

文章编号:1007-9629(2021)01-0007-07

水泥-石灰石粉浆体颗粒群特性与流变性能关系

肖佳¹, 张泽的¹, 韩凯东¹, 田承宇², 邱凯²

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075;

2. 中国水利水电第八工程局有限公司 科研设计院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 采用 RHEOLAB QC 型旋转黏度计测定水泥-石灰石粉浆体的流变性能, 研究了颗粒群特性(粒径分布和堆积密度)与浆体流变性能的关系, 并在此基础上探究了颗粒水膜厚度与浆体流变性能的关系. 结果表明: 石灰石粉掺入水泥浆体中使颗粒分布变广, 颗粒堆积状态得以改善; 粒径分布系数与浆体屈服应力、稠度的线性相关性不高, 相关系数仅为 0.600 61 和 0.699 62; 颗粒堆积密度与浆体屈服应力、稠度呈负线性相关, 相关系数分别为 0.830 58 和 0.846 54; 颗粒堆积密度与浆体流变性能的相关性高于粒径分布系数; 颗粒水膜厚度与浆体流变性能不呈简单线性关系, 其中对于掺细度 411 m²/kg 石灰石粉的水泥浆体, 其屈服应力和稠度减小, 颗粒水膜厚度增大; 对于掺细度 807、1 007 m²/kg 石灰石粉的水泥浆体, 其屈服应力和稠度减小, 颗粒水膜厚度先增后减, 出现了屈服应力、稠度和颗粒水膜厚度同时减小的现象.

关键词: 石灰石粉; 粒径分布; 堆积密度; 水膜厚度; 流变性能

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.01.002

Relationship between Particle Characteristics and Rheological Properties of Cement-Limestone Powder Pastes

XIAO Jia¹, ZHANG Zedi¹, HAN Kaidong¹, TIAN Chengyu², QIU Kai²

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. Research and Design Institute, China Hydropower Engineering Bureau 8 Co., Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: Yield stress and consistency of cement-limestone powder pastes were measured by RHEOLAB QC rotational viscometer. The relationship between particle size distribution, packing density and rheological properties was studied. The results show that the addition of limestone powder makes the particle distribution wider and improvement of the state of particle accumulation. The linear correlation between particle size distribution coefficient and yield stress and consistency is not close, the correlation coefficient is only 0.600 61 and 0.699 62. The correlation coefficient between the packing density and the yield stress and consistency is 0.830 58 and 0.846 54, which is closer than that of the particle size distribution coefficient. The relationship between water film thickness and rheological properties cannot be described by linear function, among which the yield stress and consistency of the cement paste with 411 m²/kg limestone powder are decreased and the water film thickness is increased. The yield stress and consistency of the cement paste adding limestone fineness powder of 807, 1 007 m²/kg decrease, the water film thickness first increases and then decreases, and the yield stress, consistency and water film thickness decrease simultaneously.

Key words: limestone powder; particles size distribution; packing density; water film thickness; rheological property

收稿日期:2019-07-10; 修订日期:2019-10-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278497);中南大学研究生自主探索创新项目(2019zzts969)

第一作者:肖佳(1964—),女,湖南衡阳人,中南大学教授,博士生导师,博士. E-mail:jiaxiaog2007@163.com

石灰石粉是一种丰富的天然资源,将其作为水泥掺和料不仅具有经济效益,还可以缓解水泥生产带来的环境问题^[1].已有大量文献研究了石灰石粉对水泥浆体流变性能的影响,如 Vance 等^[1]研究发现,掺入石灰石粉可提高混凝土的屈服应力和塑性黏度;而 Zhang 等^[2]研究表明,石灰石粉的加入会降低混凝土的屈服应力和塑性黏度;也有研究^[3]表明,石灰石粉增加了混凝土的屈服应力、减小了混凝土的塑性黏度.目前,针对石灰石粉对水泥浆体流变性能的影响仍存在较多争议,主要是因为这些研究多从石灰石粉的细度和掺量出发,未将水泥与石灰石粉颗粒作为整体考虑.水泥浆体可视为由固体颗粒、水和空气组成的浓缩悬浮体系,固体颗粒群特征及颗粒间作用力对浆体的流变性能有重要影响^[4-5].石灰石粉掺入水泥浆体中,由于其细度与水泥不同,改变了颗粒群的粒径分布,并对水泥颗粒产生填充效应、松弛效应、壁效应和楔入效应等^[4].改进 Andreassen & Andersen 模型、Rosin-Rammler 分布模型等^[4,6]被广泛用于描述颗粒粒径分布,2 种模型均表明颗粒分布越广,粒径分布越接近高勒分布,颗粒堆积状态就越好.颗粒堆积状态可以用堆积密度表征,随着堆积密度的增大,颗粒间空隙变小,用于填充空隙的水量减小,在用水量不变的条件下将会有多余的水包裹颗粒,从而优化体系的流变性能^[7].

