有较大影响。结合图2(a)和图3可知,混凝土限制膨胀率由大到小的养护制度排序为:水养>标准养护>水养7 d转干养>干燥养护,说明提高养护湿度对提高混凝土限制膨胀率起到重要作用。为了控制混凝土收缩开裂,在混凝土成型时掺入适当膨胀剂补偿收缩的同时,还需要在混凝土养护时提高试件养护湿度。

2.5 模拟工况下的混凝土限制膨胀率

不同温度和湿度对混凝土收缩性能影响较大,为了将现场实际工况与实验室研究结合,测试了不同尺寸混凝土的中心温度历程,模拟了该温度历程以及养护湿度情况,研究在模拟工况下混凝土的收缩和开裂特性。

如图4所示,通过在混凝土侧墙内预埋温度传感器测试混凝土中心温度。具体方法是:首先,将温度传感器以竖直方向悬空预埋于混凝土模具内;然后,将温度传感器接入自动温度测试仪;最后,将混凝土浇筑于模具中并覆盖温度传感器,待振捣和收光后,温度传感器开始采集数据。



图4 预埋温度传感器试验图

Fig. 4 Test diagram with embedded temperature sensors

由图5所示,根据实际典型工况条件,分别测试了厚度300、800和1300 mm混凝土的中心温度,其温峰分别为55、63和75℃左右,数据显示混凝土厚度越大,混凝土中心温峰越大。

为了模拟混凝土不同工况条件,采用步入式环境模拟养护箱模拟了图5所示混凝土温升历程;并且根据实际养护湿度和环境湿度,控制试件成型7 d前的湿度为95%,成型7 d后的湿度为70%。如图6所示,研究了在模拟三种工况下混凝土的膨胀水化反应历程,测试了双源膨胀体系在不同工况下对混

材料科学

凝土限制膨胀率的影响。

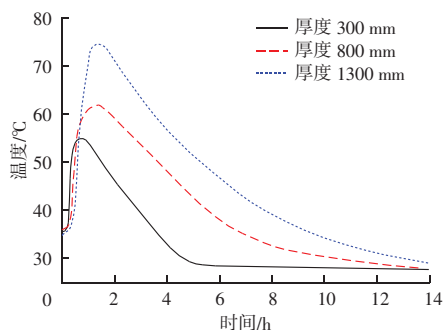
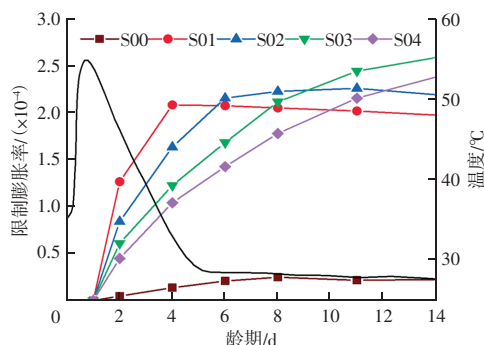
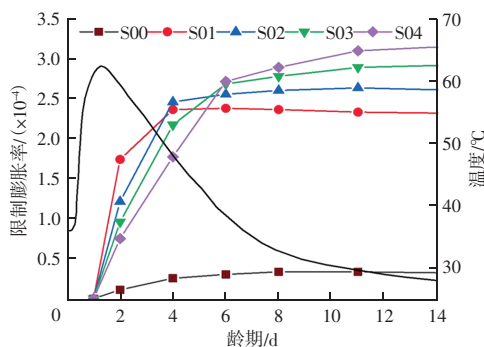


图5 不同尺寸混凝土结构的温升历程

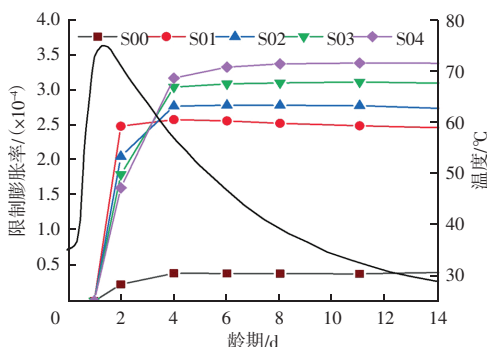
Fig. 5 Temperature rise process of concrete structures of different sizes



(a) 厚度 300 mm



(b) 厚度 800 mm



(c) 厚度 1300 mm

图6 双源膨胀体系在不同工况下的限制膨胀率

Fig. 6 The restrained expansion rate of dual-source expansive system under various working conditions

