

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.113



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



## 等扩展度条件下骨料包裹砂浆层的影响因素

李飞<sup>1</sup>, 巩璇<sup>1</sup>, 刘晨辉<sup>2</sup>, 冯宝锐<sup>3</sup>, 卢亚<sup>1</sup>

(1. 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;  
2. 北京大学第一医院, 北京 100034; 3. 空军研究院工程设计研究所 北京工程设计室, 北京 100061)

**摘要:**水泥(砂)浆在混凝土中起胶凝和润滑的双重作用,其用量随着混凝土流动性要求的提高而增大,已有研究发现浆体过多会导致混凝土的体积稳定性问题,环保绿色程度低,但骨料级配等因素对混凝土中浆体合理用量的影响研究尚不多见。在粗骨料低空隙率前提下固定粗骨料用量不变,调整砂浆用量来控制混凝土扩展度,研究骨料级配和砂浆流变特性对粗骨料包裹砂浆层厚度及用量的影响。试验结果表明:粗骨料的几何平均粒径增大,包裹砂浆层厚度单调增加,包裹砂浆用量会呈现先减小后增大的趋势,存在最优几何平均粒径;扩展度要求越高,包裹砂浆层厚度及包裹砂浆用量越大,最优几何粒径越小;当粗骨料级配不变时,包裹砂浆层厚度和包裹砂浆用量均随砂浆屈服应力和塑性黏度的增大而增大。

**关键词:**大流态混凝土;包裹砂浆层厚度;包裹砂浆用量;粗骨料级配;扩展度

**中图分类号:** TU528.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)06-0148-08

## Influencing factors of aggregate mortar coating under the condition of equal slump-flow

LI Fei<sup>1</sup>, GONG Xuan<sup>1</sup>, LIU Chenhui<sup>2</sup>, FENG Baoru<sup>3</sup>, LU Ya<sup>1</sup>

(1. Beijing Energy Conservation & Sustainable Urban and Rural Development Provincial and Ministry Co-construction Collaboration Innovation Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, P. R. China; 2. Peking University First Hospital, Beijing 100034, P. R. China; 3. Beijing Engineering Design Office, Engineering Design Research Academy, Air Force Research Institute, Beijing 100061, P. R. China)

**Abstract:** Cement (sand) slurry in the concrete plays a dual role of gelation and lubrication, its dosage with concrete increase with the increase of fluidity requirements, the existing research shows that slurry can lead to volume stability of concrete problems and low degree of green environmental protection, but the aggregate gradation on the effect of reasonable dosage of slurry in the concrete research is still rare. The influence of coarse aggregate grading and mortar rheological features on the mortar coating thickness and mortar coating content of coarse aggregate is studied by adjusting the mortar content under the condition of equal slump-flow of concrete, which coarse aggregate has a fixed amount and relative less bulk voids. The mortar coating thickness increases

**收稿日期:** 2022-06-21

**基金项目:** 十三五国家重点研发计划(2017YFC0703300); 国家自然科学基金(51608028)

**作者简介:** 李飞(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要从事建筑垃圾资源化利用和高性能混凝土及其原材料研究, E-mail: lifei@bucea.edu.cn.

**Received:** 2022-06-21

**Foundation items:** National Key Research and Development Plan During the 13th Five-Year Plan Period (No. 2017YFC0703300); National Natural Science Foundation of China (No. 51608028)

**Author brief:** LI Fei (1981-), PhD, associate professor, main research interests: resource utilization of construction waste and high performance concrete and its raw materials, E-mail: lifei@bucea.edu.cn.

monotonically with the increase of the geometric average particle size of coarse aggregate, mortar coating content shows a trend of first decreasing and then increasing, while a minimum mortar coating content occurs around the optimal geometric average particle size. It has also been proved that larger mortar coating thickness and mortar coating content are required with higher fluidity, but the smaller the optimal geometric mean particle size. The mortar coating thickness and mortar coating content increase with the increase of mortar yield stress and plastic viscosity under fixed particle size grading of coarse aggregate.