石灰石粉掺入水泥浆体后,颗粒群特性的变化是多样的,这些颗粒群特性的变化影响了体系的实际需水量,进而改变了颗粒表面的水膜厚度,对体系的流变性能有重要的影响,而国内外关于这方面的研究还较为有限.基于此,本文测定了掺入不同细度、不同掺量石灰石粉水泥浆体的流变性能,并研究了其与粒径分布、堆积密度、颗粒水膜厚度的关系.

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

水泥(C)采用中国联合水泥集团有限公司产 P·I 42.5 拉法基瑞安基准水泥,其比表面积为 $347 \text{ m}^2/\text{kg}$;3 种石灰石粉(LI、LII、LIII)均产自湖北荆门, CaCO_3 含量(质量分数,文中涉及的含量、水胶比(m_w/m_B)等均为质量分数或质量比)均为 99%,比表面积分别为 411 、 807 、 $1\,007 \text{ m}^2/\text{kg}$;减水剂(PC)为西卡公司产 3301H 型聚羧酸减水剂,固含量 25%;水采用自来水.水泥和石灰石粉的粒度分布见图 1,其表征了各粒径的水泥、石灰石粉颗粒的体积分数.水泥-石灰石粉浆体配合比见表 1.

1.2 流变性能测定

采用 Anton Paar 公司产 RHEOLAB QC 型旋转黏度计测定水泥-石灰石粉浆体的屈服应力-剪切速率($\tau-\dot{\gamma}$)曲线.为使浆体初始结构具有相同的均匀分散状态,首先,用 200 s^{-1} 的剪切速率对浆体施加预剪切 30 s;之后,在 60 s 内将剪切速率由 1 s^{-1} 增至 200 s^{-1} ,并保持 200 s^{-1} 的剪切速率不变再剪切 30 s;最后,在 60 s 内将剪切速率减至 1 s^{-1} ;每 1 s 取 1 个数据点. Herschel-Bulkley 模型可以更好地描述固体颗粒质量分数大于 30% 悬浮液的流变行为^[8],其表达式为 $\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^m$ (其中: τ_0 为动态屈服应力, Pa; m 为流变指数; K 为稠度, $\text{Pa} \cdot \text{s}^m$). 本试验选取 $\tau-\dot{\gamma}$ 曲线下行段剪切速率为 $11 \sim 200 \text{ s}^{-1}$ 的数据进行拟合,得到浆体的流变参数.

1.3 减水剂吸附量测定

按试验设计水泥-石灰石粉浆体的水胶比和减水剂掺量,称量去离子水和减水剂溶液;之后对浆体搅拌 15 min,静置 6 min,在 21 min 时(与流变性能测定时间保持一致)用离心机对悬浮液进行离心

