

钢渣细度对混凝土耐久性能影响

靳晶¹, 何文飞^{2,3}, 李志强^{2,3}

(1. 安阳职业技术学院建筑工程系, 河南 安阳 455000; 2. 华北理工大学矿业工程学院, 河北 唐山 063210; 3. 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 这是一篇陶瓷及复合材料领域的论文。本研究以不同粒径的钢渣粉为掺合料, 制备了 C30 混凝土, 研究了钢渣粉粒径对混凝土耐久性的影响。实验结果表明: 混凝土内部孔隙主要集中在 100~1000 nm, 且孔的数量随着钢渣粉的细化而不断减少, 其 10~100 nm 左右的孔隙随着钢渣的细化而增多。钢渣的掺入可改善混凝土的工作性; 随着钢渣不断细化, 混凝土的 7、28 及 56 d 抗压强度均呈现出先降低后增加的趋势, 其 56 d 抗压强度由 50.4 MPa 降低到了 37.8 MPa 又不断增加到 40.32、42.84、45.36 及 48.4 MPa, 随着钢渣细度由 23.1 μm 不断减小到 16.8、12.2、10.1、4.2 μm 钢渣活性由 75% 增加到了 96%。冻融循环 100 次后, 未掺钢渣组的混凝土质量损失为 7.6%, 当掺入 30% 钢渣后, 混凝土的抗冻性能减弱, 随着钢渣细度的变化, 混凝土的抗冻性能不断增强, 当细度为 10.1、4.2 μm 时其质量损失降低到了 7.4% 及 6.1%。钢渣的掺入能够促进混凝土对 CO_2 的固化封存能力, 增强混凝土的抗压强度, 钢渣越细混凝土抗碳化能力越强。

关键词: 陶瓷及复合材料; 钢渣; 工作性; 耐久性; 孔隙率

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.02.012

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 02-0075-06

引用格式: 靳晶, 何文飞, 李志强. 钢渣细度对混凝土耐久性能影响[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(2): 75-80.

JIN Jing, HE Wenfei, LI Zhiqiang. Effect of steel slag fineness on durability of concrete[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(2): 75-80.

根据世界钢铁协会的数据, 2019 年全球粗钢产量达到 1.6888 亿 t, 比 2018 年增加 5520 万吨, 2020 年 9 月, 全球 64 个国家的粗钢产量约为 1.564 亿 t, 即使在 2019 冠状病毒病疫情期间, 2020 年 9 月的粗钢产量仍比 2019 年 9 月增长 2.9%。其中, 中国粗钢产量占比最大。钢渣是炼钢炉中钢水与杂质分离时产生的副产物, 约占钢总量的 15%~20%, 在世界范围内大量生产。最初, 钢渣被当作废物处理, 并作为垃圾填埋场处理, 不仅占用土地资源, 而且由于高碱性渗滤液严重影响自然环境和人类健康。所以, 如何减少其大量堆放存在的隐患是当前亟待解决的难题^[1-5]。

如今在欧洲, 约有 77% 的钢渣被用作生产绿

色水泥的替代材料, 或用作砌块和骨料等建筑材料。钢渣还可用于其他领域, 如土壤改良剂、金属应用和水利工程材料。对于钢渣的利用, 研究人员还研究了使用钢渣进行 CO_2 矿化(即碳酸化处理, 类似于自然风化过程)的可行性, 因为钢渣中含有大量碱性硅酸盐矿物, 通过这种方式, 不仅可以解决由游离氧化钙(f-CaO)引起的体积稳定性问题, 还可以产生净零(或负)碳产品。当前, 利用钢渣作为矿物掺合料或集料受到了广泛的关注。Maslehuddin 等^[6]研究发现以钢渣作为骨料的混凝土表现出了更好的耐久性和物理性能。Qasrawi 等^[7]发现在混凝土中使用钢渣作为细集料可以提高混凝土的强度, 特别是抗张强度。王戎等^[8]研究表

收稿日期: 2022-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51974131)

