文章编号:1007-9629(2025)02-0144-09

级配分布模数对复合胶凝材料浆体流变性能的影响

蒋正武[1,2,*], 袁乐琅[1,2], 任 强[1,2]
(1.同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室,上海 201804;
2.同济大学 材料科学与工程学院,上海 201804)

摘要:基于紧密堆积级配模型,研究了级配分布模数对复合胶凝材料浆体流变性能的影响.结果表明:Dinger-Funk模型级配分布模数对不同复合胶凝材料的屈服应力和塑性黏度具有不同的影响规律;浆体流变性能与湿堆积密实度存在一定的相关性,而水膜厚度是级配分布模数影响浆体流变性能的关键因素;随着水膜厚度的增加,复合胶凝材料浆体的屈服应力和塑性黏度呈幂指数型下降趋势,这一影响可通过简化YODEL模型和Ahmadah模型体现.

关键词:复合胶凝材料;Dinger-Funk模型;流变性能;湿堆积密实度;水膜厚度
中图分类号:TU525 **文献标志码**:A **doi**:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.02.007

Effect of Grading Distribution Modulus on Rheological Properties of Composite Cementitious Materials Paste

JIANG Zhengwu[1,2,*], *YUAN Lelang*[1,2], *REN Qiang*[1,2]
(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on a closely packed grading model, the effect of the grading distribution modulus on the rheological properties of composite cementitious material paste was studied. The results show that the effect of grading distribution modulus of the Dinger-Funk model on the yield stress and plastic viscosity of different composite pastes varies. The rheological properties of pastes are correlated with its wet packing density to a certain extent, and the water film thickness is a key factor affecting the rheological properties of the pastes through the grading distribution modulus. As the water film thickness increases, the yield stress and plastic viscosity of composite cementitious materials paste decrease in a power exponential manner. This effect can be represented by the simplified YODEL model and Ahmadah model.

Key words: composite cementitious material; Dinger-Funk model; rheological property; wet packing density; water film thickness

水泥混凝土是世界上用量最大的人造建筑材料,每使用1 kg水泥需要排放0.6 kg以上的CO_2,对全球温室效应造成显著影响[1-2].使用粉煤灰、矿粉等辅助性胶凝材料代替部分水泥制备复合胶凝材料已成为重要的减碳措施[2-4].

胶凝材料的流变性能影响新拌水泥基材料的施工性能,成为当代混凝土结构更复杂发展趋势下的重要性能.颗粒级配影响拌和物中粗细颗粒的比例,是影响流变性能的重要因素.当前级配分布模数对混凝土流变性能影响的研究主要集中在骨料层次,如Dinger-Funk模型已应用于自密实混凝土和超高性能混凝土等[1,5-6].级配分布模数影

收稿日期:2024-02-29;修订日期:2024-03-17
基金项目:"十四五"国家重点研发计划项目(2022YFC3803104);国家自然科学基金资助项目(U22B2076,51878480,52078369,52308274);宁波市重大科技攻关暨揭榜挂帅项目(2022Z030);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目
第一作者(通讯作者):蒋正武(1974—),男,安徽潜山人,同济大学教授,博士生导师,博士.E-mail:jzhw@tongji.edu.cn

响粗细颗粒的体积占比，从而通过骨料堆积密实度影响流变性能[7]，且不同性能需求或骨料形貌特征对骨料的级配分布模数取值有不同的要求[8]. 在胶凝材料层次，辅助性胶凝材料的掺量、粒径和形貌等特征影响浆体的流变性能[9]，掺入粒径小的粉煤灰和硅灰会提高胶凝材料堆积密实度和比表面积[10-11]. 此外，粉煤灰呈球形，具有滚珠效应，而矿粉与石粉等多棱角、不规则形状的材料对流变性能的影响各不相同[9,12]. 然而，胶凝材料颗粒级配对浆体流变性能的研究较少，亟需在胶凝材料层次考虑多因素作用，开展级配分布模数对胶凝材料浆体流变性能的影响研究.

本文基于Dinger-Funk模型，设计了水泥与辅助性胶凝材料的配合比，研究了级配分布模数对复合胶凝材料浆体流变性能的影响规律，通过堆积密实度、水膜厚度等物理特征，探究其对屈服应力、塑性黏度的影响机理，以期为流变性能调控以及基于流变性能需求的复合胶凝材料设计提供理论基础.

1　试验

1.1　原材料

水泥为P·O 52.5普通硅酸盐水泥(C)，选用硅灰(SF)、矿粉(SL)、粉煤灰(FA)和石灰石粉(LP)作为辅助性胶凝材料，制备的水泥-硅灰、水泥-矿粉、水泥-粉煤灰和水泥-石灰石粉分别记为C-SF、C-SL、C-FA和C-LP. 使用激光粒度仪测试胶凝材料的粒径分布，结果见图1. 由图1可见，胶凝材料粒径大小顺序为硅灰＜粉煤灰＜水泥＜矿粉＜石灰石粉. 考虑激光粒度仪的误差范围，选取5%累计粒度分布粒径d_5作为最小粒径d_{min}，95%累计粒度分布粒径d_{95}作为最大粒径d_{max}用于级配设计. 采用氮气吸附法和李氏瓶法测得胶凝材料的比表面积和表观密度，结果见表1.