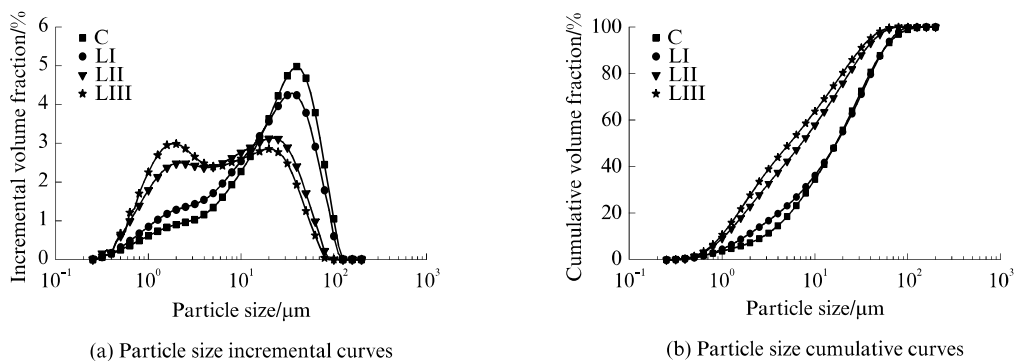


图1 水泥和石灰石粉的粒度分布

Fig. 1 Particle size distributions of cement and limestone powder

表 1 水泥-石灰石粉浆体配合比
Table 1 Mix proportions of cement-limestone powder pastes

Sample No.	Cement/g	limestone powder/g	Water/g	$w(\text{limestone powder})/\%$	PC dosage(by mass)/%	m_w/m_B
C0	400	0	120	0	0.2	0.3
CLI 10	360	40	120	10	0.2	0.3
CLI 20	320	80	120	20	0.2	0.3
CLI 30	280	120	120	30	0.2	0.3
CLI 50	200	200	120	50	0.2	0.3
CLII 10	360	40	120	10	0.2	0.3
CLII 20	320	80	120	20	0.2	0.3
CLII 30	280	120	120	30	0.2	0.3
CLII 50	200	200	120	50	0.2	0.3
CLIII 10	360	40	120	10	0.2	0.3
CLIII 20	320	80	120	20	0.2	0.3
CLIII 30	280	120	120	30	0.2	0.3
CLIII 50	200	200	120	50	0.2	0.3

3 min,然后取离心后的上层清液,稀释 5 倍后,采用紫外可见分光光度计测定其吸光度,参照预先测得的聚羧酸减水剂吸光度-浓度标准曲线,求得待测溶液中减水剂的质量浓度,根据吸附前后的质量浓度差,计算出减水剂在颗粒表面的吸附量(Q ,mg/g),其表达式如下:

$$Q=\frac{(C_0-C)V}{M} \tag{1}$$

式中: C_0 、 C 分别为聚羧酸减水剂吸附前后的质量浓度,mg/L; V 为溶液体积,L; M 为胶凝材料质量,g.

2 结果与分析

2.1 水泥-石灰石粉浆体粒径分布、堆积密度与流变性能关系

Rosin-Rammler 分布模型^[6]被广泛用于描述粉体的粒径分布,其表达式为 $R(D_p)=100\exp[-(D_p/D_e)^n]$ (其中 $R(D_p)$ 为粒径大于 D_p 的累积百分数; D_p 为颗粒粒径; D_e 为特征粒径; n 为粒径分布系数).粒径分布系数 n 越小,颗粒分布越广.图 2 为石灰石粉对浆体粒径分布系数的影响.由图 2 可以看出,随着石灰石粉细度和掺量的增加, n 值逐渐减小,说明石灰石粉掺入水泥浆体中使颗粒分布变广,粒径分布逐渐接近富勒分布^[5].

图 3 为水泥-石灰石粉浆体粒径分布系数与浆体屈服应力、稠度的相关关系.由图 3 可以看出,粒径分布系数与浆体屈服应力、稠度的相关性并不高,相关系数仅为 0.600 61 和 0.699 62,说明粒径分布系数与水泥-石灰石粉浆体的流变性能并不直接相关.

堆积密度是描述颗粒群特性最重要的参数之

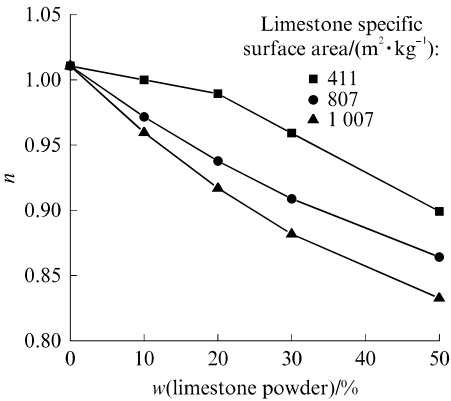


图 2 石灰石粉对浆体粒径分布系数的影响
Fig. 2 Effect of ground limestone on distribution coefficient

一^[5],其表征的是标准稠度用水量下固体颗粒的堆积状态. Shanahan 等^[9]研究发现,在掺减水剂的条件下颗粒堆积密度与浆体屈服应力有良好的相关性.文中通过测定各水泥-石灰石粉浆体的标准稠度用水量,计算了颗粒堆积密度^[10].堆积密度计算公式为 $\phi'=1/(1+\rho_B m_w/m_B)$ (其中: ϕ' 为颗粒堆积密度; ρ_B 为水泥与石灰石粉混合粉体的密度; m_w 为浆体达到标准稠度时的用水量; m_B 为胶凝材料的质量). ρ_B 可通过 $\rho_B=\frac{m_{cm}}{m_B}\rho_{cm}+\frac{m_l}{m_B}\rho_l$ 求得(其中: m_{cm} 和 m_l 分别为水泥和石灰石粉的质量; ρ_{cm} 和 ρ_l 分别为水泥和石灰石粉的密度).图 4 为水泥-石灰石粉浆体屈服应力、稠度与颗粒堆积密度的关系.由图 4 可以看出,随着颗粒堆积密度的增大,水泥-石灰石粉浆体的屈服应力和稠度均逐渐减小,与文献^[10]研究得出的结论一致.

