

花岗岩机制砂混凝土 ASR 抑制及 路面工程应用研究

冯晖林

(武汉新航建设工程有限公司,湖北 武汉 430011)

摘要:花岗岩机制砂混凝土易发生碱-硅酸反应(ASR),严重威胁其耐久性与使用寿命,而不同矿物掺合料的抑制效果尚不明确。为此,本文通过砂浆试验与工程验证,系统研究了粉煤灰、硅灰及矿渣对 ASR 的抑制效果。结果表明:随龄期延长,各组混凝土膨胀率均持续增长,但掺量越高,膨胀率越低;粉煤灰、硅灰及矿渣抑制 ASR 的最佳掺量分别为 30%、20%、5%。然而,长期观测显示单一掺料仍存在膨胀风险,建议提高掺量或采用复掺方式(如粉煤灰与矿渣复配)以发挥协同抑制作用。路面工程应用证实,掺入矿物掺合料的花岗岩机制砂混凝土在运营多年后仍具备优异的耐久性。本文成果可为花岗岩机制砂混凝土路面的检测、施工管理及运营养护提供理论与数据参考。

关键词:花岗岩机制砂;碱-硅酸反应;矿物掺合料;工程应用;混凝土路面

中图分类号:U416

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)06-0009-06

doi:10.13402/j.gcjs.2026.06.060

Suppression of ASR in granite manufactured sand concrete and its pavement engineering application

FENG Huilin

(Wuhan Xinhang Construction Engineering Co., Ltd. Wuhan 430011, Hubei, China)

Abstract: The alkali-silica reaction (ASR) in granite mechanically produced sand concrete weakens its durability and service life. The effects of different mineral admixtures in inhibiting this reaction are still unclear. Therefore, this study analyzed the inhibiting effects of fly ash, silica fume, and slag on ASR in mortar and conducted engineering tests to validate the effects of these mineral admixtures on suppressing ASR in granite mechanically produced sand concrete. The study shows that as the curing age increases, the expansion rate of granite mechanically produced sand concrete with different dosages of fly ash, silica fume, and slag all increase continuously. However, the higher the dosage, the lower the expansion rate. The optimal dosage of fly ash, silica fume, and slag for suppressing ASR in granite mechanically produced sand concrete were found to be 30%, 20%, and 5%, respectively. However, under long-term conditions, there is still a risk of expansion, necessitating increased dosages or the combined use of mineral admixtures (e.g., fly ash and slag) to enhance synergistic inhibition effects. Engineering applications show that granite mechanically produced sand concrete with mineral admixtures still exhibits good durability even under long-term traffic-induced loading conditions. The results of this study can serve as a theoretical and data reference for the inspection, construction management, and operational maintenance of granite manufactured sand concrete pavement.

Key words: granite manufactured sand; alkali-silica reaction (ASR); mineral admixtures; engineering application; concrete pavement

收稿日期: 2025-10-27

作者简介: 冯晖林(1993—),男,工程师,从事公路工程管理工作。

某新建高速公路建设地形地质条件相对复杂,防护工程量大,需要大量优质砂,但天然砂砾石骨料缺乏。为解决这一矛盾,充分利用沿线盛产的花岗岩轧制机制砂配制混凝土是一种经济实惠的解决办法^[1]。然而,花岗岩矿物中含有隐晶质、微晶质及玻璃质石英,掺入混凝土后可能引发潜在的碱-硅酸反应(alkali-silica reaction, ASR),从而降低混凝土的耐久性和服役寿命^[2]。由于该反应发展较慢且潜伏期较长,因此对花岗岩骨料中 ASR 潜在发生可能性的检测对于项目路面方案设计及管理具有重要指导意义。

