

矿物掺合料对高强机制砂混凝土早期收缩开裂性能的影响

Effect of Mineral Admixtures on Early Shrinkage and Cracking Properties of High Strength Machine-made Sand Concrete

卢玲霞

(广东冠粤路桥有限公司, 广东 广州 511400)

摘要: 针对低水胶比高强机制砂泵送混凝土早期收缩开裂严重易造成建筑物耐久性急剧衰退的问题, 通过试验研究粉煤灰、矿粉、硅灰在单掺、双掺和三掺时对混凝土工作性能、力学性能、早期收缩和开裂性能的影响规律, 以低场核磁共振仪 (NMR) 通过孔结构对早期收缩开裂性能的规律进行分析。结果表明: 粉煤灰和矿粉的掺入提高了混凝土的工作性能, 但硅灰的掺入降低了混凝土的工作性能; 矿物掺合料的掺入对混凝土早期强度影响较大, 随着养护龄期的延长, 后期强度随着水化程度的增加有所升高; 粉煤灰、矿粉、硅灰三掺时, 高强机制砂混凝土具有最小的早期收缩率和开裂面积; 掺入矿物掺合料使混凝土内部孔隙率减小, 混凝土内部致密度提高, 减小了早期收缩开裂。

关键词: 混凝土; 矿物掺合料; 机制砂; 力学性能; 早期收缩; 早期开裂

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 02-0017-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.004

LU Lingxia

(Guangdong Guanyue Road and Bridge Co., Ltd., Guangzhou 511400, China)

Abstract: Aiming at the problem of severe early shrinkage and cracking of concrete pumped with low water-binder ratio and high strength sand, which is easy to cause a sharp decline in the durability of buildings, the effects of fly ash, mineral powder and silica fume on the working performance, mechanical properties, early shrinkage and cracking properties of concrete under single, double and triple mixing were studied through experiments. The behavior of early shrinkage cracking was analyzed by low field nuclear magnetic resonance (NMR) through pore structure. The results show that the addition of fly ash and mineral powder can improve the working performance of concrete, but the addition of silica fume can reduce the working performance of concrete. The addition of mineral admixture has a great influence on the early strength of concrete, and with the extension of curing age, the late strength increases with the increase of hydration degree. When fly ash, mineral powder and silica fume are mixed, the high strength machine-made sand concrete has the smallest early shrinkage rate and cracking area. The addition of mineral admixtures can reduce the internal porosity of concrete, increase the internal density of concrete, and reduce the early shrinkage cracking.

Keywords: concrete; mineral admixture; machine made sand; mechanical properties; early contraction; early cracking

0 引言

随着我国基础设施建设的快速发展和人类保护环境意识的加强, 天然河砂资源日益匮乏和严格的开采限制, 使得机制砂逐步取代天然砂成为主要的水泥基材料细集料^[1]。此外, 在铁路、高速公路、水运、隧道等基础设施建设对高强混凝土的需求量

作者简介: 卢玲霞 (1992—), 女, 本科, 工程师, 主要研究方向: 公路桥梁施工。

收稿日期: 2023-11-10

材料科学

越来越大，对混凝土耐久性能的要求越来越高，因此，研究如何提高高强机制砂混凝土耐久性能是很有必要的^[2]。已有研究表明：采用机制砂全部替代天然砂制备高强机制砂混凝土会造成混凝土收缩大、易开裂的问题^[3]；其次，高强机制砂混凝土中胶凝材料用量较大，在早期水泥水化过程中产生的干燥收缩和自收缩比普通混凝土更容易发生早期收缩开裂^[4-5]。为降低高强混凝土的早期收缩开裂性能，通过优化原材料（如：砂、石子、水泥以及减水剂等）以及掺入外加剂（如：膨胀剂、减缩剂、纤维等）^[6-7]方法来实现，其中，通过矿物掺合料等质量替代水泥方法来实现是主要方法之一，也是被广泛应用于实际工程的，同时，也符合我国当前的“碳中和、碳达峰”的目标，具有良好的经济效益^[8-10]。

胡延燕等^[11]对不同矿物掺合料的高强混凝土进行了力学性能和水化产物的研究，证明了适量的矿粉和石英粉可以不同程度地提高混凝土的力学性能。Surender Singh 等^[12]研究表明，当用硅灰代替 10% 水泥、粉煤灰代替 20% 水泥、甘蔗渣灰代替 5% 水泥时，混凝土的力学性能得到最大的改善。然而，很少有研究者同时研究粉煤灰、矿粉、硅灰在单掺、双掺以及三掺时对高强机制砂混凝土的早期收缩开裂性能的影响。