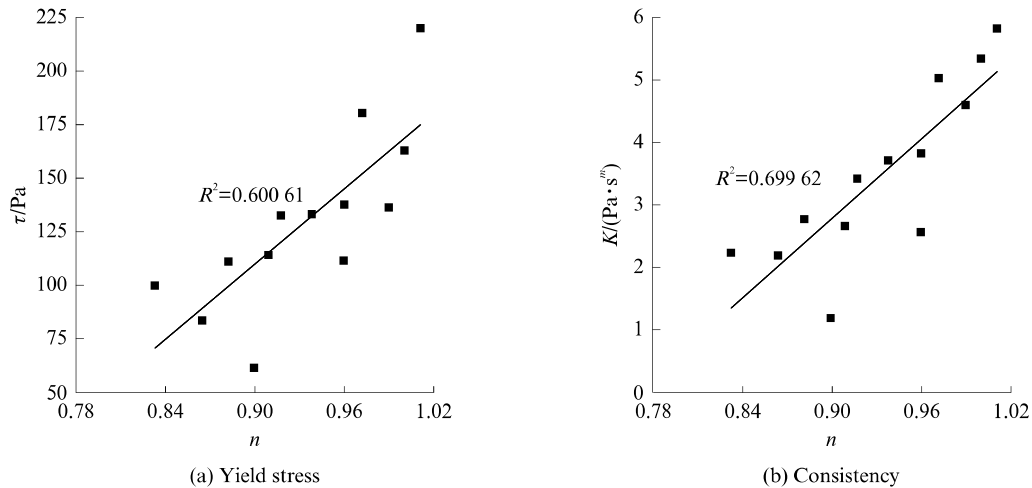


图3 水泥-石灰石粉浆体粒径分布系数与流变性能关系

Fig. 3 Relationship between distribution coefficient and rheological properties of cement-limestone powder paste

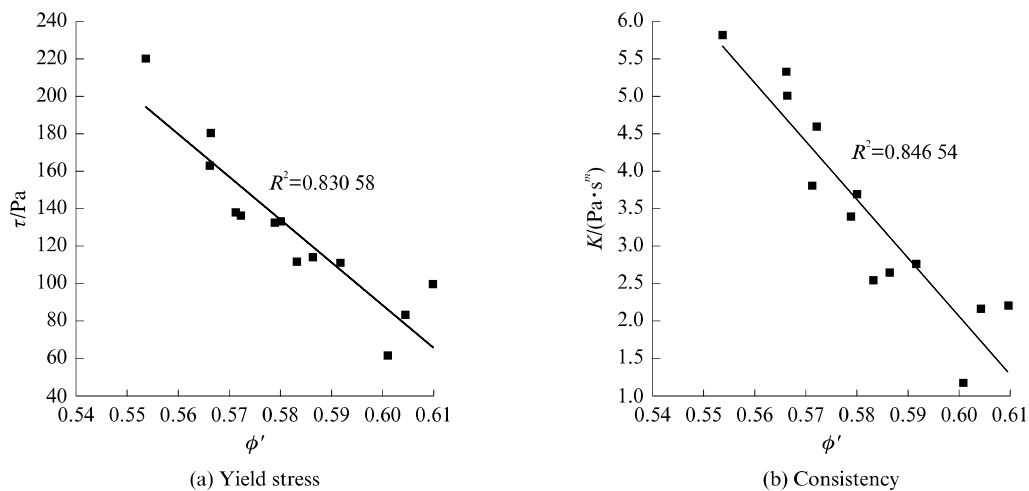


图4 水泥-石灰石粉浆体颗粒堆积密度与流变性能关系

Fig. 4 Relationship between packing density and rheological properties of cement-limestone powder paste

颗粒堆积密度增大,颗粒间空隙减小,减少了用于填充空隙的水量,即减少了实际需水量.在用水量不变的条件下,体系富余水量增加,优化了体系的流变性能.颗粒堆积密度与流变性能的相关系数分别为0.830 58和0.846 54,高于粒径分布系数与流变性能的相关系数(0.600 61和0.699 62),说明颗粒堆积密度与浆体流变性能的相关性高于粒径分布系数.这是因为粒径分布系数仅表征粒径分布宽度,而堆积密度综合了粒径分布与颗粒形状^[5],可以更好地表征颗粒的堆积状态.

