

流变参数对自密实混凝土等效砂浆静态稳定性的影响

马昆林, 冯 金, 龙广成, 谢友均, 陈小波

(中南大学土木工程学院, 高速铁路建造技术国家工程实验室, 重载铁路工程结构教育部重点实验室, 长沙 410075)

摘 要: 采用旋转黏度计测试了基于混凝土等效砂浆法所配制砂浆的塑性黏度和触变性, 采用冲模-揭板试验研究了不同塑性黏度和触变性的砂浆硬化后表面的气泡特点, 采用硬化后砂浆表层气泡率和表层气泡直径对砂浆的静态稳定性进行了表征。结果表明: 塑性黏度和触变性对硬化后砂浆表层气泡率和直径均有重要影响。相对于触变性, 塑性黏度与砂浆表层气泡率和直径的相关性更高。砂浆表层气泡率和气泡直径均随黏度增大而显著减少, 砂浆黏度不低于 $3.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时, 表层气泡率小于 5%, 直径大于 5 mm 的气泡数量接近零。砂浆表层气泡率随触变性增加而减少, 砂浆触变性不低于 $12.5 \times 10^3 \text{ Pa/s}$ 时, 砂浆表层气泡率基本小于 10%。当砂浆塑性黏度不低于 $3.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 且触变性不低于 $12.5 \times 10^3 \text{ Pa/s}$ 时, 其静态稳定性较好。

关键词: 自密实混凝土; 混凝土等效砂浆; 塑性黏度; 触变性; 静态稳定性

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2017)02-0196-10

网络出版时间: 2017-01-18 21:53:04

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2310.TQ.20170118.2153.017.html>

Influence of Rheological Parameters on Static Stability of Self-Compacting Concrete Equivalent Mortar

MA Kunlin, FENG Jin, LONG Guangcheng, XIE Youjun, CHENG Xiaobo

(School of Civil Engineering, Central South University, National Engineering Laboratory for Construction Technology of High Speed Railway, Key Laboratory of Engineering Structure of Heavy Railway, Ministry of Education, Changsha 410075, China)

Abstract: The plastic viscosity and thixotropy of self-compacting concrete equivalent mortar (SCCEM) were tested by rotational viscometer. The surface bubbles characteristics of mortar with different plastic viscosities and thixotropies were investigated by a self-designed filling-box device. Two parameters of surface bubbles ratio (SBR) and surface bubble diameter (SBD) of hardened mortar were used to characterize the static stability of mortar. The results show that the plastic viscosity and thixotropy both have great influences on SBR and SBD. Compared to the thixotropy, the correlation between the plastic viscosity and SBR/SBD is better. SBR and SBD of mortar decrease dramatically with the increasing plastic viscosity. When plastic viscosity is no less than $3.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, SBR is less than 5% and SBD larger than 5 mm is close to zero. SBR of mortar reduces with the increasing thixotropy. SBR is almost less than 10% when the thixotropy of fresh mortar is more than $12.5 \times 10^3 \text{ Pa/s}$. When the plastic viscosity is more than $3.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ and the thixotropy of fresh mortar is more than $12.5 \times 10^3 \text{ Pa/s}$, SCCEM has a good static stability.

Keywords: self-compacting concrete equivalent mortar; plastic viscosity; thixotropy; static stability

新拌自密实混凝土(SCC)具有较高的流动性, 较好的充填性, 较强的间隙通过性和抗析水性。硬化 SCC 具有较低的孔隙率, 较高的强度以及较好的耐久性能。因此 SCC 自问世就得到了较多关注, 并成为了现代混凝土技术的重要发展方向之一^[1-2]。

静态稳定性是新拌 SCC 的重要工作性能指标

之一^[3]。SCC 静态稳定性是指新拌 SCC 抵抗泌水和离析的能力, 即 SCC 在浇筑后, 凝结硬化前的静置过程中发生的骨料下沉浆体上浮现象^[4]。为获得较好的流动性, SCC 中胶凝材料用量较大, 且掺入了较多的矿物掺合料和高效减水剂。高效减水剂本身具有引气作用, 且在 SCC 的运输和施工过程中, 大

收稿日期: 2016-05-26。 修订日期: 2016-10-20。

基金项目: 国家自然科学基金(51678569, 51678568); 国家“973”计划(2013CB036201); 中南大学教师科学基金(2014JSJ013)资助。

第一作者: 马昆林(1976—), 男, 博士, 副教授。

Received date: 2016-05-26. Revised date: 2016-10-20.

First author: MA Kunlin (1976—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: makunlin@csu.edu.cn

量空气会在搅拌过程中混入 SCC 中。实践发现，静态稳定性不佳的 SCC 硬化后表层通常会出现大量气泡或浮浆，从而严重影响 SCC 质量^[5]。目前针对 SCC 静态稳定性已经有很多测试方法^[6]，文献[4]采用柱状法试验和贯入试验对 SCC 的静态稳定性进行测试，并指出静态稳定性较好时 SCC 应具备的工作性参数。从流变学的角度来说，SCC 静态稳定性与流变行为密切相关。成功的 SCC 应具有较低的屈服应力以适应其较高的变形能力，适合的塑性黏度和触变性以确保其骨料颗粒能均匀悬浮在浆体中同时确保 SCC 中的气泡不上浮至表层^[5,7-8]。在 SCC 的浇筑过程中以及硬化前的静置过程中，若塑性黏度和触变性较低，骨料相将下沉，浆体相将上浮，SCC 中的气泡也将上浮，在表层形成气泡或浮浆。掺入适合矿物掺合料^[9-12]或化学增稠剂^[13-14]均能有效改变 SCC 的塑性黏度和触变性，然而关于 SCC 静态稳定性与流变参数之间的关系还有待深入研究。

混凝土等效砂浆法(CEM)于 2000 年提出^[15]。其原理是采用砂子取代混凝土中的粗骨料，且取代用砂子的表面积与粗骨料表面积相等。研究表明^[16-17]，采用 CEM 方法配制的砂浆与原配合比 SCC 的流变学参数具有较好的相似性，并可以通过测试 CEM 砂浆性能进行 SCC 配合比设计。为此，基于相关研究结果，采用矿物掺合料改变流变参数，研究 SCC 等效砂浆配制的砂浆体系在冲模-揭板试验中上表面气泡的数量和直径及其与砂浆塑性黏度和触变性的关系，并提出了具有较好静态稳定性的

