

氧化镁自密实混凝土在水利工程中的应用研究

朱一正

蚌埠市江河水利工程建设有限责任公司, 安徽 蚌埠 233400

DOI:10.61369/ME.2025040032

摘 要 : 本研究以 MgO 分别替代 0%、3%、6%、9%、12% 水泥质量, 制备自密实混凝土 (SCC) 试件, 并测试其流动性、凝结时间、抗压强度及 28 d 自收缩。结果表明: 当 MgO 掺量 $\leq 6\%$ 时, SCC 仍满足施工性能要求, 但随 MgO 掺量增加, V 型漏斗时间和凝结时间显著延长; 在抗压强度方面, SC6 组 (MgO 6%) 3 d、7 d 和 28 d 强度分别达 18.7 MPa、27.4 MPa 和 36.4 MPa, 较对照组 SC0 分别提高 23.8%、7.9% 和 8.3%, 这主要归因于 MgO 膨胀效应改进界面致密性及 MgO 激发矿渣活性促进 C-S-H 生成; 当 MgO 掺量 $>6\%$ 时, 过量 $Mg(OH)_2$ 结晶造成微裂缝增多和活性钙源不足, 反而使强度下降。自收缩方面, SC0 至 SC12 的 28 d 自收缩值从 $115 \mu\epsilon$ 逐步降至 $80 \mu\epsilon$, 表明 MgO 膨胀产物与水泥-矿渣水化收缩良性耦合, 有效减少变形。综上, 在确保施工性能和体积稳定性的前提下, 6%MgO 是提高抗压强度并降低自收缩的最佳掺量, 为大体积 SCC 在水利工程中的应用提供了配比参考。

关 键 词 : 自密实混凝土; 氧化镁; 水利工程; 抗裂性; 自收缩

Research on the Application of Magnesium Oxide Self-Compacting Concrete in Water Conservancy Projects

Zhu Yizheng

Bengbu Jianghe Water Conservancy Engineering Construction Co., LTD. Bengbu, Anhui 233400

Abstract : In this study, MgO was used to replace 0%, 3%, 6%, 9%, and 12% of cement mass respectively to prepare self-compacting concrete (SCC) specimens, and their fluidity, setting time, compressive strength, and 28-day self-shrinkage were tested. The results show that when the MgO dosage is $\leq 6\%$, SCC still meets the construction performance requirements. However, with the increase of MgO dosage, the V-funnel time and setting time are significantly prolonged. In terms of compressive strength, the SC6 group (MgO 6%) achieved strengths of 18.7 MPa, 27.4 MPa and 36.4 MPa at 3 days, 7 days and 28 days respectively, which were 23.8%, 7.9% and 8.3% higher than those of the control group SC0 respectively. This is mainly attributed to the improvement of interfacial compactness by the MgO expansion effect and the promotion of C-S-H formation by the MgO activation of slag activity. When the MgO dosage is greater than 6%, excessive $Mg(OH)_2$ crystallization leads to an increase in micro-cracks and insufficient active calcium sources, which instead causes a decrease in strength. In terms of self-shrinkage, the 28-day self-shrinkage values of SC0 to SC12 gradually decreased from $115 \mu\epsilon$ to $80 \mu\epsilon$, indicating a good coupling between the expansion products of MgO and the hydration shrinkage of cement-slag, effectively reducing deformation. In conclusion, under the premise of ensuring construction performance and volume stability, 6%MgO is the optimal dosage for enhancing compressive strength and reducing self-shrinkage, providing a proportioned reference for the application of large-volume SCC in water conservancy projects.

Keywords : self-compacting concrete; magnesium oxide; water conservancy projects; crack resistance; self-contraction

引言

随着我国水利工程建设规模持续扩大, 混凝土结构正面临更为严苛的服役环境。高水头、大流速、干湿循环、冻融交替等因素长期作用于混凝土构件, 易诱发裂缝、渗漏与耐久性性能衰退, 直接威胁工程服役安全与寿命。因此, 如何提升水工混凝土的整体性能, 尤其是其工作性、体积稳定性及抗裂性能, 已成为当前工程界与材料学界关注的研究热点。

