

DOI:10.12119/j.yhyj.201802011

原料配比对氯氧镁水泥固化砾石土干密度的影响

肖学英^{1,2}, 常成功^{1,2}, 李颖^{1,2}, 安生霞^{1,2,3}, 文静^{1,2},
郑卫新^{1,2}, 黄青^{1,2,3}, 董金美^{1,2}

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 中国科学院盐湖资源综合利用重点实验室, 青海 西宁 810008;
2. 青海省盐湖资源化学重点实验室, 青海 西宁 810008;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:干密度是评价软土固化质量的重要指标,一般通过室内击实试验获得。以氯氧镁水泥(MOC)为结合料,砾石土为固化对象,研究了原料比对MOC固化砾石土击实性能的影响。通过室内击实试验,考察了轻烧镁粉掺量、卤水浓度、卤水掺量和活性MgO/MgCl₂物质的量比(Mg/Cl比)影响混合料干密度的规律。结果表明:MOC固化砾石土击实料的干密度随卤水掺量增加先增加后降低,随轻烧镁粉掺量及Mg/Cl比的增加而先增加后降低,随卤水浓度及轻烧镁粉掺量的增加而增加,随卤水浓度增加及Mg/Cl比降低而增加。

关键词:氯氧镁水泥;原料配比;固化土;击实特性;干密度

中图分类号:TQ172.12

文献标识码:A

文章编号:1008-858X(2018)02-0075-06

基层作为路面结构的主要承重层,是路面结构的核心。在路基施工时一般通过人工碾压的方法提高路基的密实程度,以提高基层的强度和稳定性。现行公路施工技术规范中通过土的最大干密度和最佳含水量控制路基填土的压实质量^[1]。最大干密度和最佳含水量一般通过室内击实试验获得^[2]。实际工程中,通过添加结合料提高填土之间的粘结力和稳定性。常用的无机结合料有水泥、石灰和工业废渣^[3-5]。

氯氧镁水泥(Magnesium Oxochloride Cement, MOC)具有早强、高强、胶结能力强、抗冻性好和耐盐卤等优点^[6]。近年来,有学者提出用MOC固化软土、特别是用来固化氯盐盐渍土^[7]。由于MgCl₂是氯盐渍土的常见组分,MOC固化土体系也可以看作是活性MgO固化氯化镁型盐渍土的体系。用MOC作为填土的固化剂,与目前通用无机结合料的差别在于,MOC中水化产物的形成受到活性MgO、MgCl₂和H₂O三者配比的影响^[8]。

在改变这3个参数时,还会引起活性MgO/MgCl₂物质的量比(以下简称“Mg/Cl比”)的变化,进而影响固化体系的击实性能和水化产物,最终影响MOC固化体系的强度和稳定性。本文以砾石土为研究对象,以混合料的干密度为指标,重点研究轻烧镁粉、卤水浓度、卤水掺量和Mg/Cl比对砾石土击实性能的影响。本文研究结果可为MOC无机结合料体系的配合比设计提供依据,也可为强氯盐型盐渍土的工程特性分析提供指导。

1 原材料及实验方法

1.1 实验原料

实验用土取自青海省西宁市城北区某工地的砾石土,其粒径分布见表1。砾石土的天然含水率为6.13%,在50℃烘箱中烘干至恒重,备用。砾石土中粒径小于0.088mm的颗粒经X射线粉末

收稿日期:2017-03-03;修回日期:2017-03-26

基金项目:国家自然科学基金(U1507120,51608512);青海省重大科技专项(2014-GX-A2A);青海省自然科学基金(2015-ZJ-949Q);中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部博士资助项目”

作者简介:肖学英(1964-),男,研究员,主要从事盐湖卤水资源及氯氧镁水泥开发研究工作。Email:xiaoxy@isl.ac.cn。

通信作者:李颖(1982-),男,博士,副研究员,主要从事盐湖材料学方面的研究工作。Email:setdownly@126.com;liyong@isl.ac.cn。

表 1 砾石土的粒径分布
Table 1 The particle size distribution of gravel soil

筛孔/mm	19	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	筛底
含量/%	0.51	10.39	28.62	18.14	8.89	11.68	10.80	4.17	3.07	3.72