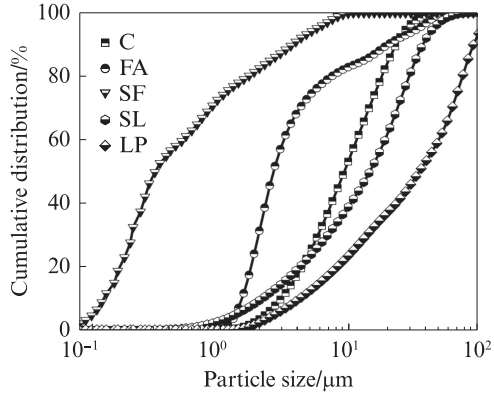


图1　胶凝材料粒径分布

Fig. 1　Particle distribution of cementitious materials

表1　胶凝材料基本物理性能参数

Table 1　Basic physical properties of cementitious materials

Material	Specific surface area/($m^2 \cdot kg^{-1}$)	Apparent density/($kg \cdot m^{-3}$)	d_5/μm	d_{95}/μm
C	355.1	3 147.1	2.21	27.39
SF	15 738.4	2 153.3	0.10	5.61
FA	1 886.7	2 508.2	1.26	33.01
SL	428.0	2 844.0	1.38	43.67
LP	364.9	2 688.0	2.66	110.98

1.2　配合比设计

采用Dinger-Funk模型设计级配(见式(1))，根据胶凝材料的粒径分布以及文献研究中对级配分布模数q值的推荐范围[5]，选取q值为0.10～0.40进行复合胶凝材料的配合比设计.

$$P(d_i)=\frac{d_i^q-d_{min}^q}{d_{max}^q-d_{min}^q} \tag{1}$$

式中：$P(d_i)$为粒径小于d_i的理想累计体积分数，%；d_i为材料第i个粒级的粒径，μm.

复合胶凝材料实际累计分数$P(d_i)'$与$P(d_i)$有差距，$P(d_i)'$用激光粒度仪所测数据进行计算：

$$P(d_i)'=\sum_{k=1}^{j}v_kP_k(d_i) \tag{2}$$

式中：v_k为第k种胶凝材料的体积分数，%；j为胶凝材料的种类；$P_k(d_i)$为第k种胶凝材料中粒径小于d_i的累计体积分数，%.

借助solver tool实现$P(d_i)'$与$P(d_i)$的偏差最小化，可得胶凝材料的体积分数v_k，其求解过程包含目标值、调控值和边界条件[1,7]的计算. 目标值R_{min}^2是复合胶凝材料级配曲线与理想级配曲线最小差值的平方[1,7]. 其计算式为：

$$\sum_{k=1}^{j}v_k=1,\quad v_k>0 \tag{3}$$

$$R_{min}^2=\sum_{i=1}^{n}\left[P(d_i)'-P(d_i)\right]^2 \tag{4}$$

式中：n为粒级总数.

调控值是复合胶凝材料中各材料的占比，影响总胶凝材料的级配，通过调控v_k实现R_{min}^2最小，达到级配优化的效果. 复合胶凝材料在不同q值下的配合比见表2，表中u_w为水胶比(体积比).

1.3　试验方法

1.3.1　流变性能

流变试验中，水泥-硅灰浆体在水胶比0.4下的剪切应力和塑性黏度较大，超出流变仪测量范围，因此将其水胶比调整为0.8. 动态剪切流变测试(DSR)分为预剪切、剪切速率增大和剪切速率减小3个阶

段,其剪切速率γ随时间的变化见图2.选择适用于水泥基材料流变性能分析的改进 Bingham 模型(见式(5)),对下降段的剪切应力-剪切速率曲线进行拟合,探究其流变性能.

表2 复合胶凝材料在不同q值下的配合比

Table 2 Mix proportions of composite cementitious materials under different q values

Group	q value	Mix proportion/(kg·m^{-3})					u_w
		C	FA	SL	SF	LP	
C-FA-0.10	0.10	2 328.8	652.1				1.19
C-FA-0.15	0.15	2 457.8	549.3				1.20
C-FA-0.20	0.20	2 590.0	443.9				1.21
C-FA-0.25	0.25	2 715.9	343.6				1.22
C-FA-0.30	0.30	2 841.7	243.3				1.23
C-FA-0.35	0.35	2 961.3	148.0				1.24
C-FA-0.40	0.40	3 080.9	52.7				1.25
C-SL-0.10	0.10	1 973.2		1 060.8			1.21
C-SL-0.15	0.15	1 712.0		1 296.9			1.20
C-SL-0.20	0.20	1 447.6		1 535.8			1.19
C-SL-0.25	0.25	1 183.3		1 774.7			1.18
C-SL-0.30	0.30	912.6		2 019.2			1.17
C-SL-0.35	0.35	642.0		2 263.8			1.16
C-SL-0.40	0.40	371.3		2 508.4			1.15
C-SF-0.10	0.10	1 595.5			1 061.4		2.13
C-SF-0.15	0.15	1 734.0			966.7		2.16
C-SF-0.20	0.20	1 869.3			874.1		2.19
C-SF-0.25	0.25	1 998.3			828.9		2.23
C-SF-0.30	0.30	2 124.2			699.7		2.26
C-SF-0.35	0.35	2 243.8			617.9		2.29
C-SF-0.40	0.40	2 360.3			538.3		2.32
C-LP-0.10	0.10	1 076.3				1 768.7	1.14
C-LP-0.15	0.15	909.5				1 911.2	1.13
C-LP-0.20	0.20	739.5				2 056.3	1.12
C-LP-0.25	0.25	575.9				2 196.1	1.11
C-LP-0.30	0.30	412.3				2 335.9	1.10
C-LP-0.35	0.35	248.6				2 475.6	1.09
C-LP-0.40	0.40	91.3				2 610.0	1.08

