

矿物外加剂－中热水泥组合胶凝材料的 砂浆基本性能对比

闵永涛¹, 张 勇¹, 王 鹏², 卢浩丹¹, 吴文博¹, 王海婷

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710100;

2. 上海市市政公路工程检测有限公司, 上海 201108)

摘要:为研究不同矿物外加剂与水泥组合胶凝材料的砂浆性能,采用F类Ⅱ级粉煤灰、天然火山灰、S75级矿渣粉,分别以10%、30%和50%这3种掺量取代中热水泥,形成组合胶凝材料,对其水胶比为0.5的砂浆流动度、凝结时间、抗压强度和胶砂比为1:3的水化放热量开展试验研究,比较不同组合胶凝材料的砂浆基本性能。结果表明:当取代量为10%~50%时,掺粉煤灰的砂浆流动度增大3.2%~22.5%,初凝时间延迟11.2%~20.4%、终凝时间延迟13.3%~43.5%,7d水化放热量降低7.4%~39.7%;掺天然火山灰的砂浆流动度减小3.2%~21.9%,初凝时间提前8.4%~24.6%、终凝时间提前5.3%~20.0%,7d水化放热量下降2.9%~25.4%;掺矿渣粉的砂浆流动度减小1.1%~6.4%,初凝时间推迟8.4%~28.8%、终凝时间推迟9.6%~25.1%,7d水化放热量减少4.8%~30.1%。在掺量为10%时,掺粉煤灰的90d龄期胶砂抗压强度与纯水泥的接近,掺矿渣粉的28d和90d龄期抗压强度较纯水泥分别提高1.6%和2.4%,而在其它掺量及龄期时,3种组合胶凝材料的胶砂抗压强度均表现为下降,并随掺量增加强度递减。研究结论可为混凝土工程胶凝材料体系的选择提供参考。

关键词:矿物外加剂;粉煤灰;天然火山灰;矿渣粉;中热水泥;砂浆性能

中图分类号:TV42

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)02-0041-06

doi:10.13402/j.gcjs.2024.02.022

Comparison of the basic properties of mortar of mineral admixture-medium-heat cement combination cementitious materials

MIN Yongtao¹, ZHANG Yong¹, WANG Peng², LU Haodan¹, WU Wenbo¹, WANG Haiting¹

(1. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710100 Shannxi, China;

2. Shanghai municipal & highway testing company Ltd., Shanghai 201108, China)

Abstract: In order to study the mortar performance of different mineral admixtures and cement composite cementitious materials, F class II fly ash, natural Volcanic ash, and S75 slag powder are used to replace medium heat cement with 10%, 30%, and 50% respectively to form composite cementitious materials. Experimental studies are carried out on the fluidity, setting time, compressive strength, and hydration heat release of mortar with a water binder ratio of 0.5, and a cement sand ratio of 1:3, and the basic properties of mortar with different combinations of cementitious materials are compared. The results show that when the substitution amount is 10%~50%, the fluidity of the mortar mixed with fly ash increases by 3.2%~22.5%, the initial setting time is delayed by 11.2%~20.4%, the final setting time is delayed by 13.3%~43.5%, and the hydration heat release after 7 days is reduced by 7.4%~39.7%; The fluidity of mortar mixed with natural Volcanic ash decreased by 3.2%~21.9%, the initial setting time was 8.4%~24.6% ahead, the final setting time was 5.3%~20.0% ahead, and the hydration heat release in 7 days decreased by 2.9%~25.4%; The fluidity of mortar mixed with slag powder decreased by 1.1%~6.4%, the initial setting time is delayed by 8.4%~28.8%, the final setting time was delayed by

收稿日期: 2023-04-11

作者简介: 闵永涛(1984—),男,高级工程师,从事水工混凝土及材料试验研究。

9.6% ~ 25.1% , and the hydration heat release in 7 days was reduced by 4.8% ~ 30.1% . At a dosage of 10% , the compressive strength of the 90 day old mortar mixed with fly ash is close to that of pure cement. The compressive strength of the 28 day and 90 day old mortar mixed with slag powder is increased by 1.6% and 2.4% , respectively, compared to pure cement. However, at other dosages and ages, the compressive strength of the mortar of the three combination cementitious materials shows a decrease, and the strength decreases with the increase of the dosage. The research conclusion can provide reference for the selection of cementitious material systems in concrete engineering.