衍射 (XRD) 分析, 确认其主要成分为石英、钙长石、白云母、董青石、钠长石、斜微长石和斜绿泥石。

实验所用轻烧镁粉购于辽宁海城, 主要矿物组成为 MgO 、 $MgCO_3$ 和 SiO_2 , 经水合法^[9]测定的活性 MgO 含量为 60.76%。

实验用水氯镁石和抗水改性剂同文献^[10]。实验用水为自来水。水氯镁石预先配置成饱和溶液, 使用时稀释至所需浓度。

1.2 实验方法

在实验过程中, 先将轻烧镁粉与抗水改性剂按照 9:1 比例混合均匀, 制得改性轻烧镁粉, 备用。按照设计配比称取砾石土和卤水, 在砾石土中添加部分卤水 (少于设计卤水掺量的 1/2) 密封闷料 4 h, 之后加入改性轻烧镁粉和剩余卤水, 充分搅拌后, 按照《T0804-1994 无机结合料稳定材料击实试验方法》进行击实实验。击锤质量为 4.5 kg, 锤击面直径为 5 cm, 落高 45 cm, 分 5 层击实, 每层锤击 27 次, 平均单位击实功为 2.687 J, 试筒内径和高分别为 10 cm 和 12.7 cm。击实后, 试样超出筒顶高度小于 5 cm, 击实试样的干燥温度为 105 °C。每个配比的击实混合料取 2 份试样测定含水率, 用其平均值计算干密度。

2 实验结果

2.1 卤水掺量和 Mg/Cl 比

当固定轻烧镁粉的掺量和卤水浓度时, 随着卤水掺量增加, Mg/Cl 比逐渐减小。图 1 是固定轻烧镁粉的掺量为 3% 和卤水浓度为 9.35% 时, 击实料的干密度随卤水掺量的变化规律。在此卤水掺量范围内, Mg/Cl 比由 13.32 降低到 7.40。

从图 1 可以看出, 干密度的变化曲线随卤水掺量增加成抛物线型。最大干密度为 2.280 g/cm^3 , 对应的卤水掺量为 7.90%。当卤水

掺量 $< 7.90\%$ 时, 干密度随卤水掺量增加而增加; 当卤水掺量 $> 7.90\%$, 击实料的干密度反而降低。该变化规律与其它无机结合料稳定材料的击实试验结果相似^[11]。

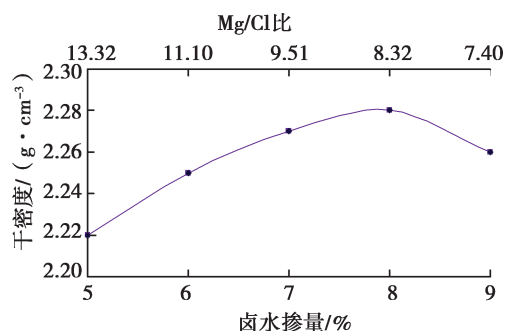


图 1 卤水掺量和 Mg/Cl 比对混合料干密度的影响

Fig. 1 The influence of brine content and Mg/Cl on dry density

2.2 卤水掺量和卤水浓度

当固定轻烧镁粉的掺量和 Mg/Cl 比时, 随着卤水掺量增加, 需要逐渐降低卤水的浓度。图 2 是固定轻烧镁粉的掺量为 4% 和 Mg/Cl 为 7 时, 击实料的干密度随卤水掺量的变化规律。在此卤水掺量增加的范围内, 卤水浓度由 29.36% 降低到 14.68%。

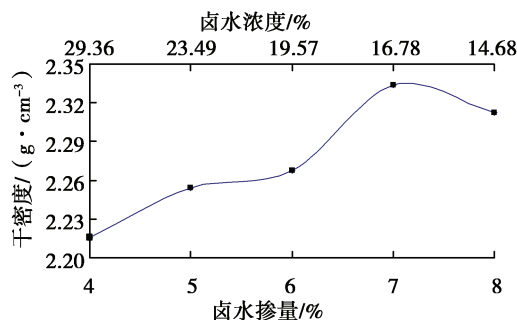


图 2 卤水掺量和卤水浓度对混合料干密度的影响

Fig. 2 The influence of brine content and brine concentration on dry density

由图2可知,随卤水掺量的增加,混合料的干密度先增加后减小。最大干密度为 $2.335\text{g}/\text{cm}^3$,此时的卤水掺量为 7.15% 。

2.3 轻烧镁粉掺量和卤水掺量

当固定卤水浓度时,同时在混合料中保持相同的 Mg/Cl 比,随混合料中轻烧镁粉掺量增加,需要相应地增加卤水的掺量。图3是固定 Mg/Cl 比为7和卤水浓度为 18.69% 时,击实料的干密度随轻烧镁粉掺量的变化规律。在此轻烧镁粉掺量变化范围内,卤水掺量由 3.20% 增加到 9.61% 。

由图3可知,在固定卤水浓度和 Mg/Cl 比时,混合料的干密度随卤水掺量的变化规律也是开口向下的抛物线型。最大干密度为 $2.316\text{g}/\text{cm}^3$,卤水掺量为 8.01% (轻烧镁粉掺量为 5%)。