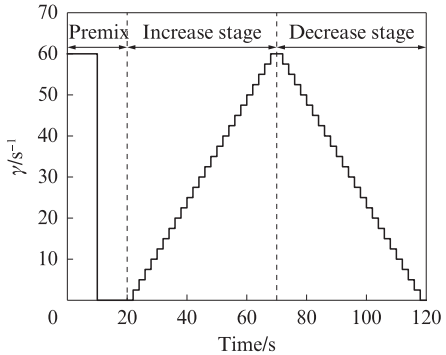


图2 动态剪切流变测试中剪切速率随时间的变化

Fig. 2 Change of shear rate with time in DSR

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \gamma + c\gamma^2 \tag{5}$$

式中:τ为剪切应力,Pa;τ_0为屈服应力,Pa;η_p为塑性黏度,Pa·s;c为二阶参数,Pa·s^2.

1.3.2 湿堆积密实度

在特定水胶比下,将胶凝材料达到的最大堆积密实度作为湿堆积密实度[13].低水胶比下胶凝材料会絮凝团聚,需掺入2%(质量分数)的减水剂来分散颗粒[13].设置复合胶凝材料的水胶比为0.20~0.50,其湿堆积密实度φ_m计算式为:

$$\varphi_m = \frac{V_s}{V} \tag{6}$$

$$V_s = \frac{M_{max}}{\rho_w R_w + \sum_{k=1}^{j} \rho_k R_k} \tag{7}$$

$$R_{\mathrm{w}}=\frac{V_{\mathrm{w}}}{V_{\mathrm{cm}}}=\frac{V_{\mathrm{w}}}{\sum_{k=1}^{j}V_k} \tag{8}$$

$$R_k=\frac{V_k}{V_{\mathrm{cm}}}=\frac{V_k}{\sum_{k=1}^{j}V_k} \tag{9}$$

式中：V为容器的体积，m^3；V_{s}为容器中胶凝材料的体积，m^3；ρ_{w}、ρ_k分别为水、胶凝材料k的表观密度，$\mathrm{kg/m}^3$；R_{w}、R_k分别为水、胶凝材料k与总胶凝材料的体积分数；V_{w}、V_k和V_{cm}分别为水、胶凝材料k和总胶凝材料的体积，m^3；$M_{\max}$为容器中浆体的最大质量，kg.

1.3.3　水膜厚度

将浆体假设成固液悬浮体系[14]，拌和水分成两部分，一部分填充颗粒间的堆积空隙，另一部分包裹于颗粒表面，其水膜厚度d_{WFT}计算式为：

$$d_{\mathrm{WFT}}=\frac{u'_{\mathrm{w}}}{A_{\mathrm{M}}} \tag{10}$$

$$A_{\mathrm{M}}=A_{\mathrm{C}}R_{\mathrm{C}}+A_xR_x \tag{11}$$

$$u_{\mathrm{v}}=\frac{1-\varphi_{\mathrm{m}}}{\varphi_{\mathrm{m}}} \tag{12}$$

$$u'_{\mathrm{w}}=u_{\mathrm{w}}-u_{\mathrm{v}} \tag{13}$$

式中：A_{M}为单位体积下颗粒的比表面积，$\mathrm{m}^2/\mathrm{m}^3$；$A_{\mathrm{C}}$、$A_x$分别为单位体积下水泥、辅助性胶凝材料的比表面积（氮气吸附法实测），$\mathrm{m}^2/\mathrm{m}^3$；$R_{\mathrm{C}}$、$R_x$分别为水泥、辅助性胶凝材料的体积分数；$u_{\mathrm{v}}$为浆体空隙率；$u'_{\mathrm{w}}$为富余水胶比.

2　结果与讨论

2.1　不同级配分布模数下的流变性能

浆体的剪切应力-剪切速率曲线见图3.由图3可见：随着剪切速率的增加，水泥-粉煤灰、水泥-矿粉和水泥-石灰石粉浆体剪切应力-剪切速率曲线的微分黏度变化较小；而水泥-硅灰浆体表现出剪切变稀的特性，且随着q值的增大，剪切变稀趋势减弱.