作者简介: 靳晶(1988-), 女, 本科, 讲师, 研究方向为建筑材料研究与制备

通信作者: 何文飞(1989-), 男, 博士研究生, 研究方向为矿产综合利用。

明：钢渣粉能够有效解决混凝土的干缩问题，钢渣粉的掺入还能提高混凝土的抗渗性能。Yogesh Nathuji Dhoble^[9]采用 X 射线衍射分析、X 射线荧光、电子显微镜对博卡罗钢厂钢渣进行了分析，采用 5%、10%、15%、20% 钢渣代替水泥配制砂浆砌块，研究表明，掺量小于 10% 的情况下，钢渣粉对其早期强度和后期强度均无不良影响，超过 10% 时砂浆强度不断降低，这是因为钢渣的胶凝性能不能很好地满足混凝土矿物掺合料的要求，这是钢渣利用率低的主要原因之一。

为了提高钢渣的利用率，降低碳排放，本研究以不同粒径的钢渣粉为掺合料，制备了 C30 混凝土，研究了钢渣粉粒径对混凝土工作性能及抗

冻性能、碳化能力的影响。

1 实 验

1.1 原 料

本研究所用水泥、Ⅱ级粉煤灰及钢渣化学成分见表 1。其中水泥为 P·O 42.5R 水泥，D50 为 16.2 μm。钢渣由攀钢集团提供，其主要矿物相为 C₃S、C₂S 等（图 1）；在助磨剂（三乙醇胺）掺量为 0.04% 下，采用球磨机分别粉磨 20、40、6、80、100 min 后，D50 分别为 23.1、16.8、12.2、10.1、4.2 μm（图 2）。实验所用骨料为满足标准要求的天然砂石。本实验所用到的水均采用本地自来水。

表 1 原材料化学组成/%
Table 1 Chemical composition of raw materials

名称	CaO	Al ₂ O ₃	SO ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	TiO ₂	累计
水泥	69.19	5.2	2.71	15.99	3.99	0.03	0.08	2.14	0.63	99.96
粉煤灰	2.48	28.09	1.31	58.93	3.42	2.61	0.36	0.95	1.38	99.53
钢渣	36.36	6.56	0.29	11.88	35.22	0.04	0.04	8.6	0.8	99.79

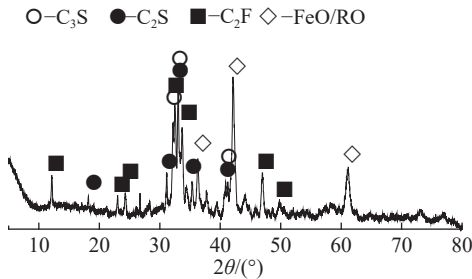


图 1 钢渣 XRD
Fig.1 XRD of steel slag

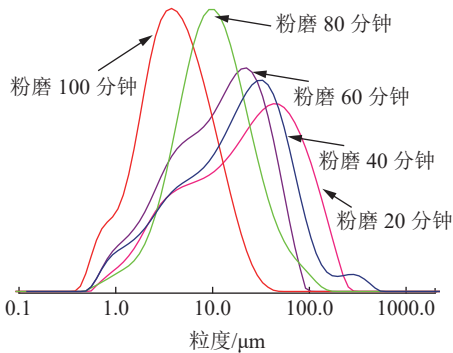


图 2 钢渣粒度分布
Fig.2 Particle size distribution of steel slags

1.2 试样制备

本研究中 C30 混凝土的配合比见表 2（参照 JGJ 55-2011 进行设计）。根据表 2 配比称量材

料，并进行搅拌。搅拌后入 100 mm×100 mm×100 mm 及 100 mm×100 mm×400 mm 立方体模具，标准养护（温度 (20±2) °C，湿度 98%RH）1 d 后拆除模具泡水养护（温度 20±2 °C）至龄期进行测试。

表 2 混凝土配合比设计/（kg/m³）
Table 2 Concrete mix ratio design

编号	水	钢渣粉	水泥	粉煤灰	砂	碎石	外加剂
C30-0	165	0	280	65	620	1008	7.21
C30-1-20	165	84	196	65	620	1008	7.21
C30-2-40	165	84	196	65	620	1008	7.21
C30-3-60	165	84	196	65	620	1008	7.21
C30-4-80	165	84	196	65	620	1008	7.21
C30-5-100	165	84	196	65	620	1008	7.21

1.3 测试方法

混凝土的工作性、力学性能均按照 GB/T 50080-2002《普通混凝土拌合物性能实验方法标准》中的实验方法进行检测；混凝土的抗冻性（快冻法）及碳化性能（实验条件为：CO₂ 浓度 20%±2%，湿度 70%±5%RH，温度 20±3 °C），依据 GB/T 50082-2009《普通混凝土长期性能和耐久性能实验方法标》测试。