因此，本文研究粉煤灰、矿粉、硅灰分别在单掺、双掺、三掺时等质量取代水泥对 C60 高强机制砂混凝土的工作性能、力学性能、早期收缩和开裂性能的影响，以期矿物掺合料应用于高强机制砂混凝土提供新思路，为高强机制砂混凝土在实际工程中的应用提供借鉴。

1 试验

1.1 原材料

水泥采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥，主要性能指标见表 1；粉煤灰采用 F 类Ⅱ级粉煤灰，性能指标见表 2；粒化高炉矿渣采用 S95 矿渣粉，性能指标见表 3；细骨料采用石灰岩机制砂，细度模数为 3.02，石粉含量为 5.05%，表观密度为 2660 kg/m³；粗骨料采用粒径 5~31.5 mm 连续级配碎石，表观密度为 2700 kg/m³，压碎指标为 6.7%；减水剂采用 LC-HPC 聚羧酸高性能减水剂，技术指标见表 4；此外，采用 XRF 技术对水泥、粉煤灰、矿粉、硅灰、石粉等胶凝

材料的主要化学成分进行测试，结果见表 5。

表 1 水泥技术指标						
Table 1 Cement technical index						
比表面积/ (m ² /kg)	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
358	240	310	4.8	7.2	23.2	48.3

表 2 F 类Ⅱ级粉煤灰性能指标						
Table 2 Class F Class II fly ash performance index /%						
细度	含水率	需水量比	烧失量	碱含量	SO ₃ 含量	28 d 活性指数
7.0	0.2	102	2.0	1.63	0.6	71.5

表 3 S95 矿粉性能指标							
Table 3 S95 mineral powder performance index							
密度/ (g/cm ³)	比表面积 (m ² /kg)	活性指数/%	流动 度比/%	SO ₃ 含 量/%	氯离 子/%	含水 率/%	烧失 量/%
2.9	443	72.0	95.2	96	0.2	0.01	0.3 -0.8

表 4 减水剂技术指标					
Table 4 Technical index of water reducing agents					
固含量/%	密度/ (g/cm ³)	pH 值	氯离子 含量/%	水泥净浆流 动度/mm	减水率/%
19.6	1.06	6	0.01	230	19.2

表 5 胶凝材料的化学组成/%								
Table 5 Chemical composition of cementitious materials /%								
材料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
水泥	20.31	5.02	3.41	65.57	1.17	2.89	0.397	0.813
粉煤灰	53.67	31.14	4.78	4.01	1.30	0.392	1.16	1.82
矿粉	37.60	15.78	0.55	34.92	6.34	1.70	1.32	0.60
硅灰	70.26	15.28	2.03	2.48	0.647	0.0126	4.57	4.22
石粉	69.33	15.79	4.53	3.67	0.54	0.07	2.98	2.69

1.2 混凝土配合比

混凝土配合比见表 6，水胶比为 0.3，混凝土强度等级为 C60，减水剂掺量占胶凝材料总质量的 1.2%。矿物掺合料的掺入方式为等质量取代水泥，以纯水泥组为基准组 C1，单掺粉煤灰（20%）C2、矿粉（10%）C3、硅灰（5%）C4，复掺粉煤灰（20%）+矿粉（10%）C5，三掺粉煤灰（20%）+矿粉（10%）+硅灰（5%）C6 等作为对比组，研究矿物掺合料对高强机制砂混凝土工作性能、力学性能以及收缩开裂性能的影响。

表 6 混凝土试验配合比							
Table 6 Concrete test mix ratios / (kg/m ³)							
组别	水泥	河砂	石子	水	粉煤灰	矿粉	硅灰
C1	490.0	689	1 124	147			
C2	392.0	689	1 124	147	98		
C3	441.0	689	1 124	147		49	
C4	465.5	689	1 124	147			24.5
C5	343.0	689	1 124	147	98	49	
C6	318.5	689	1 124	147	98	49	24.5