在混凝土工程中,预防 ASR 的主要措施包括控制水泥碱含量、避免在关键部位使用活性骨料,以及添加粉煤灰、矿渣、硅灰或其他矿物/化学掺合料^[3]。然而,前两种措施在实际应用中往往受生产成本、技术条件及环境因素的限制,同时对混凝土等级要求较高。适量化学外加剂(如锂盐或铝盐)虽然可有效抑制 ASR,但受制于技术储备,目前尚难在工程中广泛推广^[4]。相比之下,向混凝土中掺入适量矿物掺合料不仅能有效抑制 ASR 发展,还可改善新拌混凝土及硬化混凝土性能,同时降低资源消耗并实现环境保护^[5]。研究表明,矿物掺合料能够显著抑制碱-硅酸反应引起的有害膨胀^[6],其中粉煤灰和矿渣的复掺被认为是行之有效的抑制手段^[7]。综上,掺入矿物掺合料是抑制混凝土中碱-硅酸反应的一种经济、实用且高效的方法,兼具降低资源消耗、保护环境的附加优势。然而,针对花岗岩机制砂混凝土的相关研究仍相对有限。与传统天然砂相比,花岗岩机制砂的颗粒形貌、矿物组成及活性成分存在差异,这可能会对 ASR 的发生及其抑制效果产生影响。因此,不同类型和掺量的矿物掺合料在花岗岩机制砂混凝土中对 ASR 的抑制效果及其最佳掺量尚未明确。

在 ASR 评估检测方面,岩相分析、加速砂浆棒法、长期砂浆棒法以及混凝土棱柱体法已被广泛应用于评估花岗岩骨料中 ASR 的潜在风险。混凝土膨胀性指标是表征 ASR 损伤程度与潜在风险的核心参数。例如,美国 ASTM 标准中的集料潜在碱反应性标准试验方法(砂浆棒法)(ASTM C1260)利用加速条件评估膨胀性以预测 ASR 风险;而测定碱-硅反应引起的混凝土长度变化的标准试验方法(ASTM C1293)则通过模拟碱硅酸环境并测量试件 1 a 内的膨胀率来评价集料 ASR 活性,被视为评估集料碱活性的“黄金标准”^[8-9]。我国《预防混凝土碱骨料反应技术规范》(GB/T 50733—2011)亦规定,在不具备岩相法检验条件且不了解岩石类型的情况下,可直接采用快速砂浆棒法检验膨胀率,以反映骨料 ASR 反应活性及抑制骨料碱活性的有效性。

基于此,本文系统研究了不同矿物掺合料对花岗岩机制砂混凝土中 ASR 的抑制效果,并确定了各类矿物掺合料的最佳掺量,同时通过工程实践对其抑制效果进行了验证,以期缓解天然砂资源枯竭压力、保障高速公路混凝土结构的长期耐久性提供科学依据与技术支撑。

1 室内试验

1.1 试验材料

(1) 水泥。采用 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥,其物理力学性能及化学组成分别如表 1、2 所示。厂家检测报告显示,各项指标均符合《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2023)的要求。

(2) 集料。粗集料选用花岗岩碎石,细集料选用花岗岩机制砂。依据《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)检测,性能指标如表 3、4 所示,均满足技术规范要求。

表 1 水泥物理力学性能指标

初凝时间/min	终凝时间/min	28 d 抗折强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa	标准稠度用水量/%	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	安定性/mm
191	262	7.6	48.9	26.8	322	

表 2 水泥化学组成(质量分数)

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₂	MgO	K ₂ O	%
56.13	17.51	4.42	3.61	3.12	2.47	0.61	

表 3 粗集料技术指标

碎石粒径/mm	压碎值/%	含泥量/%	空隙率/%
16.0~26.5	8.7	0.28	43.5
9.5~19.0	11.5	0.47	44.6
4.5~9.5	10.9	0.62	41.8

表 4 细集料技术指标

石粉含量/%	细度模数	堆积密度/ (kg·m ⁻³)	表观密度/ (kg·m ⁻³)	紧装空隙率/%
4.6	2.78	1 542	2 613	37.4

(3) 矿物掺合料。采用的矿物掺合料包括 F 类Ⅱ级粉煤灰、硅灰及 S95 级粒化高炉矿渣。其中，F 类Ⅱ级粉煤灰具有低钙、低水化热特性，有利于抑制碱—骨料反应并减少温度裂缝；硅灰平均粒径约为 0.31 μm，比表面积高达 24 890 m²/kg，容重为 1 651 kg/m³，其极高的火山灰活性可使基体微观结构显著致密；矿渣的各项技术指标详见表 5，其较高的玻璃体含量保证了优异的后期增强效果。

