

摩尔比对硫氧镁水泥胶凝材料基本力学性能影响研究

刘一谦¹, 高圣翔¹, 周祉安¹, 柳全科¹, 刘 海¹, 刘 昱^{1,*}

1. 辽宁科技大学, 土木工程学院, 辽宁 鞍山, 114051

摘要: 本研究探讨了不同摩尔比对硫氧镁水泥 (MSO) 基本力学性能的影响, 主要通过实验方法评估了摩尔比变化对水泥抗压强度和抗折强度的作用。实验选取了不同的 MgO 与 MgSO₄ 摩尔比 (8:1:20, 9:1:20, 10:1:20), 并对 7 天与 28 天养护期内的水泥强度进行了测定。研究表明, 随着摩尔比的增加, MSO 水泥在抗压强度和抗折强度上均有显著提高。在 28 天的养护期中, 10:1:20 组的抗压强度比基准组提高了 16.5%, 抗折强度提升了 22.3%。此外, 通过扫描电子显微镜 (SEM) 观察, 摩尔比较高的水泥样品显示出更为致密的微观结构, 这与水泥强度的提高密切相关。研究表明, 摩尔比对硫氧镁水泥的性能具有重要影响, 可以通过合理配比优化水泥的强度和微观结构。结果为工程师在水泥生产和应用过程中提供了宝贵的数据支持和优化建议。

关键词: 硫氧镁水泥; 摩尔比; 抗压强度; 抗折强度; 微观结构

Research on the Impact of Molar Ratio on the Basic Mechanical Properties of Magnesium Oxysulfate Cementitious Materials

Yiqian Liu¹, Shengxiang Gao¹, Zhian Zhou¹, Quanke Liu¹, Hai Liu¹, Yu Liu^{1,*}

1. School of Civil Engineering, Liaoning University of science and technology, Anshan, 114051, Liaoning, China

Abstract: In this study, the effects of different molar ratios on the basic mechanical properties of magnesium oxysulfate cement (MSO) were investigated. Experimental methods were employed to evaluate the impact of molar ratio changes on the compressive and flexural strength of the cement. Three molar ratios of MgO to MgSO₄ (8:1:20, 9:1:20, 10:1:20) were selected for the experiment, and the cement's strength was measured at 7 and 28 days of curing. The results show that increasing the molar ratio significantly enhances the compressive and flexural strengths of MSO cement. After 28 days of curing, the compressive strength of the 10:1:20 mixture was 16.5% higher than that of the reference group, while the flexural strength increased by 22.3%. Additionally, scanning electron microscopy (SEM) observations revealed that samples with higher molar ratios exhibited a denser microstructure, which is closely linked to the improved cement strength. This study demonstrates that the molar ratio plays a crucial role in the performance of magnesium oxysulfate cement. By optimizing the molar ratio, both the strength and microstructure of the cement can be improved. The findings provide valuable data and optimization recommendations for engineers involved in cement production and application.

Keywords: Magnesium oxysulfate cement; Molar ratio; Compressive strength; Flexural strength; Microstructure

硫氧镁水泥 (MSO) 作为一种低碳环保材料, 近年来得到了广泛关注。该水泥在建设和环保领

域具有巨大的潜力，其优异的力学性能和低碳排放特性使其成为一种具有前景的建筑材料^[1-3]。

巴明芳等^[4-7]通过实验研究了 MgO 与 MgSO₄ 摩尔比对水泥力学性能的影响，结果表明摩尔比的变化显著影响水泥的抗压强度。然而，尽管已有研究表明摩尔比对水泥性能有一定影响，但这些研究主要集中在单一的材料强度提升上，缺乏对不同摩尔比条件下水泥微观结构与力学性能之间关系的深入分析^[8-10]。此外，研究方法上大多数文献采用的是经验性分析，缺乏定量数据支持和具体的优化方案。

