

石粉对水泥净浆流变性能的影响研究*

Study on the Effect of Stone Powder on Rheological Properties of Cement Paste

杨奕菲, 刘嘉良, 巩璇, 周理安, 李飞

(北京建筑大学 北京节能减排与城乡可持续发展省部共建协同创新中心, 北京 100044)

摘要: 为探究石粉对水泥基材料工作性能和凝结硬化的影响, 开展了不同岩性石粉对水泥净浆流动度和凝结时间影响的试验研究, 分析了掺石粉水泥净浆的流变性能及触变性经时变化特性, 分析了石粉亚甲蓝值 (MB 值) 对水泥净浆工作性能的影响规律。研究表明: 水泥净浆流动度随着石粉 MB 值的增大而减小, 水泥净浆的塑性粘度和屈服应力与石粉 MB 值存在较好的线性相关性; 石灰石等碳酸盐类石粉的加入可缩短水泥净浆的凝结时间, 花岗岩等硅酸盐类石粉的加入会延长水泥净浆的凝结时间。

关键词: 石粉; 工作性能; 流变特性; 凝结时间

中图分类号: TU525 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 06-0105-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.06.017

YANG Yifei, LIU Jialiang, GONG Xuan, ZHOU Lian, LI Fei

(Beijing Energy Conservation & Sustainable Urban and Rural Development Provincial and
Ministry Co-construction Collaboration Innovation Center, Beijing 100044, China)

Abstract: Experimental studies were carried out on the influence of workability and setting time with the use of different lithology stone powder in cement-based materials. The time-dependent rheological properties and thixotropy of cement paste with stone powder were analyzed. The influence of methylene blue value (MB value) of stone powder on the workability of cement paste was also studied. The results show that the fluidity of cement paste decreases with the increase of the MB value of stone powder, and the plastic viscosity and yield stress of cement paste have a good linear correlation with the MB value of stone powder. The use of carbonate stone powders such as limestone can shorten the setting time of cement paste, while the silicate stone powders such as granite can prolong the setting time of cement paste.

Keywords: stone powder; workability; rheological properties; setting time

0 引言

随着我国基建事业的发展, 粉煤灰、粒化高炉矿渣矿粉等活性掺合料供应日益紧张, 同时随着机制砂的应用, 产生了大量石粉, 从而加重环境负担。本文开展了石粉对水泥基材料流变性能的影响研究, 旨在解决机制砂石粉废料的处理和活性矿物掺合料供应短缺的问题。已有研究^[1-2]表明, 石灰石粉掺入混凝土中可以起到良好的密实

* 基金项目: 北京节能减排与城乡可持续发展省部共建协同创新中心资助项目 (Supported by ECERC)。

作者简介: 杨奕菲 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事水泥基材料研究。

通信作者: 李飞 (1981—), 博士, 教授, 研究方向: 建筑垃圾资源化

收稿日期: 2023-09-19

材料科学

填充作用,对水泥基材料工作性的改善作用显著。但目前研究大多集中在石灰石粉,对花岗岩等其他岩性的石粉研究较少。本文选取五种不同类型的石粉,围绕其对水泥净浆性能的影响展开研究。

1 试验

1.1 试验原材料

本试验中使用的水泥为北京金隅公司生产的 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,水泥性能符合 GB175-2007《通用硅酸盐水泥》要求,基本性能试验结果见表 1。

本试验用石粉由五种不同的岩石经球磨机粉磨而成,分别为石灰岩、白云岩、凝灰岩及两种不同花岗岩(本文记为花岗岩 a、花岗岩 b 以区分)。石粉 MB 值采用 GB/T30190-2013《石灰石粉混凝土》的方法测定,测试结果如表 2 所示。

本试验用外加剂为聚羧酸减水剂,固含量为 20%。

表 1 水泥基本性能试验结果
Table 1 Basic performance test results of cement

比表面积 (m ² /kg)	初凝时间 /min	终凝时间 /min	3 d 抗折 /MPa	3 d 抗压 /MPa	28 d 抗折 /MPa	28 d 抗压 /MPa
361	126	243	4.2	25.5	7.7	46.5

表 2 石粉 MB 值测试结果
Table 2 MB value test results of stone powder

种类	花岗岩 a	花岗岩 b	石灰岩	白云岩	凝灰岩
MB 值/(ml/g)	1.6	2.1	0.8	0.5	1.0
标准稠度用水量/%	28.8	29.3	28.8	28.8	29.5