自密实混凝土 (Self-Compacting Concrete, SCC) 具有良好的流动性、稳定性与充盈能力, 能在无需振捣的条件下实现自动流动

与密实，特别适用于钢筋密集、水流路径复杂的水工结构^[1-2]。然而，SCC通常采用较低水胶比与高胶凝材料掺量，并辅以大量高效减水剂，以实现其流动性要求，这一配合设计导致其内部孔隙压力大、胶体结构发展不均，早期极易产生显著自收缩及收缩裂缝^[3-4]，在大体积或约束构件中表现尤为突出，严重制约其在水利工程中的大规模推广应用。

为缓解 SCC 早期体积变形所带来的开裂风险，国内外研究者开展了多种调控手段的探索，包括内部养护、纤维增强、活性粉体调整及掺加膨胀组分等。其中，氧化镁（MgO）作为一种缓释型膨胀掺合料，因其水化生成体积膨胀的氢氧化镁（Mg(OH)₂），具备显著的收缩补偿潜力^[5-6]。MgO在碱性环境下还可促进类水滑石（hydrotalcite-like）相的生成，该相具有较大的体积和良好的分布稳定性，能有效填充浆体孔隙、缓解毛细压力、提升混凝土的微观均质性^[7]，对提升混凝土的抗裂性与长期耐久性具有重要意义。

尽管研究表明 MgO 对调控水泥基材料体积稳定性具有积极作用，但其在 SCC 体系中的综合影响机理尚不清晰。MgO 可能改变浆体的流变行为、水化速率、孔隙结构与水化产物类型，其对混凝土工作性、凝结行为、力学性能及收缩控制等多个方面存在耦合效应^[8]。尤其在低水胶比、高流动性要求的 SCC 体系中，MgO 的实际效能与适宜掺量仍需通过系统实验加以明确，为其在水工结构中的应用提供理论支撑与参数指导。

一、试验

（一）原材料

试验用 P · O 42.5 普通硅酸盐水泥产自海螺水泥有限公司；矿物掺合料选用 S105 级高炉矿渣粉和 I 级粉煤灰；分析纯轻质氧化镁（A.R.，纯度≥98%），购自天津市致远化学试剂有限公司；细骨料为中砂，细度模数 2.6，含泥量 <2%；粗骨料为连续级配碎石，粒径 5 - 20 mm，压碎值 <10%。外加剂采用聚羧酸高效减水剂（减水率约 30%）。试验用水为洁净城市自来水。

（二）配合比与样品制备

为研究氧化镁对自密实混凝土工作性、自收缩和力学性能的影响，在保持总胶凝材料用量不变的前提下，控制 MgO 的掺量分别为 0%、3%、6%、9%、12%（占胶凝材料质量百分比），并替代等量水泥。水胶比统一为 0.35，砂率为 45%。减水剂掺量均为 1%。详细配合比见表 1。

表 1 不同 MgO 掺量自密实混凝土配合比（单位：kg/m³）

编号	MgO	水泥	矿渣粉	粉煤灰	水	中砂	碎石
M0	0	300	60	40	140	850	900
M3	9	291	60	40	140	850	900
M6	18	282	60	40	140	850	900
M9	27	273	60	40	140	850	900
M12	36	264	60	40	140	850	900

（三）方法

为全面评估 MgO 对自密实混凝土的工作性能的影响，采用 V 型漏斗试验测定其流动粘聚性，J 环试验评价其钢筋间流动阻力，L 型箱试验用于检测其在绕过障碍后的填充能力与通过性。按照表 1 配比制得净浆，并装入维卡仪模具中，在标准养护条件下测试净浆凝结时间。

根据表 1 配比制备 100mm³立方体试件检测抗压强度。放入温度（20±3）℃，相对湿度大于 95% 的标准养护室里养护 24h 后拆模，养护至 3 d，7 d，28 d 进行抗压强度测试。试块 3 个一组，测试结果取平均值，并报告标准差。

采用波纹管法测定自密实混凝土自收缩。新拌混凝土分层装入 φ30 mm × 500 mm 波纹塑料管中，每层振动密实后密封。养

护条件为标准养护室，使用位移计每日记录前 14 天长度变化，14 天后每 7 天记录一次，监测至 28 天。自收缩应变按下式计算：

$$\mu_s = (L_T - L_0) \times \frac{10^6}{L_0} \quad (1)$$

其中：L_T 为龄期 t 时刻长度，L₀ 为初始长度。

二、结果与讨论

（一）流动性与凝结时间分析

自密实混凝土（SCC）以优异的流动性和充盈能力广泛应用于水利工程等复杂结构中，其施工性能对成型质量与结构安全至关重要。氧化镁（MgO）作为活性掺合料，通过调控浆体粘度和水化速率，可显著影响 SCC 的工作性与凝结行为。试验结果表明，MgO 掺量从 0% 增加至 12% 时，V 型漏斗时间由 7.8 s 增至 13.2 s，J 环扩展度由 720 mm 降至 590 mm，L 型箱阻塞比由 0.88 降至 0.72，表明 MgO 掺入降低了拌合物的流动性与通过性。