在摩尔比方面，薛涛等^[11]研究了原料摩尔比和矿物掺合料对硫氧镁砂浆性能的影响，发现摩尔比对水泥的耐久性有一定改善作用。但其研究仅在短期养护下对水泥的力学性能进行了评估，未能对长期养护效果进行充分探讨。此外，周俊峰等^[12]探讨了硫氧镁水泥的耐水性能，指出摩尔比的变化对耐水性能有一定影响，但他们并未深入研究其微观结构对水泥强度的具体影响。

尽管这些研究为硫氧镁水泥的发展提供了有益的理论支持，但大部分研究缺乏对摩尔比对水泥性能的量化分析，尤其是在不同摩尔比下水泥的抗压强度、抗折强度以及微观结构之间的具体关系仍不明确^[13-14]。本研究将采用不同摩尔比的 MgO 与 MgSO₄ 配比，定量分析其对水泥抗压强度和抗折强度的影响。最终，研究成果将为工程师在实际应用中提供理论支持，指导水泥配比的优化。

1 材料与方法

1.1 材料来源

试验采用的轻烧氧化镁来自辽宁海城，工业级，活性 MgO 含量≥85%，比表面积 200m²/kg，七水硫酸镁为海城当地厂家生产，分析纯，纯度≥99%，主要化学成分见表 1。

表 1 主要化学成分

| Table 1 Main chemical composition | |
|-----------------------------------|--------|
| 主要成分 | 含量 (%) |
| MgO | 48.35% |
| H ₂ O | 51.1% |
| CaO | 0.15% |
| Others | 0.4% |

通过 X 射线衍射 (XRD) 对轻烧 MgO 粉末的结晶相进行了分析，结果如图 1 所示。MgO 的 XRD 衍射峰非常清晰，图中还可以看到 MgCO₃ 的小衍射峰。由于煅烧温度较低，少量的残余 MgCO₃ 存在于图谱中。

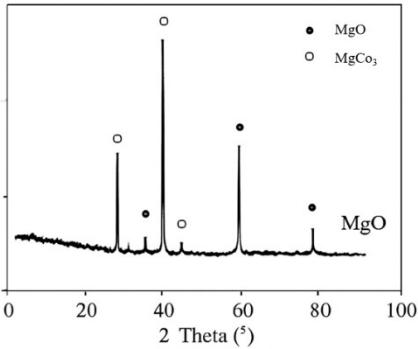


图 1 轻烧 MgO 粉的 XRD 图谱
Fig. 1 XRD of light burned MgO powder

1.2 配合比设计

试验采用的配合比如表 2 所示，根据氧化镁反应活性来确定 MOS 中氧化镁粉、七水硫酸镁及水的摩尔比。

表 2 配合比设计
Table 2 Mix design

| 活性 MgO: n(MgSO ₄ ·7 H ₂ O): n(H ₂ O) | MgO | MgSO ₄ ·7 H ₂ O | H ₂ O |
|-----------------------------------------------------------------------|------|---------------------------------------|------------------|
| 8: 1: 20 | 710 | 246 | 198 |
| 9: 1: 20 | 2840 | 984 | 792 |
| 10: 1: 20 | 2130 | 738 | 594 |

1.3 试件制备与加载表征

为制备 MSO 水泥浆体，首先使用去离子水配制 MgSO₄ 溶液，将 MgSO₄·7H₂O 溶解于去离子水中，形成不同摩尔比的 H₂O/MgSO₄ 溶液。在改性版本中，加入柠檬酸与 MgSO₄ 溶液混合，确保溶液均匀。接着，将 MgO 粉末加入上述溶液中，搅拌数分钟，得到均匀的 MSO 水泥浆体。混合完成后，将浆体倒入预先准备的模具中。初步步骤包括将 MgO 与 MgSO₄ 干拌均匀，然后加入去离子水继续搅拌 3min。最终，将混合物分别倒入尺寸为 40mm×40mm×160mm 和 100mm×100mm×100mm 的试模中，并进行振动成型，如图 2 所示。成型后，分别在 7d 和 28d 时，测试其抗折强度与抗压强度。