SCC 等效砂浆的流变参数。

1 实验

1.1 原料及配合比

水泥(C)：兆山新星集团湖南有限公司生产的 P·O 42.5 水泥，水泥主要技术指标见表 1 所示。粉煤灰(FA)：湖南湘潭电厂的 F 类粉煤灰。矿粉(SL)：湖南湘潭钢厂提供的磨细矿渣。石灰石粉(LP)：湖南益阳桃江产石灰石粉。水泥、粉煤灰、矿粉和石灰石粉的粒径分析和化学组成见表 2 所示。砂子(S)：湖南湘江长产河砂，细度模数 2.57，表观密度 2 660 kg/m³，堆积密度 1 516 kg/m³。聚羧酸高效减水剂(PS)：湖南金华达建材有限公司生产，减水率 18.1%，固体含量 25.4%。拌合用水(W)：自来水。

砂浆的配合比采用 CEM 方法：采用筛分的方法计算各筛孔粗骨料的筛余质量，结合筛孔直径和筛余质量计算自密实混凝土中粗骨料的总表面积；同样的方法对砂子进行筛分，计算一定质量砂子的表面积；计算与所用自密实混凝土中粗骨料表面积相同的砂子的质量；采用一定质量的砂子代替粗骨料，该质量砂子的表面积与 SCC 中所用粗骨料的表面积相当。

胶凝材料、砂、石、水的配合比为 540:843:843:187。砂浆配合比中，除了采用一定质量的砂子替代了全部 SCC 中的粗骨料外，其它材料及用量均相同。砂浆配合比设计见表 3 所示。通过调整减水剂用量控制所测试砂浆的扩展度在(300±10) mm。

表 1 水泥的主要技术指标

Table 1 Properties of cement

Specific gravity/ (kg·m ⁻³)	Specific surface area/ (m ² ·kg ⁻¹)	Mass fraction w/%					Setting time/min		Compressive strength/MPa	
		f-Cao	Alkali	C ₃ A	Cl ⁻	SO ₃	Initial	Final	3 d	28 d
3 120	344	0.09	0.47	7.22	0.010	2.85	149	211	25.1	46.8

表 2 水泥、粉煤灰、矿粉及石灰石粉化学组成及粒径分析

Table 2 Properties of cement, fly ash, slag and limestone powder

Material	Specific gravity/(kg·m ⁻³)	Specific surface area/(m ² ·kg ⁻¹)	D[V _{0.5}]/μm	Mass fraction/%						
				SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	CaCO ₃	SO ₃
Cement (C)	3120	344	16.21	20.3	3.2	4.8	62.3	4.2		2.85
Fly ash (FA)	2450	486	8.25	51.8	5.0	26.4	4.1	1.0		2.0
Slag (SL)	2730	465	9.16	35.5	6.6	16.6	36.9	12.9		1.02
Limestone powder (LP)	2670	573	6.77	0.45	0.02	0.01	58.3			97.8

表 3 砂浆配合比
Table 3 Mixed proportion of mortar

Sample No.	Mass fraction/%					
	Cement	Fly ash	Slag	Limestone powder	Sand	Water
M0	100	0	0	0	162	34
M-FA10	90	10	0	0	159	34
M-FA20	80	20	0	0	157	34
M-FA30	70	30	0	0	154	34
M-FA40	60	40	0	0	152	34
M-FA50	50	50	0	0	149	34
M-SL10	90	0	10	0	161	34
M-SL20	80	0	20	0	159	34
M-SL30	70	0	30	0	158	34
M-SL40	60	0	40	0	157	34
M-SL50	50	0	50	0	156	34
M-LP10	90	0	0	10	161	34
M-LP20	80	0	0	20	159	34
M-LP30	70	0	0	30	158	34
M-FA20-SL5	75	20	5	0	156	34
M-FA20-SL10	70	20	10	0	156	34
M-FA20-SL15	65	20	15	0	155	34
M-FA20-SL20	60	20	20	0	154	34
M-FA20-LP5	75	20	0	5	156	34
M-FA20-LP10	70	20	0	10	156	34
M-FA20-LP15	65	20	0	15	155	34
M-FA20-LP20	60	20	0	20	154	34

1.2 方法

1.2.1 砂浆黏度及触变性测试 试验在(25±2)°C, 相对湿度(70±5)%的条件下进行。先将各配合比砂浆置于搅拌锅内加水搅拌, 慢速搅拌 120 s 后停 15 s, 接着快速搅拌 120 s, 然后采用 Anton Paar 公司生产的 Rheolab QC 型旋转黏度计测定砂浆在各剪切速率下的剪切应力值, 采用 Bingham 流体模型对剪切速率和剪切应力进行数学拟合^[18], 见公式(1), 得到相应塑性黏度值。

$$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma} \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力(Pa); τ_0 为屈服应力(Pa); η 为塑性黏度(Pa·s); $\dot{\gamma}$ 为剪切速率(s⁻¹)。砂浆触变性采用测试砂浆触变环的方法进行。旋转黏度计测试剪切速率由 5 s⁻¹ 增大到 150 s⁻¹, 然后又由 150 s⁻¹ 降为 5 s⁻¹ 过程中形成的触变环面积。

1.2.2 砂浆静态稳定性试验 砂浆搅拌完成后, 先

测试其流动扩展度, 然后测试塑性黏度和触变环面积, 最后进行砂浆静态稳定性试验。试验采用的模具见图 1 所示。首先将模具内部清理干净并涂抹脱模剂, 然后将模具放置在水平位置, 模具上侧的盖板用重物压实。将砂浆从距离浇筑口 100 mm 高度处缓缓连续注入模具中, 直至砂浆从模具端部排气孔处满出并开始逸出时停止浇筑。静置 24 h 后将上盖板揭开, 观察试件上表层质量并统计试块上表面不同直径的气泡数量。为方便统计, 将砂浆上表层出现的气泡按照直径分为 0.5 mm ≥ d > 5 mm 以及 d ≥ 5 mm 两类, 其中直径在 0.5~5 mm 的气泡, 按照 0.5 mm ≥ d > 1 mm、1 mm ≥ d > 2 mm、2 mm ≥ d > 3 mm、3 mm ≥ d > 4 mm、4 mm ≥ d > 5 mm 进行数量统计, 计算 0.5~5 mm 气泡面积与砂浆上表层面积之比, 采用表层砂浆气泡率(r)表示, 式(2)所示, 对于气泡直径大于 5 mm 的气泡, 按个数进行统计。

$$r = \frac{0.25\pi(\sum(n_1d_{0.5-1}^2 + n_2d_{1-2}^2 + n_3d_{2-3}^2 + n_4d_{3-4}^2 + n_5d_{4-5}^2))}{S} \times 100\% \quad (2)$$

式中： r 为砂浆表层气泡率，%； $n_1 \sim n_5$ 分别为不同直径的气泡数量； $d_{0.5-1} \sim d_{4-5}$ 分别为(0.5 mm~5 mm) 内 5 个区间内的气泡直径，取上下限的平均值作为该区间的气泡的平均直径，mm； S 为砂浆上表面积， mm^2 。