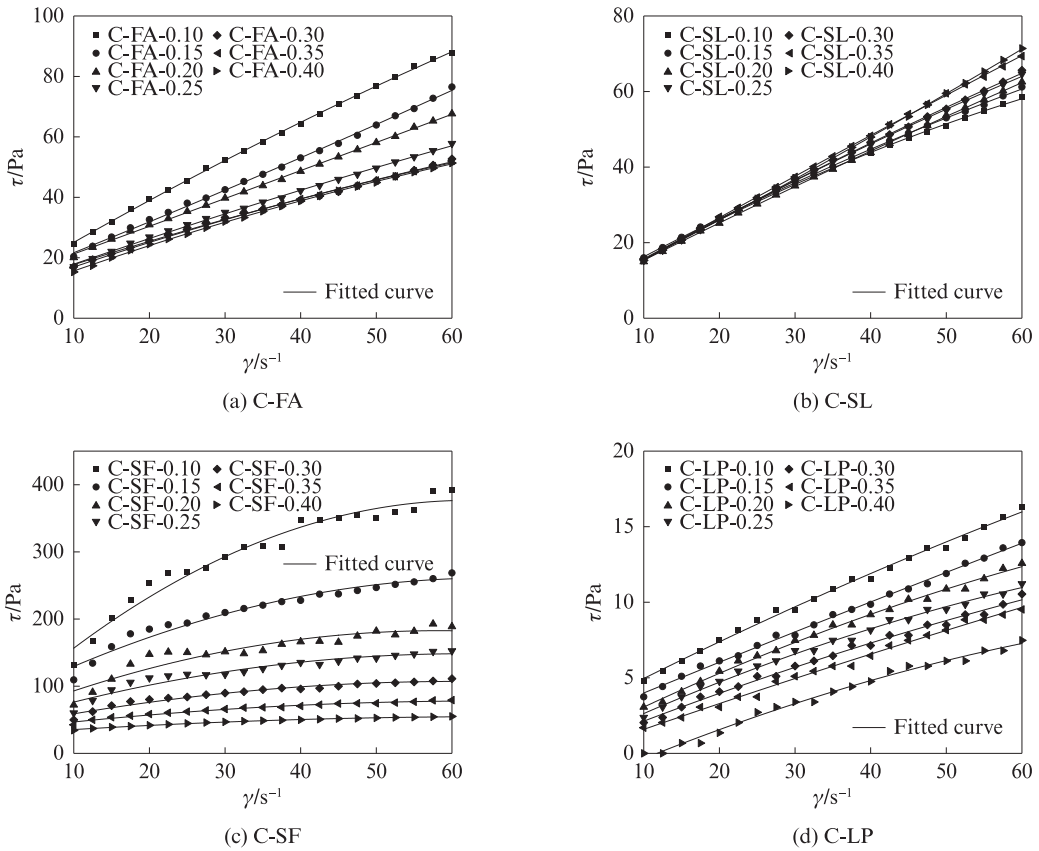


图3　浆体的剪切应力-剪切速率的曲线

Fig. 3　Shear stress-shear rate of pastes

浆体的拟合屈服应力和塑性黏度见图4.由图4可见：随着q值的增加，水泥-粉煤灰和水泥-硅灰浆体的屈服应力先增大再减小，塑性黏度先下降后保持平缓，这是因为当q值增加时，粉煤灰、硅灰的掺量减小，复合胶凝材料的比表面积减小，水膜厚度增加，使得其屈服应力和塑性黏度呈整体下降趋势；水泥-矿粉浆体的屈服应力和塑性黏度受q值的变化影响较小，这是因为矿粉的粒径接近水泥，改变其配合比对浆体流变性能没有明显的影响；水泥-石灰石粉浆体的屈服应力随着q值的增加而减小，塑

性黏度几乎不变，这是因为石灰石粉掺量随 q 值增加而增大，屈服应力降低[11,15]. 综上，不同组成的复合胶凝材料流变性能随级配分布模数的变化趋势不一致.