**Keywords:** flow concrete; mortar coating thickness; mortar coating content; coarse aggregate grading; slump-flow

随着城镇化的推进以及基础设施的快速完善,混凝土也进入以大流态预拌混凝土为主的阶段。粗骨料作为混凝土组成中不可或缺的一环,占据了混凝土总体积的 50%~70%<sup>[1]</sup>。粗骨料在混凝土中主要承担骨架作用,赋予混凝土更好的耐久性和体积稳定性<sup>[2-4]</sup>。目前混凝土的研究大多以传统混凝土为基础,更多地从胶凝材料和减水剂的角度出发,忽略粗骨料在混凝土中的作用,但对于大流态混凝土来说,粗骨料的品质往往会影响其胶凝材料用量和工作性。

混凝土中的粗骨料并不是简单的堆砌,通过硬化混凝土的切片和研究发现,粗骨料在浆体中处于悬浮状态<sup>[5]</sup>。用中心质假说对混凝土中的空间结构进行解释,可以理解为混凝土是由粗骨料为中心质,浆体作为介质来填充和包裹粗骨料的固体颗粒空间分布模型<sup>[6-7]</sup>。Shen 等<sup>[8]</sup>将混凝土中的砂浆分为填充浆体和多余浆体,发现多余浆体的体积分数始终为粗骨料堆积密度与粗骨料体积分数之差。因此,混凝土中的砂浆一部分填充粗骨料之间的空隙,而多余的浆体则围绕在粗骨料表面形成包裹砂浆层,起到包裹和润滑的作用,从而将砂浆分为包裹砂浆和填充砂浆,它们与粗骨料共同形成了混凝土的填充包裹模型。填充砂浆的用量取决于粗骨料之间的紧密堆积空隙率,当粗骨料之间的空隙越小,需要填充的浆体就会相应地减少。与细骨料不同的是粗骨料的堆积性能对空隙率的影响较小,波动都在 3% 以内<sup>[9]</sup>。de Larrard<sup>[10]</sup>将骨料作为水泥浆体相中的内含物,骨料之间的距离称为最大浆体厚度,发现存在最优的骨料最大尺寸(MSA),当水泥用量不变时,MSA 增大会降低用水量;当水胶比不变时,增大 MSA 将会降低混凝土强度。Bondar 等<sup>[11]</sup>改进了 MPT(最大浆体厚度)模型并优化了混

凝土的配合比。李国栋等<sup>[12]</sup>发现,随着粗骨料的体积率与最大粒径的变大,水泥净浆的包裹层厚度变化不大,但混凝土的流动性得到了改善。田正宏等<sup>[13]</sup>发现,间断级配的粗骨料与连续级配的粗骨料相比,在胶凝材料体系中加入粉煤灰后,粗骨料包裹层变厚同时流变性能有了明显改善。赵洪等<sup>[14]</sup>发现,浆体黏度较高时,可有效提高骨料包裹层的厚度。陈阳<sup>[15]</sup>研究了粗骨料表面砂浆包裹层厚度的计算方法,发现随着包裹层厚度增大,混凝土的流动性和塑性黏度增大,而屈服应力和触变性变小。Xie 等<sup>[16]</sup>发现透水混凝土中骨料表面浆体的厚度与浆体的屈服应力呈现一定的数学关系,可以用来预测水泥浆体的最大体积。刘平等<sup>[17]</sup>发现骨料包裹层厚度存在最佳值,在一定范围内,浆体工作性得到改善,超过这个范围浆体会出现离析。因此,对于包裹砂浆而言,其用量取决于粗骨料表面包裹砂浆层的厚度,而扩展度要求和浆体黏度决定了最小包裹砂浆层的厚度。

笔者在粗骨料低空隙率的前提下定量研究粗骨料级配和砂浆流变特性对包裹砂浆层厚度和包裹砂浆用量的影响,以期得到粗骨料级配的优化和评价。

1 试验

1.1 试验材料

- 水泥:P·O 42.5 水泥,其主要性能如表 1 所示。
- 粉煤灰:试验采用 II 级粉煤灰,其主要性能指标如表 2 所示。
- 矿渣:试验采用 S105 矿渣,其主要性能指标如表 3 所示。
- 减水剂:试验外加剂采用聚羧酸系高效减水剂,含固量为 40%。

表 1 水泥的主要性能指标  
Table 1 Main performance indexes of cement

标稠用水量/%	凝结时间/min		细度(80 μm 筛余)/%	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
	初凝	终凝		3 d	28 d	3 d	28 d
26.9	160	240	0.4	4.6	7.5	22.8	47.5

表 2 粉煤灰的主要性能指标

Table 2 Main performance indexes of fly ash

45μm 筛 余/%	密度/ (g/cm <sup>3</sup> )	需水量 比/%	比表面积/ (m <sup>2</sup> /kg)	活性指 数/%
10	2.24	93	352	80.0

表 3 矿渣的主要性能指标

Table 3 Main performance indexes of slag

45 μm 筛余/%	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	比表面积/(m <sup>2</sup> /kg)	流动性比/%
4.01	2.81	438	91