表 5 矿物掺合料技术指标

检测项目	标准值	粉煤灰 实测值	矿渣 实测值
细度/%	≤20	18.1	—
需水量比/%	≤105	102.7	—
烧失量/%	≤8	7.6	0.60
含水量/%	≤1	0.3	—
密度/(g·cm ⁻³)	≥2.8	—	2.92
比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	≥400	—	488.00
流动度比/%	≥95	—	100.00
玻璃体含量/%	≥85	—	98.00

1.2 试验方案

(1) 原材料取样。试验所用花岗岩机制砂取自某高速公路施工现场，经岩相分析确认为活性

骨料。

(2) 配合比设计。为抑制花岗岩机制砂混凝土的碱—硅酸反应，选用粉煤灰、硅灰和矿渣作为矿物掺合料，采用等质量替代水泥的方式确定其最佳掺量。具体替代比：粉煤灰 10%、20%、30%；硅灰 3%、5%、7%；矿渣 10%、20%、30%。

(3) 加速砂浆棒试验方法。试验步骤：每种配合比制备 3 个尺寸为 25 mm×25 mm×280 mm 的砂浆试件。砂浆分两层入模并逐层捣实，成型后置于标准养护室养护(24±2) h，随后脱模并在(80±2)℃的水浴中养护(24±2) h。待试件冷却至室温后测量初始长度，随即将其垂直浸入 1 mol/L 的 NaOH 溶液中，于(80±2)℃条件下继续养护(14±2)d。养护结束后测量试件最终长度，并以 3 个试件长度变化率的算术平均值作为砂浆棒的 ASR 膨胀率。

(4) ASR 抑制效果判定方法。依据 GB/T 50733—2011 评价抑制效果。若砂浆棒试件在养护 14 d 时的膨胀率小于 0.03%，则判定该掺合料对该花岗岩机制砂的 ASR 抑制效果有效。

1.3 配合比设计

将粉煤灰的替代比设定为 10%、20%、30%；硅灰 3%、5%、7%；矿渣 10%、20%、30%。具体配合比参数如表 6 所示。

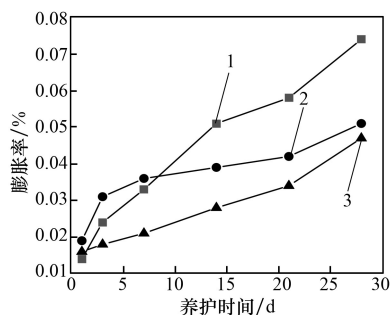
2 试验结果分析

2.1 粉煤灰对花岗岩机制砂混凝土 ASR 的影响

不同粉煤灰掺量下花岗岩机制砂混凝土 ASR 膨胀抑制效果如图 1 所示。

表 6 配合比设计

组别	机制砂	水泥	水	粉煤灰	硅灰	矿渣
10% 粉煤灰	870	360	180	40	—	—
20% 粉煤灰	870	320	180	80	—	—
30% 粉煤灰	870	300	180	100	—	—
3% 硅灰	870	388	180	—	12	—
5% 硅灰	870	380	180	—	20	—
7% 硅灰	870	372	180	—	28	—
10% 矿渣	870	360	180	—	—	40
20% 矿渣	870	320	180	—	—	80
30% 矿渣	870	300	180	—	—	100



1—10%；2—20%；3—30%。

图 1 不同粉煤灰掺量对花岗岩机制砂混凝土 ASR 膨胀抑制效果

由图 1 可知：粉煤灰掺量对 ASR 抑制效果具有显著影响。当掺量为 10% 和 20% 时，砂浆棒试件 14 d 膨胀率分别为 0.051% 和 0.039%，均超过 GB/T 50733—2011 规定的 0.03% 限值，表明抑制效果不明显。当掺量提高至 30% 时，14 d 膨胀率降至 0.028%，低于规范限值，表现出有效的抑制作用。此外，该组试件 28 d 膨胀率仅为 0.047%，显著低于低掺量组，说明 30% 掺量的粉煤灰不仅有效抑制了早期膨胀，且在长期尺度上具有稳定的抑制效能。