上述性能变化主要归因于 MgO 颗粒细度大、吸水性强，增加浆体黏度，部分水化形成的 Mg(OH)₂ 亦对流动性形成阻碍。但在掺量不超过 6% 时，SCC 各项工作性指标仍满足相关规范要求，具备良好施工适应性。

MgO 同时显著延缓了混凝土的凝结进程，初凝与终凝时间分别由 3.2 h 和 4.1 h 延长至 6.1 h 和 8.0 h。该效应主要源于 MgO 水化缓慢、释碱能力弱，抑制了胶凝组分的活化与凝胶结构形成，延迟水化进程。

综合来看，MgO 掺量控制在 3%~6% 可在保障 SCC 施工性的基础上，延长可操作时间，适应水利工程中钢筋密集、输送距离远等复杂工况，具备良好工程应用潜力。

（二）抗压强度

在保持总胶凝材料用量、水胶比及砂率一致的前提下，随着 MgO 掺量的增加，自密实混凝土在各龄期的抗压强度呈先升高后降低的趋势。以 SC6 组（MgO 掺量为 6%）为例，其 3 天、7 天、28 天的抗压强度分别达到 18.7、27.4 和 36.4 MPa，均显著高于未掺 MgO 的对照组 SC0（15.1、25.4、33.6 MPa），表明适量 MgO

有助于早期与后期强度的同步增长。

造成上述提升的主要原因可能包括两个方面：一是 MgO 与水反应生成 $Mg(OH)_2$ ，其晶体填充孔隙并产生微膨胀效应，有助于提高界面过渡区密实性与整体结构致密度；二是 MgO 具有碱性活性，可显著激发矿渣的潜在火山灰活性，加速其与 $Ca(OH)_2$ 反应生成 C-S-H 凝胶，从而增强胶结体系的强度发展。因此，MgO 在此体系中不仅仅充当膨胀组分，其“辅助激发剂”的功能可能是强度提升的关键机制之一。

然而，当 MgO 掺量超过 6%（SC9 与 SC12）时，强度反而下降，这可能与以下因素有关：一方面，过量 $Mg(OH)_2$ 的生成将形成大体积结晶产物，导致内部微裂缝和毛细孔结构扩展，破坏整体结构完整性；另一方面，大量 MgO 取代了部分水泥，会降低体系中 $Ca(OH)_2$ 含量，从而削弱对矿渣的激发效果，反使后期强度增长受限。综合分析表明，在矿渣参与反应的胶凝体系中，MgO 存在一个最佳掺量区间，以充分发挥其激发与膨胀双重作用。

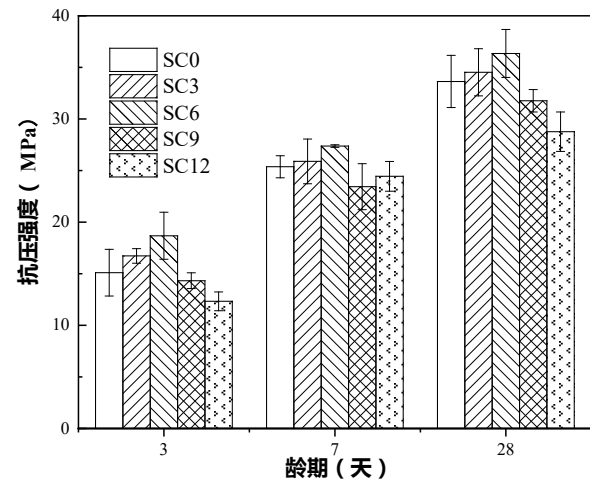


图1 MgO 掺量对 SCC 抗压强度的影响

（三）自收缩

自收缩测试结果显示，随着 MgO 掺量的增加，自密实混凝土在 28 天龄期的自收缩值逐渐下降，从 SC0 组的 $115 \mu\epsilon$ 降至 SC12 组的 $80 \mu\epsilon$ ，降幅约 30%。这一趋势明确表明 MgO 在限制自收缩方面具有显著效果，其作用机制主要归结为其水化产物 $Mg(OH)_2$ 在硬化早期的体积膨胀作用，可有效抵消由于水泥与矿渣反应产生的体积收缩。