(a) 拌合材料



(b) 试块脱模

图 2 试件制备

Fig. 2 Specimen preparation

本研究中抗压强度和抗折强度试验均严格参照《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70-2009)^[15]执行。抗压强度试验采用 YAW-300 型全自动压力试验机进行加载，保证加载速度均匀稳定，数据记录准确；抗折强度试验采用 DKZ-500 型电动抗折试验机进行，确保试件在加载过程中受力均匀。试件分别在 7d 和 28d 龄期进行抗压及抗折性能测试，试验所用设备如图 3 所示，所得数据用于后续性能对比分析。



(a) 抗压试验机



(b) 抗折试验机

图 3 试验加载设备

Fig. 3 Test loading equipment

本试验采用高分辨率扫描电子显微镜 (SEM) 对养护 7d 和 28d 后的试样进行微观结构观测。取破坏后试块上的样品作为研究对象。将试样制备成适合 SEM 观测的尺寸和形状, 确保其表面平整且具有代表性。在 $10\mu\text{m}$ 的观测尺度下, 利用高能电子束对试样表面进行扫描。通过精确控制电子束的加速电压和电流, 使其能够穿透试样表面一定深度, 从而获取试样的微观形貌信息^[16]。在扫描过程中, 记录大量的高分辨率图像, 以全面反映试样的微观结构特征。

2 结果与分析

2.1 摩尔比对抗压强度的影响

如图 4 所示, 展示了不同摩尔比 MSO 试样的抗压强度试验结果。实验表明, 随着 MgO 与 MgSO_4 摩尔比的增加, 硫氧镁水泥在 7d 和 28d 养护期内的抗压强度均显著提高, 尤其在 28d 时, 10:1:20 组的抗压强度比基准组提高了 16.5%。

在 7d 的测试中, 10:1:20 组的抗压强度为 62.7MPa, 比基准组 (47.8MPa) 高出 30% 以上。在 28d 的测试中, 9:1:20 组和 10:1:20 组的抗压强度分别比基准组提高了 9.9% 和 16.5%。

尤其在 10:1:20 组中, 生成的针棒状晶体数量明显多于其他组别, 表明较高的摩尔比促进了水化反应, 生成了更多水化产物, 显著提高了水泥的抗压强度。硫氧镁水泥的强度主要源于氧化镁与七水硫酸镁在水化过程中的反应, 生成的 $5 \cdot 1 \cdot 7$ 型水化产物 (如针棒状晶体) 为水泥的强度提供了支撑。

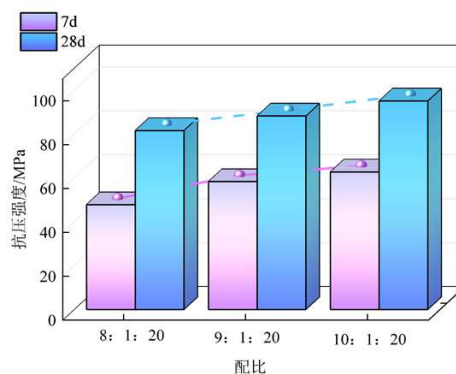


图 4 抗压强度试验结果

Fig. 4 Compressive strength test results

2.2 摩尔比对抗折强度的影响

如图5所示为不同摩尔比 MOS 试样抗折强度试验结果。可以看出,与抗压强度趋势一致,随着养护龄期的增加,各组 MOS 试样的抗折强度分别提升了 78.3%、60.1%、47.3%。8:1:20 组增长趋势更为明显。此外,抗折强度随 MgO/MgSO_4 摩尔比的增加而增加,7d 抗折强度,9:1:20 组和 10:1:20 组的抗压强度分别为 9.3MPa 和 10.8MPa,比基准组的 7.5MPa 高出了 24%和 44%。28d 抗折强度,与基准组 8:1:20 试件相比,9:1:20 组和 10:1:20 组分别提高了 12.1%和 22.3%,表明较高摩尔比下,氧化镁的含量较高,水化反应初期较为迅速,早期水化产物的积累显著提高了水泥的初期强度。此外,水泥水化过程中水分的控制和反应的充分性也受到摩尔比的影响,较高的摩尔比意味着更多的氧化镁参与反应,减少了水分的浪费,提高了水泥的早期强度。