由图6(a)可知,在温峰值为55℃时,混凝土在降温阶段限制膨胀率均呈上升趋势,限制膨胀率大小依次为S01>S03>S02>S04>S00,这归因于钙源膨胀剂较镁源膨胀剂早期水化反应速率更快,膨胀能释放更大,导致钙源膨胀剂占比越高混凝土早期龄期限制膨胀率越大。钙源膨胀剂S01在温度未降至常温时限制膨胀率已基本停止增长,镁源膨胀剂S04在温度降至常温后限制膨胀率依然缓慢增长。镁源膨胀剂的占比越高限制膨胀率后期增长速率越大,在龄期为6d时,S02限制膨胀率超过S01并且趋于稳定;在龄期为10d时,S03限制膨胀率超过S02并且继续膨胀;当龄期14d时,限制膨胀率大小依次为S03>S04>S02>S01>S00,这主要由于镁源膨胀剂较钙源膨胀剂的水化膨胀性能更加持久稳定,镁源膨胀剂在后期继续膨胀,超过了钙源膨胀剂停滞的限制膨胀率,但是温度条件限制了镁源膨胀剂的后期发展速度,导致S04限制膨胀率提高但是未超过S03。因此,在混凝土厚度300mm工况下,钙源与镁源膨胀剂占比为35:65的双源膨胀体系对混凝土补偿收缩效果较佳。

由图6(b)可知,在温峰值为63℃时,混凝土在降温阶段限制膨胀率均呈上升趋势,限制膨胀率大小依次为S01>S03>S02>S04>S00,与图6(a)早期限制膨胀率增长趋势一致。但是,当温度降低时,S02限制膨胀率超过S01,并且两者均基本趋于稳定,主要由于S02中镁源膨胀剂的后期水化膨胀作用增大了混凝土限制膨胀率。当龄期为6d时,S03限制膨胀率超过S02并且仍具有膨胀趋势,S04限制膨胀率超过S03并且膨胀增长率较S03更大,这主要由于镁源膨胀剂占比增高,早期膨胀速率较弱而后期膨胀能释放更大。在龄期6d后限制膨胀率发生转折性变化,大小依次为S04>S03>S02>S01>S00,说明在混凝土厚度800mm工况下,纯镁源膨胀剂对混凝土补偿收缩效果较好。

由图6(c)可知,在温峰值为75℃时,S01水合膨胀结束,限制膨胀率已趋于稳定,说明钙源膨胀剂在温度越高工况下水化速率越快。在龄期2d时,双源膨胀剂体系混凝土的膨胀增长速率大小依次为S01>S02>S03>S04,这主要由于钙源膨胀剂水合膨胀作用结束,镁源膨胀剂发挥主要膨胀作用,

镁源膨胀剂占比越高，限制膨胀率增长速率越大。在龄期 4 d 时限制膨胀率发生转折性变化，大小依次为 $S04 > S03 > S02 > S01$ ，与厚度 800 mm 的变化趋势一致。不同的是，厚度 1300 mm 工况的限制膨胀率趋于稳定的时间更短，这主要由于温度越高，不管是钙源膨胀剂还是镁源膨胀剂的反应速率均更快，膨胀能释放更快，导致限制膨胀率更快趋于稳定。