1.3 试验方法

1.3.1 工作性能和力学性能

按表 5 所示配合比对混凝土进行搅拌，参照 GB/

T 50081—2002《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》测试新拌混凝土的坍落度、扩展度和凝结时间；坍落度经时损失按 GB 50164—2011《混凝土质量控制标准》进行测试。力学性能参照规范 GB/T 50010—2002《普通混凝土力学性能试验方法》规定，将制备的混凝土试件在标准养护条件（温度（20±2）℃，相对湿度≥95%）下养护 7、28、56 d 后测其抗压强度，试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm。

1.3.2 耐久性能

收缩试验、抗氯离子和开裂试验均参照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》进行，收缩试件尺寸为 515 mm×100 mm×100 mm，测试时间为 2 d，测试仪器采用 CABR-NES 型非接触式混凝土收缩变形测试仪；开裂试件尺寸为 800 mm×600 mm×100 mm，测试时间为 1 d；抗氯离子试件尺寸为 φ=100 mm，H=50 mm。

1.3.3 孔结构性能测试方法

采用苏州纽迈分析仪器股份有限公司生产的核磁共振微结构分析与成像系统测定混凝土试件 28 d 的孔隙结构特征。试验前，试件在真空环境下用水饱和 24 h；试验期间，磁场设置为 0.55 T，共振频率为 50~60 Hz。

2 试验分析

2.1 工作性能

表 7 为不同矿物掺合料新拌混凝土的工作性能。与基准组 C1 相比，单掺粉煤灰 C2 和矿粉 C3 时，混凝土的坍落度分别增大了 15 和 5 mm，同时，伴随着坍落度的增大混凝土扩展度也增大，混凝土初凝时间分别延长了 20 和 30 min。而单掺硅灰 C4，混凝土的坍落度降低了 15 mm。1 h 坍落度损失表明，单掺硅灰 C4 后，混凝土拌合物的经时损失较大，坍落度为 170 mm，扩展度为 450 mm×450 mm；C5 和 C6 的

混凝土扩展度分别增大了 10 mm 和 20 mm，混凝土的流动性变大，更有利于混凝土的泵送。

粉煤灰以等质量取代水泥掺入混凝土，在一定程度上增加了浆体体积，此外粉煤灰颗粒大多为球状玻璃体，起到滚珠作用，使得混凝土内部之间的摩擦力减小，因此，粉煤灰能够提高混凝土的坍落度和扩展度^[13]。而硅灰的掺入会降低新拌混凝土的坍落度和扩展度，其主要原因是：硅灰的粒径小于水泥，使得比表面积增加，硅灰吸水性大于水泥，最终导致拌合物游离水减少，故相同水胶比情况下，混凝土的黏聚性增强，流动性减小^[14]。

因此，无论矿物掺合料在单掺、双掺以及三掺时，与基准组相比，混凝土拌合物的工作性能均能达到泵送的要求，满足实际工程施工的要求。

2.2 抗压强度

图 1 所示为不同矿物掺合料混凝土 7、28、56 d 的抗压强度测试结果。与基准组 C1 混凝土 7 d 时的抗压强度值 57.98 MPa 相比，单掺粉煤灰 C2、单掺矿粉 C3、单掺硅灰 C4 的混凝土抗压强度稍有降低，分别为 53.90、55.10、54.30 MPa；双掺 C5 和三掺 C6 混凝土的力学性能分别降低了 6.6 MPa 和 5.2 MPa。不同矿物掺合料 28 d 抗压强度范围为 67~68 MPa，满足 C60 混凝土的力学性能要求。混凝土 56 d 时，单掺粉煤灰 C2、双掺 C5 和三掺 C6 混凝土的抗压强度均大于基准组。

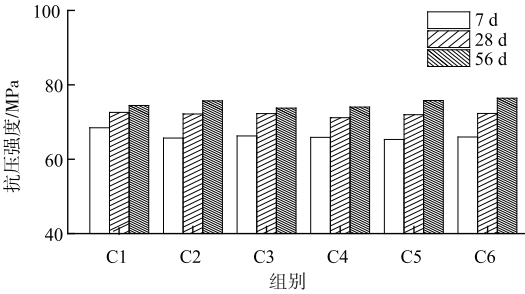


图 1 混凝土力学性能测试结果
Fig. 1 Test results of mechanical properties of concrete

2.3 早期收缩试验结果与分析

图 2 为不同矿物掺合料混凝土早期收缩测试结果。高强机制砂混凝土的收缩主要在前 12 h，12 h 后基本趋于稳定。C1~C6 六组混凝土 48 h 的收缩率分别为 $1\,354\times 10^{-6}$ 、 807×10^{-6} 、 $1\,003\times 10^{-6}$ 、 $1\,118\times 10^{-6}$ 、 566×10^{-6} 、 508×10^{-6} ，与基准组 C1 相比，早期收缩率