Key words: mineral admixtures; fly ash; natural volcanic ash; slag powder; medium heat cement; mortar performance

优质矿物外加剂可以有效提高混凝土的和易性和耐久性^[1]。同时,矿物外加剂的应用也具有重要的环境效应和技术经济价值。近年来,由于基础建设的快速发展,混凝土的需求量不断增加,从而加大了对能源和自然资源的消耗。随着国家“双碳”目标的提出,以常见的矿物外加剂材料为基础的节能环保新型矿物外加剂材料成为了研究热点^[2-4],这对提高混凝土性能和资源可持续利用起到重要作用。但由于不同矿物外加剂之间的性能差异,致使其与水泥基材料混合后的胶凝材料性能表现各不相同。张佳阳等^[5]研究结果显示,粉煤灰对水泥的代替量与水泥净浆流动性呈负相关性,石灰石粉对水泥的代替量与水泥净浆流动性呈线性增加。闫浩康等^[6]认为,掺入适量的粉煤灰对提高改性硫氧镁水泥早期强度效果明显优于掺矿渣粉。赵忠^[7]发现,与偏高岭土和硅灰相对比,混合矿渣粉的胶凝材料强度最高,碱度最低。所以有必要对不同矿物外加剂与水泥组合胶凝材料的性能进行研究。

在混凝土中,由胶凝材料、水、细骨料组成的砂浆体,对粗骨料间的孔隙起到填充和包裹作用,赋予了混凝土拌和物一定流动性和黏聚性。在混凝土硬化过程中,砂浆体又与粗骨料胶结为一体,使混凝土能够形成一定强度,产生耐久性能。因此,研究矿物外加剂与水泥组合胶凝材料的砂浆性能,

有助于改善和提高混凝土的性能。然而,由于矿物外加剂与水泥之间的相互影响较为复杂,目前,关于矿物外加剂对砂浆性能的影响研究成果尚存在不同的观点。梁荣创等^[8]研究发现,硅灰掺量在 5% 以下时,砂浆流动度呈平缓下降趋势。但腾银见等^[9]认为,硅灰掺量 5% 以下时砂浆砂流动度比基准砂浆流动度更大。谢群等^[10]研究结果显示,粉煤灰的掺量与砂浆流动性成递增,而张烨等^[11]研究结果却得出了相反的规律。可见,不同矿物外加剂对砂浆性能的影响研究结论并不一致。为探究不同矿物外加剂与中热水泥组合胶凝材料的砂浆性能差异,采用 F 类 II 级粉煤灰、天然火山灰、S75 级矿渣粉这 3 种矿物外加剂,分别以 10%、30% 和 50% 的掺量等量取代中热水泥展开试验研究,比较 3 种矿物外加剂与中热水泥组合胶凝材料砂浆的流动性、凝结时间、抗压强度及水化放热量指标,以期混凝土工程选择和使用矿物外加剂的种类及掺量提供参考。

1 试验概况

1.1 材料

采用 P·MH42.5 级中热水泥、F 类 II 级粉煤灰、天然火山灰、S75 级矿渣粉。水泥和各矿物外加剂基本质量指标如表 1 所示,主要化学成分如表 2 所示。试验砂采用中国 ISO 标准砂。

表 1 基本质量指标

种类	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	安定性	凝结时间/min		抗压强度/MPa			28 d 强度 活性指数/%
			初凝	终凝	3 d	7 d	28 d	
水泥	298	合格	185	260	25.9	31.2	51.5	—
粉煤灰	290	合格	—	—	—	—	—	79
天然火山灰	395	合格	—	—	—	—	—	67
矿渣粉	410	合格	—	—	—	—	—	88