1.2 试验方法

(1) 凝结时间:含石粉的水泥净浆的凝结时间按(GB/T1346-2011)《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》测定。

(2) 流动度:参照(GB/T8077-2012)《混凝土外加剂均质性试验方法》分别按 20% 的掺量替代水泥做净浆试验,研究石粉对水泥净浆流动度及经时流动度损失的影响。

(3) 流变性能:采用美国 BROOKFIELD 生产的 RST-SST 型 Rheo3000 旋转流变仪,测试得到剪切应力随剪切速率的变化趋势,测试的过程主要分为两个阶段:预剪切阶段、数据测试阶段。进行预剪切的目的是让各个净浆在流变测试前应保持一致的剪切状态。在测试净浆剪切应力曲线时,

测试过程中转子剪切速率要在第一个 250 s 内先由 5 r/min 加速到 150 r/min,在第二个 250 s 内由 150 r/min 降至 5 r/min,其中第一个 250 s 为预剪切阶段,第二个 250 s 为数据采集阶段,每 10 s 捕捉一个数据点,由此可得剪切速率-剪切应力的上行和下行关系曲线,对下行曲线的试验数据使用常见的宾汉姆流变模型进行拟合。

2 结果与讨论

2.1 石粉对净浆流动度的影响

为研究不同岩性石粉对新拌水泥净浆的流动度以及经时流动损失的影响,试验固定配合比不变,以石粉的岩性种类为变量,对比石灰岩、花岗岩 a、花岗岩 b、白云岩、凝灰岩五种不同岩性石粉水泥净浆流动度的差异,其中石粉掺量均为 20%,试验配合比设计及试验结果如表 3 所示。

表 3 水泥净浆配合比及试验结果
Table 3 Mix proportion of cement paste and test results

编号	石粉种类	MB 值	水泥/g	石粉/g	水/g	水胶比	外加剂/%	流动度/mm
1	基准组		200	0	70	0.35	0.5	165
2	石灰岩	0.8	160	40	70	0.35	0.5	177
3	白云岩	0.5	160	40	70	0.35	0.5	178
4	凝灰岩	1.0	160	40	70	0.35	0.5	145
5	花岗岩 a	1.6	160	40	70	0.35	0.5	140
6	花岗岩 b	2.1	160	40	70	0.35	0.5	155

结合表 3 和图 1 可知,石灰岩等钙质石粉较凝灰岩、花岗岩等硅质石粉,MB 值总体偏低,钙质石粉净浆流动度明显高于硅质石粉。这与李科成等人的研究一致^[3]。当不掺加石粉时,净浆流动度为 165 mm,掺加了 20% 石灰石粉和白云石粉时,流动度有不同程度的增加,利于净浆的流动;而当凝灰岩、花岗岩 a 及花岗岩 b 等石粉加入时,流动度均有不同程度的下降,这是因为其在拌合时会吸附净浆中的水和减水剂,导致净浆变稠,不利于净浆流动。而白云岩石粉和石灰岩石粉吸附性较小,且粉粒表面较为圆滑,在新拌净浆中起到“滚珠轴承”的作用,利于净浆流动。MB 值的大小可以反映石粉作为矿物掺合料在新拌净浆中的吸附能力。从而影响净浆的流动度与塑性黏度^[4]。

石灰石粉对减水剂的吸附作用较弱,可使水

泥颗粒更加分散，净浆絮凝结构减少，并且抑制了水泥水化初期的交叉连生^[5]，石粉-水泥净浆的初始流动度较基准组提高了 7%。随着时间的增加，石灰岩石粉-水泥净浆在 30 min、60 min、90 min、120 min 时的流动度分别为 160 mm、135 mm、120 mm 和 100 mm，流动度较初始状态分别下降了 9.6%、23.7%、32.2%、43.5%。这主要是由于石灰岩石粉的填充和分散作用使有效水胶比增大，水泥颗粒更加分散，减少了净浆絮凝结构，提高了初始流动度；而石粉掺量过高时上述促进作用有所减弱^[6]。白云岩与石灰岩石粉对于净浆的影响趋势是相同的，初始流动度较基准组提高了 7.9%，随着时间的增加，净浆流动度也同样呈下降趋势。