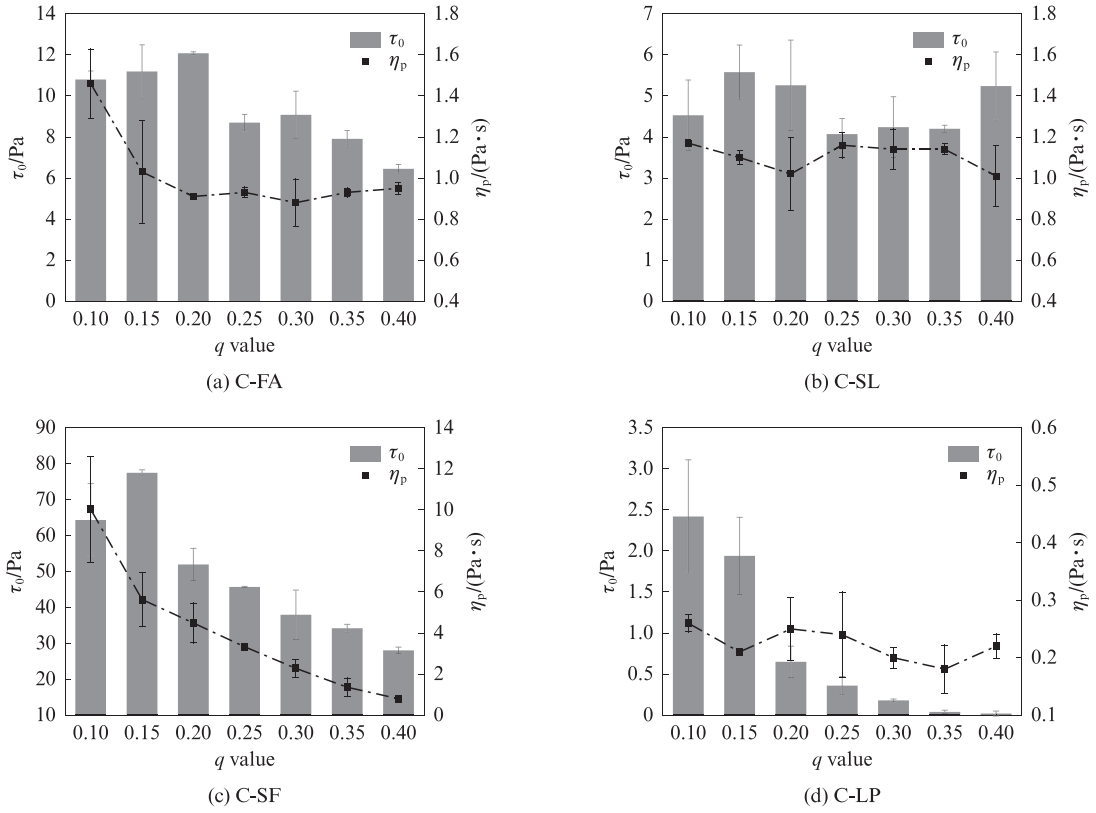


图4 浆体的拟合屈服应力和塑性黏度

Fig. 4 Fitted yield stress and plastic viscosity of pastes

2.2 湿堆积密实度对流变性能的影响

2.2.1 湿堆积密实度的变化规律

水泥-粉煤灰浆体的湿堆积密实度见图5. 由图5可见，当水胶比从0.22增大至0.50时，浆体湿堆积密实度呈先增大后降低的趋势，且在水胶比为0.25时达到最大值0.718. 这是因为水胶比较低时，胶凝材料不足以拌和成糊状浆体，存在大量空隙；而水胶比较高时，颗粒分散在水介质中，颗粒间距增大，湿堆积密实度降低[13,16].

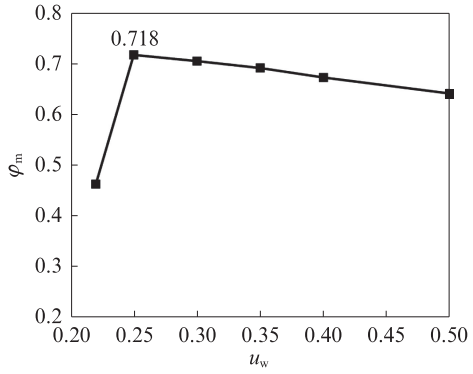


图5 水泥-粉煤灰浆体的湿堆积密实度

Fig. 5 Wet packing density of C-FA pastes

复合胶凝材料浆体的湿堆积密实度见图6. 由图6可见：当 q 值从0.1增加至0.4时，浆体的湿堆积密实度先增大后降低；当 q 值为0.15～0.25时，浆体湿堆积密实度较高. 当 q 值较小时，细颗粒在复合胶凝材料中的比例较高，其体积超过粗颗粒间的空隙，引发边壁效应和楔入效应[10,17]，在粗颗粒附近形成额外的空隙，使浆体的湿密实度降低. 当 q 值较大时，细颗粒比例减少，不能充分填充颗粒间空隙，导致浆体的湿堆积密实度降低[10]. 浆体的湿堆积密实度与其水胶比(0.25～0.45)之间存在负相关性，在优化级配下，颗粒紧密堆积，所需的填充水减少，当颗粒级配不合理时，密实度下降，所需的水胶比增加. 研究表明，4种胶凝材料中粒径小的球状粉煤灰和硅灰对颗粒空隙的填充效果较好，湿堆积密实度达到0.72以上，而粒径较大且具有不规则形状的矿粉、石灰石粉与水泥颗粒间难以相互填充[9,17].

综上，当 q 值取0.15～0.25时，浆体湿堆积密实度较高，且与其组成无关.

2.2.2 湿堆积密实度对流变性能的影响规律

浆体流变性能随湿堆积密实度的变化规律见图7. 由图7可见：随着湿堆积密实度的增加，浆体屈服应

力呈现增大趋势，塑性黏度也有着相似的变化规律；粉煤灰、硅灰等细颗粒的掺入可以提高复合胶凝材料浆体的湿堆积密实度，导致其屈服应力、塑性黏度的增大[9,18]．尽管流变性能与湿堆积密实度有一定的相关性，但存在较多的分散点，表明湿堆积密实度不是影响复合胶凝材料流变性能的主导因素．

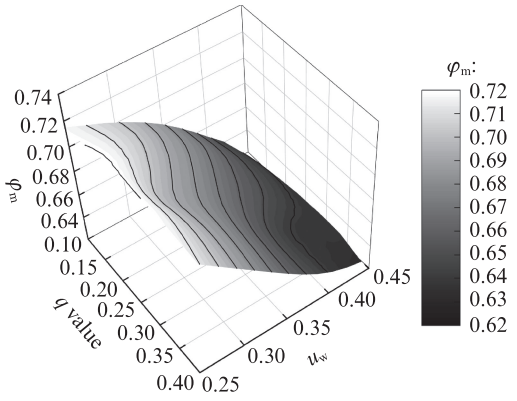


图6　复合胶凝材料浆体的湿堆积密实度

Fig. 6　Wet packing density of composite cementitous materils pastes

2.3　水膜厚度对流变性能的影响

2.3.1　水膜厚度的变化规律

浆体的水膜厚度主要受到比表面积、水胶比等的影响．浆体的水膜厚度见图8．由图8可见：随着q值的增加，水泥-粉煤灰和水泥-硅灰浆体水膜厚度增大，水泥-矿粉和水泥-石灰石粉浆体的水膜厚度减小；在相同水胶比下，随着比表面积的增大，浆体水膜厚度呈下降趋势；掺入粉煤灰、硅灰细颗粒增加了复合胶凝材料浆体的比表面积，导致水膜厚度减小[9]；当比表面积接近时，浆体水膜厚度随着水胶比的增加而增大，更多的拌和水包裹于颗粒表面．