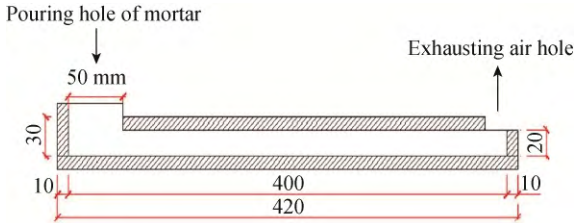


图 1 砂浆静态稳定性测试装置

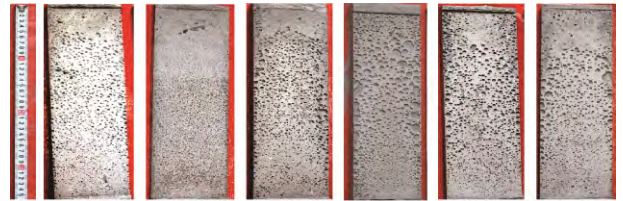
Fig. 1 Schematic diagram of mortar stability testing device

2 结果与讨论

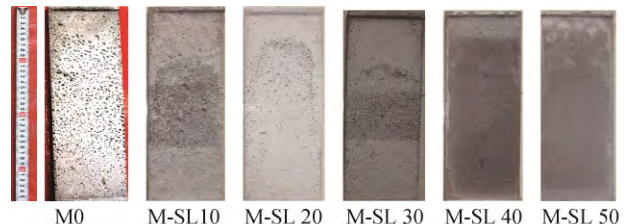
2.1 砂浆表层气泡

采用表 3 的配合比，当砂浆流动扩展度达到 (300 ± 10) mm 时，砂浆均能够将实验模具充满，但 24 h 揭开上盖板后硬化砂浆的表层质量和表层气泡有较大不同。图 2 为各配合比进行模具充填试验后表面质量照片。由图 2a 可知，随粉煤灰掺量增加，砂浆表层气泡数量明显增加，且直径较大的气泡数量显著增加，这说明，增大粉煤灰掺量容易使砂浆在静置后仍产生较多气泡，不利于砂浆静态稳定性。由图 2b 可知，随矿粉掺量增加，砂浆表层气泡数量减少，且随掺量增加，表层砂浆大孔气泡数量显著降低，表层质量显著得到改善，说明掺入矿粉后，有利于提高砂浆的静态稳定性。由图 2c 可知，掺入石灰石粉后，砂浆表层仍有大量气泡，且直径较大的气泡数量较多。由图 2d~图 2e 可知，采用矿物掺合料双掺后，在一定掺量范围内，砂浆表层气泡显著减少，特别是大孔气泡数量显著减少，如 20%和粉煤灰和 15%和 20%的矿粉复掺后，砂浆表

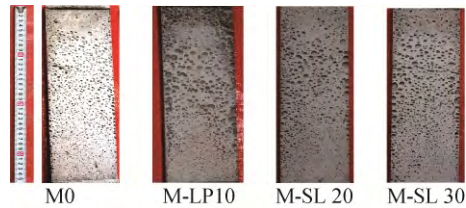
层质量较好，20%的粉煤灰和 10%的石灰石粉复掺后，砂浆表层质量也较好，说明采用适合的矿物掺合料双掺能够有效降低砂浆的表层气泡，有利于提高浆体的静态稳定性。改变矿物掺合料对砂浆工作