表2 主要化学成分(质量分数) %

指标	水泥	粉煤灰	天然火山灰	矿渣粉
SiO ₂	20.55	64.01	56.80	35.26
Al ₂ O ₃	4.26	19.75	13.38	11.89
Fe ₂ O ₃	5.85	8.75	4.67	0.88
CaO	61.00	3.61	5.74	39.51
MgO	4.69	0.88	2.00	5.89
SO ₃	1.24	0.21	0.20	0.45
Na ₂ O	0.17	0.60	2.71	0.61
K ₂ O	0.23	0.10	3.62	0.53

1.2 方案

3种矿物外加剂与中热水泥组合方案如表3所示。

表3 组合方案 %

方案编号	掺量			
	水泥	粉煤灰	天然火山灰	矿渣粉
A	100	0	0	0
B-1	90	10	0	0
B-2	70	30	0	0
B-3	50	50	0	0
C-1	90	0	10	0
C-2	70	0	30	0
C-3	50	0	50	0
D-1	90	0	0	10
D-2	70	0	0	30
D-3	50	0	0	50

1.3 试验

砂浆流动性测试,按《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2005)^[12]进行;抗压强度试件尺寸为40 mm×40 mm×160 mm,试验按《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—2021)^[13]进行;砂浆凝结时间,按《建筑砂浆基本性能试验方法》(JGJ/T 70—2009)^[14]的要求测定;水化放热量试验,依据《水泥水化热测定方法》(GB/T 12959—2008)^[15]“代用法”测定。

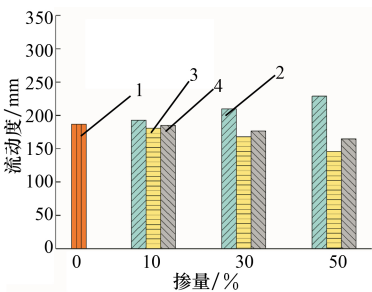
砂浆流动性、抗压强度及凝结时间试验,均采用固定水胶比为0.5,质量配合比为水:水泥:砂=225 mL:450 g:1 350 g。砂浆水化放热量试验,采用胶砂比为1:3,即胶凝材料为450 g,砂为1 350 g,用水量采用不同矿物外加剂与水泥组合胶凝材料的标准稠度用水量。试验在温度为18~22℃,相

对湿度在50%~60%的环境条件下进行。

2 结果及讨论

2.1 砂浆流动性

砂浆流动性试验结果对比如图1所示。



1—中热硅酸盐水泥;2—掺粉煤灰;
3—掺火山灰;4—掺矿渣粉。

图1 砂浆流动性试验结果对比

分析图1可知:当矿物外加剂对水泥的取代量由10%增加到50%时,掺粉煤灰的砂浆流动度增大3.2%~22.5%;掺天然火山灰的砂浆流动度减小3.2%~21.9%;掺矿渣粉的砂浆流动度减小1.1%~6.4%,说明矿物外加剂与中热水泥组合,对砂浆流动性影响差异较大。其中,粉煤灰-中热水泥组合胶凝材料砂浆具有良好的流动性,并且砂浆流动性能随粉煤灰取代量递增;天然火山灰/矿渣粉-中热水泥组合胶凝材料的砂浆流动性相对较差,且掺量越高,流动性下降越明显。