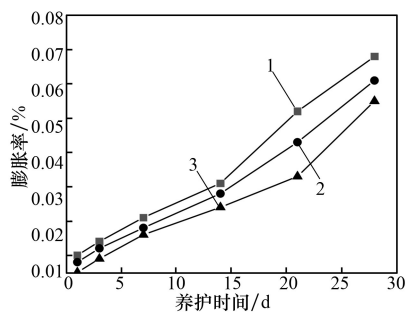
其作用机理主要包括两方面：1) 粉煤灰中的活性 SiO_2 和 Al_2O_3 通过火山灰反应消耗水泥水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，降低了体系中氢氧根离子的浓度，从而削弱了对骨料中活性二氧化硅的侵蚀能力^[3]；2) 粉煤灰的填充效应和二次水化作用改善了孔隙结构，降低了碱液在孔隙中的扩散速率，延缓了 ASR 凝胶的生成和扩散^[7]。随着掺量增加，上述效应呈增强趋势，故 30% 掺量表现出最优的抑制效果。

综上，采用 30% 粉煤灰替代水泥，可显著降低花岗岩机制砂引发的 ASR 膨胀反应风险，同时优化浆体微观结构，提升混凝土的长期耐久性。

2.2 硅灰对花岗岩机制砂混凝土 ASR 的影响

不同硅灰掺量对花岗岩机制砂混凝土 ASR 膨胀的抑制效果如图 2 所示。

由图 2 可知：随着龄期延长，各组试件膨胀率均持续增长，且总体呈现“掺量越高，膨胀率越低”的规律，说明硅灰对 ASR 具有一定的抑制作用。在 14 d 龄期时，3% 掺量组的膨胀率为 0.031%，超过 0.03% 的临界值，判定为抑制无效；而 5% 和 7% 掺量组的膨胀率分别为 0.028% 和 0.024%，均低于临界值，表明较高掺量能够在



1—3%；2—5%；3—7%。

图 2 不同硅灰掺量对花岗岩机制砂混凝土 ASR 膨胀抑制效果

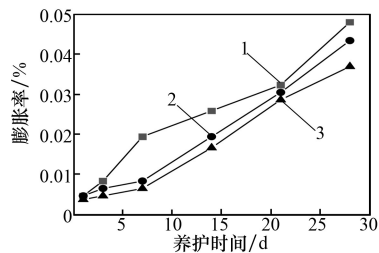
短期内有效削弱 ASR 活性。然而，进入长期阶段后(28 d)，各组试件的膨胀率分别攀升至 0.068%、0.061% 和 0.055%，均远超规范限值。这说明即使在较高掺量条件下，ASR 反应仍在持续发展，单一硅灰掺量对长期膨胀的抑制效果有限。

硅灰抑制 ASR 的机理主要在于其高活性和细微颗粒特征。硅灰能与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生二次水化反应，生成 $\text{C}-\text{S}-\text{H}$ 胶体，降低孔溶液中的碱度；同时，其填充效应可改善孔隙结构，从而延缓 ASR 反应的发生与发展^[5-6]。然而，当掺量处于 3% ~ 7% 的较低水平时，体系中残余的碱仍足以驱动反应，导致后期膨胀持续累积。

因此，硅灰在短期内对 ASR 具有显著的抑制作用，并且 5% 掺量的硅灰能够有效抑制花岗岩机制砂混凝土 ASR 反应。但在长期条件下仍存在膨胀风险。为了保证混凝土的长期耐久性，单纯依靠 3% ~ 7% 的硅灰掺量难以充分保障混凝土的长期耐久性，建议适当提高其掺量或将其与粉煤灰、矿渣等矿物掺合料复合使用，以发挥协同抑制效应^[6]。

2.3 矿渣对花岗岩机制砂混凝土 ASR 的影响

不同矿渣掺量对花岗岩机制砂混凝土 ASR 膨胀的抑制效果如图 3 所示。



1—10%；2—20%；3—30%。

图 3 不同矿渣掺量对花岗岩机制砂混凝土 ASR 膨胀抑制效果

由图 3 可知：随着龄期延长，3 组试件膨胀率均呈持续上升趋势，说明花岗岩机制砂的 ASR 反应仍在持续进行。矿渣掺量对抑制膨胀作用显著：掺量越高，膨胀率越低，该趋势在早期阶段尤为明显。14 d 龄期时，10% 掺量组膨胀率为 0.028%，略低于 0.03% 的规范限值；20% 与 30% 掺量组膨胀率分别为 0.021% 和 0.018%，显示出高掺量矿渣在短期内对 ASR 膨胀的有效抑制。然而，进入长期阶段（28 d），各组膨胀率分别攀升至 0.052%、0.047% 和 0.040%。尽管随着掺量增加，28 d 膨胀率降低了约 2.3%（由 10% 增至 20%），但所有组别的膨胀率仍高于 0.03% 的限值，表明单一矿渣掺量对长期 ASR 膨胀的抑制仍存在局限性。