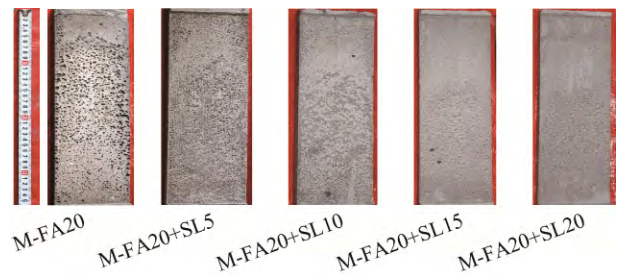
(a) Influence of FA



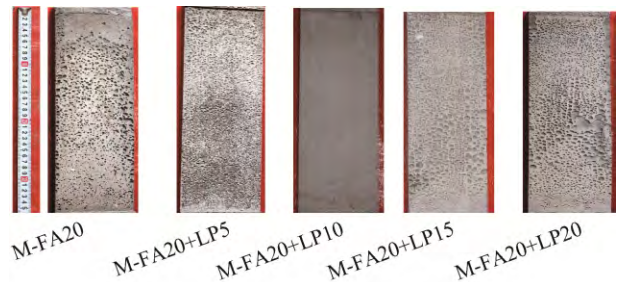
(b) Influence of SL



(c) Influence of LP



(d) Influence of FA and SL compound



(e) Influence of FA and LP compound

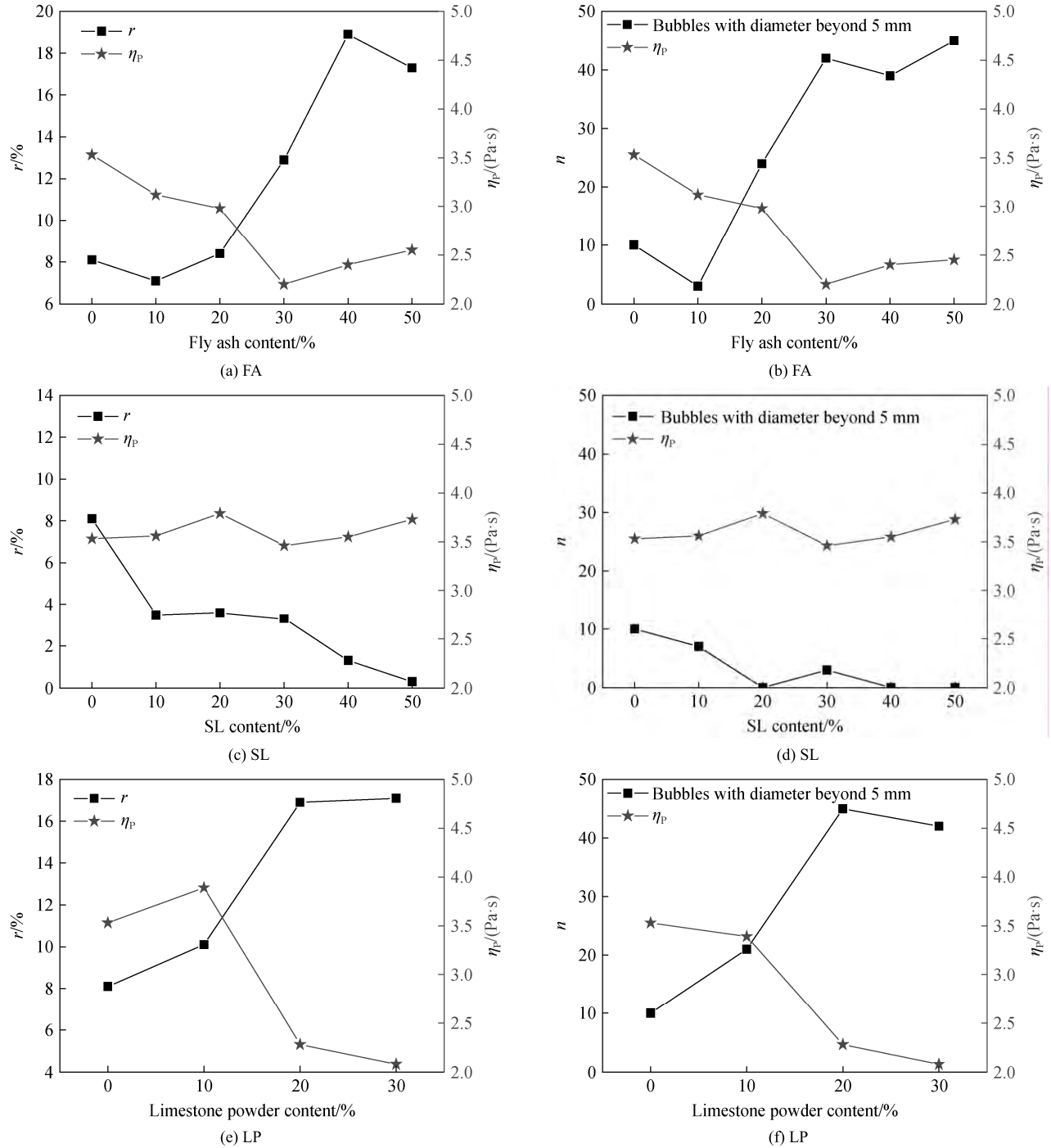
图 2 不同条件下砂浆表面层气泡
Fig. 2 Mortar surface bubbles under different mixtures

性的影响实际上是改变了屈服应力、塑性黏度和触变性等流变参数。通过减水剂的调节, 砂浆流动扩展度在(300±10) mm 时, 均能充满模具, 说明该条件下砂浆的流动性均能满足要求, 但不同塑性黏度和触变性对砂浆表层气泡的数量和大小产生了重要影响。

2.2 塑性黏度与表层气泡

砂浆表层气泡率以及表层直径大于 5 mm 的气泡与砂浆塑性黏度的关系见图 3 和图 4 所示。图 3

为矿物掺合料单掺条件下, 砂浆塑性黏度与表层气泡的关系。图 4 为矿物掺合料双掺条件下, 砂浆塑性黏度与表层气泡的关系。由图 3a 和图 3b 可知, 随粉煤灰掺量增大, 砂浆塑性黏度显著降低。随着粉煤灰掺量增大, 砂浆表层气泡率增加, 且砂浆表层大于 5 mm 的气泡显著增加。即随着塑性黏度降低, 砂浆表层气泡显著增多, 特别是当砂浆中粉煤灰掺量大于 20% 后, 砂浆黏度显著降低, 气泡数量显著增加, 粉



Note*: r is surface bubble ratio.

图 3 塑性黏度(η_p)与单掺矿物掺合料砂浆表面气泡的关系

Fig. 3 Plastic viscosity (η_p) vs. bubble numbers n with single mineral admixture

煤灰掺量为 40%和 50%时, 砂浆黏度分别降低至 2.41 Pa·s 和 2.55 Pa·s, 表层气泡率分别为 18.9%和 18.3%, 表层大于 5 mm 的气泡数量分别为 39 个和 45 个, 这说明增大粉煤灰掺量, 特别是掺量大于 20%后, 砂浆塑性黏度相对较低, 对砂浆的静态稳定性不利。

由图 3c 和图 3d 可知, 随着矿粉掺量增加, 砂浆黏度略有增大, 砂浆黏度大致在 3.5~4.0 Pa·s 之间变化, 而表层气泡率随着矿粉掺量的增加显著降低, 且砂浆表层大于 5 mm 的气泡显著减少。特别是矿粉掺量大于 30%后, 砂浆表层质量较好, 无显著气泡出现, 当砂浆中矿粉掺量为 40%和 50%时, 砂浆黏度为 3.55 Pa·s 和 3.73 Pa·s, 表层气泡率为 1.3%和 0.9%, 砂浆表层大于 5 mm 的气泡数量均为 0, 说明掺入矿粉在一定程度上提高了塑性黏度, 对砂浆的静态稳定性有利。

由图 3e 和图 3f 可知, 当石灰石粉掺量大于 10%后, 砂浆的塑性黏度显著降低, 砂浆表层气泡率和直径大于 5 mm 的气泡数量随石灰石粉掺量的增加, 显著增大, 当砂浆中石灰石粉掺量为 30%时, 黏度

降低为 2.08 Pa·s, 表层气泡率为 17.8%, 表层大于 5 mm 的气泡数量为 42 个, 说明石灰石粉的掺入不能有效提高砂浆的静态稳定性。

由图 4a 和图 4b 可知, 保持粉煤灰掺量 20%不变, 同时掺入矿粉时, 随着矿粉掺量增加, 砂浆的塑性黏度逐渐增大, 当矿粉掺量大于 15%以后, 砂浆黏度大于 3.5 Pa·s, 砂浆表层气泡率显著降低, 且砂浆表层大于 5 mm 的气泡数量明显减少, 当矿粉掺量为 15%和 20%时, 砂浆黏度为 3.66 Pa·s 和 3.72 Pa·s, 而表层砂浆率为 5.9%和 3.7%, 表层直径大于 5 mm 的气泡数量均为 0。

由图 4c 和图 4d 可知, 粉煤灰掺量为 20%时, 当石灰石粉掺量在 10%以内时, 随着石灰石粉掺量的增加, 砂浆黏度有一定增大, 20%的粉煤灰与 10%的石灰石粉双掺时, 砂浆黏度为 3.48 Pa·s, 表层直径大于 5 mm 的气泡数量为 1 个, 然而石灰石粉掺量大于 10%以后, 砂浆黏度显著降低, 20%的粉煤灰与 20%的石灰石粉双掺时, 砂浆黏度仅为 2.07 Pa·s, 表层气泡率