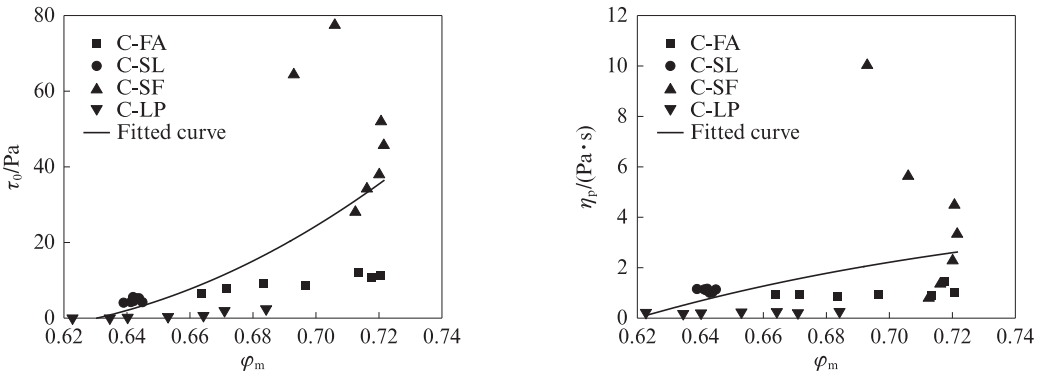


图7　浆体流变性能随湿堆积密实度的变化规律

Fig. 7　Variation of rheological properties in relation to wet packing density of pastes

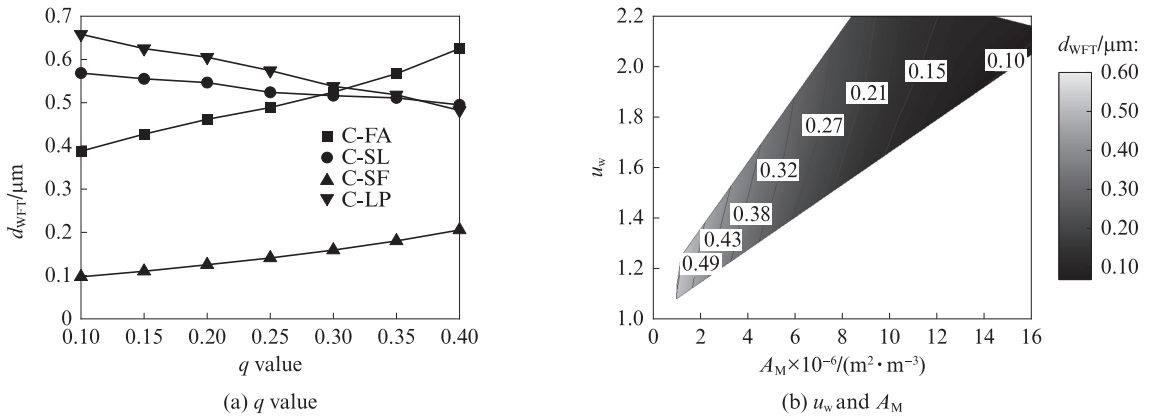
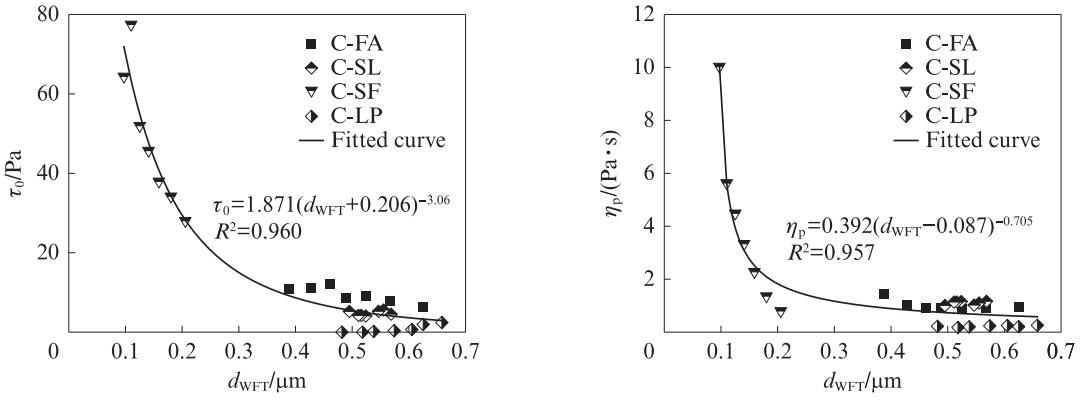


图8　浆体的水膜厚度

Fig. 8　Water film thickness of pastes

2.3.2　水膜厚度对流变性能的影响规律

浆体流变性能与水膜厚度的关系见图9．由图9可见：随着水膜厚度的增加，浆体屈服应力和塑性黏度减小，且呈幂指数型下降；当水膜厚度从0.1 μm增加至0.2 μm时，浆体塑性黏度急剧减小；当水膜厚度达到0.5 μm时，其对浆体流变性能的影响减弱．浆体流变性能随水膜厚度的变化规律与文献中的研究结果一致[14-15]．通过优化级配提高浆体湿堆积密实度，可使水膜厚度增加，为颗粒相对运动提供更多的流体介质，降低互锁效应[10]．但随着细颗粒的掺入，增大



(a) τ_0-d_{WFT} (b) η_p-d_{WFT}

图9 浆体流变性能与水膜厚度的关系

Fig. 9 Relationship between rheological properties and water film thickness of pastes

了浆体比表面积,从而减小了水膜厚度.由此可见,水膜厚度综合体现了湿堆积密实度、比表面积因素对浆体流变性能的影响[14,19].