2.2 水泥-石灰石粉水膜厚度与流变性能关系

根据颗粒堆积密度可计算得到水泥-石灰石粉浆体的颗粒水膜厚度^[1,11],其表达式如下:

$$d_{wf} = \frac{u_w'}{y_t} = \frac{u_w - u_{void}}{y_t} = \frac{u_w - \frac{1-\phi'}{\phi}}{y_t} \quad (2)$$

式中: d_{wf} 为颗粒的水膜厚度; y_t 为颗粒的总比表面积; u_w' 为多余水量与固体的体积比(多余水比); u_w 为全部水量与固体的体积比; u_{void} 为空隙与固体的体积比. $y_t^{[9]}$ 可通过 $y_t = y_{cm} u_{cm} + y_l u_l$ 求得(其中: y_{cm} 和 y_l 分别为水泥和石灰石粉颗粒的比表面积; u_{cm} 和 u_l 分别为水泥和石灰石粉颗粒与胶凝材料固体总颗粒的体积比).图5为石灰石粉对颗粒水膜厚度的影响.由图5可知:对于掺细度 $411 \text{ m}^2/\text{kg}$ 石灰石粉的浆体,颗粒水膜厚度随石灰石粉掺量的增加而逐渐增大;对于掺细度 $807, 1\ 007 \text{ m}^2/\text{kg}$ 石灰石粉的浆体,颗粒水膜厚度随石灰石粉掺量的增加先增大后减小,且后者颗粒水膜厚度开始减小时的掺量小于前者.

图6为石灰石粉对浆体多余水比的影响.由图6可以看出,随着石灰石粉掺量的增加,水泥-石灰

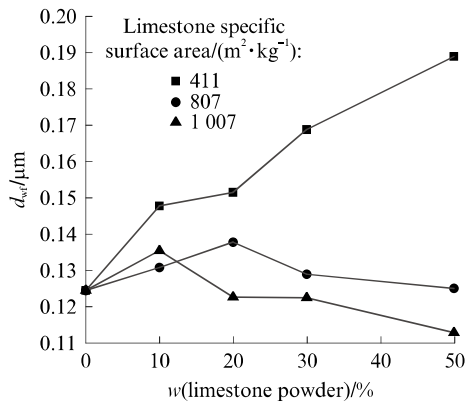


图 5 石灰石粉对颗粒水膜厚度的影响
Fig. 5 Effect of limestone powder on water film thickness

石粉浆体的多余水比增加,说明石灰石粉掺入水泥浆体中改善了颗粒的堆积状态.

式(2)显示,颗粒的水膜厚度为多余水比与颗粒总比表面积的比值.随着石灰石粉掺量的增加,浆体多余水比和颗粒总比表面积均有所增加,因此颗粒水膜厚度的增加或减小应取决于多余水比和颗粒总比表面积的相对增加速率.表 2 为水泥-石灰石粉浆体的多余水比与颗粒总比表面积的相对增加速率

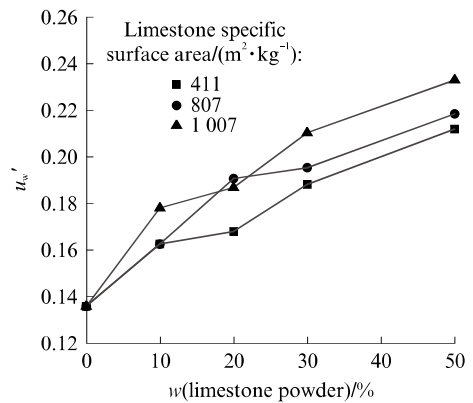


图 6 石灰石粉对浆体多余水比的影响
Fig. 6 Effect of limestone powder on excess water ratio

Δ .若 Δ 值大于 0,则表示颗粒水膜厚度增大;若 Δ 值小于 0,则表示颗粒水膜厚度减小.由表 2 可以清晰地看出:对于掺细度 411 m^2/kg 石灰石粉的浆体,其 Δ 值均大于 0,说明多余水比的增加速率一直高于颗粒总比表面积;对于掺细度 807、1 007 m^2/kg 石灰石粉的浆体,其 Δ 值分别在石灰石粉掺量为 30%、20%时小于 0,说明该掺量下多余水比的增加速率低于总比表面积,使得颗粒水膜厚度有所减小.

