

石灰石粉对水泥浆体水化特性及流变性能的影响

苗苗^{1†}, 雪凯旺¹, 苗芳², 姜洪伟²

(1.重庆大学材料科学与工程学院,重庆 400045;2.国网营口供电公司,辽宁 营口 115000)

摘要:利用微量热仪和旋转黏度计,从掺量和细度两方面研究了石灰石粉对水泥浆体水化特性和流变性能的影响.从水化放热速率和放热量角度分析了石灰石粉对水化特性的影响,从紧密堆积理论和固体颗粒体积分数两个角度分析石灰石粉对流变性能的影响.结果表明:石灰石粉可以促进体系的水化进程,且石灰石粉细度越大,促进作用越明显.石灰石粉掺量增大导致水泥含量减少,所以体系第二放热峰峰值和总放热量随石灰石粉掺量的增大而减小.随着石灰石粉掺量或细度的增加,复合体系中固体颗粒的体积分数逐渐增大,粒径分布模数减小,且体系的粒度分布曲线逐渐接近于最密堆积的理想分布曲线.复合体系的屈服应力和塑性黏度随石灰石粉掺量的增大而减小,随石灰石粉细度的增大而增大.

关键词:石灰石粉;水化特性;流变性能

中图分类号:TU528

文献标志码:A

Influence of Limestone Powder on Hydration Characteristics and Rheological Properties of Cement Paste

MIAO Miao^{1†}, XUE Kaiwang¹, MIAO Fang², JIANG Hongwei²

(1.College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
2.State Grid Yingkou Power Supply Company, Yingkou 115000, China)

Abstract:The influence of limestone powder on the hydration characteristics and rheological properties of cement was studied from two aspects of content and fineness by micro calorimeter and rotational viscometer. The influence of limestone powder on the system hydration was analyzed through the rate of hydration heat evolution and hydration heat, while the influence of limestone powder on the rheological properties was analyzed from two angles of close packing and particle volume fraction. The results show that limestone powder can promote the system hydration process, and the greater fineness of limestone powder results in the more obvious promoting effect. The addition of limestone powder leads to the decrease of cement content, so the second exothermic peak and total heat of the system decrease with the increase of limestone powder content. With the increase of limestone powder content or fineness, the volume fraction of solid particles increases gradually, the particle size distribution modulus decreases, and the particle size distribution curve of composite system is close to the ideal distribution curve gradually. The yield stress and plastic viscosity of composite systems decrease with the increase of limestone powder content, but increase with the increase of limestone powder fineness.

Key words:limestone powder;hydration characteristic;rheological properties

* 收稿日期:2018-03-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51808072),National Natural Science Foundation of China(51808072)

作者简介:苗苗(1982—),女,辽宁大连人,重庆大学讲师,博士

† 通讯联系人,E-mail:miao_thu@126.com

随着混凝土技术的迅速发展,化学外加剂和矿物掺合料已经成为现代混凝土必不可少的组分.掺加矿物掺合料不仅可以节约水泥,降低成本,其颗粒形态效应、微集料效应和活性效应还可以提高新拌混凝土的和易性,改善混凝土的后期强度和耐久性^[1-3].与矿渣、粉煤灰、硅灰等掺合料相比,石灰石粉具有资源储量大、分布广泛、价格低廉等优点,可以带来良好的经济效益和环境效益^[4-10].因此,将石灰石粉用作水泥混合材或混凝土矿物掺合料的研究越来越多.

石灰石粉对水泥体系水化特性影响的研究表明:石灰石粉可以与 C_3A 反应生成碳铝酸钙水化物(主要是单碳铝酸钙水化物)^[11-14];石灰石粉可作为异相成核的成核位点降低成核位垒,能加速体系中 Ca^{2+} 的吸附,并能加速 C_3S 的水化反应^[15-18],从而促进水泥体系早期水化反应的进行,且石灰石粉细度越大以上作用效果越明显^[17].Xu 等^[16]通过微量热仪、差示扫描量热仪、扫描电镜等设备研究了纳米石灰石粉对 C_3S 水化性能的影响.结果表明:掺加质量分数为 1% 的纳米石灰石粉可以有效地加速 C_3S 的水化,减小体系初、终凝时间,改善 $Ca(OH)_2$ 和 C—S—H 凝胶的微观形貌,增加水化产物的致密程度,并提高试样的抗压强度值.Yang 等^[19]通过差热、热重、背散射电子成像等手段研究了经纳米 $CaCO_3$ 改性的石灰石粉对水泥体系水化产物及孔结构的影响.结果表明:掺加改性的石灰石粉可降低体系孔隙率,优化孔结构,提高试样的抗压、抗折强度.