其原材料的成分、矿物相及水化产物形貌、孔结构分析，分别采用 Axios 型 X-射线荧光光谱

仪、Axios 型 X 射线衍射仪及 TM-1000 型扫描电子显微镜、PoreMaster60 型压汞仪进行分析。

2 结果与讨论

钢渣的矿物相中含有 C_2S 、 C_3S 等水硬性矿物。因此，钢渣具有一定程度的胶凝性。同时，钢渣含有高活性的非晶相，且不同细度的钢渣对水泥水化的影响也存在差异。基于以上的相关特点，本实验以钢渣为掺合料，分别设计了钢渣以粉磨 20、40、60、80、100 min，D50 分别为 23.1、16.8、12.2、10.1、4.2 μm 的 5 种细度，制备了 C30 混凝土，并对其工作性和耐久性进行了测试。

2.1 钢渣细度对混凝土工作性的影响

到目前为止，对于钢渣作为矿物掺合料展开了大量的研究，张洪滔等^[10]得出，钢渣粉越细，其活性越高，其各龄期性能较其他细度较优。混凝土的工作性，是评估它是否适用于生产施工的一个主要参数。钢渣细度对混凝土坍落度的影响见图 3，虽然混凝土坍落度均大于 220 mm，但随着钢渣粉细度的减小（D50 从 23.1 μm 分别减小至 16.8、12.2、10.1、4.2 μm ），混凝土的坍落度呈现出先增加后降低的趋势。与基准组（未掺钢渣组）对比，随着钢渣细度由 23.1 不断减小到 4.2 μm 时，其坍落度由 238 mm 增加到 245 mm，而后不断降低到 225 mm，静置 1 h 后呈现出相同趋势，且损失量较小。混凝土扩展度的变化见图 4，扩展度均大于 600 mm，随着钢渣粉细度的减小（D50 从 23.1 μm 分别减小至 16.8、12.2、10.1、4.2 μm ），混凝土的坍落度变化与坍落度相似也呈现出先增加后降低的趋势。由图可知，与未掺钢渣组对比，随着钢渣细度由 23.1 μm 不断减小到 4.2 μm 时，其扩展度由 618 mm 增加到 625 mm，而后减小至 606 mm，静置 1 h 损失量较小。由此可得出钢渣的掺入可改善混凝土的工作性，且钢渣细度越小，混凝土工作性越差。

2.2 钢渣细度对混凝土力学性能的影响

钢渣粉的细度对其抗压强度的影响较大。由图 5 可知，相对于基准组，随着钢渣 D50 从 23.1 μm 分别减小至 16.8、12.2、10.1、4.2 μm ，混凝土的 7、28 及 56 d 抗压强度均呈现出先降低后增加的趋势。由图可知，未掺钢渣组的混凝土 7 d 抗压强度为 36.2 MPa，当掺入 30% 钢渣后，随着钢渣细度由 23.1 μm 不断减小到 16.8、12.2、10.1、4.2

μm 时，混凝土的 7 d 抗压强度由 36.2 MPa 降低到了 27.0 MPa 又不断增加到 29.2、32.5、35.1 及 36 MPa；其 28 d 抗压强度由 41.0 MPa 降低到了 30.7 MPa 又不断增加到 32.8、34.8、36.9 及 39.3 MPa；其 56 d 抗压强度由 50.4 MPa 降低到了 37.8 MPa 又不断增加到 40.32、42.84、45.36 及 48.4 MPa，钢渣活性由 75% 增加到了 80%、84%、91% 及 96%。这是因为随着掺入钢渣细度的减小，填充了基体中的孔结构，促使大孔减小，小孔细化，从而促使基体致密化。