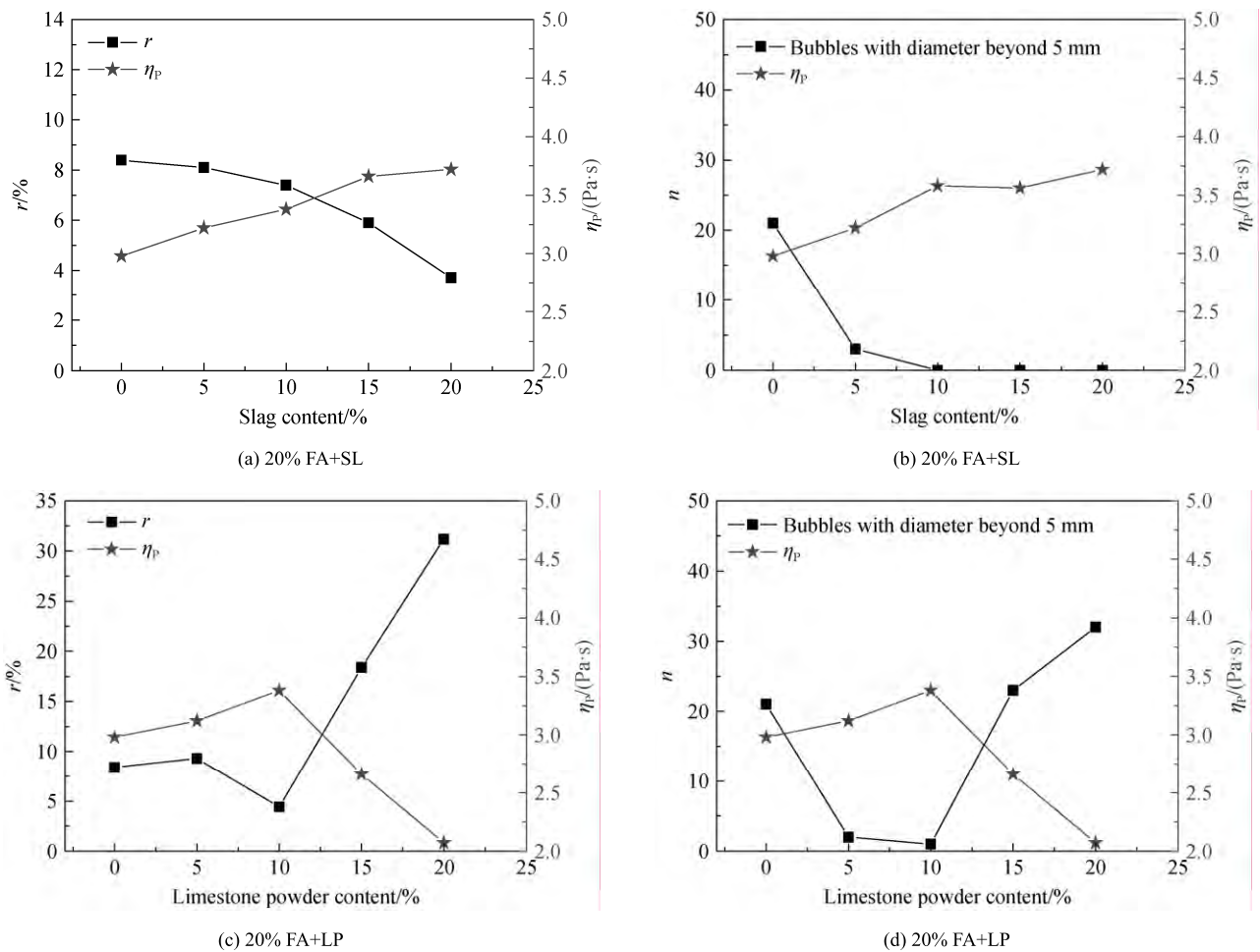


图 4 塑性黏度与复掺矿物掺料砂浆表面气泡的关系
Fig. 4 Plastic viscosity vs. bubble numbers with compound mineral admixtures

图 5a 和图 5b 分别是砂浆表层气泡率和塑性黏度的相关性，砂浆表层直径大于 5 mm 的气泡数量与塑性黏度的相关性。由图 5a 可知，砂浆表层气泡率与其塑性黏度之间具有较好的线性关系，且相关系数为 0.87。由图 5b 可知，砂浆表层直径大于 5 mm 的气泡与塑性黏度之间也具有较好的相关性，相关系数为 0.89。以上说明，砂浆塑性黏度对表层气泡数量和气泡的大小都有重要影响，砂浆塑性黏度高，则砂浆表层气泡率降低，表层气泡直径减小，塑性黏度低则表层气泡率高，表层气泡直径增大。从图 5 还可以看出，当塑性黏度大于 3.0 Pa·s 时，砂浆表层气泡率基本低于 10%，且表层直径大于 5 mm 的气泡数量基本少于 10 个，当塑性黏度大于 3.5 Pa·s 时，砂浆气泡率基本低于 5%，且表层直径大于 5 mm 的气泡数量较少出现，几乎为零。因此，建议具有较好静态稳定性的砂浆黏度系数不宜低于 3.5 Pa·s。