原因分析:矿物外加剂在代替部分水泥后,与水泥形成了新的胶凝体系,由于不同矿物外加剂的粒径和颗粒形态不同,使得胶凝体系结构发生了较大变化^[16]。粉煤灰的比表面积接近中热水泥,其粒径对流动性影响不大,然而粉煤灰的球体形态在砂浆中起到了滚珠作用,减少了砂浆体内的内摩擦,提高了砂浆流动性,并且随着代替量增加,滚珠作用越加明显,因此对结果的影响更加显著。而天然火山灰和矿渣粉的比表面积要比中热水泥大得多,制备单位体积的砂浆需要更多的水,导致砂浆流动性降低。另一方面,天然火山灰的扁平 and 蜂窝形貌以及多棱角结构^[17]、矿渣粉的岩状颗粒和不均匀分布特性^[18],增大了水泥砂浆浆体内部摩擦力,这可能也是导致砂浆流动性降低的原因之一。

2.2 砂浆凝结时间

不同组合胶凝材料的砂浆凝结时间对比如图 2 所示。

由图 2 可知：与纯水泥相比，当矿物外加剂对水泥的取代量由 10% 增加到 50% 时，掺粉煤灰的砂浆初凝时间延迟 11.2% ~ 20.4%，终凝时间延迟 13.3% ~ 43.5%；掺天然火山灰的砂浆初凝时间提前 8.4% ~ 24.6%，终凝时间提前 5.3% ~ 20.0%；掺矿渣粉的砂浆初凝时间推后 8.4% ~ 28.8%，终凝时间推后 9.6% ~ 25.1%。由此可以看出，掺入粉煤灰和矿渣粉可推迟中热水泥砂浆的凝结时间，而掺入天然火山灰使中热水泥砂浆的凝结时间提前，并且随着粉煤灰、矿渣粉的取代量增加凝结时间递增，随天然火山灰的取代量增加凝结时间递减。这是因为矿渣粉和粉煤灰代替部分水泥后，减缓了水泥水化和 C-S-H 凝胶形成的速率^[19]，使水泥的凝结时间延迟，并且取代量越大延迟越明显。掺入天然火山灰对水泥砂浆凝结时间的缩短作用，可能与其自身的高碱含量和有效孔径、色散力以及表面粗糙度有关^[20]。

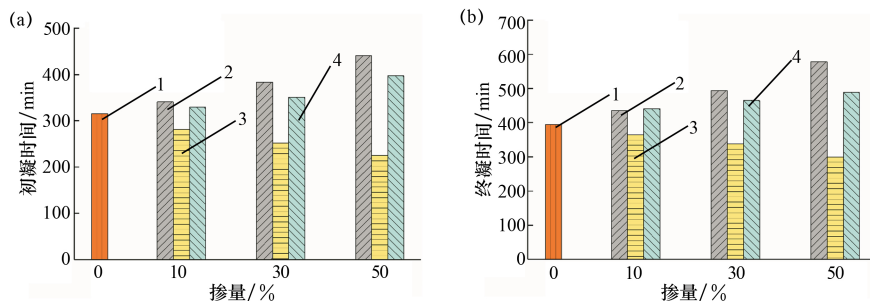
对比 3 种组合胶凝材料，在相同取代量时，掺粉煤灰的砂浆凝结时间最长，掺矿渣粉的次之，而掺天然火山灰的砂浆凝结时间最短。

2.3 抗压强度

矿物外加剂与中热水泥组合胶凝材料的胶砂抗压强度对比如图 3 所示。

分析图 3(a) 可知：与纯水泥相比，取代量为 10% ~ 50% 时，掺粉煤灰的胶砂 3 d 龄期抗压强度降低 9.1% ~ 50.6%；7 d 龄期抗压强度下降 13.4% ~ 47.7%；28 d 龄期抗压强度下降 6.4% ~ 42.8%，90 d 龄期抗压强度下降 1.7% ~ 28.2%。由此可以看出，粉煤灰-中热水泥组合胶凝材料的胶砂抗压强度随粉煤灰取代量增加呈下降趋势，但随着龄期增长，抗压强度下降趋势逐渐减小，并且在 90 d 龄期时，掺量为 10% 的抗压强度与纯水泥的抗压强度接近。