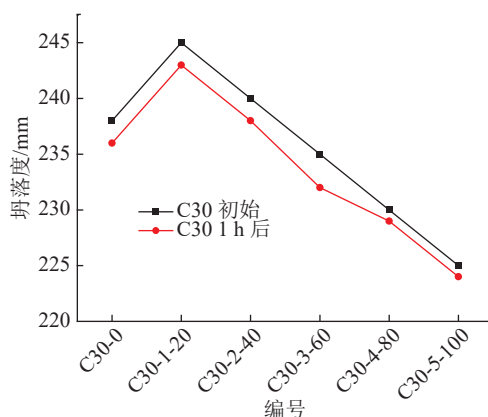


图3 钢渣细度对混凝土坍落度的影响

Fig.3 Effect of steel slag fineness on slump of concrete

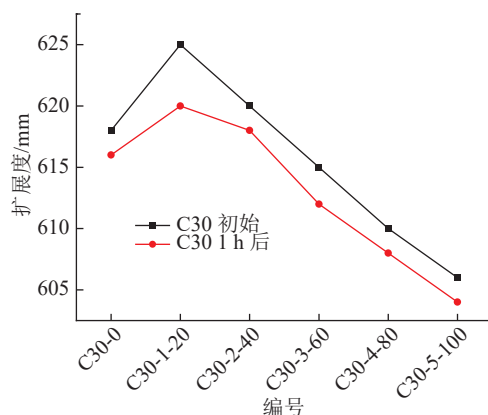


图4 钢渣细度对混凝土扩展度的影响

Fig.4 Effect of steel slag fineness on concrete extensibility

2.3 钢渣细度对混凝土抗冻性能影响

钢渣细度对 C30 混凝土抗冻性能的影响见图 6，由图可知随着冻融次数的不断增加，混凝土的质量损失不断增大。冻融循环 100 次后，未掺钢渣组的混凝土质量损失为 7.6%，当掺入 30% 钢渣后，混凝土的抗冻性能减弱，随着钢渣细度由 23.1 μm 不断减小到 16.8、12.2、10.1、4.2 μm ，混凝土的抗冻性能不断增强，其 100 次冻融循环后的质量损失也由 15.3% 不断降低到 12.3%、8.5%、

7.4% 及 6.1%，其中粒径为 10.1 及 4.2 μm 的钢渣粉末混凝土抗冻性能有所提高，这可能是因为较细的粉末掺入增强了混凝土基体的密实度，钢渣越细其比表面积越大水化活性越高，促进了基体的水化反应，提高了基体的密实程度，减少了基体的孔隙率，促使基体更加密实，从而增强了抗冻能力。

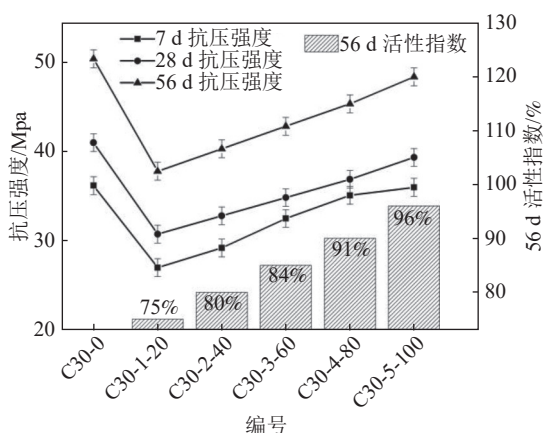


图 5 钢渣细度对混凝土抗压强度的影响

Fig.5 Effect of steel slag fineness on compressive strength of concrete

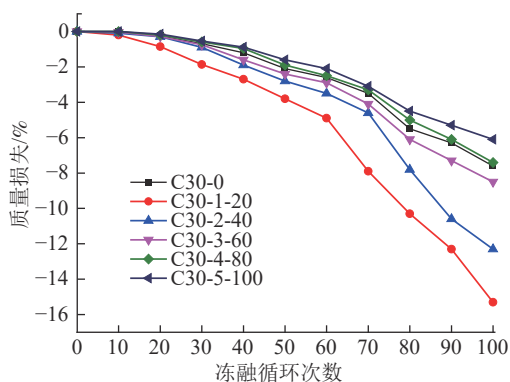


图 6 钢渣细度对 C30 混凝土抗冻性能的影响

Fig.6 Effect of steel slag fineness on frost resistance of C30 concrete

2.4 钢渣细度对混凝土抗碳化性能的影响

钢渣细度对 C30 混凝土碳化性能的影响见图 7，由图可知混凝土碳化后，与基准组对比随着钢渣细度由 23.1 μm 不断减小到 16.8、12.2、10.1、4.2 μm ，其强度分别增加到 54.2、45.2、49.5、50.2、49.3、53.2 MPa，分别增加了 32.2%、47.0%、50.9%、44.0%、33.6%、35.2%，其碳化深度也从 23 mm 增加到了 36 mm 而后降低到 32、28、22、17 mm，表明钢渣的掺入能够促进混凝土的碳化，提高混凝土的碳化后的抗压强度，但是钢渣越细其碳化深度越小，这是因为钢渣碳化活性较高，