表 2 水泥-石灰石粉浆体多余水比和颗粒总比表面积相对增加速率
Table 2 Relative increase rate of excess water ratio and total specific surface area of cement-limestone powder paste

Sample No.	u_w'	$y_t/(\mu\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}^{-3})$	Increase rate of u_w'	Increase rate of y_t	Δ
C0	0.135 805	1.089 580	0	0	0
CLI 10	0.162 526	1.099 196	0.196 761	0.008 825	0.187 935
CLI 20	0.167 831	1.106 966	0.032 641	0.007 069	0.025 570
CLI 30	0.187 950	1.112 940	0.119 877	0.005 397	0.114 482
CLI 50	0.211 604	1.119 698	0.125 850	0.006 072	0.119 780
CLII 10	0.162 418	1.240 446	0.195 965	0.138 463	0.057 502
CLII 20	0.190 460	1.380 922	0.172 650	0.113 246	0.059 407
CLII 30	0.195 067	1.511 252	0.024 189	0.094 379	-0.070 019
CLII 50	0.218 129	1.742 460	0.118 226	0.152 991	-0.034 760
CLIII 10	0.177 875	1.312 057	0.309 782	0.204 186	0.105 596
CLIII 20	0.186 626	1.519 816	0.049 197	0.158 346	-0.109 150
CLIII 30	0.210 030	1.713 202	0.125 406	0.127 243	-0.001 840
CLIII 50	0.232 590	2.058 236	0.107 413	0.201 397	-0.093 980

图 7 为水泥-石灰石粉浆体中颗粒水膜厚度与流变性能的关系.由图 7 可见:颗粒水膜厚度与浆体流变性能不呈简单线性关系;对于掺细度 411 m^2/kg 石灰石粉的浆体,其屈服应力、稠度减小,颗粒水膜厚度增大;对于掺细度 807、1 007 m^2/kg 石灰石粉的浆体,其屈服应力、稠度减小,颗粒水膜厚度先增后减,出现了屈服应力、稠度与颗粒水膜厚度同时减小的现象.

根据颗粒水膜厚度的作用机理可知,颗粒水膜厚度的减小对浆体屈服应力、稠度的增大有促进作用^[12].但浆体屈服应力、稠度随颗粒水膜厚度减小而减小的试验现象说明,有其他因素存在减弱了这种作用,可能与减水剂在颗粒表面的吸附有关.尽管各浆体中减水剂掺量相同,但由于石灰石粉对聚羧酸减水剂的吸附量远大于水泥^[13],不同的水泥-石灰石粉体系对减水剂的吸附效果有所不同.图 8 为