因此，混凝土厚度 800 mm 工况下，纯镁源膨胀剂对混凝土补偿收缩效果最好。

2.6 模拟工况下的混凝土裂缝统计

在模拟混凝土厚度 800 mm 工况的模拟养护箱内进行平板开裂试验。混凝土裂缝测试如图 7 所示，混凝土裂缝统计见表 6。

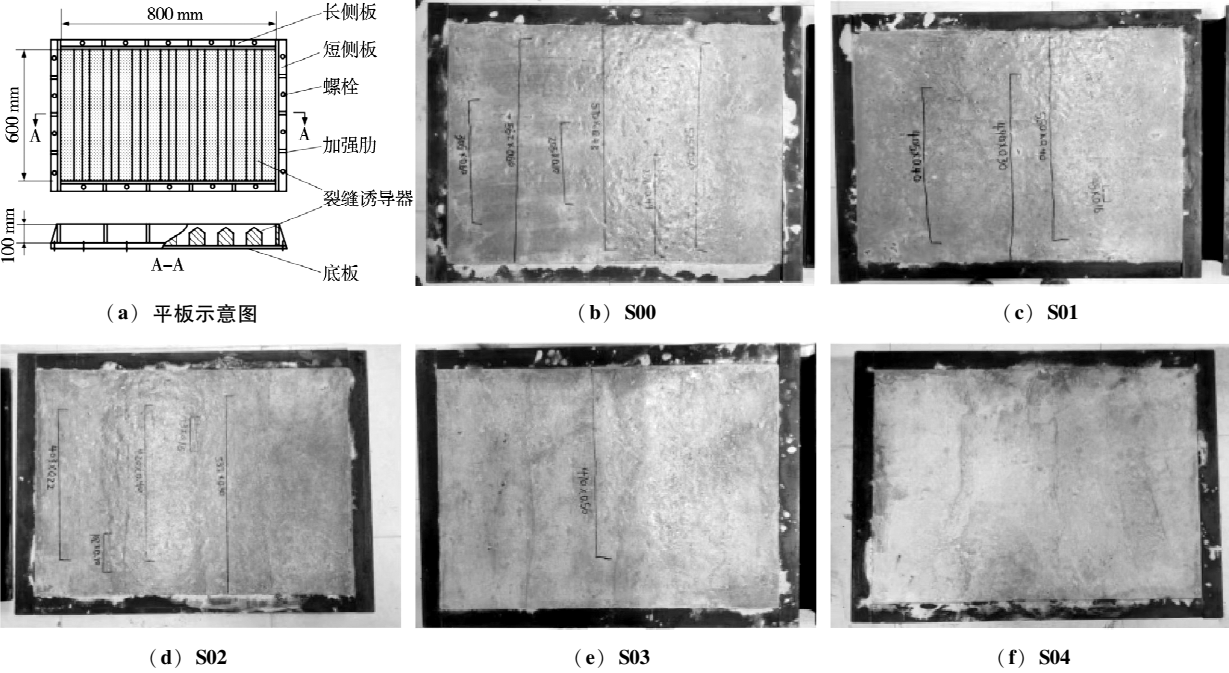


图 7 混凝土裂缝
Fig. 7 Diagram of concrete crack inspection

表 6 混凝土裂缝统计
Table 6 Concrete crack statistics

编号	最大裂缝宽度/mm	平均开裂面积 / (mm ² /根)	单位面积裂缝数 / (根/m ²)	单位面积总开裂面积 / (mm ² /m ²)
S00	0.60	99	12.5	1240
S01	0.40	67	8.3	559
S02	0.40	44	10.4	460
S03	0.56	132	2.1	274
S04	0	0	0	0

在混凝土厚度 800 mm 工况下，掺膨胀剂混凝土 S01 ~ S04 较未掺膨胀剂混凝土 S00 的开裂数量明显减少。掺纯钙源膨胀剂、钙源与镁源膨胀剂比例为 35 : 65 和 65 : 35 以及纯镁源膨胀剂的混凝土，单位面积总开裂面积较空白组分别降低了 54.9%、62.9%、77.9% 和 100%；单位面积裂缝数较空白组也分别减少了 4.2、2.1、10.4 和 12.5 根/m²。

掺镁源膨胀剂混凝土 S04 抗裂性能最好，结合

图 6 (b) 的 S04 曲线分析，因为镁源膨胀剂在早期提供了少量膨胀预应力，弥补了混凝土塑性收缩和自收缩；在后期温降阶段继续膨胀提供了逐渐增大的膨胀应力抵消了混凝土温降收缩；同时干燥收缩阶段缓慢膨胀平衡了混凝土干燥收缩，以及在混凝土内部提供了预压应力，为补偿混凝土收缩和裂缝控制提供了全生命周期防护。

掺钙源膨胀剂与镁源膨胀剂比例为 35 : 65 的双源膨胀体系对抑制混凝土开裂也有较好作用，结合图 6 (b) 的 S03 曲线分析，主要原因是在龄期 2 d 前，钙源膨胀剂提供了较大的膨胀应力抵消了混凝土塑性收缩和自收缩；在龄期 2 ~ 7 d 之间，混凝土产生较大的温降收缩趋势，其中在龄期 2 ~ 4 d，钙源膨胀剂和镁源膨胀剂同时产生膨胀应力补偿了混凝土温降收缩，在龄期 4 ~ 7 d 之间，钙源膨胀剂水

材料科学

合膨胀基本结束, 镁源膨胀剂起到主要的膨胀作用; 在龄期 7~14 d 之间, 混凝土温降收缩基本停止, 而相对干燥的环境导致混凝土开始产生干燥收缩, 镁源膨胀剂作为唯一且重要的膨胀源, 继续微膨胀弥补混凝土部分干燥收缩。混凝土发生少量开裂现象, 可能由于在干燥收缩阶段镁源膨胀剂的膨胀力不足导致产生少量干燥收缩裂缝。