石灰石粉对水泥混凝土流变性能影响的研究表明:石灰石粉的“微集料效应”和“颗粒形态效应”可提高水泥浆体或新拌混凝土的流动性,减少离析、泌水现象^[20-22].加入石灰石粉会降低体系水粉比(体积比)导致水泥净浆的流变性能劣化,而石灰石粉的颗粒级配效应却可以优化水泥净浆的流变性能,且这两方面的作用相互制约^[4];Vikan 等^[23]研究表明,水泥体系的流动阻力和凝胶强度随石灰石粉掺量的增大而减小.肖佳等^[6]通过 H-B 模型拟合浆体的流变曲线,研究了石灰石粉细度对水泥浆体流变性能的影响,结果表明:随着石灰石粉细度增大,水泥浆体动态屈服应力和瞬时结构恢复能力增大,体系新建能和黏度减小.

随着水泥水化反应的进行,浆体体系中水化产物逐渐增多,体系的屈服应力和塑性黏度也随之变化,即体系流变性能的改变可以在一定程度上反映体系早期的水化进程,而体系的水化是体系流变性

能改变的原因之一.因此,本文借助微量热仪和旋转黏度计,从掺量和细度两方面研究石灰石粉对水泥水化特性和体系流变性能的影响,为进一步研究石灰石粉对水泥体系流变性能的经时变化打下基础.

1 实验

1.1 原材料及配合比

水泥:中国联合水泥集团有限公司生产的基准水泥,简记为 C.水泥化学成分见表 1,物理性能见表 2.

表 1 水泥的化学成分

Tab.1 Chemical compositions of cement									%
w_{CaO}	w_{SiO_2}	$w_{Al_2O_3}$	$w_{Fe_2O_3}$	w_{MgO}	w_{SO_3}	$w_{Na_2O_{eq}}$	w_{f-CaO}	w_{LOI}	
64.40	21.62	4.35	3.45	3.45	2.25	0.50	0.90	1.25	

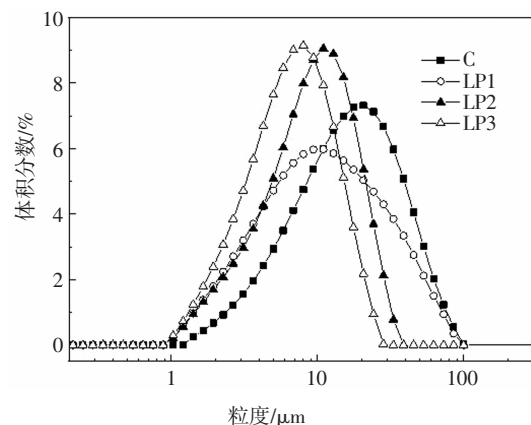
表 2 水泥的物理力学性能

Tab.2 Physical and mechanical properties of cement								
密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	比表面积 $/(m^2 \cdot kg^{-1})$	标准稠度 /%	初凝时间 /min	终凝时间 /min	抗折强度 /MPa		抗压强度 /MPa	
					3 d	28 d	3 d	28 d
3.15	350	25.6	132	198	5.6	7.6	27.5	49.8

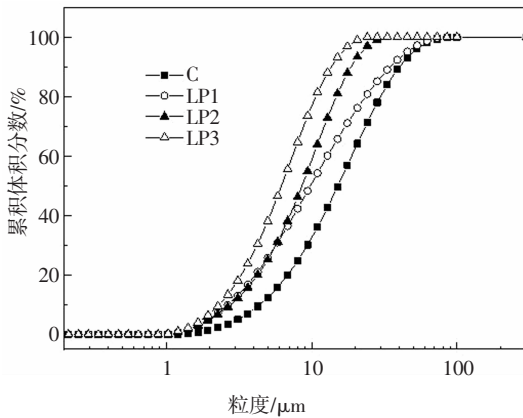
石灰石粉:由常州市禹恩新材料科技有限公司生产,体积平均粒径分别为 $14.801 \mu m$ 、 $9.797 \mu m$ 、 $7.198 \mu m$,密度分别为 $2.71 g/cm^3$ 、 $2.69 g/cm^3$ 、 $2.67 g/cm^3$,依次记为 LP1、LP2、LP3.水泥和石灰石粉的粒度分布如图 1 所示.