表 7 新拌混凝土工作性能
Table 7 Working properties of fresh concrete

组别	质量占比/%		初始/mm		1 h/mm		凝结时间/min	
	粉煤灰	矿粉	坍落度	扩展度	坍落度	扩展度	初凝	终凝
C1			205	510×510	195	480×490	485	800
C2	20		220	530×535	210	505×510	505	825
C3		10	210	515×520	195	485×485	515	830
C4			190	470×460	170	450×450	510	810
C5	20	10	215	510×520	200	500×505	555	865
C6	20	10	225	510×510	200	510×515	560	890

材料科学

分别降低了 40.39%、25.92%、17.43%、58.20%、62.48%。可知,矿物掺合料在单掺时均能有效抑制混凝土的早期收缩。其中,粉煤灰对混凝土早期收缩抑制效果最佳。其原因是:混凝土早期的水泥水化反应使得基体水份大量减少导致收缩变大,而采用粉煤灰等质量取代水泥后减少了水泥用量,粉煤灰在混凝土早期主要起到填充作用,混凝土中微小孔隙被粉煤灰微小颗粒填充,表面的致密凝胶抑制毛细孔的生成。而矿粉等质量取代水泥后仅仅是早期水化速度减慢,混凝土整体水化程度降低。因此,掺入粉煤灰使混凝土早期收缩减小最为显著,矿物掺合料双掺收缩效果明显优于单掺,矿物掺合料三掺收缩率比双掺的收缩率大 4.28%。综上,矿物掺合料三掺对混凝土的收缩效果最佳,矿物掺合料双掺收缩效果居中,矿物掺合料单掺收缩效果最差。

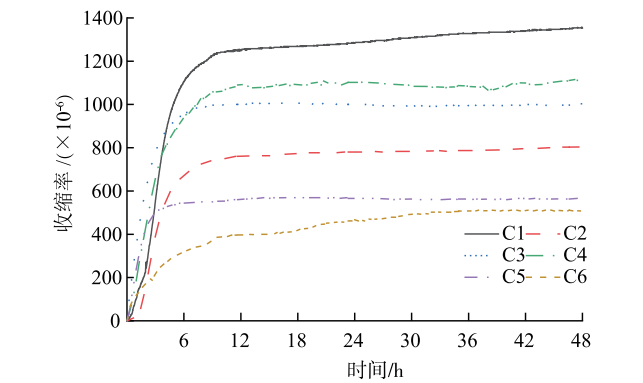


图 2 混凝土早期收缩曲线
Fig. 2 Early shrinkage curve of concrete

2.4 早期开裂

不同矿物掺合料混凝土早期抗开裂性能测试结果见表 8。由表可知,与基准组 C1 相比,掺入矿物掺合料能够有效延缓混凝土的开裂时间。矿物掺合料单掺粉煤灰,混凝土的初裂时间延迟了 35min;矿物掺合料双掺和三掺,混凝土的初裂时间分别延迟了 45min 和 60min。同时,矿物掺合料的掺入使得混凝土最大裂缝宽度、裂缝条数、裂缝总长度以及开裂面积等均显著降低。掺入矿物掺合料,混凝土的最大裂缝宽度由 0.734 mm 分别减小至 0.456、0.624、0.587、0.434、0.357 mm;混凝土的开裂面积由 1 179 mm²/m²分别降低至 793、1 013、1 129、711、637 mm²/m²,裂缝降低系数 η 分别为 32.73%、14.08%、4.24%、39.69%、45.97%。

表 8 混凝土早期开裂试验结果 Table 8 Concrete early cracking test results						
编号	起裂时间 /min	裂纹数 /条	最大裂缝宽度/mm	裂缝总长度/mm	开裂面积/(mm ² /m ²)	开裂降低系数率/%
C1	110	6	0.734	1 247	1 179	
C2	145	4	0.456	875	793	32.73
C3	120	5	0.624	1 109	1 013	14.08
C4	125	5	0.587	1 131	1 129	4.24
C5	155	3	0.434	730	711	39.69
C6	170	3	0.357	690	637	45.97