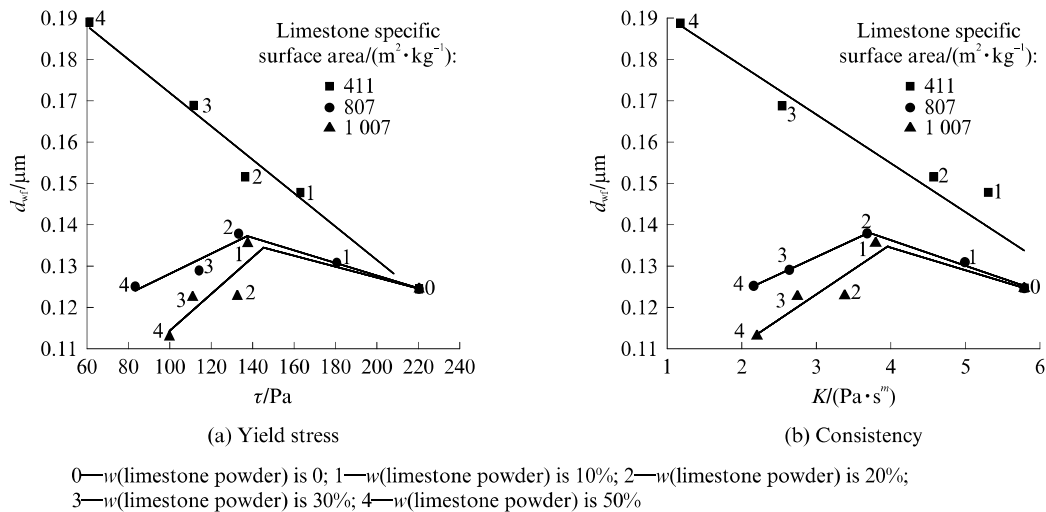


图 7 水泥-石灰石粉浆体中颗粒水膜厚度与流变性能的关系
Fig. 7 Relationship between d_{wf} and rheological properties of cement-limestone powder paste

不同水泥-石灰石粉浆体中单位体积固体颗粒对聚羧酸减水剂的吸附量. 由图 8 可见, 随着石灰石粉掺量的增加, 水泥-石灰石粉浆体单位体积固体颗粒对聚羧酸减水剂吸附量逐渐增加.

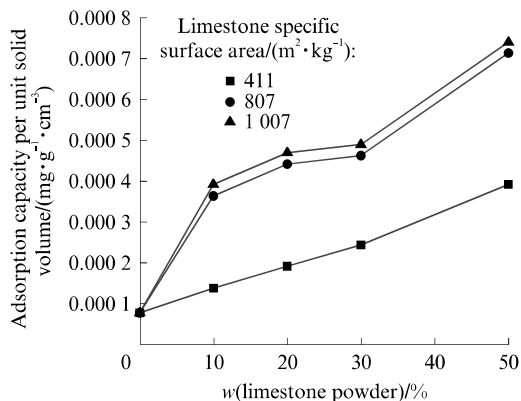


图 8 水泥-石灰石粉混合粉体单位体积减水剂吸附量
Fig. 8 Adsorption capacity of cement-limestone powder mixed powder per unit solid volume

颗粒表面吸附的减水剂有增大颗粒间距的作用, 单位体积减水剂吸附量增加, 颗粒间距增大, 从而减小了颗粒间的表面作用力^[14]. 浆体屈服应力与颗粒间的表面作用力有关且成正比. 在颗粒分散良好的体系中, 若固体体积分数 φ 小于 $0.85\varphi_{\text{div}}$ (φ_{div} 可近似为最大堆积分数), 则颗粒间的表面作用力由表面作用力主导, 屈服应力随表面作用力的减小而减小^[14-15]. 各浆体中固体体积分数 φ ^[15] 与最大堆积分数 φ_m ^[16] 之比均小于 0.85 (见表 3). 因此, 对于掺细度 807、1 007 m^2/kg 石灰石粉的浆体, 尽管石灰石粉掺量较大时颗粒水膜厚度较小, 对颗粒间距有减

小作用, 但由此增大的单位体积减水剂吸附量同时会增大颗粒间距, 因此水泥-石灰石粉浆体流变性能的变化应取决于二者所引起的颗粒间距变化的相对大小, 而这部分的量化需要进一步研究.

颗粒水膜厚度是一个综合了颗粒总比表面积与堆积密度的参数. 颗粒总比表面积较大时, 颗粒水膜厚度减小, 其通过影响颗粒间距对流变性能发挥作用, 这也说明了上述粒径分布、堆积密度颗粒群特性的变化最终表现为颗粒间距的变化, 与文献[17]提出的观点一致, 量化不同条件下体系颗粒间距的变化是判断水泥-石灰石粉浆体屈服应力、稠度变化的关键.

表 3 水泥-石灰石粉浆体固体体积分数与最大堆积分数之比
Table 3 Ratio of solid volume fraction to maximum packing fraction of cement-limestone powder pastes

No.	Sample	$d_{10}/\mu\text{m}$	$d_{90}/\mu\text{m}$	φ	φ_m	φ/φ_m
1	C0	2.825	56.368	0.443 000	0.745 194	0.594 828
2	CLI 10	2.518	56.368	0.446 770	0.750 703	0.595 134
3	CLI 20	2.518	56.368	0.450 330	0.750 703	0.599 879
4	CLI 30	2.244	56.368	0.453 950	0.756 101	0.600 384
5	CLI 50	2.244	56.368	0.461 370	0.756 101	0.610 193
6	CLII 10	2.244	56.368	0.446 933	0.756 101	0.591 103
7	CLII 20	2.000	50.238	0.450 665	0.756 100	0.596 040
8	CLII 30	1.589	50.238	0.454 460	0.766 531	0.592 880
9	CLII 50	1.416	44.774	0.462 245	0.766 536	0.603 031
10	CLIII 10	2.244	56.368	0.446 949	0.756 101	0.591 124
11	CLIII 20	1.783	50.238	0.450 698	0.761 364	0.591 961
12	CLIII 30	1.416	50.238	0.454 510	0.771 588	0.589 058
13	CLIII 50	1.262	44.774	0.462 331	0.771 588	0.599 195