从机理上分析，矿渣通过二次水化作用消耗水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，生成 C-S-H 凝胶，降低体系中可溶性氢氧根浓度，从而削弱了骨料与碱的反应^[7]。此外，矿渣的细颗粒的填充效应改善了水泥浆体孔隙结构，减缓了碱液向骨料表面的扩散，延缓了 ASR 凝胶的形成与膨胀发展。随着掺量增加，这两种效应叠加，显著延缓了早期 ASR 膨胀的发展^[3]。

综上，矿渣对花岗岩机制砂的 ASR 膨胀具有明显抑制作用，但仅靠单一掺量难以完全消除长期膨胀风险。在工程实践中，建议进一步提高矿渣掺量，或将其与粉煤灰、硅灰等复合使用，以实现协同抑制效应，保障混凝土的长期耐久性。

3 应用实例

3.1 工程概况

某新建花岗岩机制砂混凝土高速公路全长约 65 km。采用双向四车道标准，设计时速为 120 km/h，预估日均交通量约为 1.8 万当量轴次。在长期服役过程中，花岗岩机制砂混凝土路面受车辆循环荷载及气候环境等多因素耦合作用，易出现开裂、剥落、抗滑性能衰减及 ASR 导致的膨胀等病害，严重削弱路面耐久性与使用寿命^[7]。为探究矿物掺合料对 ASR 的抑制效果及其工程适用性，本文选取 K35 + 500 ~ K35 + 620 段作为试验段，分别采用 30% 粉煤灰、5% 硅灰和 20% 矿渣粉等优化混

凝土配比，并通过现场铺筑验证，旨在提升混凝土结构性能，延缓 ASR 及力学性能劣化。

3.2 施工要点

为确保含矿物掺合料的花岗岩机制砂混凝土的施工质量及长期服役性能，需对全过程实施严格管控：

（1）原材料选择与配比优化：合理选择粉煤灰、硅灰、矿渣及水泥、骨料等原材料，优化掺量与配比，确保掺合料分散均匀，满足设计力学性能及 ASR 抑制要求。

（2）拌和、运输与浇筑：严格控制运输与储存的时间和环境条件，防止掺合料性能劣化；根据环境温度、湿度及施工工况适当调整操作工艺，保证混凝土拌和均匀、振捣密实，避免因操作不当导致局部 ASR 活性集中。

（3）养护管理：科学制定养护制度，确保混凝土水化充分及掺合料活性充分发挥，从而有效抑制 ASR 膨胀，提升长期耐久性。

3.3 施工效果评价

为验证工程应用效果，对未掺矿物掺合料的普通混凝土及掺入 30% 粉煤灰、5% 硅灰、20% 矿渣粉的试验路段进行了综合性能测试，结果如表 7 所示，其中 BPN 值 (british pendulum number) 为路面在潮湿条件下的摩擦系数表征值。

表 7 掺入矿物掺合料的花岗岩机制砂混凝土施工效果评价

研究对象	14 d 膨胀率/%	抗滑性能 (BPN 值)	28 d 抗压强度/MPa
未掺矿物掺合料	0.056	91	37
30% 粉煤灰	0.026	96	44
5% 硅灰	0.021	94	42
20% 矿渣粉	0.023	93	41

由表 7 可知：掺加矿物掺合料显著改善了混凝土的各项性能。首先，各掺合料组 14 d 膨胀率均显著降低，其中 5% 硅灰组膨胀率最低 (0.021%)，说明硅灰在早期抑制 ASR 膨胀方面效果最优。其次，抗滑性能有所提升，30% 粉煤灰组 BPN 值最高 (96)，表明粉煤灰有助于改善路面抗滑能力。最后，力学性能明显增强，30% 粉煤灰组 28 d 抗压强度达 44 MPa，较基准组提升约 18.9%。