随着花岗岩 a 石粉掺量的增加，复合净浆初始流动度下降十分明显，较基准组下降了 15%。花岗岩石粉-水泥净浆在 30 min、60 min、90 min、120 min 时的流动度分别为 112 mm、100 mm、95 mm 和 85 mm。较初始状态分别下降了 20%、29%、32%、39%。初始流动度较基准组降低了 15%，这可能与石粉的组成和颗粒形貌有关，导致经时损失较大。花岗岩 b 对于净浆的影响与花岗岩 a 趋势相同，初始流动度降低，随时间变化的经时流动度也降低。花岗岩石粉含有较多云母，对减水剂吸附量大，使复合胶凝材料净浆工作性能大幅度降低，因此花岗岩石粉掺量不宜过大。

凝灰岩石粉的掺入同样降低了净浆的初始流动度，较基准组下降了 12%。凝灰岩石粉-水泥净浆在 30 min、60 min、90 min、120 min 时的流动度分别为 115 mm、108 mm、103 mm 和 95 mm。较初始状态分别下降了 21%、26%、29%、34%。凝灰岩石粉粒径较大，颗粒分布较宽，粉体堆积时不紧密，因此复合胶凝材料净浆初始流动度降低，但凝灰岩石粉的减水剂吸附率随时间增加，导致复合胶凝材料净浆的经时流动度降低。

如图 1 所示，对比 5 种石粉净浆的经时流动度变化，石灰岩、白云岩两种石粉净浆较其他三种石粉初始流动度较高，但经时损失较大，在 90 min 后流动度反而低于花岗岩 b。凝灰岩及两种花岗岩

石粉净浆虽然初始流动度较低，但经时变化较为稳定，在 2 h 内的大小关系并未改变。

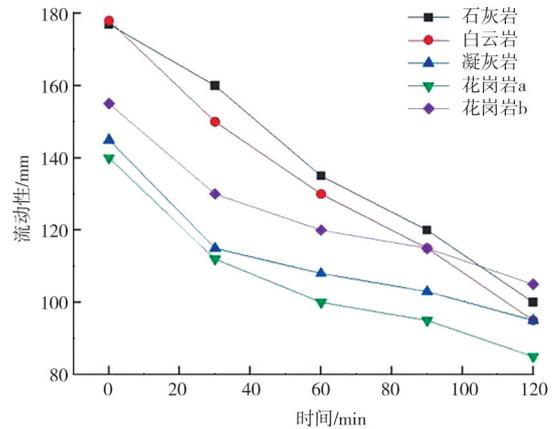


图 1 石粉-水泥净浆流动度经时变化

Fig. 1 Variation of fluidity of stone powder cement paste over time

2.2 石粉对净浆流变特性的影响

水泥净浆流变性能测试结果如图 2 所示，可以看出：不同岩性石粉对净浆的剪切应力-剪切速率曲线的影响是不同的。五种岩性的石粉剪切应力均随剪切速率增大而增大，石灰岩石粉与白云岩石粉颗粒间的斥力作用较强，颗粒更易于分散，可大幅减少水泥净浆中的絮凝结构，降低水泥净浆塑性黏度和屈服应力^[7]。

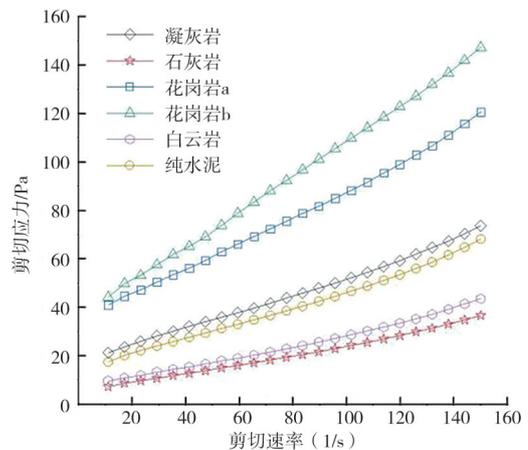


图 2 石粉岩性对净浆剪切应力的影响

Fig. 2 Effect of lithology of stone powder on shear stress of slurry

由图 3、图 4 可知，石粉-水泥净浆在一定程度上，其 MB 值是与屈服应力呈线性关系的，拟合过程中的相关系数为 0.85，MB 值与塑性黏度拟合过程中，相关系数为 0.95，说明相关性较大，石粉的吸附性对净浆的屈服应力与塑性黏度是有影