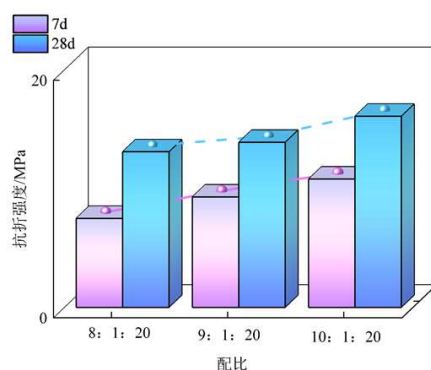
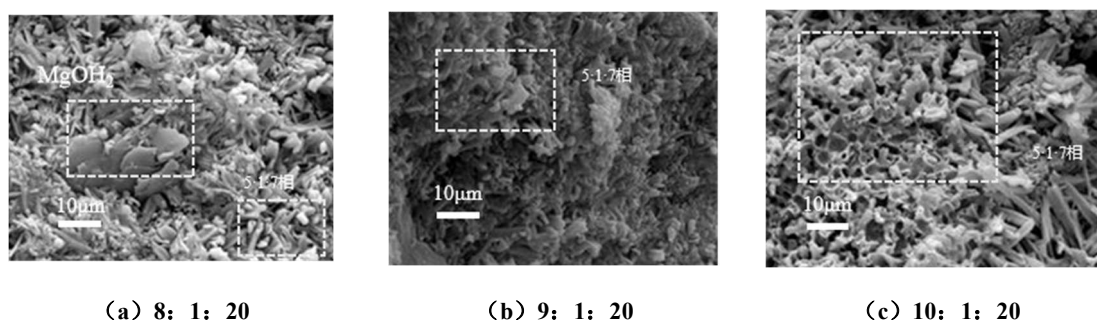


图5 抗折强度试验结果

Fig. 5 Flexural strength test results

2.3 摩尔比对微观结构的影响

图6展示了不同氧硫比的 MOS 水泥试样在 7d 的微观形貌。从图6可以看出,不同氧硫比的试样水化过程中均生成了较多的针棒状 $5 \cdot 1 \cdot 7$ 晶体。结合图6(c),可以发现摩尔比为 10:1:20 的样品中,针棒状晶体的数量明显多于其他水化试样。这些针棒状晶体正逐渐交织成网状结构。随着网状结构的形成,基体趋向于稳定,结构更加致密,从而减少了体积变形^[16-17]。扫描电子显微镜 (SEM) 观察表明,随着摩尔比的增加,水泥的微观结构变得更加致密。



(a) 8:1:20

(b) 9:1:20

(c) 10:1:20

图6 养护 7d 不同摩尔比 MOS 的 SEM 图

Fig. 6 SEM of MOS with different molar ratios after 7 days' curing

3 结论

(1) 摩尔比对抗压强度的影响: 实验结果表明,随着 MgO 与 MgSO_4 的摩尔比增加,MSO 水泥的抗压强度显著提高。特别是在 28d 养护期内,10:1:20 组的抗压强度比基准组高出 16.5%。这一

结果为水泥的强度优化提供了有效指导。

(2) 摩尔比对抗折强度的影响: 在抗折强度方面, 随着摩尔比的增加, 抗折强度表现出明显的提升。在 28d 的测试中, 9:1:20 组和 10:1:20 组的抗折强度分别比基准组提高了 12.1%和 22.3%。这种增强效应对于提高水泥的耐久性和使用寿命具有重要意义。