2.4 流变性能预测模型

2.4.1 屈服应力

YODEL模型[20]描述了浆体中胶体相互作用和颗粒接触作用对屈服应力的影响,但该模型中Hamaker常数A_0和渗流体积分数φ_0受颗粒特性影响而不确定.因此,用简化YODEL模型来评估浆体的屈服应力[21]:

$$\tau_0 \cong \frac{1}{H^2}\frac{F_{\sigma,\Delta}}{R'}\frac{\varphi^3}{\varphi_m(\varphi_m-\varphi)} \tag{14}$$

式中:$F_{\sigma,\Delta}$为粒径分布函数;R'为颗粒半径的中位值,m;H为颗粒间距,取2倍水膜厚度,m;φ为固体体积分数,%.

利用简化YODEL模型可建立浆体屈服应力与胶凝材料物理特征的关系[20-21],结果见图10.由图10可见,随着模型计算值的增加,浆体屈服应力也相应增大.$1/H^2$表示胶体相互作用,与颗粒间距相关[21],受到水膜厚度的影响.$F_{\sigma,\Delta}\cdot\varphi^3\Big/\Big[R'\cdot\varphi_m(\varphi_m-\varphi)\Big]$表示颗粒接触作用,使用Dinger-Funk模型优化级配,增加湿堆积密实度.另外,掺入与水泥粒径不同的粉煤灰、硅灰、矿粉和石灰石粉,扩大粒径分布范围,增大粒径分布函数$F_{\sigma,\Delta}$[20],从而提高颗粒接触的概率,增强颗粒接触作用[21].因此,紧密堆积设计优化材料的颗粒级配,通过改变湿堆积密实度、水膜厚度等物理特征,影响胶体相互作用和颗粒接触作用,最终影响浆体的屈服应力.

2.4.2 塑性黏度

浆体的塑性黏度与颗粒间流体动力相互作用、颗粒接触作用有关联,可通过颗粒间距、粒径、湿堆

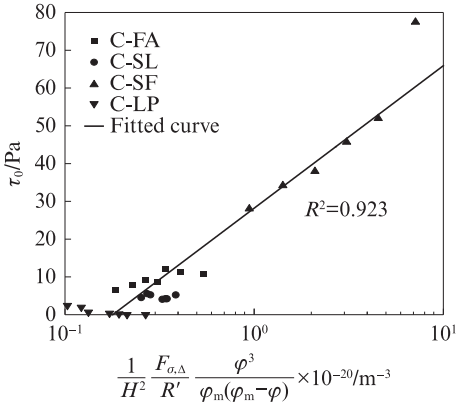


图10 浆体屈服应力与胶凝材料物理特征的关系

Fig. 10 Relationship between yield stress of pastes and physical characteristics of cementitious materials

积密实度等参数进行表征[10,22].Ahmadah[23]提出了塑性黏度模型:

$$\eta_p = \frac{r}{Hd}\left(1-\frac{\varphi}{\varphi_m}\right)^{-3} \tag{15}$$

式中:d为颗粒平均粒径,取50%累计粒度分布粒径值,m;r为浆体间隙液黏度与接触点曲率半径有关的系数.

浆体的塑性黏度与胶凝材料物理特征的关系见图11.由图11可见,随着模型计算值的增加,浆体塑性黏度也相应增大.$\left(1-\varphi/\varphi_m\right)^{-3}$和$1/(Hd)$分别表示颗粒间接触作用和流体动力相互作用对塑性黏度的影响[23].一方面,湿堆积密实度会影响颗粒间的接触摩擦和碰撞;另一方面,在比表面积和湿堆积密实度的综合影响下,水膜厚度改变颗粒间距从而影响颗粒接触作用力[19].此外,当颗粒间距增大时,颗粒间隙液的局部剪切程度降低,减弱了颗粒间流体动力的相互作用,进而影响浆体的塑性黏度[22-23].

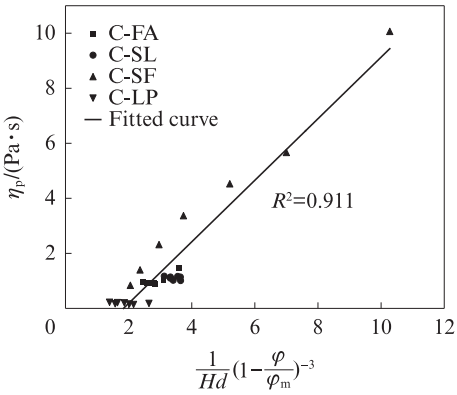


图11　浆体塑性黏度与胶凝材料物理特征的关系

Fig. 11　Relationship between plastic viscosity of pastes and physical characteristics of cementitious materials

3　结论

(1)不同组成的复合胶凝材料的流变性能随级配分布模数q值的变化趋势不一致.随着q值的增加，水泥-粉煤灰和水泥-硅灰浆体的屈服应力先增大后减小，塑性黏度呈下降趋势；水泥-石粉浆体的屈服应力随q值增加而减小，塑性黏度保持不变；水泥-矿粉的流变性能受q值的影响较小.

(2)通过研究q值对湿堆积密实度的影响，建议q值取0.15～0.25，用于Dinger-Funk模型设计复合胶凝材料的配合比，以实现浆体较高的湿堆积密实度.

(3)湿堆积密实度对流变性能有一定的影响，但水膜厚度是q值影响流变性能的关键因素，其屈服应力和塑性黏度与水膜厚度呈幂指数型下降关系.