2.5 氯离子电通量

图 3 所示为不同矿物掺合料混凝土 28 d 的电通量测试值,表 9 为混凝土抗氯离子侵蚀性能评定^[15]。结合图 3 和表 9 可知,掺加不同矿物掺合料混凝土电通量变化范围在 783~2 048 C,其中,只有基准组 C1 测试电通量值为 2 048 C,表现为中渗透性,而矿物掺合料的掺入使得混凝土抗氯离子电通量均小于 2 000 C,表现出良好的抗氯离子侵蚀性能。单掺矿物掺合料时,硅灰的掺入使得混凝土电通量值最小,矿粉掺入时混凝土电通量值最大,粉煤灰混凝土的电通量值居中。双掺和三掺时混凝土电通量值均小于 1 000 C,表现为极低渗透性。

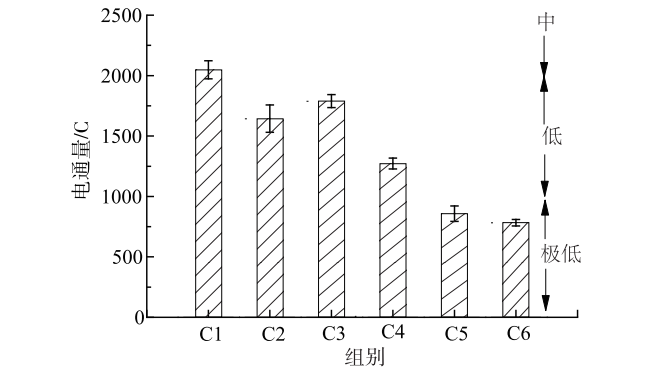


图 3 混凝土电通量测定值
Fig. 3 Measured values of concrete electric flux

表 9 混凝土抗氯离子侵蚀性能评定 Table 9 Evaluation of the resistance of concrete to chloride ion erosion	
6 h 电通量/C	氯离子渗透率
>4 000	高
2 000~4 000	中
1 000~2 000	低
100~1 000	极低
<100	忽略

2.6 核磁共振

图 4 所示为不同矿物掺合料混凝土在标准养护 28 d 后采用核磁共振技术测得的 T₂ 谱图分布曲线以及采用

数据转化得到的混凝土孔径分布曲线^[16]。不同矿物掺合料混凝土 T_2 图谱均有 2~3 个明显的峰，且矿物掺合料的掺入对混凝土各个峰核磁信号强度影响较大，因此，矿物掺合料对混凝土内部孔隙结构影响较大。峰面积的大小代表孔径的数量和尺寸，图 4（a）中从左往右依次为第一峰、第二峰、第三峰分别代表小孔径占比、中等孔径占比、大孔径占比。当矿物掺合料三掺 C6 时，混凝土的 T_2 图谱第一峰信号强度相对于基准组 C1 而言下降了 64.7%，同时，第一峰峰值顶点出现的时间也由 0.5607 ms 右移至 0.7934 ms，第一峰的面积也由 536 35 减小至 210 05。C1~C6 的孔隙率分别为 2.24%、1.45%、1.76%、1.85%、1.21%、1.09%。因此，随着不同矿物掺合料的掺入，混凝土的密实度增大。

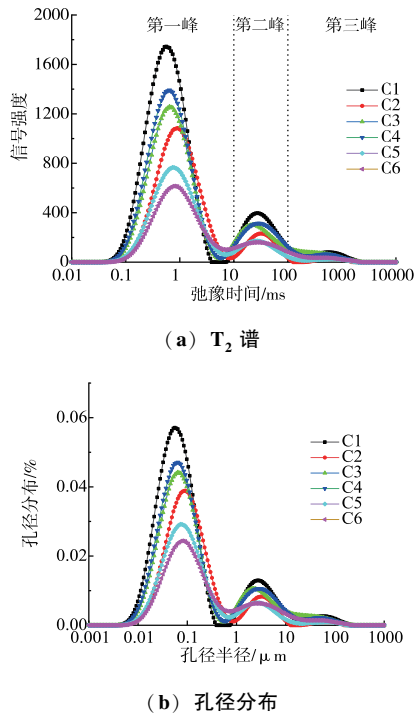


图 4 不同矿物掺合料混凝土 T_2 谱及孔径分布曲线
Fig. 4 T_2 spectrum and pore size distribution curve of concrete with different mineral admixtures