细骨料:细骨料为安山岩机制砂,产地为湖州,其性能指标如表 4 所示。

表 4 细骨料的主要性能指标

Table 4 Main performance indexes of fine aggregate

细度模数	压碎指标/%	石粉含量/%	亚甲蓝值/(g/kg)
3.4	21	2.2	0.4

粗骨料:主要的性能指标如表 5 所示。

表 5 粗骨料的主要性能指标

Table 5 Main performance indexes of coarse aggregate

表观密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	紧密堆积密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	吸水 率/%	压碎指 标/%	空隙 率/%
2 575	1 751	0.6	6.8	41

C30 和 C50 混凝土中粗骨料级配分别如表 6 和表 7 所示,选择粗骨料的几何平均粒径作为包裹砂浆用量的评价指标,几何平均粒径与粗骨料整体的粗细相关,相对于用粗骨料中的最大粒径来表征更为精确。根据《高性能混凝土用骨料》(JG/T 568—2019)中的规定,将方孔筛分为 7 个规格:2.36、4.75、9.5、16、19、26.5、31.5 mm,每一级筛所对应的分计筛余百分比为  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 、 $a_5$ 、 $a_6$ 、 $a_7$ 。不考虑骨料粒径大于 31.5 mm 的级配情况,粗骨料的几何平均粒径算法为

$$d = a_1\sqrt{2.36 \times 4.75} + a_2\sqrt{4.75 \times 9.5} + a_3\sqrt{9.5 \times 16} + a_4\sqrt{16 \times 19} + a_5\sqrt{19 \times 26.5} + a_6\sqrt{26.5 \times 31.5}$$

式中: $d$ 为粗骨料的几何平均粒径,mm。

表 6 C30 混凝土的粗骨料级配及其几何平均粒径

Table 6 Coarse aggregate gradation and geometric mean particle size of C30 concrete

组别	分计筛余百分比/%				几何平均 粒径/mm
	4.75~9.5 mm	9.5~16 mm	16~19 mm	19~26.5 mm	
级配 1	100.0	0.0	0.0	0.0	6.7
级配 2	55.0	45.0	0.0	0.0	9.2
级配 3	40.0	39.0	21.0	0.0	11.2
级配 4	34.0	29.7	20.1	16.2	13.0
级配 5	29.4	15.1	29.3	26.2	14.7

表 7 C50 混凝土的粗骨料级配及其几何平均粒径

Table 7 Coarse aggregate gradation and geometric mean particle size of C50 concrete

组别	分计筛余百分比/%				几何平均 粒径/mm
	4.75~9.5 mm	9.5~16 mm	16~19 mm	19~26.5 mm	
级配 5	29.4	15.1	29.3	26.2	14.7
级配 6	33.1	21.9	27.8	17.2	13.5
级配 7	44.1	18.9	19.6	17.4	12.5
级配 8	61.3	17.2	21.5	0.0	10.0
级配 9	73.5	26.5	0.0	0.0	8.2

1.2 试验方案及测试方法

1.2.1 试验方案

混凝土配合比的设计原则为:在粗骨料质量不变的前提下,调整 C30 和 C50 混凝土中粗骨料与总砂浆浆体的比例,使新拌混凝土扩展度达到 500、600、700 mm,C30 和 C50 混凝土的配合比分别如表 8 和表 9 所示。基准比例为某搅拌站配制 C30 和 C50 大流态混凝土达到 3 个扩展度要求时的配合比。

1.2.2 测试方法

根据《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009)和《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)规定的方法制备砂浆和 C30、C50 混凝土;根据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)中的方法测试混凝土的扩展度。

2 试验结果与讨论

2.1 骨料几何平均粒径对混凝土包裹砂浆用量的影响

根据粗骨料堆积试验得到粗骨料的紧密堆积空隙率,用总砂浆用量减去粗骨料的紧密堆积空隙后再除以粗骨料几何平均粒径下的比表面积,即为骨料表面的包裹砂浆层厚度<sup>[9]</sup>。控制混凝土扩展度为 500、600、700 mm 时,计算每个扩展度下粗骨料表面的包裹砂浆层厚度,将包裹砂浆层厚度和粗骨料的平均几何粒径进行幂函数拟合(图 1、图 2),每条拟合曲线的相关系数均在 0.98 以上。两图对比可知,不同扩展度下 C50 混凝土的包裹砂浆层厚度增大速度均大于 C30 混凝土。但 C50 和 C30 混凝土包裹砂浆层厚度随几何平均粒径变化的整体趋势大致相同,对于给定的扩展度,包裹砂浆层厚度随几何平均粒径的增大而增大,同时较大的包裹砂浆层厚度对应较高的扩展度。

图 3 和图 4 分别为 C30 和 C50 混凝土在 500、600、700 mm 三个固定扩展度下 100 kg 粗骨料包裹砂浆用量与平均几何粒径的对应图。C30 和 C50 混