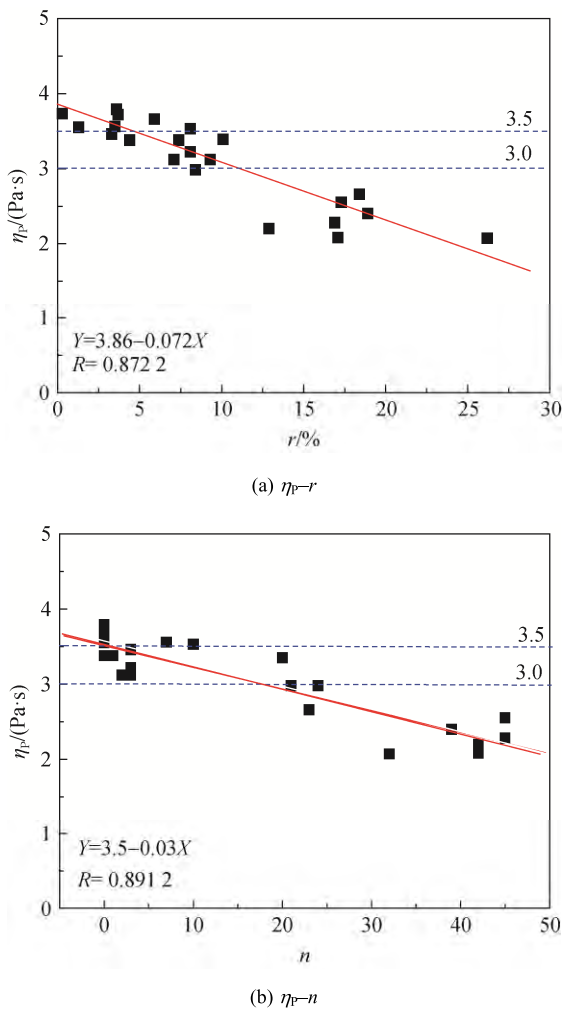


图 5 表层气泡与塑性黏度的关系
Fig. 5 Relations between bubbles and plastic viscosity

2.3 触变性与表层气泡

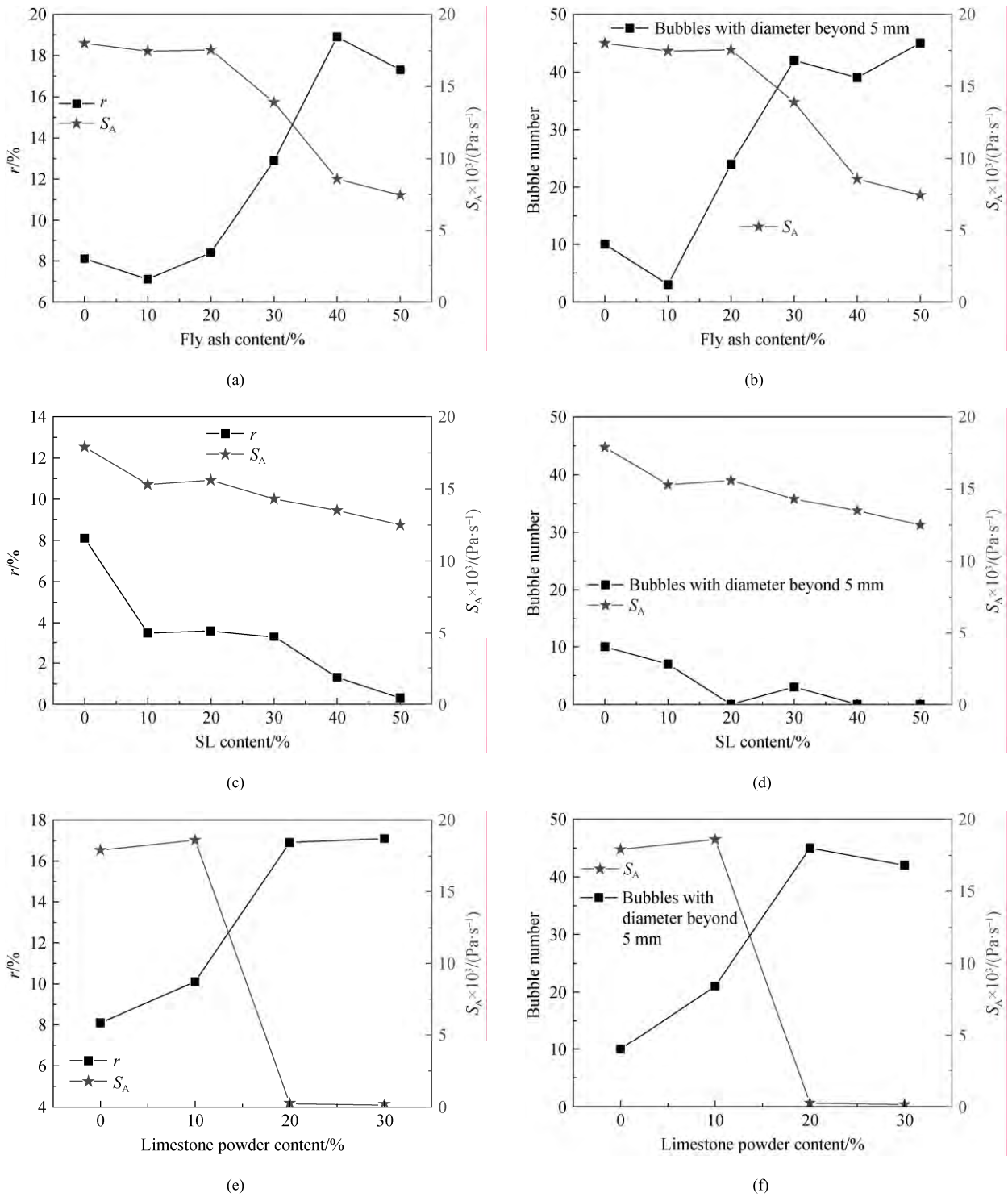
砂浆表层气泡率以及砂浆表层直径大于 5 mm 的气泡与砂浆触变性的关系见图 6 和图 7 所示。图 6 为矿物掺合料单掺条件下，砂浆触变性与表层气泡的关系。图 7 为矿物掺合料双掺条件下，砂浆触变性与表层气泡的关系。

由图 6a 和图 6b 可知，粉煤灰的掺入降低了砂浆的触变性，特别是当粉煤灰掺量大于 20% 后，砂浆的触变性显著降低。当砂浆触变性显著降低后，特别是当砂浆中粉煤灰掺量大于 20% 后，砂浆触变性显著降低，表层气泡率显著增加，而砂浆表层直径大于 5 mm 的气泡数量随着粉煤灰掺量的增加显著增加。这说明粉煤灰掺量的增加，特别是掺量大于 20% 后，砂浆触变性显著降低，对砂浆的静态稳定性不利。

由图 6c 和图 6d 可知，随着矿粉掺量增加，砂浆触变性有一定程度降低，但不显著，而表层气泡率随着矿粉掺量的增加显著降低，且砂浆表层大于 5 mm 的气泡显著减少。特别是矿粉掺量大于 30% 以后，砂浆表层质量较好，无显著气泡出现。当矿粉掺量为 40% 和 50% 时，触变环面积为 13.5×10^3 Pa/s 和 12.6×10^3 Pa/s，表层气泡率为 1.3% 和 0.9%，砂浆表层大于 5 mm 的气泡数量均为 0，这说明矿粉的掺入未显著降低砂浆的触变性，对砂浆的静态稳定性有利。

由图 6e 和图 6f 可知，石灰石粉掺量大于 10% 后，砂浆触变性显著降低，砂浆表层气泡率和直径大于 5 mm 的气泡数量随石灰石粉掺量的增加显著增大，当砂浆中石灰石粉掺量为 20% 和 30% 时，砂浆触变环面积降低为 0.25×10^3 Pa/s 和 0.14×10^3 Pa/s，表层气泡率为 16.9% 和 17.8%，表层大于 5 mm 的气泡数量为 45 个和 42 个，这说明石灰石粉的掺入量大于 10% 后，砂浆触变性显著降低，砂浆静态稳定性显著降低。

由图 7a 和图 7b 可知，粉煤灰掺量 20% 不变，随矿粉掺量增加，砂浆触变环面积有一定降低，但随矿粉掺量增加砂浆表层气泡率降低，且砂浆表层大于 5 mm 的气泡数量明显减少，当矿粉掺量为 15% 和 20% 时，砂浆触变环面积仍然有 13.1×10^3 Pa/s 和 12.8×10^3 Pa/s。矿粉单掺和复掺的试验结果表明，矿粉掺入后砂浆的塑性黏度有一定提高，触变环面积未出现显著降低，且硬化后的砂浆表面气泡数量和大小均显著低于掺入其它种类矿物掺合料的砂浆，说明掺入矿粉有利于提高砂浆的静态稳定性。



S_A is area of thixotropic hysteresis loop.