综合分析可知,不同掺合料的作用机理存在差异:硅灰对抑制 ASR 膨胀最为敏感,粉煤灰在提升抗滑与抗压强度方面表现突出,矿渣粉则表现出均衡的改良效果。因此,加入矿物掺合料不仅可以降低砂浆早期膨胀,还能提升其力学性能和抗滑性能,从而改善机制砂砂浆的综合性能。

3.4 长期监测

为进一步验证矿物掺合料对 ASR 的抑制效果及其工程适应性,对试验段进行了为期 3 a 的跟踪与监测。结果表明,掺加最佳比例矿物掺合料的路段表现状况良好,未发现明显 ASR 膨胀或结构性破坏,仅存在少量微裂缝(裂缝率 $<0.5\%$),且无剥落、松散现象,结构完整性保持良好。此外,路面抗滑性能及耐久性指标均满足设计要求,保障了道路的长期安全与舒适。

结合室内试验与现场监测结果证实,矿物掺合料对 ASR 具有关键抑制作用:一方面,粉煤灰、硅灰及矿渣粉通过参与水化反应或提供活性硅酸盐组分,显著降低了混凝土早期膨胀率,有效抑制了碱-硅反应^[3,7];另一方面,掺合料优化了混凝土微观结构及界面黏结性能,协同提升了混凝土的整体力学性能、耐久性及抗疲劳性能^[3]。

4 结 论

(1) 在试验掺量范围内,30%粉煤灰等量替代水泥可有效抑制花岗岩机制砂混凝土的 ASR。当粉煤灰掺量为 30% 时,混凝土 14 d 膨胀率为 0.028%,28 d 膨胀率为 0.047%,均满足规范要求。

(2) 硅灰对 ASR 具有良好的短期抑制效果。如硅灰掺量为 5% 时,混凝土 14 d 膨胀率低至 0.028%,但后期略有增长(28 d 为 0.061%),表明长期条件下仍存在膨胀风险。

(3) 矿渣对 ASR 膨胀具有稳定的抑制作用,其最佳掺量为 20%。在此掺量下,混凝土 14 d 膨

胀率为 0.021%,28 d 膨胀率为 0.047%,表现出良好的体积稳定性。

(4) 矿物掺合料能有效抑制花岗岩机制砂混凝土的 ASR 反应。考虑到单一掺料在长期服役下的潜在膨胀风险,建议采用复掺技术(如硅灰与粉煤灰复配),以发挥协同抑制效应,进一步提升耐久性。

(5) 工程应用效果表明,掺入适宜的矿物掺合料不仅能抑制 ASR,还能同步提升混凝土的抗压强度与抗滑性能,显著增强了路面结构的综合耐久性。

参考文献:

- [1] 曹盛明,张东长,邱俊.石粉含量对中对低强度机制砂混凝土性能的影响[J].工程建设,2007,39(5):47-50.
- [2] 亢素英.机制砂在混凝土工程中的应用技术要点[J].山西交通科技,2017(3):9-11.
- [3] 王威,刘连新,张毅.双掺矿物掺合料抑制集料碱硅酸反应的试验研究[J].混凝土,2019(5):74-76;80.
- [4] 刘文丰,李碧雄,王熠泽,等.稻壳灰粒径对水泥砂浆的碱硅酸反应风险影响[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2024,56(1):30-37.
- [5] TOUMA W E, FOWLER D W, CARRASQUILLO RL. Alkali-silica reaction in portland cement concrete: Testing methods and mitigation alternatives [R]. Dissertation Abstracts International, 2001.
- [6] NIXON P, SIMS I. Testing aggregates for alkali-reactivity [J]. Materials and Structures, 1996, 29(6): 323-334.
- [7] 王志磊,斯纪平,王玉富,等. LiNO_3 对碱硅酸反应及其膨胀的影响[J].材料科学与工程学报,2017,35(4):600-606.
- [8] 高鹏,王永博,薛刚,等.橡胶粉和硅灰对碱硅酸反应的抑制作用[J].建筑材料学报,2023,26(4):429-436.
- [9] 胡明玉,陈露璐,郑江,等.粉煤灰和抛光渣抑制碱硅酸反应及其机理研究[J].建筑材料学报,2020,23(4):739-747.