(4)q值影响复合胶凝材料的粒径分布、湿堆积密实度、水膜厚度等物理特征.通过简化YODEL模型和Ahmadah模型可建立复合胶凝材料浆体流变性能与物理特征的相关性.

参考文献：

[1] ESMAEILKHANIAN B, KHAYAT K H, WALLEVIK O H. Mix design approach for low-powder self-consolidating concrete: Eco-SCC-content optimization and performance[J]. Materials and Structures, 2017, 50(2):124.

[2] HABERT G, MILLER S A, JOHN V M, et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries[J]. Nature Reviews Earth and Environment, 2020, 1(11):559-573.

[3] 蒋正武，尹军. 可持续混凝土发展的技术原则与途径[J]. 建筑材料学报，2016，19(6):957-963.
JIANG Zhengwu, YIN Jun. Technical principles and approaches for development of sustainable concrete[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(6):957-963. (in Chinese)

[4] 蒋正武，高文斌，杨巧，等. 低碳混凝土的技术理念与途径思考[J]. 建筑材料学报，2023，26(11):1143-1150.
JIANG Zhengwu, GAO Wenbin, YANG Qiao, et al. Technical principles and approaches for low carbon concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(11):1143-1150. (in Chinese)

[5] 余睿，范定强，水中和，等. 基于颗粒最紧密堆积理论的超高性能混凝土配合比设计[J]. 硅酸盐学报，2020，48(8):1145-1154.
YU Rui, FAN Dingqiang, SHUI Zhonghe, et al. Mix design of ultra-high performance concrete based on particle densely packing theory[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(8):1145-1154. (in Chinese)

[6] 温得成，魏定邦，吴来帝，等. 基于MAA模型的UHPC基体配合比设计和特性分析[J]. 建筑材料学报，2022，25(7):693-699，743.
WEN Decheng, WEI Dingbang, WU Laidi, et al. Research on mix design and characteristics of UHPC matrix mixture based on MAA model[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(7):693-699, 743. (in Chinese)

[7] HÜSKEN G, BROUWERS H J H. A new mix design concept for earth-moist concrete: A theoretical and experimental study[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(10):1246-1259.

[8] WANG X H, WANG K J, TAYLOR P, et al. Assessing particle packing based self-consolidating concrete mix design method[J]. Construction and Building Materials, 2014, 70:439-452.

[9] MEHDIPOUR I, KHAYAT K H. Effect of particle-size distribution and specific surface area of different binder systems on packing density and flow characteristics of cement paste[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 78:120-131.

[10] 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.

[11] 张倩倩，张丽辉，冉千平，等. 石灰石粉对水泥浆体流变性能的影响及作用机理[J]. 建筑材料学报，2019，22(5):680-686.
ZHANG Qianqian, ZHANG Lihui, RAN Qianping, et al. Effect of limestone powder on rheological properties of cement paste and its mechanism[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(5):680-686. (in Chinese)

[12] 汪保印，张洁，熊金伟，等. 废弃石粉对混凝土的性能影响及碳排放分析[J]. 建筑材料学报，2023，26(11):1151-1157，1206.
WANG Baoyin, ZHANG Jie, XIONG Jinwei, et al. Influence of waste stone powder on properties and carbon emissions of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(11):1151-1157, 1206. (in Chinese)

[13] 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.

[14] KWAN A K H, CHEN J J. Roles of packing density and water film thickness in rheology and strength of cement paste[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2012, 10(10):332-344.

[15] 肖佳，张泽的，韩凯东，等. 水泥-石灰石粉浆体颗粒水膜厚度与其屈服应力关系[J]. 建筑材料学报，2021，24(2):

231-236, 246.
XIAO Jia, ZHANG Zedi, HAN Kaidong, et al. Relationship between water film thickness and yield stress of cement-ground limestone powder paste[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2):231-236, 246. (in Chinese)

[16] WONG H H C, KWAN A K H. Packing density of cementitious materials:Part 1—Measurement using a wet packing method[J]. Materials and Structures, 2008, 41(4):689-701.

[17] NG P L, KWAN A K H, LI L G. Packing and film thickness theories for the mix design of high-performance concrete[J]. Journal of Zhejiang University-Science A(Applied Physics & Engineering), 2016, 17(10):759-781.

[18] 刘宇, 黎梦圆, 阎培渝. 矿物掺合料对胶凝材料浆体流变性能和触变性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(5):594-601.
LIU Yu, LI Mengyuan, YAN Peiyu. Effect of mineral admixtures on rheological properties and thixotropy of binder paste [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(5): 594-601. (in Chinese)

[19] KWAN A K H, LI L G. Combined effects of water film thickness and paste film thickness on rheology of mortar[J]. Materials and Structures, 2012, 45(9):1359-1374.

[20] FLATT R J, BOWEN P. Yield stress of multimodal powder suspensions:An extension of the YODEL (yield stress model) [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2007, 90(4): 1038-1044.

[21] ZHU J, SHU X, TANG J H, et al. Effect of microfines from manufactured sand on yield stress of cement paste [J]. Construction and Building Materials, 2021, 267:120987.

[22] ZHU J, LIU J P, KHAYAT K H, et al. Mechanisms affecting viscosity of cement paste made with microfines of manufactured sand[J]. Cement and Concrete Research, 2022, 156:106757.

[23] AHMADAH O. Rheology control of cements with low environmental impact[D]. Quebec:University of Sherbrooke, 2021.