但随着其不断细化，增强了混凝土基体的密实度，钢渣越细其比表面积越大水化活性越高，促进了基体的水化反应，提高了基体的密实程度，减少了基体的孔隙率，促使基体更加密实，从而增强了抗碳化能力。

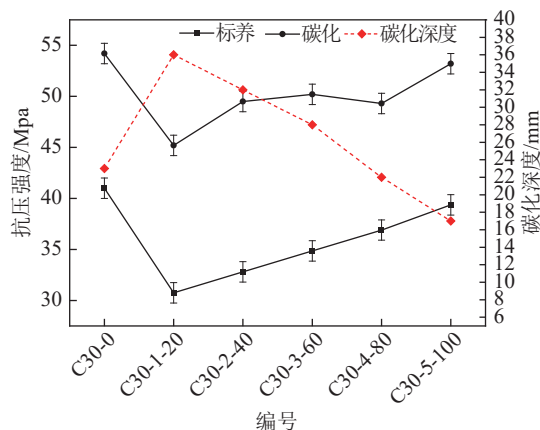


图 7 钢渣细度对 C30 混凝土碳化性能的影响

Fig.7 Effect of steel slag fineness on carbonation properties of C30 concrete

2.5 钢渣细度对混凝土微观性能的影响

钢渣细度对混凝土孔隙的影响见图 8。由图可知混凝土内部孔隙主要集中在 100~1000 nm，且孔的数量随着钢渣粉的细化而不断减少，其 10~100 nm 左右的孔隙随着钢渣的细化而增多；与基准组对比，随着钢渣细度由 23.1 μm 不断减小到 16.8、12.2、10.1、4.2 μm ，混凝土累计入汞量呈现出先增加而后不断降低的规律，表明随着钢渣不断细化，减少了基体的孔隙率，增强了混凝土基体的密实度，促使基体更加密实。

C30 混凝土养护 28 d 后 SEM 图谱见图 9。由图可知混凝土主要水化产物为 C-S-H 凝胶与片状氢氧化钙，且发现与基准组对比，随着钢渣细度由 23.1 μm 不断减小到 16.8、12.2、10.1、4.2 μm ，混凝土表面密实度不断变化，其中 C30-1-20 组混凝土表面孔隙较大，随着钢渣不断细化，混凝土表面孔隙不断减少，基体不断密实，这与之前压汞结果一致。这是因为钢渣颗粒越大其堆积在一起后颗粒之间的孔隙越大，颗粒越小堆积越密实所产生的孔隙越小，钢渣粉磨 20 min 后的细度为 23.1 μm 大于水泥的平均细度 16.2 μm ，因此 C30-1-20 组混凝土表面孔隙较大，随着钢渣细度由 23.1 μm 不断减小到 16.8、12.2、10.1、4.2 μm ，混凝土基体中孔隙直径及孔隙数量不断减小，基体将变得致密。

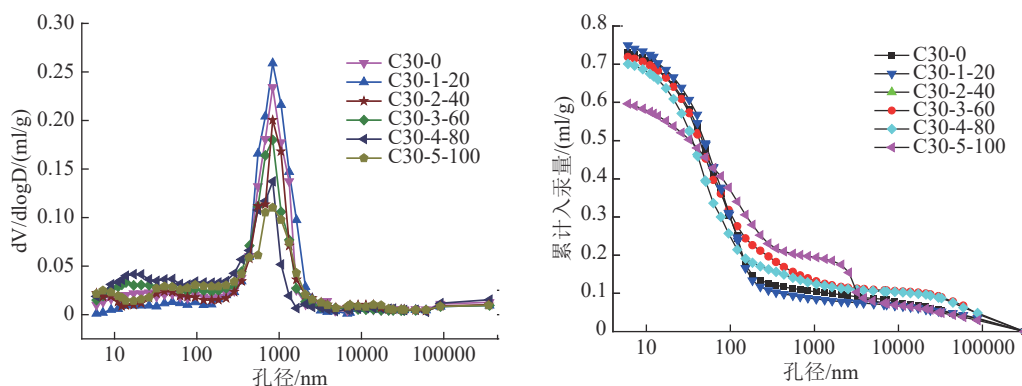


图8 钢渣细度对 C30 混凝土孔结构的影响
Fig.8 Effect of steel slag fineness on pore structure of C30 concrete