表 10 混凝土核磁共振测试结果
Table 10 Concrete NMR test results

编号	孔隙率/%	第一峰峰顶位置/ms	峰顶对应信号强度/mT	总面积/ms	第一峰面积/ms	第二峰面积/ms	第三峰面积/ms
C1	2.24	0.560 7	1 744.503	657 33	536 35	9 468	2 630
C2	1.45	0.911 6	1 084.774	398 71	342 10	4 948	713
C3	1.76	0.644 2	1 257.389	497 72	396 03	7 485	2 683
C4	1.85	0.644 2	1 391.947	543 78	440 48	8 025	1 129
C5	1.21	0.740 2	766.732	301 83	252 11	4 154	817
C6	1.09	0.793 4	615.2205	270 04	210 05	4 497	1 501

3 结论

- （1）矿物掺合料在单掺、双掺、三掺等掺入高强机制砂混凝土中，对混凝土力学性能和工作性能均影响不大。56 d 时，三掺可提高混凝土的抗压强度，粉煤灰对混凝土的工作性能改善效果最为显著。
- （2）与基准组混凝土 C1 相比，在 高强机制砂混凝土中掺入粉煤灰、矿粉、硅灰等胶凝材料在单掺、双掺、三掺时均能有效抑制高强机制砂混凝土的早期收缩和开裂。其中，掺入矿物掺合料在三掺时 C6 对降低混凝土早期收缩和开裂效果最有效，收缩降低了 62.48%，裂缝降低系数为 45.97%。
- （3）矿物掺合料的掺入使高强机制砂混凝土整体孔隙率减小，有效改变混凝土内部孔隙结构，抑制了混凝土内部大孔隙的产生。

参 考 文 献

[1] 张凌强, 陈倩, 黄兴, 等. 石粉含量对 C50 花岗岩机制砂混凝土性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39 (7): 2154-2158, 2177.

[2] 杨海成, 陈灿, 范志宏. 花岗岩机制砂石粉对 C80 高强高性能混凝土性能的影响及机理研究 [J]. 水运工程, 2021 (11): 13-20, 49.

[3] 汪丽娟, 乔宏霞, 刘志超, 等. 不同替代率下玄武岩机制砂混凝土性能影响试验研究 [J]. 中国矿山工程, 2021, 50 (6): 54-58.

[4] 黄天勇, 常宇, 房桂明, 等. 高强高性能混凝土收缩调控的研究进展 [J]. 混凝土世界, 2020 (9): 47-50.

[5] 陈海明, 黄凌量, 沈朋辉, 等. 水胶比对高强砂浆早期收缩特性的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2018, 37 (4): 1399-1403, 1429.

[6] 于本田, 陈延飞, 王焕, 等. 大掺量高吸附性石粉高强机制砂混凝土收缩开裂抑制试验 [J]. 复合材料学报, 2021, 38 (8): 2625-2634.

[7] 李飞, 詹炳根. 内养护剂、膨胀剂、减缩剂对高强混凝土早期收缩的影响 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2016, 39 (9): 1254-1259.

[8] 罗雷, 郭旻旻, 李寅明, 等. 碳中和下水泥行业低碳发展技术路径及预测研究 [J]. 环境科学研究, 2022, 135 (6): 1527-1537.

[9] 虞虹. 从“水泥生产的碳中和”浅谈现代绿色化学新思想 [J]. 化学教学, 2021 (11): 93-97.

[10] 白玫. 中国水泥工业碳达峰、碳中和实现路径研究 [J].

材料科学

温抗裂性下降。

表 4 不同阻燃剂类型混合料的低温性能
Table 4 Low temperature performance of mixtures
with different types of flame retardants

测试指标	无阻燃剂	HL+ATH	HL+SH	HL+APP
弯拉强度/MPa	9.2	9.0	9.4	8.9
弯曲应变	3 078	2 988	3 055	2 927

2.2.3 水稳定性

研究不同复配阻燃剂对沥青混合料水稳定性影响, 掺加不同阻燃剂 OGFC 沥青混合料马歇尔残留稳定度见表 5。3 种阻燃体系下 OGFC 沥青混合料残留稳定度与无阻燃剂的对照组相比无明显差异, 说明复合阻燃剂掺加不会影响到 OGFC 沥青混合料水稳定性, 在一定程度上甚至会改善沥青混合料水稳定性性能。