(3) 微观结构与力学性能的关系: 扫描电镜 (SEM) 结果表明, 较高摩尔比的样品具有更为致密的微观结构, 针棒状晶体数量的增加显著提高了水泥的强度。这一发现为进一步优化水泥配比提供了理论依据, 并为工程师在实际施工中提供了优化材料配方的方向。

参考文献

- [1] 乔紫璇, 张润丰, 刘 彤, 等. 偏高岭土掺量对硫氧镁水泥性能的影响[J]. 无机盐工业, 2025, 57(05): 32-38.
- [2] 林天成, 徐 迅, 孙永涛, 等. 磷石膏对硫氧镁水泥性能影响的研究[J]. 新型建筑材料, 2025, 52(04): 103-108.
- [3] 马宏宇, 姬仁林, 马亚丽, 等. 有机酸调控硫氧镁水泥的水化进程[J]. 硅酸盐学报, 2025, 53(02): 396-405.
- [4] 巴明芳, 马哲洋, 纪璐鑫, 等. 不同摩尔比对改性硫氧镁水泥基材料力学性能、变形行为的影响及机理研究[J/OL]. 建筑材料学报, 2025: 1-14.
- [5] 巴明芳, 薛涛, 朱杰兆, 等. 水玻璃对硫氧镁胶凝材料强度稳定性和耐水性的影响[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(06): 963-970.
- [6] Li Z, Ji Z. Effect of molar ratios on compressive strength of modified magnesium oxysulfate cement[J]. Int. J. Hybrid Inf. Technol, 2015, 8(6): 87-94.
- [7] Gu Kang, Lang Lei, Li Desheng, et al. Preparation of Magnesium Oxysulfate Cement with Calcined Phosphate Tailings[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34(12).
- [8] 陈啸洋, 张婷婷, 常 钧, 等. 硅酸对硫氧镁水泥耐水性能的影响[J/OL]. 硅酸盐学报, 2023, 51(8): 2017-2026.
- [9] 巴明芳, 许浩锋, 朱杰兆, 等. 活性混合材对改性硫氧镁胶凝材料性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(04): 763-770.
- [10] 巴明芳, 朱杰兆, 薛 涛, 等. 原料摩尔比对硫氧镁胶凝材料性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(01): 124-130.
- [11] 薛 涛, 范奕涛, 刘婧涵, 等. 原料摩尔比和矿物掺合料对柠檬酸改性硫氧镁砂浆性能的影响[J]. 宁波大学学报(理工版), 2018, 31(04): 81-87.
- [12] 周俊峰, 陈啸洋, 陈 兵, 等. 煅烧沸石粉对硫氧镁水泥耐水性的影响[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(3): 197-205.
- [13] Qin L, Gao X, Li W, et al. Modification of magnesium oxysulfate cement by incorporating weak acids[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(9): 04018209.
- [14] Wu C, Yu H, Zhang H, et al. Effects of phosphoric acid and phosphates on magnesium oxysulfate cement[J]. Materials and structures, 2015, 48: 907-917.
- [15] 中华人民共和国建设部, JGJ/T 70-2009, 建筑砂浆基本性能试验方法标准[S], 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [16] Tang S, Yuan J, Cai R, et al. In situ monitoring of hydration of magnesium oxysulfate cement paste: Effect of MgO/MgSO₄ ratio[J]. Construction and Building Materials, 2020, 251: 119003.
- [17] Zhang Q, Fan K. Effect of molar ratio on mechanical properties and water resistance of citric acid modified magnesium sulfate cement[J]. Archives of Civil Engineering, 2025: 19-35-19-35.

基金项目: 辽宁科技大学博士资助基金项目 (6003000447)、辽宁科技大学大学生 (创新) 训练计划项目 (X202510146185)。

¹ **第 1 作者简介:** 刘一谦 (2005-), 男, 本科在读, 研究方向: 新型胶凝材料。E-mail: liuyiqian20050416@qq.com。

*** 通讯作者简介:** 刘昱 (1989-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向: 绿色建筑材料。E-mail: liuyu1225@ustl.edu.cn。