减水剂(SP):重庆科之杰公司生产的 Point-TS8 聚羧酸减水剂,稀释至固含量为 12.5%,掺量为 1%.

配合比:胶凝材料总量为 500 g,水胶比为 0.29,石灰石粉掺量分别为 10%、20%、30%.



(a) 粒度区间分布



(b) 粒度累计分布

图1 水泥和石灰石粉的粒度分布

Fig.1 Particle size distributions of the cement and ground limestone

1.2 实验方法

1.2.1 粒度分布

采用英国马尔文仪器有限公司出品的 Master-sizer 2000 激光粒度仪测定水泥和石灰石粉的粒度分布。

1.2.2 水化热

采用美国 TA 公司生产的 TAM Air 微量热仪测定体系的水化放热量和放热速率,样品质量为 15 g,温度为 20 ℃,水胶比为 0.29。

1.2.3 流变性能

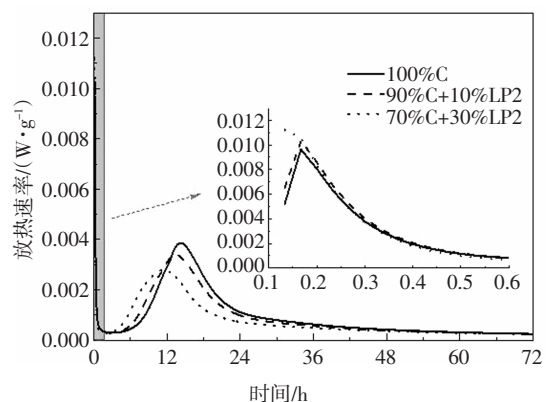
实验采用成都仪器厂出品的 NXS-11B 旋转黏度计配套的 B 系统(外筒内径为 4 cm,内筒外径为 3.177 cm,内筒高度为 5 cm,试样用量为 60 mL),在不同剪切速率下考察石灰石粉细度和掺量对浆体流变特性的影响。浆体流变性采用 Bingham 流体模型描述,具体过程如下:将浆体倒入旋转黏度计,以 204.3/s⁻¹ 的预剪切速率预剪切 1 min,然后在 3.178 /s⁻¹~204.3/s⁻¹ 范围内进行流变试验测试,记录浆体在各剪切速率下的剪切应力值,作出流变曲线,最后计算并拟合流变参数。

2 结果与讨论

2.1 石灰石粉对水泥浆体水化特性的影响

图 2、图 3 所示分别为石灰石粉的掺量及细度对水泥水化特性的影响。由图 2 可见:随着石灰石粉掺量的增加,体系第一放热峰峰位前移、峰值增高

且均高于纯水泥体系的峰值。诱导期变短,第二放热峰峰位前移、峰值降低且均低于纯水泥体系的峰值,体系总放热量减小。由图 3 可见:随着石灰石细度的增加,体系第一放热峰的变化规律与上述石灰石粉掺量增加时的变化规律一致,第二放热峰峰位前移,但峰值增高,体系总放热量增大但均低于纯水泥体系的总放热量。第一放热峰对应水化过程的初始反应期,主要是溶解热和 C₃A 的反应。石灰石粉对体系第一放热峰峰位、峰值的影响主要来自其物理作用和化学作用两方面。物理作用:石灰石粉的粒径小于水泥颗粒,水泥初始反应产生的水化产物会被分散于水泥颗粒周围的石灰石粉稀释,使水化产物层变薄,有利于水化反应的进行^[10]。化学作用即活性效应:石灰石粉可与铝酸盐或铝酸盐水化物反应生成碳铝酸盐^[11-14],对水化反应具有促进作用。第二放热峰主要来自 C₃S 的反应。第二放热峰峰位前移的原因大致分为三方面^[14-18]:一是石灰石粉对水化产物的稀释作用,水泥颗粒周围的水化产物层变薄,有利于水化反应的进行;二是石灰石粉的晶核效应,晶核形成过程中,均匀成核所需的能量大于非均匀成核所需的能量。因此,石灰石粉可作为成核位点降低成核位垒,从而促进水化反应的进行;三是与纯水泥体系相比,复合体系中可用于 C₃S 水化的水量相对增加,促进了 C₃S 的早期水化。因此,第二放热峰的峰位随石灰石粉掺量或细度的增加逐渐前移。复合体系中水泥量随石灰石粉掺量增大而减小。因此,复合体系中第二放热峰峰值和体系总放热量均随石灰石粉掺量增大而降低。而掺量相同时,石灰石粉的细度越大越有利于体系水化反应的进行。因此,复合体系中第二放热峰峰值和体系总放热量均随石灰石粉细度的增大而增大,但细度从 LP2 增大到 LP3 时,放热总量的差异不明显。