表 8 C30混凝土配合比

Table 8 C30 concrete mix proportion

砂浆用量倍数	砂率/%	水泥用量/kg	粉煤灰用量/kg	矿粉用量/kg	水用量/kg	砂用量/kg	石用量/kg	减水剂用量/%
0.8	39.6	18.05	7.38	4.92	13.74	65.44	100	0.68
0.85	41.0	19.18	7.90	5.23	14.56	69.54	100	0.68
0.9	42.4	20.31	8.31	5.54	15.38	73.64	100	0.68
0.95	43.7	21.44	8.82	5.85	16.31	77.74	100	0.68
1.0	45.0	22.56	9.23	6.15	17.13	81.85	100	0.68
1.05	46.2	23.69	9.74	6.46	17.95	85.95	100	0.68
1.1	47.4	24.82	10.15	6.77	18.87	90.05	100	0.68
1.15	48.5	25.95	10.67	7.08	19.69	94.15	100	0.68
1.2	49.5	27.08	11.08	7.38	20.51	98.26	100	0.68
1.25	50.6	28.21	11.59	7.69	21.44	102.36	100	0.68
1.3	51.6	29.33	12.00	8.00	22.26	106.36	100	0.68
1.35	52.5	30.46	12.51	8.31	23.08	110.46	100	0.68
1.4	53.4	31.59	12.92	8.62	24.00	114.56	100	0.68
1.45	54.3	32.72	13.44	8.92	24.82	118.67	100	0.68
1.5	55.1	33.85	13.85	9.23	25.74	122.77	100	0.68

表 9 C50混凝土配合比

Table 9 C50 concrete mix proportion

砂浆用量倍数	砂率/%	水泥用量/kg	粉煤灰用量/kg	矿粉用量/kg	水用量/kg	砂用量/kg	石用量/kg	减水剂用量/%
0.8	35.7	27.18	3.88	7.77	12.84	55.66	100.00	0.39
0.85	37.1	28.91	4.10	8.31	13.59	59.12	100.00	0.39
0.9	38.5	30.64	4.42	8.74	14.46	62.57	100.00	0.39
0.95	39.8	32.25	4.64	9.28	15.21	66.02	100.00	0.39
1.0	41.0	33.98	4.85	9.71	16.07	69.47	100.00	0.39
1.05	42.2	35.71	5.07	10.25	16.83	73.03	100.00	0.39
1.1	43.3	37.43	5.39	10.68	17.58	76.48	100.00	0.39
1.15	44.4	39.05	5.61	11.22	18.45	79.94	100.00	0.39
1.2	45.5	40.78	5.83	11.65	19.20	83.39	100.00	0.39
1.25	46.5	42.50	6.04	12.19	20.06	86.95	100.00	0.39
1.3	47.5	44.23	6.36	12.62	20.82	90.40	100.00	0.39
1.35	48.4	45.85	6.58	13.16	21.57	93.85	100.00	0.39
1.4	49.3	47.57	6.80	13.59	22.44	97.30	100.00	0.39
1.45	50.2	49.30	7.01	14.13	23.19	100.76	100.00	0.39
1.5	51.0	51.02	7.34	14.56	24.06	104.31	100.00	0.39

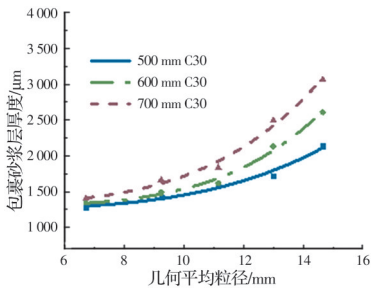


图 1 C30混凝土包裹砂浆层厚度与几何平均粒径关系

Fig. 1 Relationship between C30 concrete mortar coating thickness and geometric mean particle size

凝土的包裹砂浆用量随着扩展度的增大而增大;骨料粒径较小时 3 种扩展度下包裹砂浆用量相差较小,随着几何平均粒径的不断增大,扩展度要求越

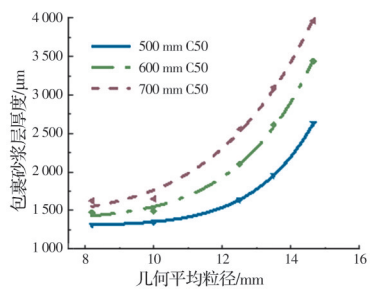


图 2 C50混凝土包裹砂浆层厚度与几何平均粒径关系

Fig. 2 Relationship between C50 concrete cladding thickness and geometric mean particle size