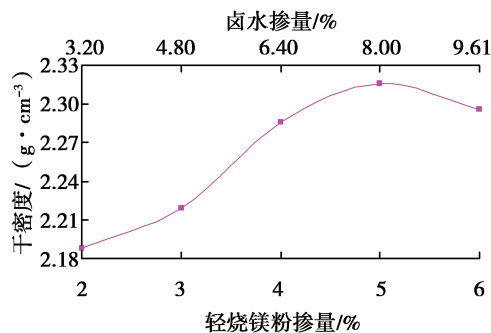


图3 轻烧镁粉掺量和卤水掺量对混合料干密度的影响

Fig. 3 The influence of light-burn magnesia content and brine content on dry density

2.4 轻烧镁粉掺量和卤水浓度

当固定卤水的掺量和 Mg/Cl 比时,随着轻烧镁粉掺量增加,需要相应地增加卤水浓度。图4是固定卤水掺量为 8% 和 Mg/Cl 比为7时,击实料的干密度随轻烧镁粉掺量的变化规律。在此轻烧镁粉的掺量范围内,卤水的浓度由 7.48% 增加到 21.59% 。

由图4可知,在实验所考察的轻烧镁粉掺量范围内,击实料的干密度随轻烧镁粉掺量的增加而单调增加;击实料的干密度由 $2.273\text{g}/\text{cm}^3$ 增加到了 $2.344\text{g}/\text{cm}^3$,增加幅度为 3.15% 。

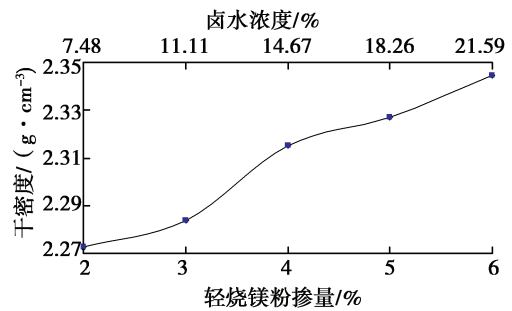


图4 轻烧镁粉掺量和卤水浓度对混合料干密度的影响

Fig. 4 The influence of light-burn magnesia content and brine concentration on dry density

2.5 轻烧镁粉掺量和 Mg/Cl 比

当固定卤水的掺量和浓度时,随混合料中轻烧镁粉的掺量增加, Mg/Cl 比会逐渐增加。图5是固定卤水的掺量为 7% 和卤水浓度为 18.69% 时,混合料的干密度随轻烧镁粉掺量的变化规律。在此轻烧镁粉的变化范围内, Mg/Cl 比由 3.20 增加到 9.24 。

由图5可知,固定卤水的掺量和浓度时,随轻烧镁粉掺量增加击实料的干密度先增加后减小,该变化规律与图1~图3类似。轻烧镁粉的掺量为 4% 时,混合料达到最大的干密度($2.337\text{g}/\text{cm}^3$),此时对应的 Mg/Cl 比为 6.28 。

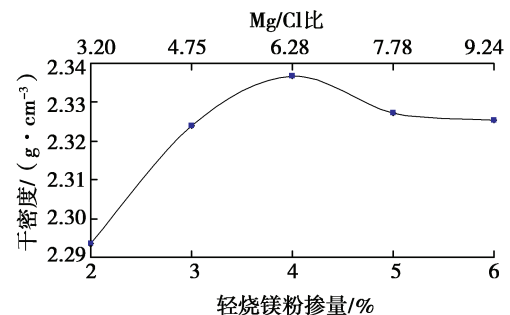


图5 轻烧镁粉掺量和 Mg/Cl 比对混合料干密度的影响

Fig. 5 The influence of light-burn magnesia content and Mg/Cl ratio on dry density

2.6 卤水浓度和 Mg/Cl 比

当固定轻烧镁粉的掺量和卤水掺量时,随着卤水浓度的增加, Mg/Cl 比逐渐减小。图6是固定轻烧镁粉的掺量为 3% 以及卤水掺量为 8% 时,

击实料的干密度随卤水浓度增加的变化规律。在此卤水浓度的变化范围内 Mg/Cl 比由 8.32 降低到 3.33。

由图 6 可知,在实验所考察的卤水浓度变化范围内,击实料的干密度随卤水浓度的增加成单调递增趋势;击实料的干密度由 2.266 g/cm^3 增加到 2.304 g/cm^3 ,增加幅度为 1.68%。与图 4 比较可知,单纯增加卤水浓度引起干密度增加的幅度要小于增加轻烧镁粉掺量引起干密度增加的幅度。