3 结论

为了分析膨胀剂在不同环境的膨胀效果及适用工况, 研究了双源膨胀体系在不同养护温度、养护制度的混凝土限制膨胀率, 并且研究了双源膨胀体系在模拟混凝土厚度 300、800 和 1300 mm 三种工况下的混凝土限制膨胀率和开裂情况, 得出以下主要结论:

(1) 在不同养护温度下, 温度越高, 掺膨胀剂混凝土的各龄期限制膨胀率越大, 并且限制膨胀率增长趋于稳定的时间越短; 钙源膨胀剂在高温环境下早期水合反应迅速, 导致膨胀损失较大而整体膨胀率不高, 更适合在低于 40 ℃ 环境下使用; 而镁源膨胀剂在低温环境下水合速率较慢, 在高温环境下膨胀能相对较大并且具有适当延迟释放效果, 更适用于在不低于 40 ℃ 温度环境。

(2) 湿度条件对混凝土收缩性能具有较大影响, 掺不同膨胀剂的混凝土限制膨胀率均依次为: 水养 > 标准养护 > 水养 7 d 转干养 > 干燥养护, 因此, 为了控制混凝土收缩开裂, 在成型时掺入适当膨胀剂补偿收缩的同时, 还需要在养护时提高试件养护湿度。

(3) 在厚度为 300 mm 的混凝土工况下, 钙源膨胀剂与镁源膨胀剂比例为 35:65 的双源膨胀剂对补偿混凝土收缩效果较佳; 在厚度为 800 和 1300 mm 的混凝土工况下, 镁源膨胀剂能够起到较佳的补偿收缩作用, 其中在厚度为 800 mm 的混凝土工况下, 镁源

膨胀剂具有优异的抗裂作用。

参 考 文 献

- [1] 郝彤, 乔天龙, 冷发光, 等. 混凝土收缩及开裂相关问题综述 [J]. 混凝土, 2022 (12): 22-28.
- [2] 彭香明, 陈瑜. 混凝土干燥收缩研究进展 [J]. 粉煤灰综合利用, 2017 (1): 5.
- [3] 李凌旭, 王帅宝, 马明昌, 等. 大体积混凝土的特点及其温度裂缝产生机理 [J]. 施工技术, 2017, 46 (增刊 2): 567-569.
- [4] 余波, 喻泽成, 范志宏, 等. 海洋混凝土结构环境作用等级与耐久性设计参数的中外规范对比 [J]. 海洋工程, 2021, 39 (3): 11.
- [5] 左俊卿, 房霆宸, 朱敏涛, 等. 裂缝控制材料对混凝土收缩及微观性能影响 [J]. 混凝土, 2024 (1): 95-100.
- [6] 师海霞, 纪宪坤, 廉慧珍, 等. 改善水泥混凝土本征特性的补偿收缩技术研究进展 [J]. 新型建筑材料, 2021 (12): 48.
- [7] 焦茂鹏, 王鹏刚, 田砾, 等. 低活性氧化镁膨胀剂对混凝土微结构, 收缩和耐久性的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2023, 51 (11): 2905-2913.
- [8] 王聿梁. 膨胀自应力混凝土性能及其应用研究 [D]. 济南: 山东大学, 2023.
- [9] 蔡景顺, 李华, 舒鑫, 等. 提升结构混凝土耐久性的外加剂研究进展 [J]. 硅酸盐学报, 2025, 53 (3): 553-573.
- [10] 吴翠娥, 陶方元, 吴文选. 不同硫铝酸钙-氧化钙复合膨胀剂膨胀性能研究 [J]. 膨胀剂与膨胀混凝土, 2014 (4): 5.
- [11] 王子龙, 丁建彤, 蔡跃波, 等. 氧化钙类膨胀剂表面改性的研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2017, 36 (1): 5.
- [12] 曹丰泽, 阎培渝. 活性与养护温度对氧化镁膨胀剂膨胀性能的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2017, 45 (8): 8.
- [13] 杨东洋, 曹鸿猷, 黄京龙. MgO 膨胀剂对超高性能混凝土收缩性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (10): 3420-3427.
- [14] 高培伟, 卢小琳, 唐明述. 膨胀剂对混凝土变形性能的影响 [J]. 南京航空航天大学学报, 2006.
- [15] 王新媚. 轻烧氧化镁和钙矾石的膨胀性能对比研究 [D]. 南京: 南京工业大学, 2006.
- [16] 杨和礼. 原材料对基础大体积混凝土裂缝的影响与控制 [D]. 武汉: 武汉大学, 2004.