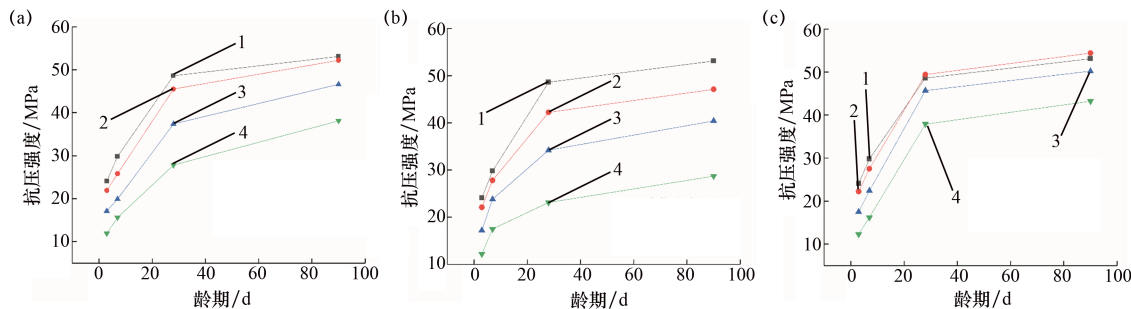
分析图 3(b) 可知：与纯水泥相比，取代量为 10% ~ 50% 时，掺天然火山灰的 3 d 龄期胶砂抗压强度降低 8.3% ~ 49.4%；7 d 龄期抗压强度下降 6.7% ~ 41.3%；28 d 龄期抗压强度减少 13.2% ~



(a) 初凝时间；(b) 终凝时间

1—中热硅酸盐水泥；2—掺粉煤灰；3—掺火山灰；4—掺矿渣粉。

图 2 砂浆凝结时间对比



(a) 粉煤灰-中热水泥；(b) 天然火山灰-中热水泥；(c) 矿渣粉-中热水泥

1—中热硅酸盐水泥；2—掺量 10%；3—掺量 30%；4—掺量 50%。

图 3 胶砂抗压强度对比

52.5%、90 d龄期抗压强度降低11.3%~46.0%。由此表明,天然火山灰-中热水泥组合胶凝材料的胶砂抗压强度随天然火山灰的取代量增加有明显降低。

分析图3(c)可知:与纯水泥相比,取代量为10%~50%时,3 d龄期胶砂抗压强度降低7.9%~49.0%;7 d龄期抗压强度下降7.7%~45.6%;但当取代量为10%时,28 d龄期抗压强度提高1.6%,90 d龄期抗压强度提高2.4%,而在另外两种取代量时,抗压强度均表现为下降,并且随取代量增加强度递减。由结果分析可以看出,矿渣粉-中热水泥组合胶凝材料的3 d和7 d龄期胶砂抗压强度随取代量增加下降较为明显。当试验龄期为28 d、90 d时,取代量为10%的胶砂抗压强度较纯水泥略有增长,但当代替量进一步增大时,强度呈下降趋势。

2.4 水化放热量对比

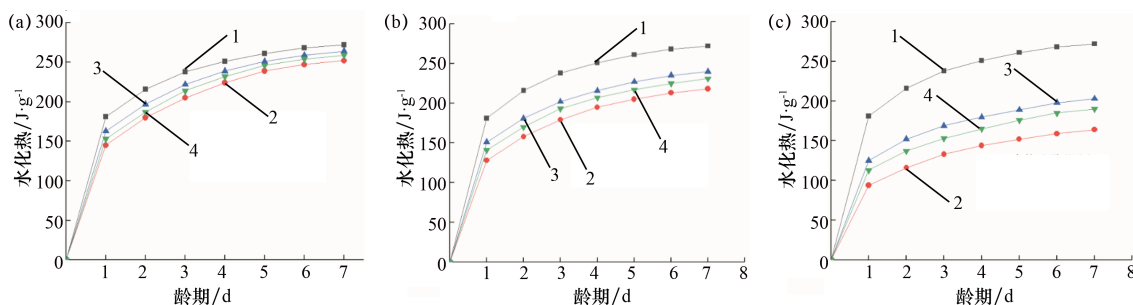
组合胶凝材料的砂浆水化放热量对比如图4所示。分析图4可知:1~3 d龄期时,各组合胶凝材料的砂浆水化放热量上升较为明显,而在3 d龄期之后水化放热速度趋于缓慢。相对于纯水泥,当矿物外加剂取代量由10%增加到50%时,掺粉煤灰的组合胶凝材料,1 d龄期水化放热量降低19.9%~48.1%,3 d龄期水化放热量降低13.9%~44.1%,7 d龄期水化放热量降低7.4%~39.7%;掺天然火山灰的组合胶凝材料,1 d龄期水化放热量降低9.9%~30.9%,3 d龄期水化放热量降低6.7%~29.0%,7 d龄期水化放热量降低2.9%~25.4%;掺矿渣粉的组合胶凝材料,1 d龄期水化放热量降低15.5%~37.6%,3 d龄期水化放热量