高包裹砂浆用量增长幅度越大;6 条曲线的相同之处为 100 kg 粗骨料包裹砂浆用量随着粗骨料几何平均粒径的增大呈现先减小后增大的趋势,存在包



裹砂浆用量最小值点。包裹砂浆用量出现最小值的原因可能是:当骨料粒径小于最优粒径时,随着骨料粒径的增大,需要被包裹的骨料比表面积减少,包裹砂浆用量减少;当几何平均粒径大于最优粒径时,包裹砂浆用量受比表面积的影响变小,较粗的骨料想要流动就需要包裹更多的浆体来克服内部阻力。对于 C30 和 C50 混凝土来说,以扩展度 500 mm 时的最小浆体用量以及该用量所对应的几何平均粒径作为基准,扩展度 600 mm 时的最小浆体用量分别增长了 10.3%、19.8%,几何平均粒径分别减小了 9.8%、7%;扩展度 700 mm 时分别增长了 24.7%、37.9%,几何平均粒径分别减小了 16.3%、8.7%。说明最小包裹砂浆用量会随着扩

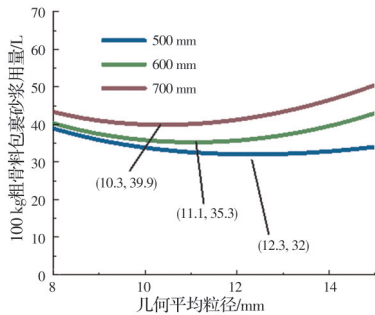


图 3 C30 混凝土不同扩展度要求下粗骨料包裹砂浆用量与几何平均粒径的关系

Fig. 3 Relationship between coarse aggregate mortar coating content and geometric mean particle size under different slump-flow requirements of C30 concrete

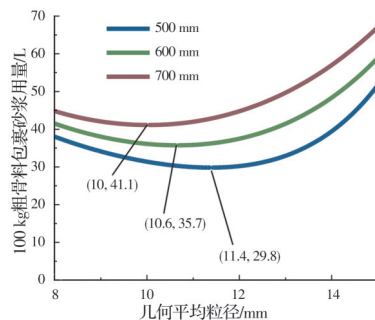


图 4 C50 混凝土不同扩展度要求下粗骨料包裹砂浆用量与几何平均粒径的关系

Fig. 4 Relationship between coarse aggregate mortar coating content and geometric mean particle size under different slump-flow requirements of C50 concrete

展度的增大而增大,而最小浆体用量对应的几何平均粒径则会随着扩展度的增大而减小。

2.2 砂浆流变特性对混凝土包裹砂浆用量的影响

选择两种不同强度(C30、C50)的混凝土中砂浆用量倍数为 1 时的配合比作为参照,配制砂浆时除去粗骨料,而水泥、粉煤灰、矿粉、机制砂、水的比例不变。两种砂浆的流变曲线如图 5 所示,从图 5 可以看出,砂浆流体符合宾汉姆模型,利用宾汉姆模型对流变曲线中的下行曲线进行拟合得到砂浆的各项流变参数(表 10)。C50 组砂浆的屈服应力和塑性黏度分别为 C30 的 1.8 倍和 1.6 倍,所对应混凝土扩展度为 500、600、700 mm 时的包裹砂浆层厚度, C50 混凝土分别为 C30 的 1.83 倍、1.75 倍和 1.42 倍(C30 和 C50 混凝土中的粗骨料均选用级配 5)。屈服应力和塑性黏度随着水泥砂浆中的固相体积占比的增大而增大<sup>[18-19]</sup>,导致了砂浆稠度的减小。这说明砂浆稠度越小,浆体中颗粒之间黏结滞力越强,发生流动时所克服的摩擦力增大<sup>[20]</sup>,相同级配的骨料想要达到相同扩展度时就需要更厚的包裹砂浆层,导致包裹砂浆用量的增大。剪切应力随着剪切速率由加速到减速的变化过程形成了一个闭合的环,称为触变环(图 5),触变环的面积表示了絮凝结构的数量和浆体触变性能的大小。在曲线的上行阶段,由于絮凝结构多,破坏时的剪切应力也随之增大;在曲线的下行阶段,絮凝结构数量大幅度减少,所以剪切应力也随之减小,C50 混凝土中触变环面积为 12 557.3 Pa/s,是 C30 混凝土触变环面积的 2.0 倍。这说明 C50 浆体内部絮凝结构的数量越多,发生流动时的摩擦力也就越大。

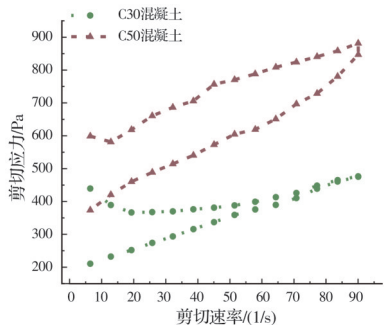


图 5 两种砂浆的原始流变曲线

Fig. 5 Original rheological curves of two mortars

表 10 两种砂浆的流变参数和包裹砂浆层厚度对比

Table 10 Comparison of rheological parameters and mortar coating thickness of two mortars