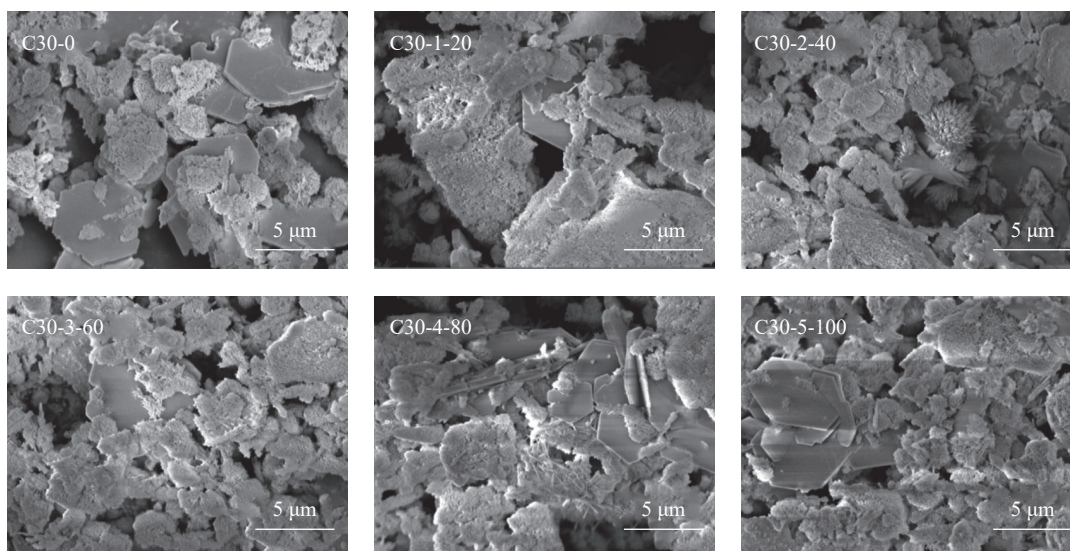


图9 C30 混凝土养护 28 d 后的 SEM
Fig.9 SEM of C30 concrete after 28 d of curing

3 结 论

(1) 钢渣的掺入可改善混凝土的工作性，且钢渣细度越小，混凝土工作性越差。各掺量下混凝土坍落度都保持在 220 mm 以上，坍落度都保持在 600 mm 以上，静置 1 h 后工作性损失量较小。

(2) 钢渣粉的细度对其抗压强度的影响较大，随着粉磨时间从 20 min 增加到 40、60、80、100 min，混凝土的 7、28 及 56 d 抗压强度均呈现出先降低后增加的趋势。其 56 d 抗压强度由 50.4 MPa 降低到了 37.8 MPa 又不断增加到 40.32、42.84、45.36 及 48.4 MPa，钢渣活性由 75% 增加到了 96%。

(3) 冻融循环 100 次后，未掺钢渣组的混凝土质量损失为 7.6%，当掺入 30% 钢渣后，混凝土的抗冻性能减弱，随着钢渣细度由 23.1 μm 不断减小到 16.8、12.2、10.1、4.2 μm，混凝土的抗冻性

能不断增强。钢渣的掺入能够促进混凝土的碳化，提高混凝土碳化后的抗压强度，钢渣越细其碳化深度越小。

(4) 混凝土内部孔隙主要集中在 100~1000 nm，且孔的数量随着钢渣粉的细化而不断减少，其 10~100 nm 左右的孔隙随着钢渣的细化而增多；与基准组对比，随着钢渣细度由 23.1 μm 不断减小到 16.8、12.2、10.1、4.2 μm，混凝土的孔隙率呈现出先增加而后不断降低的规律。

参考文献：

- [1] 梁晓杰, 常钧, 吴昊泽. 钢渣粉粒度对复合胶凝材料水化性能的影响[J]. 矿产综合利用, 2021(3):180-186.
- LIANG X J, CHANG J, WU H Z. Effect of particle size of steel slag powder on hydration performance of composite cementitious material[J]. Multipurpose Utilization of Mineral

Resources, 2021(3):180-186.