更重要的是，由于本体体系中含有矿渣，MgO 激发矿渣反应不

仅提升了 C-S-H 凝胶产物的生成速率和数量，还可能通过促进早期水化释放更多热量，加快凝结硬化进程，从而在更短时间内形成具有膨胀能力的 $Mg(OH)_2$ 结晶结构。这一过程与矿渣自收缩高峰出现时间的提前产生了良性耦合，使得 MgO 的膨胀效应与自收缩过程更好匹配，从而实现收缩补偿效果最大化。

此外，较高掺量（如 SC9 与 SC12）虽对强度有所不利，但其自收缩值却最低，说明 MgO 膨胀效应主导了体积变化过程。若工程对体积稳定性要求高，可结合强度与收缩双重指标综合确定 MgO 合理掺量，避免“过补偿”带来的结构劣化风险。

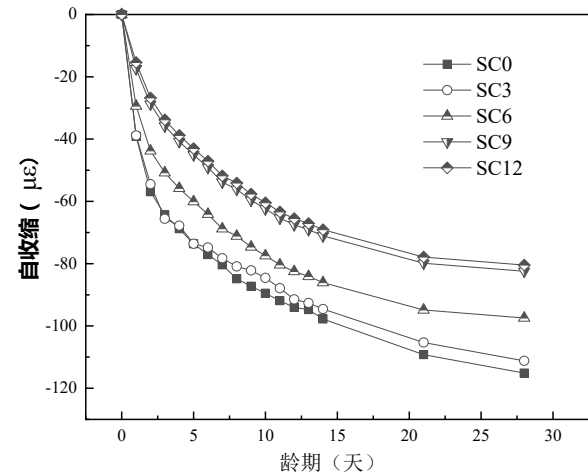


图2 MgO 掺量对 SCC 混凝土 28 天内自收缩的影响

三、结论

研究表明，适量掺入 MgO 的自密实混凝土（以 6% MgO 为最佳）既能满足施工流动性和凝结时间要求，又能显著提升抗压强度和减小自收缩；其机理在于 MgO 水化生成的 $Mg(OH)_2$ 微膨胀可改善界面密实度，同时 MgO 激发矿渣活性促进 C-S-H 凝胶形成，从而提高早晚期强度，并通过膨胀效应补偿水泥—矿渣水化收缩；当 MgO 掺量超过 6% 时，过量 $Mg(OH)_2$ 易产生微裂缝且 $Ca(OH)_2$ 不足以激发矿渣，导致强度下降；基于施工性能、力学性能与体积稳定性的综合平衡，6% MgO 应作为大体积自密实混凝土在水利工程中推荐的掺量，并可结合延长养护时间进一步抑制收缩开裂。

参考文献

- [1] 庄金平, 孙伟浩. 橡胶自密实混凝土与普通混凝土黏结抗剪性能试验研究 [J]. 混凝土, 2025, (04): 34-38.
- [2] 魏建修, 刘清, 闫浩, 等. 冻融循环作用下再生骨料自密实混凝土抗冻性能及损伤本构模型建立 [J]. 混凝土, 2025, (04): 90-97+106.
- [3] 李静, 呼浩楠. 纤维增强自密实混凝土力学性能与孔结构特征 [J/OL]. 复合材料学报, 1-13. 2025.
- [4] 何平, 叶智远. 粘度改性材料对 C40 自密实混凝土性能影响研究 [J]. 新型建筑材料, 2025, 52(02): 27-31.
- [5] 刘子源, 毕万利, 关岩, 等. 焙烧菱镁尾矿制 MgO 膨胀剂对水泥砂浆膨胀性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2021, 24(03): 466-472.
- [6] 卢存, 李华, 徐文, 等. MgO 膨胀剂对长龄期混凝土性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2023, 26(05): 524-529.
- [7] 齐广政, 张强, 刘宣. 脱硫石膏对铝酸钙—电石渣协同激发超硫酸盐水泥水化特性的调控机理 [J/OL]. 硅酸盐通报, 1-10.
- [8] 焦茂鹏, 王鹏刚, 田砾, 等. 低活性氧化镁膨胀剂对混凝土微结构、收缩和耐久性的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(11): 2905-2913.