降低10.1%~35.7%,7 d龄期水化放热量降低4.8%~30.1%。

由分析结果可以看出,3种矿物外加剂对水泥水化放热量的影响规律基本相同,均对降低水泥水化放热量有积极作用,特别是对1~3 d龄期的水泥水化放热量降低幅度比较明显,而在3 d龄期后,矿物外加剂对水泥砂浆水化放热量降低幅度逐渐减小。这可能是由于部分水泥被矿物外加剂取代后,减少了水泥中熟料的含量,使水化的速度有所降低,而且在水化前期,矿物外加剂很少参与其中,因此在水化早期的降低效果显著。随着龄期增加,水泥中的熟料进一步水化,同时,由于粉煤灰、天然火山灰和矿渣粉的活性作用,会产生一定量的水化热,使得胶凝材料放热量降低作用在3 d龄期后逐渐减小。从胶凝材料水化放热量来看,在相同取代量时,粉煤灰-中热水泥组合胶凝材料水化放热量最小,其次是矿渣粉-中热水泥,而天然火山灰-中热水泥组合胶凝材料的水化放热量相对要高一些。

3 结 论

(1) 3种矿物外加剂对砂浆流动度和凝结时间影响差异较大,当掺量为10%~50%时,掺粉煤灰的砂浆流动度增大3.2%~22.5%,砂浆的初凝时间延迟11.2%~20.4%,终凝时间延迟13.3%~43.5%;掺天然火山灰的砂浆流动度降低3.2%~21.9%,砂浆初凝时间提前8.4%~24.6%,终凝时间提前5.3%~20.0%;掺矿渣粉的砂浆流动度减小1.1%~6.4%,砂浆初凝时间推迟8.4%~28.8%,终凝时间推迟9.6%~25.1%。



代替量/%: (a) 10; (b) 30; (c) 50

1—中热硅酸盐水泥; 2—掺粉煤灰; 3—掺火山灰; 4—掺矿渣粉。

图4 水化放热量对比

(2) 掺粉煤灰的胶砂抗压强度随粉煤灰取代量增加呈下降趋势,但随着龄期增长,强度下降趋势逐渐减小,并在 90 d 龄期时,取代量为 10% 的抗压强度与纯水泥的接近。掺天然火山灰的胶砂抗压强度随取代量增加,各龄期强度均有明显降低。掺入 10% 的矿渣粉,28 d、90 d 龄期胶砂抗压强度较纯水泥分别提高 1.6%、2.4%,但在另外两种取代量及其它龄期时,抗压强度均表现为下降,并且随取代量增加强度递减。

(3) 3 种矿物外加剂对降低水泥水化热有积极作用。在 3 种取代量下,掺入粉煤灰,1 d 水化放热量降低 19.9%~48.1%,3 d 水化放热量降低 13.9%~44.1%,7 d 水化放热量降低 7.4%~39.7%,掺入天然火山灰 1 d 龄期水化放热量降低 9.9%~30.9%,3 d 水化放热量降低 6.7%~29.0%,7 d 水化放热量降低 2.9%~25.4%;掺入矿渣粉 1 d 水化放热量降低 15.5%~37.6%,3 d 水化放热量降低 10.1%~35.7%,7 d 水化放热量降低 4.8%~30.1%。