图 6 触变性与单掺矿物掺合料砂浆表面气泡的关系

Fig. 6 Thixotropy vs. bubble numbers with single mineral admixture

由图 7c 和图 7d 可知，粉煤灰掺量为 20%时，当石灰石粉掺量在 10%以内时，随石灰石粉掺量增加，砂浆触变性未显著降低，砂浆表层气泡率也未显著增大。然而石灰石粉掺量大于 10%后，砂浆触变性显著降低，20%的粉煤灰与 15%和 20%的石灰石粉双掺时，砂浆触变环面积黏度仅为 0.49×10^3 Pa/s

和 0.43×10^3 Pa/s，表层气泡率达到 18.4%和 31.2%，表层直径大于 5 mm 的气泡数量为 23 个和 32 个。

图 8a 和图 8b 分别为砂浆表层气泡率和触变环面积的相关性，砂浆表层直径大于 5 mm 的气泡数量与触变环面积的相关性。由图 8a 可知，砂浆表层气泡率与其触变环面积之间具有一定线性关系，且

相关系数为 0.73，说明砂浆触变环面积对表层气泡率有一定的影响。由图 8a 可以看出，当触变环面积大于 $12.5 \times 10^3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时，砂浆表层气泡率基本低于 10%。由图 8b 可知，砂浆表层直径大于 5 mm 的气

泡与触变环面积之间也具有一定相关性，相关系数为 0.57，也表现为触变环面积降低，砂浆表层直径大于 5 mm 的气泡增加。因此，建议具有较好静态稳定性的砂浆触变环面积不宜低于 $12.5 \times 10^3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

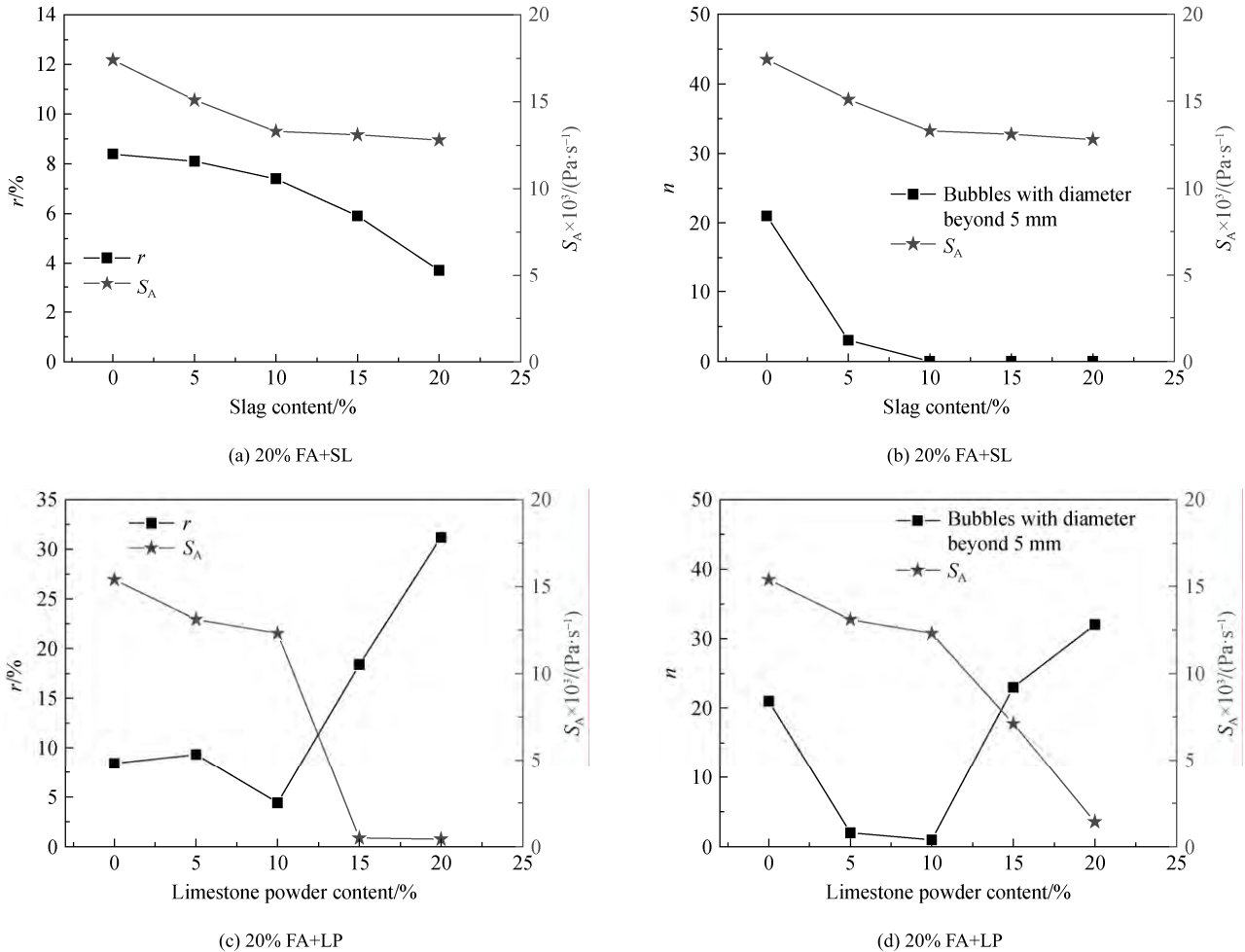


图 7 触变性复掺矿物掺合料砂浆表面气泡的关系
Fig. 7 Thixotropy vs. bubble numbers with compound mineral admixture