组别	屈服应力/Pa	塑性黏度/(Pa·s)	包裹砂浆层厚度/ $\mu\text{m}$		
			扩展度 500 mm	扩展度 600 mm	扩展度 700 mm
C30	191.7	3.2	1 598.7	1 987.8	2 588.7
C50	346.5	5.1	2 933.2	3 483.5	3 666.4

### 2.3 基于浆体用量的合理级配区

总砂浆用量中的填充砂浆可以看作粗骨料的紧密堆积空隙体积,而现有的骨料密实级配堆积理论有k法、N法和I法。I法和N法为无穷级数,无法规定粗骨料的最小粒径;k法则通过规定最小粒径,从而得到最大粒径和最小粒径区间的密实堆积级配,笔者通过k法得到粗骨料的堆积级配曲线。k法是通过颗粒分级质量递减系数 $k$ 设计堆积级配曲线<sup>[21]</sup>,从而得到骨料在第 $x$ 级筛时的通过率。

$$x = 3.32 \times \lg\left(\frac{D}{d_x}\right)$$

式中: $x$ 为级数; $D$ 为骨料颗粒最大粒径; $d_x$ 为第 $x$ 级筛孔粒径,mm。

总级数 $n$ 为

$$n = 3.32 \times \lg\left(\frac{D}{X_n}\right)$$

式中: $X_n$ 为骨料第 $n$ 级粒径; $n$ 为总级数。

某一级筛的通过率为

$$P_x = 100\% \times \left(1 - \frac{k^x - 1}{k^n - 1}\right)$$

式中: $k$ 为 $k$ 法计算系数。

在对级配进行优化时先将粗骨料的低空隙率作为前提,几何平均粒径随着 $k$ 值的增大而减小,通过调整3种扩展度下 $k$ 值的变化范围,从而限制几何平均粒径的范围。水胶比不同的两种混凝土填充砂浆用量始终小于包裹砂浆用量,曲线走向较为平稳,在 $k=0.75$ 时取得最小用量25 L;包裹砂浆用量在总浆体量中占据主导地位,且包裹砂浆的最小用量均随着扩展度的增大而增大。在骨料级配、配合比以及工作性要求都相同的情况下,骨料粒形综合指数如果差异较大,那么浆体用量也会上下浮动5%~10%<sup>[9]</sup>。因此,根据最小浆体用量划分合理级配区,将不同扩展度要求下最小浆体用量向上增大10%的范围划分为合理级配区间,取上限值与总浆体用量的交点作为当前水胶比和扩展度下 $k$ 值的取值范围。对于C30混凝土(图6)来说,当扩展度为500、600、700 mm时,系数 $k$ 的取值范围分别为: $0.3 < k < 2.2$ 、 $k > 0.44$ 、 $k > 0.5$ ,与此对应的粗骨料几何平均粒径取值范围是: $9.3 \text{ mm} < \text{几何平均粒径} < 16.1 \text{ mm}$ ,几何平均粒径小于14.6 mm,几何平均粒径小于14.1 mm。对于C50混凝土(图7)来说,当扩展度为500、600、700 mm时, $k$ 的取值范围分别

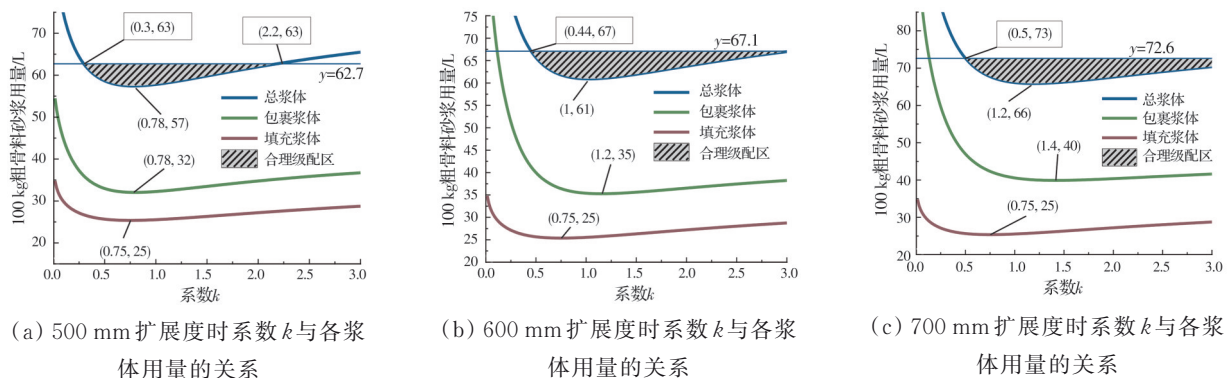


图6 C30混凝土不同扩展度要求时系数 $k$ 与各浆体用量的关系

Fig.6 The relationship between the coefficient  $k$  and each mortar content at different slump-flow requirements of C30 concrete