材料科学

响的,可以通过控制石粉的 MB 值来达到控制净浆屈服应力和塑性黏度在一定范围内的大小,择优选择石粉去替代水泥在净浆中的作用。

石灰岩石粉的加入使净浆的屈服应力与塑性黏度有较大幅度降低。白云岩与石灰岩石粉对于净浆的影响趋势相同,但总体没有石灰岩石粉对净浆两个流变参数变化大。花岗岩 a 和花岗岩 b 石粉对石粉-水泥净浆的屈服应力与塑性黏度的降低幅度较大。凝灰岩石粉-水泥净浆相较于纯水泥净浆,屈服应力下降,而塑性黏度有所增加。

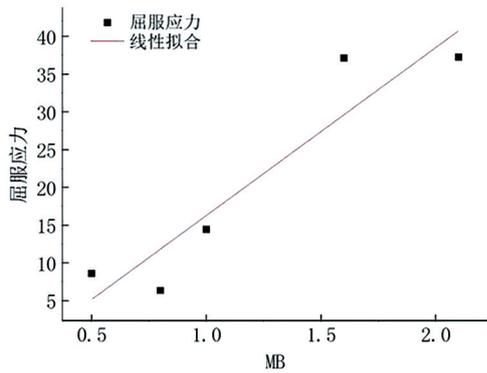


图3 石粉 MB 值对净浆屈服应力的影响

Fig. 3 Effect of MB value of stone powder on yield stress of slurry

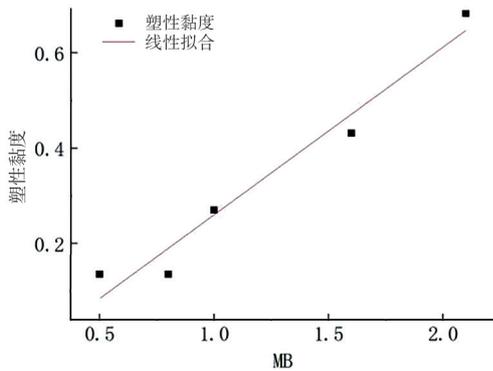


图4 石粉 MB 值对净浆塑性黏度的影响

Fig. 4 Effect of MB value of stone powder on plastic viscosity of slurry

净浆的触变性可以用触变环面积的大小表征,反映净浆产生流动时破坏絮凝结构和网状结构所需能量的大小^[8]。掺加 20% 花岗岩 a 石粉的净浆的流变曲线和触变环面积如表 4 和图 5 所示。由图可知,随着时间的增长,掺量 20% 的花岗岩石粉-水泥净浆的触变环面积呈现逐渐增大的趋势。原因如下:一方面,由于石粉填充在水泥颗粒之间,导致净浆内部颗粒间距变小结构更为紧凑,水泥

颗粒和石粉颗粒在范德华力和静电作用下,更容易形成絮凝结构和网状结构;另外,花岗岩石粉较大的比表面积,为水泥净浆内部的网状结构提供了更多的接触点,使得水泥净浆内部的絮凝结构更加密实稳固。净浆内部的絮凝结构和网状结构越复杂,净浆流动时破坏絮凝结构和网状结构所需要的能量越多,净浆的触变性越强。

表 4 花岗岩 a-石粉净浆触变环面积
Table 4 Thixotropic ring area of cement paste with granite a

时间/min	0	60	120
触变环面积	365	690	861

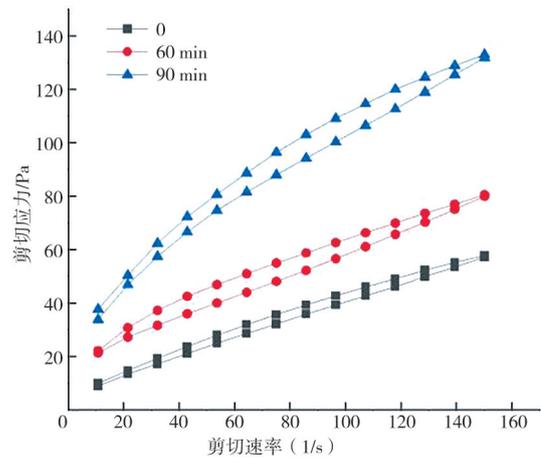


图5 花岗岩 a-石粉净浆两小时经时流变特性变化

Fig. 5 Variation of rheological properties of cement paste with granite a in two hours