(a) 放热速率

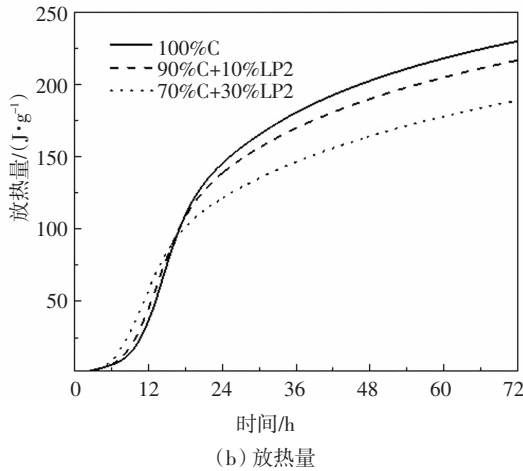


图 2 石灰石粉的掺量对体系放热速率和放热量的影响
Fig.2 Influence of limestone powder dosages on heat evolution and total heat evolved

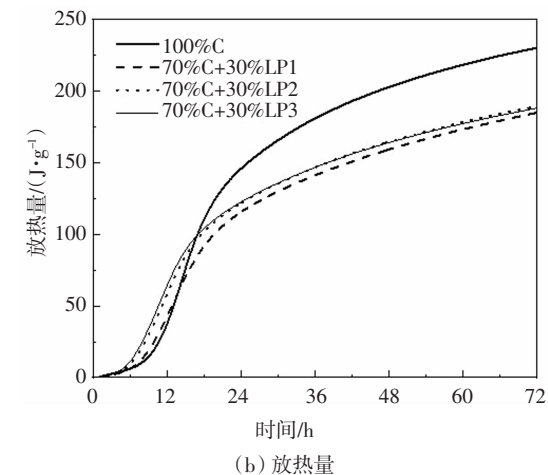
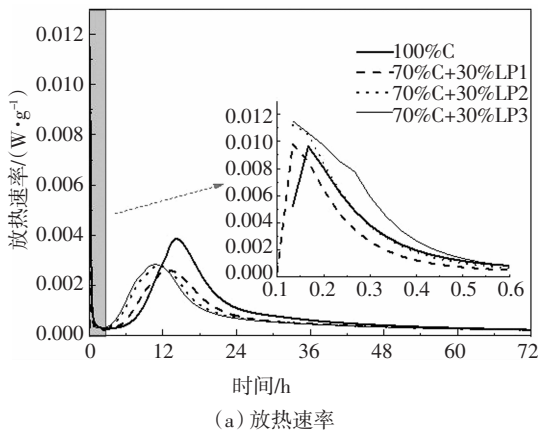


图 3 石灰石粉的细度对体系放热速率和放热量的影响
Fig.3 Influence of limestone powder fineness on heat evolution and total heat evolved

2.2 石灰石粉对水泥浆体流变性能的影响

石灰石粉的掺量和细度对水泥浆体流变性能的影响分别如图 4、图 5 所示。采用 Bingham 流体模

型对试验结果进行拟合,拟合结果见表 3。由图 4 和表 3 中 2~4、5~7 组的拟合结果可见:复合体系的屈服应力和塑性黏度均随石灰石粉掺量的增大而减小。由图 5 和表 3 中 3、6、8 组的拟合结果可见:复合体系的屈服应力和塑性黏度均随石灰石粉细度的增大而增大。