Note: d_{10} , d_{90} refer to the corresponding particle size when the cumulative fraction of particle size reaches 10% and 90%.

3 结论

(1)石灰石粉掺入水泥浆体中,使颗粒分布变广,改善了颗粒堆积状态。

(2)粒径分布系数与浆体屈服应力、稠度的线性相关性不高,相关系数仅为 0.600 61 和 0.699 62. 颗粒堆积密度与浆体屈服应力、稠度呈负线性相关,其与流变性能的相关系数分别为 0.830 58 和 0.846 54. 颗粒堆积密度与浆体流变性能的相关性高于粒径分布系数。

(3)颗粒水膜厚度与浆体流变性能不呈简单线性关系,对于掺细度 $411 \text{ m}^2/\text{kg}$ 石灰石粉的浆体,其屈服应力和稠度减小,颗粒水膜厚度增大;对于掺细度 $807,1007 \text{ m}^2/\text{kg}$ 石灰石粉的浆体,其屈服应力和稠度减小,颗粒水膜厚度先增后减,出现了浆体屈服应力、稠度与颗粒水膜厚度同时减小的现象。

参考文献:

- [1] 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, 52:196-207.
- [2] ZHANG X, HAN J. The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste[J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(5):827-830.
- [3] DERABLA R, BENMALEK M L. Characterization of heat-treated self-compacting concrete containing mineral admixtures at early age and in the long term[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 66:787-794.
- [4] MEHDIPOUR I, KHAYAT K H. Understanding the role of particle packing characteristics in rheo-physical properties of cementitious suspensions: A literature review[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 161:340-353.
- [5] YE H, GAO X, WANG R, et al. Relationship among particle characteristic, water film thickness and flowability of fresh paste containing different mineral admixtures[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 153:193-201.
- [6] LEE S H, KIM H J, SAKAI E, et al. Effect of particle size distribution of fly ash-cement system on the fluidity of cement pastes[J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(5):763-768.
- [7] KWAN A K H, WONG H H C. Packing density of cementitious materials: Part 2—Packing and flow of OPC + PFA + CSF[J]. *Materials and Structures*, 2008, 41(4):773-784.
- [8] KABAGIRE K D, DIEDERICH P, YAHIA A, et al. Experimental assessment of the effect of particle characteristics on rheological properties of model mortar[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 151:615-624.
- [9] SHANAHAN N, TRAN V, WILLIAMS A, et al. Effect of SCM combinations on paste rheology and its relationship to particle characteristics of the mixture[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 123:745-753.
- [10] KNOP Y, PELED A. Packing density modeling of blended cement with limestone having different particle sizes[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 102:44-50.
- [11] LI L G, CHU S H, ZENG K L, et al. Roles of water film thickness and fibre factor in workability of polypropylene fibre reinforced mortar[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2018, 93:196-204.
- [12] GHODDOUSI P, SHIRZADI J A A, SOBHANI J. Effects of particle packing density on the stability and rheology of self-consolidating concrete containing mineral admixtures[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 53:102-109.
- [13] ALONSO M M, PALACIOS M, PUERTAS F. Compatibility between polycarboxylate-based admixtures and blended-cement pastes[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2013, 35(1):151-162.
- [14] FENEUIL B, PITOIS O, ROUSSEL N. Effect of surfactants on the yield stress of cement paste[J]. *Cement and Concrete Research*, 2017, 100:32-39.
- [15] ROUSSEL N, LEMAITRE A, FLATT R J, et al. Steady state flow of cement suspensions: A micromechanical state of the art[J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(1):77-84.
- [16] HU C, LARRARD D F. The rheology of fresh high-performance concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 1996, 26(2):283-294.
- [17] GUO Y, ZHANG T, WEI J, et al. Evaluating the distance between particles in fresh cement paste based on the yield stress and particle size[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 142:109-116.