(4) 在相同条件下,粉煤灰-中热水泥组合胶凝材料的砂浆流动性能较好,水化放热量低,但砂浆凝结时间长,早龄期的胶砂抗压强度较低;天然火山灰-中热水泥组合胶凝材料的砂浆流动性能较差,凝结时间较短,水化放热量相对较高;矿渣粉-中热水泥组合胶凝材料的砂浆流动性及水化放热量不如掺粉煤灰的优,但砂浆后期强度相对较高。

参考文献:

- [1] 张骏,田帅,梁丽敏,等. 矿物掺合料对混凝土早期收缩及开裂性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品,2018(9):16-19.
- [2] 王浩,谭盐宾,张国然,等. 流纹岩微粉对梁体混凝土性能的影响研究[J]. 铁道建筑,2022,62(6):104-107.
- [3] 田景松,刘枫,王璞,等. 白云石粉对混凝土性能影响的研究[J]. 混凝土世界,2022(4):55-60.
- [4] 杨佳彭. 偏高岭土在白色硅酸盐水泥混凝土中的效应[J]. 混凝土,2022(6):185-188,192.
- [5] 张佳阳,申向东. 粉煤灰、石灰石粉复掺对水泥净浆工作性能的影响[J]. 材料导报,2014,28(4):140-144.
- [6] 闫浩康,王硕,时绪智,等. 不同矿物掺合料对改性硫氧镁水泥性能影响的研究[J]. 硅酸盐通报,2022,41(1):27-32.
- [7] 赵忠. 矿物掺和料对水泥物理化学性能的影响研究[J]. 山西交通科技,2022(3):26-29.
- [8] 梁荣创,孙海燕,董新越,等. 硅灰对胶砂性能影响的试验研究[J]. 人民珠江,2022,43(3):90-95.
- [9] 腾银见,种娜,张雨晴,等. 矿物掺合料对低水胶比水泥砂浆性能的影响[J]. 广东土木与建筑,2021,28(12):92-96.
- [10] 谢群,李海波,王火明. 矿物掺合料对水泥砂浆性能的影响[J]. 中外公路,2021,41(3):291-294.
- [11] 张焯,张海涛. 粉煤灰、石灰石和矿渣对水泥流动性和力学性能的影响[J]. 河南建材,2010(6):42-44.
- [12] 水泥胶砂流动度测定方法:GB/T 2419—2005[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [13] 水泥胶砂强度检验方法(ISO法):GB/T 17671—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.
- [14] 建筑砂浆基本性能试验方法:JGJ/T 70—2009[S]. 北京:中国工业出版社,2009.
- [15] 水泥水化热测定方法:GB/T 12959—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [16] 卞立波,刘梦珠,王琴,等. 高掺矿物掺合料对复合胶凝材料强度、水化热和孔结构的影响[J]. 硅酸盐通报,2019,38(9):2713-2718.
- [17] 毕亚丽,刘艳,张勇. 粉煤灰和天然火山灰对胶砂性能影响对比试验研究[J]. 西北水电,2012(1):70-72.
- [18] 吕利华,闫旭. 矿物掺合料对水泥胶浆流变性能的影响[J]. 山西建筑,2015,41(22):126-128.
- [19] 廖宜顺,沈晴,徐鹏飞,等. 粉煤灰对水泥基材料水化过程电阻率的影响研究[J]. 材料导报,2019,33(8):1335-1339.
- [20] 胡钊光,夏京凉,裴岩,等. 肯尼亚天然火山灰质材料对混凝土凝结特性的影响研究[J]. 混凝土,2015,(9):94-96,100.