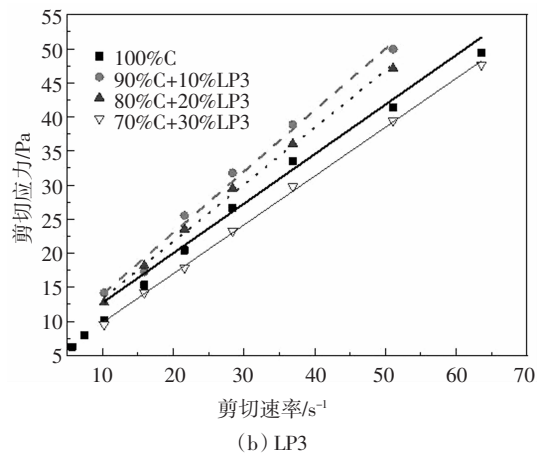
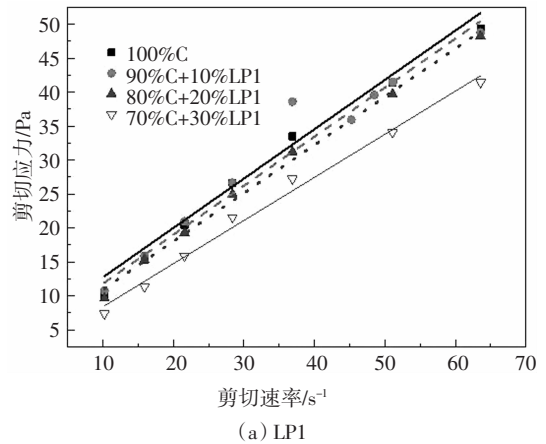


图 4 石灰石粉的掺量对体系流变性能的影响
Fig.4 Influence of limestone powder dosages on rheology property of paste

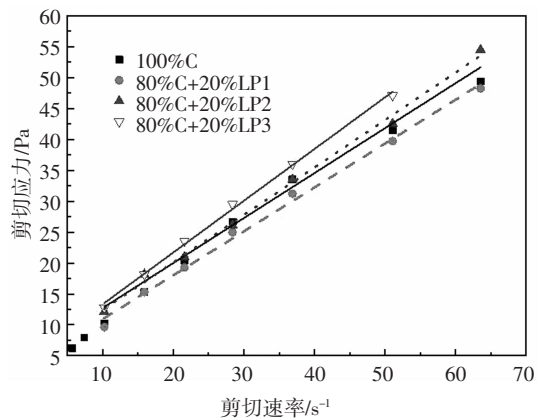


图 5 石灰石粉的细度对体系流变性能的影响
Fig.5 Influence of limestone powder fineness on rheology property of paste

表3 流变参数拟合结果

Tab.3 Fitting results of rheological parameters of paste

编号	样品	τ_0/Pa	$\eta/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	拟合方程	R^2
1	100%C	5.475	0.727	$\tau = 5.475 + 0.727\gamma$	0.949
2	90%C+10%LP1	4.591	0.722	$\tau = 4.591 + 0.722\gamma$	0.986
3	80%C+20%LP1	3.849	0.709	$\tau = 3.849 + 0.709\gamma$	0.995
4	70%C+30%LP1	2.048	0.635	$\tau = 2.048 + 0.635\gamma$	0.989
5	90%C+10%LP3	5.007	0.899	$\tau = 5.007 + 0.899\gamma$	0.987
6	80%C+20%LP3	4.996	0.836	$\tau = 4.996 + 0.836\gamma$	0.997
7	70%C+30%LP3	2.685	0.716	$\tau = 2.685 + 0.716\gamma$	0.999
8	80%C+20%LP2	4.745	0.768	$\tau = 4.745 + 0.768\gamma$	0.995

体系流变性主要受颗粒之间的相互作用(如内摩擦力、颗粒间黏滞力、电斥力等)和水化产物的胶结作用的影响^[17].而体系初期的流变性能主要受颗粒之间相互作用的影响.体系中固体颗粒之间的相互作用主要取决于颗粒粒度分布和固体颗粒体积分数.