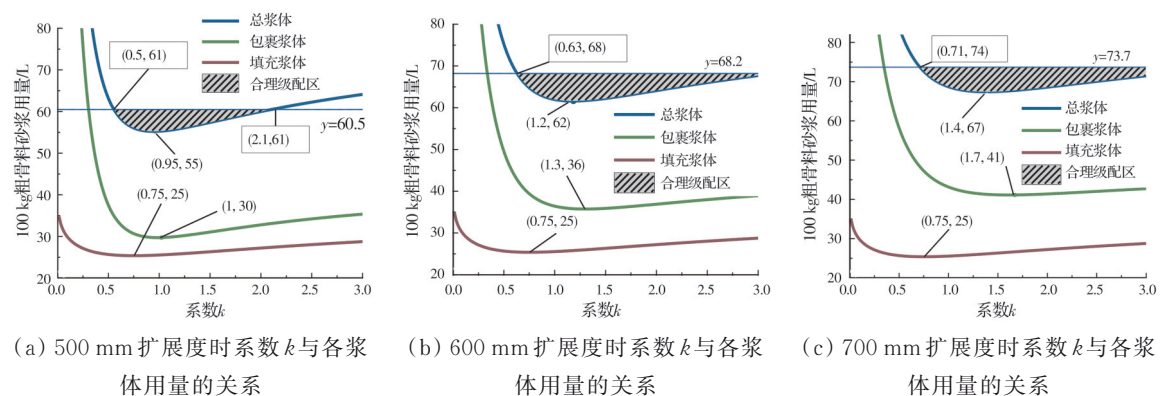


图7 C50混凝土不同扩展度要求时系数 $k$ 与各浆体用量的关系

Fig.7 The relationship between the coefficient  $k$  and each mortar content at different slump-flow requirements of C50 concrete

为:  $0.5 < k < 2.1$ 、 $k > 0.63$ 、 $k > 0.71$ ; 与此对应的几何平均粒径的范围为:  $9.4 \text{ mm} < \text{几何平均粒径} < 13.8 \text{ mm}$ , 粒径小于  $13.2 \text{ mm}$ , 粒径小于  $12.8 \text{ mm}$ 。由于 C30 和 C50 混凝土粗骨料粒径一般不会取  $10 \text{ mm}$  以下, 所以认为  $500 \text{ mm}$  扩展度时混凝土不对骨料的最小粒径做出限制。

### 3 结论

在试验条件下, 得到影响骨料包裹砂浆层厚度及用量的主要因素和规律如下:

1) 包裹砂浆层厚度随着粗骨料几何平均粒径的增大而增大, 而包裹砂浆用量则呈现先减小后增大的趋势。

2) 随着砂浆流变特性的变化, 达到相同扩展度时所需包裹砂浆用量随之增加。当砂浆的屈服应力、塑性黏度分别增大了  $80.8\%$  和  $59.4\%$  时, 粗骨料包裹砂浆层厚度增加了  $41.6\% \sim 83.5\%$ 。

3) 随着混凝土扩展度要求的提高, 粗骨料的最优几何平均粒径取值区间减小, 而包裹砂浆层厚度和包裹砂浆用量增大。当 C30 和 C50 混凝土的扩展度要求从  $500 \text{ mm}$  增大到  $700 \text{ mm}$  时, 最小包裹砂浆用量分别增大了  $24.7\%$ 、 $37.9\%$ , 而对应的最优几何平均粒径分别减小了  $16.3\%$ 、 $8.7\%$ , 较小粒径的粗骨料更适合配制大流态混凝土。