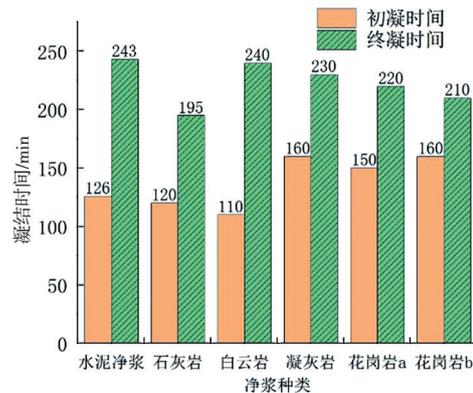


图6 不同石粉对净浆凝结时间的影响

Fig. 6 Effect of different stone powder on setting time of clean slurry

如图 6 可知,石灰岩和白云岩石粉使净浆的初凝和终凝时间均低于基准组。这与魏泽雨^[9]等人的研究结果一致。花岗岩 a 和凝灰岩以及花岗岩

岩 b 石粉延长了净浆的初凝时间，终凝时间略有缩短。石灰岩石粉可降低水泥水化反应的壁垒，促进早期水化产物的生长和沉淀，又可与水泥中的铝相发生化学反应，在晶核作用和化学作用共同影响下，石灰岩石粉及白云岩石粉缩短了净浆的凝结时间，随石粉细度增大，晶核作用和化学作用增强，进一步缩短了凝结时间^[10]；凝灰岩、花岗岩 a 和花岗岩 b 石粉自身活性较低，等质量替代水泥后水化产物 C-S-H 凝胶减少，导致初凝时间增加。进而表现为石灰岩和白云岩的加入缩短了初、终凝时间，凝灰岩、两种花岗岩石粉的加入延长了初凝时间，对终凝时间影响不大。

3 结论

本文通过试验分析不同岩性石粉对新拌水泥净浆性能的影响，得出以下结论：

(1) 石粉 MB 值越大，其吸附性越强，净浆流动度随之减小，且水泥净浆的塑性黏度和屈服应力与石粉 MB 值存在良好的线性相关性。

(2) 掺入 20% 的石灰岩、白云岩石粉可以增大净浆初始流动度，掺入 20% 的凝灰岩和花岗岩会降低净浆初始流动度，但掺石灰岩和白云岩石粉的净浆流动度经时损失较高。

(3) 石灰石粉、白云石粉的加入可以缩短复合净浆的初凝时间与终凝时间。花岗石 1 石粉、凝灰石粉和花岗岩 b 石粉会延长复合净浆的初凝

时间。

参 考 文 献

- [1] 余琴, 黄振兴, 曹养华, 等. 磨细石灰石粉在混凝土中应用的技术探讨 [J]. 混凝土, 2015 (8): 108-111.
- [2] 雷文晗, 赵大军, 程志勇. 石灰石粉作为混凝土矿物掺合料的应用研究进展 [J]. 粉煤灰综合利用, 2013, No. 137 (1): 53-56.
- [3] 李科诚, 赵扬, 夏京亮, 等. 不同岩性机制砂石粉特性研究 [J]. 建材世界, 2018, 39 (3): 38-40+54.
- [4] 董瑞, 沈卫国. 石粉和泥粉对 MB 值的动态关系研究 [J]. 混凝土, 2017 (12): 67-70+74.
- [5] 房桂明, 于涛, 刘传坤, 等. 石灰石粉在聚羧酸外加剂混凝土中的研究与应用 [J]. 混凝土, 2013 (1): 94-96.
- [6] 孙茹茹, 袁政成, 黄法礼, 等. 不同岩性石粉对水泥-石粉复合净浆工作性能的影响 [J]. 铁道建筑, 2020, 60 (11): 153-158.
- [7] 张倩倩, 张丽辉, 冉千平, 等. 石灰石粉对水泥净浆流变性能的影响及作用机理 [J]. 建筑材料学报, 2019, 22 (5): 680-686.
- [8] 唐修生, 蔡跃波, 温金保, 等. 磨细矿渣复合净浆流变参数与流动度的相关性 [J]. 硅酸盐学报, 2014, 42 (5): 648-652.
- [9] 魏泽雨, 边延伟, 陈占虎, 等. 超细石粉对水泥基材料性能影响的研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2017, No. 166 (6): 27-30.
- [10] 史才军, 王德辉, 贾煌飞, 等. 石灰石粉在水泥基材料中的作用及其耐久性的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2017, 45 (11): 1582-1593.