Andreasen 方程是反映粉体颗粒紧密堆积程度的经典模型^[24]:

$$U(D) = 100 \times (D/D_{\max})^n \quad (1)$$

式中: $U(D)$ 为粒径小于 D 的颗粒百分含量; D 为颗粒粒径; D_{\max} 为体系中最大颗粒粒径; n 为分布模数, n 值越小,颗粒堆积越紧密,而当 $n = 1/3$ 时,颗粒呈最密堆积状态.取体系中 $D_{\max} = 100 \mu\text{m}$, $n = 1/3$ 可以做出颗粒紧密堆积状态下粒度累计分布曲线,即紧密堆积粉体的理想分布曲线(Ideal).根据水泥和石灰石粉的粒径分布所得的复合体系的粒度分布曲线如图6所示.用Andreasen方程拟合各复合体系的粒度累计分布曲线,可得到各体系的粒度分布模数 n ,拟合结果见表4.由图6和表4可见:石灰石粉掺量或细度越大,复合体系的粒度分布曲线越接近于

最密堆积的理想分布曲线.且复合体系的粒度分布模数随石灰石粉掺量或细度的增大而减小,即复合体系颗粒堆积的紧密程度随石灰石粉掺量或细度的增大而增大.由于石灰石粉的粒径小于水泥颗粒的粒径,一方面小颗粒可以在大颗粒运动过程中起到"滚珠"的作用,使颗粒运动更加容易;另一方面石灰石粉中更加微小的颗粒还可填充于水泥颗粒间隙,从而释放出更多的自由水分,优化体系的流变性能.

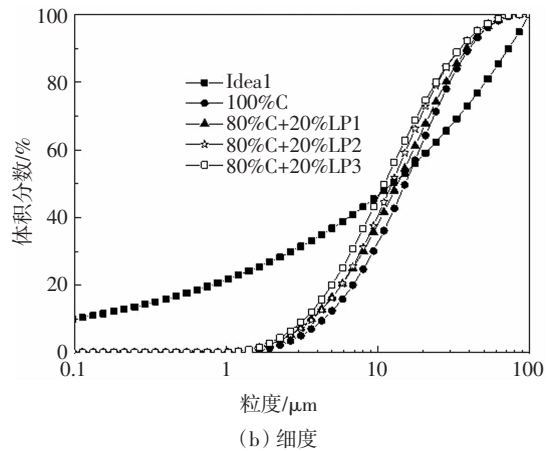
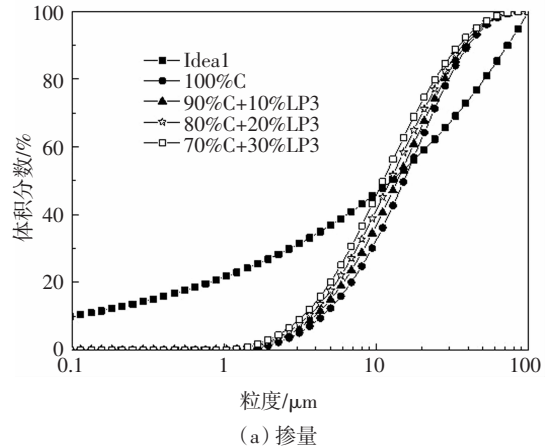


图6 石灰石粉的掺量和细度对体系颗粒堆积程度的影响
Fig.6 Influence of limestone powder dosages and fineness on the particle packing

表4 各体系固体颗粒粒度分布模数拟合结果

Tab.4 Fitting results of particle size distribution modulus in each system

编号	样品	n	R^2	编号	样品	n	R^2
1	100%C	0.487 06	0.902	6	80%C+20%LP2	0.458 97	0.891
2	90%C+10%LP1	0.477 71	0.902	7	70%C+30%LP2	0.445 97	0.885
3	80%C+20%LP1	0.468 67	0.901	8	90%C+10%LP3	0.465 57	0.898
4	70%C+30%LP1	0.460 09	0.900	9	80%C+20%LP3	0.445 92	0.891
5	90%C+10%LP2	0.472 47	0.900	10	70%C+30%LP3	0.427 98	0.883