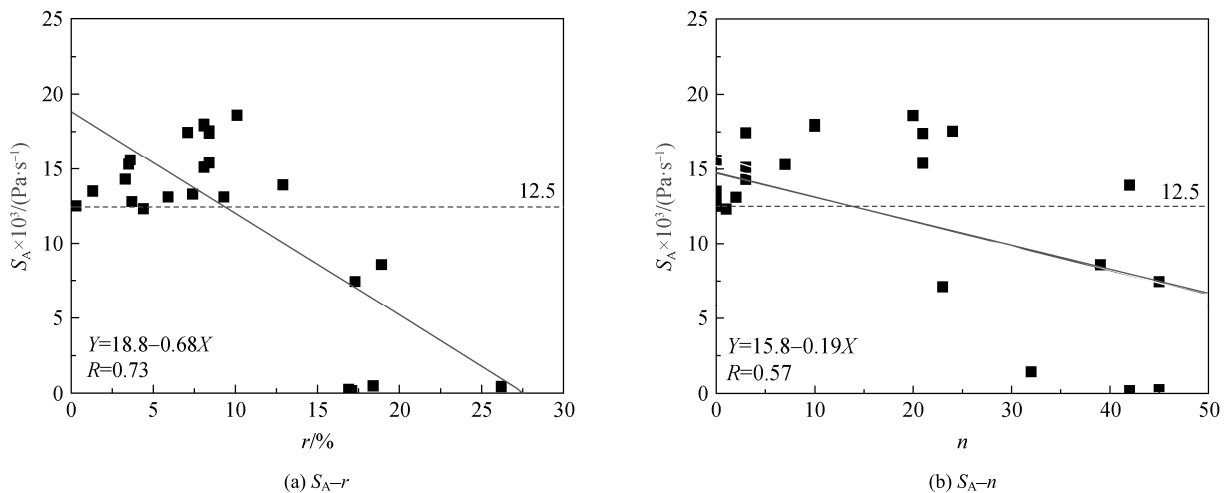


图 8 表层气泡和触变性的关系
Fig. 8 Relations between bubble numbers and thixotropy

3 结论

1) 掺入矿粉后砂浆的塑性黏度稍有提高, 触变环面积未出现显著降低, 且硬化后的砂浆表面气泡率和大小均显著低于掺入粉煤灰和石灰石粉的砂浆, 矿粉的掺入有利提高砂浆的静态稳定性。

2) 塑性黏度和触变性对硬化后砂浆表层气泡率和直径均有影响, 但是相对于触变性, 塑性黏度与砂浆表层气泡率和直径的相关性更高。砂浆表层气泡率和直径均随黏度增大而显著减少, 砂浆黏度不低于 $3.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时, 表层气泡率小于 5%, 直径大于 5 mm 的气泡数量接近于零。砂浆表层气泡率随触变性增加而减少, 砂浆触变性不低于 $12.5 \times 10^3 \text{ Pa/s}$ 时, 砂浆表层气泡率几乎小于 10%。

3) 当塑性黏度不低于 $3.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 且触变性不低于 $12.5 \times 10^3 \text{ Pa/s}$ 时, 采用自密实混凝土等效砂浆方法配制的砂浆具有较好的静态稳定性。

参考文献:

- [1] OKAMURA H, OUCHI M. Self-compacting high performance concrete [J]. *Prog Struct Eng Mater*, 1998, 1(4): 378–83.
- [2] AÏCIN P C. Cements of yesterday and today-concrete of tomorrow [J]. *Cem Concr Res*, 2000, 30(9): 1349–59.
- [3] KHAYAT K H, HU C H. Monty. Stability of self-compacting concrete advantages, and potential applications[A]//1st international RILEM Symposium on self-compacting concrete[C]//Stockholm, Sweden, 1999, 9.
- [4] 张勇, 赵庆新, 李化建, 等. 自密实混凝土基本工作性能与其静态稳定性间的关系[J]. *硅酸盐学报*, 2016, 44(2): 261–267.
ZHANG Yong, ZHAO Qingxin, LI Huajia, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2016, 44(2): 261–267.
- [5] KHAYAT K H, ASSAAD J. Air-void stability in self-consolidating concrete [J]. *ACI Mater J*, 2002, 99(4): 408–416.
- [6] 张勇, 李化建, 赵庆新, 等. 自密实混凝土稳定性评价方法研究进展[J]. *混凝土*, 2015(10): 113–118.
ZHANG Yong, LI Huajia, ZHAO Qingxin, et al. *Concrete (in Chinese)*, 2015(10): 113–118.
- [7] RAHMAN M K, BALUCH M H, MALIK M A. Thixotropic behavior of self compacting concrete with different mineral admixtures[J]. *Construct Build Mater*, 2014, 50(15): 710–717.
- [8] NUNES S, OLIVEIRA P M, COUTINHO J S, et al. Rheological characterization of SCC mortars and pastes with changes induced by cement delivery [J]. *Cem Concr Compos*, 2011, 33 (1): 103–115.
- [9] LASKAR A I, TALUKDAR S. Rheological behavior of high performance concrete with mineral admixtures and their blending [J]. *Construct Build Mater*, 2008, 22(12): 2345–2354.
- [10] CORINALDESI V, MORICONI G. The role of industrial by-products in self-compacting concrete [J]. *Construct Build Mater*, 2011, 25(8): 3181–3186.
- [11] 马昆林, 龙广成, 谢友均, 等. 水泥-粉煤灰-石灰石粉复合浆体的流变性能[J]. *硅酸盐学报*, 2013, 41(5): 582–585.
MA Kunlin, LONG Guangcheng, XIE Youjun, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2013, 41(5): 582–585.
- [12] 唐修生, 蔡跃波, 温金保, 等. 磨细矿渣复合浆体流变参数与流动度的相关性[J]. *硅酸盐学报*, 2014, 42(5): 648–652.
TANG Xiusheng, CAI Yuebo, JIN Baowen, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2014, 42(5): 648–652.
- [13] LEEMANN A, WINNEFELD F. The effect of viscosity modifying agents on mortar and concrete [J]. *Cem Concr Compos*, 2007, 29 (5): 341–349.
- [14] CAPPELLARI M, DAUBRESSE A, CHAOUICHE M. Influence of organic thickening admixtures on the rheological properties of mortars: Relationship with water-retention [J]. *Construct Build Mater*, 2013, 38(1): 950–961.
- [15] SCHWARTZENTRUBER A, CATHERINE C. Method of the concrete equivalent mortar (CEM)-A new tool to design concrete containing admixture[J]. *Mater Struct*, 2000, 33(232): 475–482.
- [16] ERDEM T K, KHAYAT K H, YAHIA A. Correlating rheology of SCC to corresponding concrete-equivalent mortar[J]. *ACI Mater J*, 2009, 106(2): 154–161.
- [17] RUBIO-HERNANDEZ F J, VELAZQUEZ-NAVARRO J F, ORDOÑEZ-BELLOC L M. Rheology of concrete: a study case based upon the use of the concrete equivalent mortar[J]. *Mater Struct*, 2013, 46(4): 587–605.
- [18] 张雄, 张蕾. 流变学理论在水泥基材料中的应用[J]. *粉煤灰综合利用*, 2013(4): 9–13.
ZHANG Xiong, ZHANG Lei. *Fly Ash Compreh Util (in Chinese)*, 2013(4): 9–13.