[2] 丁满堂. 含钒钢渣提钒利用研究[J]. 矿产综合利用, 2020(6):69-72.

DING M T. Research on utilization of vanadium extraction from vanadium-bearing steel slag[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(6):69-72.

[3] 何良玉, 谯理格, 赵日照, 等. 钢渣作胶凝材料和细集料制备高性能砂浆的研究[J]. 矿产综合利用, 2019(6):94-100.

HE L Y, JIAO L G, ZHAO R X, et al. Study on preparation of high performance mortar using steel slag as cementitious material and fine aggregate[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(6):94-100.

[4] 徐正震, 梁精龙, 李慧, 等. 含钒废弃物中钒的回收研究现状及展望[J]. 矿产综合利用, 2020(3):8-13.

XU Z Z, LIANG J L, LI H, et al. Research status and prospects of vanadium recovery in vanadium containing wastes[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(3):8-13.

[5] 米晓凡, 范海宏, 贾璐卫, 等. 烧结温度对钢渣陶粒结构及性能的影响[J]. 非金属矿, 2021, 44(1):36-39+46.

MI X F, FAN H H, JIA L W, et al. Effect of sintering temperature on the structure and properties of steel slag ceramic particles[J]. Nonmetallic Mining, 2021, 44(1):36-39+46.

[6] Maslehuddin M, Sharif AM, Shameem M, et al. Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes[J]. *Constr Build Mater*, 2003, 17(2):105-12.

[7] Qasrawi H, Shalabi F, Asi I. Use of low CaO unprocessed steel slag in concrete as fine aggregate[J]. *Constr Build Mater*, 2009, 23(2):1118-25.

[8] 王戎. 钢渣粉对混凝土性能的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2019, 50(2):221-224.

WANG R. Effect of steel slag powder on concrete properties[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2019, 50(2):221-224.

[9] Yogesh Nathuji Dhoble, Sirajuddin Ahmed. Study on cementitious properties of steel slag by partial replacement of cement[J]. *Global Journal of Engineering Science and Researches*, 2018(7):8-7.

[10] 张洪滔, 郭随华, 张文生, 等. 钢渣粉体颗粒形态与钢渣水泥强度关系的研究[J]. 电子显微学报, 2002(5):780-781.

ZHANG H T, GUO S H, ZHANG W S, et al. Study on the relationship between particle morphology of steel slag powder and strength of steel slag cement[J]. *Journal of Electron Microscopy*, 2002(5):780-781.

Effect of Steel Slag Fineness on Durability of Concrete

JIN Jing¹, HE Wenfei^{2,3}, LI Zhiqiang^{2,3}

(1.Department of Architectural Engineering, Anyang Vocational and Technical College, Anyang 455000, Henan, China; 2.School of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China; 3.Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: This is an article in the field of ceramics and composites. C30 concrete was prepared with steel slag powder with different particle size as admixture, and the effect of steel slag powder particle size on the durability of concrete was studied. The test results show that the internal pores of concrete are mainly concentrated in 100~1000 nm, and the number of pores decreases with the refinement of steel slag powder, and the pores of about 10~100 nm increase with the refinement of steel slag. The addition of steel slag can improve the workability of concrete; With the continuous refinement of steel slag, the 7, 28 and 56 d compressive strength of concrete decreases first and then increases. The 56 d compressive strength decreases from 50.4 MPa to 37.8 MPa and continues to increase to 40.32, 42.84, 45.36 and 48.4 MPa. With the fineness of steel slag from 23.1 MPa decreases to 16.8、12.2、10.1、4.2 μm . The activity of m steel slag increased from 75% to 96%. After 100 freeze-thaw cycles, the mass loss of concrete without steel slag group is 7.6%. When 30% steel slag is added, the frost resistance of concrete decreases. With the change of steel slag fineness, the frost resistance of concrete increases continuously, when the fineness is 10.1、4.2 μm , the mass loss is reduced to 7.4% and 6.1%. The addition of steel slag can promote the solidification and storage capacity of concrete to CO_2 and enhance the pressure strength of concrete. The finer the steel slag is, the stronger the carbonization resistance of concrete is.

Keywords: Ceramics and composites; Steel slag; Workability; Durability; Porosity