Krieger-Dougherty 公式描述了颗粒体积分数与黏度的关系^[25]:

$$\eta = \eta_{\text{medium}}(1 - \Phi/\Phi_m)^{-[\eta]\Phi_m} \quad (2)$$

式中: η 代表体系黏度; η_{medium} 代表介质黏度; Φ 代表体系中固体颗粒的体积分数, $\Phi = (1 + \rho_B W/B\rho_W)^{-1}$, 其中 ρ_B 为复合胶凝材料的密度, W/B 为水胶比,取 0.29; Φ_m 代表体系中固体颗粒的最大体积分数; $[\eta]$ 为特性黏度,球体颗粒为 2.5.式(2)表明体系黏度随固体体积分数的增大而增大.这是由于当体系固体颗粒含量增加时,颗粒间距减小,相互作用增大,内摩擦力增大,所以体系黏度增大.且颗粒间距减小,会导致流动阻力增大,所以,体系屈服应力也随固体体积分数的增大而增大.各体系中固体颗粒的体积分数如表 5 所示.随石灰石粉掺量的增大,固体颗粒的体积分数逐渐增大,导致体系流变性能逐渐劣化;而粒度的分布范围逐渐变宽,颗粒粒度的分布模数逐渐减小,对体系流变性能的提升有利.体系的屈服应力和塑性黏度随石灰石粉掺量的增大而降低,说明石灰石粉细度相同时,因掺量增大引起的粒度分布变化对体系流变性能的积极作用大于因固体颗粒体积分数增加对流变性能的消极作用.掺量相同时,随石灰石粉细度的增大,颗粒粒度的分布模数逐渐减小,但固体颗粒的体积分数增大,且石灰石粉细度增大将需要更多的液相来润湿固体颗粒表面.所以,体系屈服应力和塑性黏度随石灰石粉细度的增大而增大.

表 5 各体系固体颗粒的体积分数

Tab.5 Volume fraction of solid particles in each system

编号	样品	Φ	编号	样品	Φ
1	100%C	0.522 6	6	80%C+20%LP2	0.530 0
2	90%C+10%LP1	0.526 0	7	70%C+30%LP2	0.533 8
3	80%C+20%LP1	0.529 7	8	90%C+10%LP3	0.526 5
4	70%C+30%LP1	0.533 3	9	80%C+20%LP3	0.530 3
5	90%C+10%LP2	0.526 3	10	70%C+30%LP3	0.534 3

3 结 论

1)随着石灰石粉掺量或细度的增加,体系第一放热峰峰位前移、峰值增高且均高于纯水泥体系的峰值,诱导期变短,第二放热峰峰位前移.即掺加石灰石粉可以加速体系的水化进程,且石灰石粉的细度越大,作用效果越明显.但是,石灰石粉掺量越大,

水泥含量越少,所以体系第二放热峰峰值和总放热量逐渐减小.

2)随着石灰石粉掺量或细度的增加,粒径分布模数逐渐减小,复合体系的粒度分布曲线越接近于最密堆积的理想分布曲线,即堆积越紧密,所需空隙填充水减少,有利于提高浆体流变性能.随着石灰石粉掺量或细度的增加,复合体系中固体颗粒的体积分数逐渐增大,颗粒间距减小且所需润湿水增多,不利于浆体流变性能提高.

3)细度相同时,复合体系的屈服应力和塑性黏度随石灰石粉掺量的增大而减小,有利于流变性能占主导作用;掺量相同时,复合体系的屈服应力和塑性黏度随石灰石粉细度的增大而增大,不利于流变性能的作用占主导.

参考文献

- [1] BALDINO N, GABRIELE D, LUPI F R, *et al.* Rheological behaviour of fresh cement pastes: Influence of synthetic zeolites, limestone and silica fume[J]. *Cement and Concrete Research*, 2014, 63(9):38—45.
- [2] JADVYGA Z, MODESTAS K, INA P, *et al.* Effect of limestone particles on rheological properties and hardening process of plasticized cement pastes[J]. *Materials Science*, 2015, 21(1):143—148.
- [3] 陈杨升. 矿物掺合料微细集料效应和形态效应的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011:6—10, 25—38.
CHEN Y S. Studies on micro-aggregate effects and morphological effects of mineral admixture[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011:6—10, 25—38. (In Chinese)
- [4] 徐文, 郭飞, 田倩. 不同超塑化剂掺量下石灰石粉水泥净浆流变性能[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(2):274—279.
XU W, GUO F, TIAN Q. Rheological properties of cement paste with limestone powder at different dosages of superplasticizers[J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(2):274—279. (In Chinese)
- [5] 谢友均, 陈小波, 马昆林, 等. 石灰石粉对水泥-粉煤灰浆体剪切变稀和剪切增稠的影响[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(5):824—829.
XIE Y J, CHEN X B, MA K L, *et al.* Effects of limestone powder on shear thinning and shear thickening of cement-fly ash paste[J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(5):824—829. (In Chinese)
- [6] 肖佳, 王大富, 何彦琪, 等. 石灰石粉细度对水泥浆体流变性能的作用研究[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(4):501—505.
XIAO J, WANG D F, HE Y Q, *et al.* Research on effects of ground limestone fineness on the rheological property of cement pastes [J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20(4):501—505. (In Chinese)
- [7] VOGLIS N, KAKALI G, CHANIOTAKIS E, *et al.* Portland-lime-