表 5 不同阻燃剂类型混合料的残留稳定度
Table 5 Residual stability of mixtures of
different flame retardant types

无阻燃剂	HL+ATH	HL+SH	HL+APP
85.65	86.77	87.21	88.54

2.2.4 疲劳性能

研究不同复配阻燃剂对沥青混合料疲劳性能影响, 掺加不同阻燃剂 OGFC 沥青混合料的疲劳寿命(次)见表 6。

表 6 沥青混合料的疲劳寿命
Table 6 Fatigue life of asphalt mixtures

疲劳寿命	无阻燃剂	HL+ATH	HL+SH	HL+APP
疲劳寿命/次	4 367	4 665	4 580	4 392
比率	1.00	1.07	1.05	1.01

掺加 3 种阻燃体系 OGFC 沥青混合料疲劳寿命略有提高, HL、ATH 和 SH 均呈现碱性, 且 ATH 碱性较强, 提升沥青胶浆相容性, 能够增强沥青与集料黏附性, 改善沥青集料界面受力情况, 在荷载反复作用下减少细观裂缝产生, 从而有效阻止疲劳破坏,

延长混合料疲劳寿命。

3 结论

综合 3 种复配阻燃体系对沥青阻燃性能和 OGFC 沥青混合料路用性能的影响, 结论如下:

(1) 相对于单掺 HL 相比, 3 种类型复配阻燃剂掺加使沥青和混合料阻燃性能均有较大提升, 其中 HL+APP 无机膨胀型复配阻燃剂阻燃性能最佳。

(2) 3 种复配阻燃体系在保证良好阻燃性能的同时, 对混合料高温性能、水稳定性和疲劳性能均略有改善, 但低温性能稍有下降, 在低温地区使用阻燃体系时可结合纤维使用, 既能保证混合料阻燃性能, 也可以中和低温抗裂性下降。

参 考 文 献

[1] 徐斌. 排水性沥青路面理论与实践 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

[2] 魏建国, 谢成, 付其林. 阻燃剂对沥青与沥青混合料性能的影响 [J]. 中国公路学报, 2013, 26 (6): 30-36.

[3] ALICE B, FILIPPO M, GIOVANNA B, et al. Effect of nanoclay and conventional flame retardants on asphalt mixtures fire reaction. 2013, 47: 990-1000.

[4] 兰翔. 隧道温拌阻燃抑烟排水沥青路面材料与性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013.

[5] 李立寒, 邹小龙, 陈春羽, 等. 复配阻燃沥青氧指数和路用性能研究. [J] 建筑材料学报. 2013, 16 (1): 76-80.

[6] 朱凯. 基于沥青多组分燃烧特性的钙基纳米复合阻燃体系研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.

[7] 贺海, 王朝辉, 刘志胜, 等. 新型无机阻燃沥青制备与路用性能研究 [J]. 公路交通科技, 2014, 31 (7): 45-52.

[8] 孙杰. 基于应力控制模式下的沥青混合料疲劳开裂预估模型的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.

(上接第 21 页)

价格理论与实践, 2021 (4): 4-11, 53.

[11] 胡延燕, 何廷树. 石英粉、矿粉对 PHC 管桩混凝土力学性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2016, 35 (11): 3517-3521, 3528.

[12] SURENDER S, RANSINCHUNG GD, PRAVEEN K. Effect of mineral admixtures on fresh, mechanical and durability properties of RAP inclusive concrete [J]. Construction and Building Materials, 2017, 156: 19-27.

[13] 张艺清, 董芸. 粉煤灰和硅粉对水下自密实混凝土性能的影响 [J]. 混凝土, 2021 (10): 133-137.

响 [J]. 混凝土, 2021 (10): 133-137.

[14] 李波, 周海龙, 吕振国, 等. 高强机制砂混凝土工作性及力学性能的试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39 (6): 1765-1771, 1797.

[15] 李福海, 高浩, 唐慧琪, 等. 短切玄武岩纤维混凝土基本性能试验研究. 铁道科学与工程学报, 2022, 19 (2): 419-427.

[16] 王萧萧, 刘畅, 张菊, 等. 常年冻土区混凝土孔隙结冰规律对抗压强度的影响 [J]. 工业建筑, 2021, 51 (9): 197-201.