### 参考文献

- [1] 詹伟, 杨林, 苗苗. 粗骨料种类对高强混凝土工作性和力学性能的影响[J]. 重庆建筑, 2017, 16(12): 52-55.  
ZHAN W, YANG L, MIAO M. Impact of coarse aggregate types on workability and mechanical properties of high strength concrete [J]. Chongqing Architecture, 2017, 16(12): 52-55. (in Chinese)
- [2] TOPCU İ, KOCATAŞKIN F. A two-phase composite materials approach to the workability of concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 1995, 17(4): 319-325.
- [3] AKCAY B, AGAR-OZBEK A S, BAYRAMOV F, et al. Interpretation of aggregate volume fraction effects on fracture behavior of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1): 437-443.
- [4] JIN L, YU W X, DU X L, et al. Meso-scale simulations of size effect on concrete dynamic splitting tensile strength: influence of aggregate content and maximum aggregate size [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 230: 106979.
- [5] 刘晨辉. 基于工作性的骨料级配评价方法研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.  
LIU C H. Research on evaluation method of aggregate grading based on workability [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020. (in Chinese)
- [6] 廉慧珍, 师海霞. 解读吴中伟“水泥基复合材料的中心质假说”[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(5): 777-786.  
LIAN H Z, SHI H X. Clarification of a hypothesis on ‘centroplasm of cement-based composite’ proposed by Wu Zhongwei [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(5): 777-786. (in Chinese)
- [7] 王晓东, 韩振芳, 刘源. 混凝土配合比设计中石子用量的探讨[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2012, 28(5): 31-35.  
WANG X D, HAN Z F, LIU Y. Dosage of gravel in concrete mixture ratio design [J]. Journal of Hebei North University (Natural Science Edition), 2012, 28(5): 31-35. (in Chinese)
- [8] SHEN W G, WU M M, ZHANG B L, et al. Coarse aggregate effectiveness in concrete: Quantitative models study on paste thickness, mortar thickness and compressive strength [J]. Construction and Building Materials, 2021, 289: 123171.
- [9] 谢华兵. 机制砂粒形与级配特性及其对混凝土性能的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.  
XIE H B. The characteristics of shape and grading of manufactured sand and theirs effects on the properties of concrete [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [10] DE LARRARD F. Concrete mixture proportioning: A scientific approach [M]. CRC Press, Taylor & Francis Group, 1999.
- [11] BONDAR D, NANUKUTTAN S, PROVVIS J L, et al. Efficient mix design of alkali activated slag concretes based on packing fraction of ingredients and paste thickness [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 218: 438-449.
- [12] 李国栋, 张立, 任正义. 细观尺度下混凝土的工作性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(3): 779-786.  
LI G D, ZHANG L, REN Z Y. Study on working performance of concrete under mesoscale [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(3): 779-786. (in Chinese)
- [13] 田正宏, 罗时权, 吴军, 等. 粉煤灰掺量对非连续级配混凝土新拌流变性影响[J]. 水电能源科学, 2018, 36(1): 133-136.  
TIAN Z H, LUO S Q, WU J, et al. Effect of fly ash content on rheological properties of discontinuous graded concrete [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(1): 133-136. (in Chinese)
- [14] 赵洪, 杨永民, 李方贤, 等. 骨料包裹层厚度的研究及其对多孔混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2014(2): 29-32.  
ZHAO H, YANG Y M, LI F X, et al. Study on the

- thickness of cover layer of aggregate and its influence on properties of porous concrete [J]. Concrete, 2014(2): 29-32. (in Chinese)
- [15] 陈阳. 低胶凝材料用量自密实混凝土的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- CHEN Y. Research on the self-compacting concrete with low content of cementitious materials [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [16] XIE X G, ZHANG T S, YANG Y M, et al. Maximum paste coating thickness without voids clogging of pervious concrete and its relationship to the rheological properties of cement paste [J]. Construction and Building Materials, 2018, 168: 732-746.
- [17] 刘平, 方小婉, 何飞亮, 等. 浆体包裹层厚度对自密实混凝土性能的影响[J]. 人民黄河, 2021, 43(8): 148-151, 158.
- LIU P, FANG X W, HE F L, et al. Influences of paste thickness to the coated aggregates on properties of self-compacting concrete [J]. Yellow River, 2021, 43(8): 148-151, 158. (in Chinese)
- [18] 张朝阳, 喻建伟, 孔祥明, 等. 化学外加剂对砂浆流变性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(5): 622-631.
- ZHANG C Y, YU J W, KONG X M, et al. Effect of chemical admixtures on rheological properties of mortars [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(5): 622-631. (in Chinese)
- [19] ROUSSEL N, STEFANI C, LEROY R. From mini-cone test to Abrams cone test: Measurement of cement-based materials yield stress using slump tests [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(5): 817-822.
- [20] FLATT R J, BOWEN P. Yodel: A yield stress model for suspensions [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2006, 89(4): 1244-1256.
- [21] 陈其红. k法和变k法在常用级配设计中的应用[J]. 广东公路交通, 2021, 47(4): 90-95, 100.
- CHEN Q H. Application of k method and variable k method in current common gradation design [J]. Guangdong Highway Communications, 2021, 47(4): 90-95, 100. (in Chinese)

(编辑 胡玲)