- stone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cements [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27(2):191—196.
- [8] VARHEN C, DILONARDO I, ROMANO R C, *et al.* Effect of the substitution of cement by limestone filler on the rheological behaviour and shrinkage of microconcretes [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 125:375—386.
- [9] VANCE K, KUMAR A, SANT G, *et al.* The rheological properties of ternary binders containing Portland cement, limestone, and metakaolin or fly ash [J]. *Cement and Concrete Research*, 2013, 52(10):196—207.
- [10] LAWRENCE P, CYR M, RINGOT E. Mineral admixtures in mortars [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(12):1939—1947.
- [11] KAKALI G, TSIVILIS S, AGGELI E, *et al.* Hydration products of C3A, C3S and Portland cement in the presence of CaCO₃ [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(7):1073—1077.
- [12] BENTZ D P, FERRARIS C F, JONES S Z, *et al.* Limestone and silica powder replacements for cement: Early-age performance [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 78:43—56.
- [13] LOTHENBACH B, LE SAOUT G, GALLUCCI E, *et al.* Influence of limestone on the hydration of Portland cements [J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(6):848—860.
- [14] BONAVENTI V L, RAHHAL V F, IRASSAR E F. Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements [J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(6):853—859.
- [15] CAMILETTI J, SOLIMAN A M, NEHDI M L. Effect of nano-calcium carbonate on early-age properties of ultra-high-performance concrete [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2013, 65(5):297—307.
- [16] XU Z H, ZHOU Z H, DU P, *et al.* Effects of nano-limestone on hydration properties of tricalcium silicate [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2017, 129(1):75—83.
- [17] 肖佳. 水泥-石灰石粉胶凝体系特性研究 [D]. 长沙: 中南大学土木工程学院, 2008: 3—9, 86—95.
XIAO J. The study on characteristics of cement-ground limestone gelation system [D]. Changsha: Central South University, 2008: 3—9, 86—95. (In Chinese)
- [18] RAHHAL V, TALERO R. Early hydration of Portland cement with crystalline mineral additions [J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(7):1285—1291.
- [19] YANG H S, CHE Y J. Effects of nano-CaCO₃/limestone composite particles on the hydration products and pore structure of cementitious materials [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 2018(3):1—8.
- [20] SCHANKOSKI R A, PILAR R, PRUDNCIO L R, *et al.* Evaluation of fresh cement pastes containing quarry by-product powders [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 133:234—242.
- [21] VANCE K, ARORA A, SANT G, *et al.* Rheological evaluations of interground and blended cement-limestone suspensions [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 79:65—72.
- [22] TANG M M, WANG Z Y. Experimental study on rheological deformation and stress properties of limestone [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2008, 15(S1):475—478.
- [23] VIKAN H, JUSTNES H. Rheology of cementitious paste with silica fume or limestone [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(11):1512—1517.
- [24] 杨静, 李滢. 矿物掺合料的颗粒级配高性能混凝土浆体材料力学性能的影响 [J]. *工业建筑*, 2003, 33(6):55—58.
YANG J, LI Y. Influence of particle size distribution of mineral admixture on mechanical properties of cementitious materials of high performance concrete [J]. *Industrial Construction*, 2003, 33(6):55—58. (In Chinese)
- [25] KRIEGER I M, DOUGHERTY T J. A mechanism for non-newtonian flow in suspensions of rigid spheres [J]. *Transactions of the Society of Rheology*, 1959, 3(1):137—152.