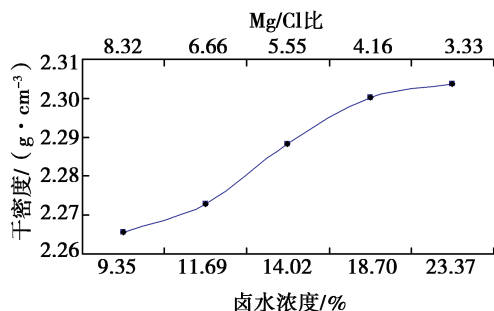


图 6 卤水浓度和 Mg/Cl 比对混合料干密度的影响

Fig. 6 The influence of brine concentration and Mg/Cl ratio on dry density

3 讨论

在击实方式及击实功相同的情况下,混合料的击实特性和轻烧镁粉掺量、卤水浓度、卤水掺量以及 Mg/Cl 比有关。混合料的干密度受上述 4 个因素的影响表现出不同的变化规律。

3.1 卤水掺量的影响

由实验结果可知,无论轻烧镁粉掺量、卤水浓度和 Mg/Cl 比如何变化,混合料的干密度随卤水掺量的变化规律在实验范围内都表现为抛物线型,即随卤水掺量增加,混合料的干密度先增加后降低,通过实验可以得到相应条件下混合料的最大干密度及其卤水掺量。该变化规律与其它类型无机结合混合料随含水率的变化规律相似^[11]。最大干密度对应的卤水掺量类似于其它无机结合混合料的最优含水率。

在混合料中,卤水中的 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 H_2O 等粒子被吸附在土粒和氧化镁颗粒的表面。随卤水

掺量增加,固体颗粒表面的卤水增加,一方面降低了颗粒表面的摩擦力,使固化体系中的颗粒在外力作用(击实功)下更容易移动,另一方面减小了土颗粒表面双电层的厚度。这两方面的原因使挤压作用下颗粒间的距离减小,空隙减少,土料的干密度增加。当卤水掺量继续加大,颗粒表面的卤水聚集成较厚的液膜或液珠,液膜和液珠占据空间位置并阻碍固化体系中的颗粒靠近。待固化体烘干后,颗粒之间的液膜和液珠失水,留下空隙导致固化体的干密度降低。卤水掺量过大时,击实过程中会挤出颗粒间过量的卤水,析出浆液。

由于击实后混合料的干密度还受到固化体系中颗粒级配及卤水浓度的影响,因而图 1 ~ 图 3 中击实混合料出现的最大干密度及其对应的卤水掺量均有差异。

3.2 轻烧镁粉掺量的影响

受卤水浓度和 Mg/Cl 比变化的影响,击实混合料的干密度随轻烧镁粉掺量变化表现出不同的变化趋势。

当固定卤水掺量和 Mg/Cl 比时,增加轻烧镁粉掺量,需要相应地增加 MgCl_2 (卤水浓度和密度增加),击实料的干密度随之增加(图 4)。由于轻烧镁粉的粒径($<0.088 \text{ mm}$)较小,在固化体系中容易填充到砾石土颗粒之间;且 MgCl_2 以接近 H_2O 分子粒径的 Mg^{2+} 和 Cl^- 形式混合到体系中,更容易填充进更小的空隙中。因而,随着轻烧镁粉和 MgCl_2 掺量增加,混合料的干密度在本文实验范围内逐渐增加。当轻烧镁粉的掺量从 2% 增加到 6% 时,由此引起混合料的总质量增加 3.92%,与此同时体系的最大干密度增加幅度为 3.15%。这可能是缘于增加的轻烧镁粉和 MgCl_2 填充到了砾石土颗粒的空隙中。

当轻烧镁粉掺量为 2%、浓度为 18.69% 的卤水掺量为 7% 时,混合料击实后已达到较大的干密度。在此基础上固定卤水掺量和浓度,逐渐增加混合料中轻烧镁粉的掺量,导致击实混合料的干密度先增加后降低(图 5)。这说明轻烧镁粉的掺量较低时,击实体系中并未达到最佳的颗粒级配组合状态,颗粒之间仍然存在孔隙。逐渐增加砾石土中轻烧镁粉的掺量,能进一步填充颗粒间孔隙,使击实料的干密度增加。但当砾石土颗粒

间与轻烧镁粉粒径匹配的孔隙被填满之后,过量的轻烧镁粉颗粒将取代土颗粒。由于轻烧镁粉的密度(堆积密度 $< 1.5 \text{ g/cm}^3$)小于土颗粒(主要成分为石英,密度为 2.66 g/cm^3),因而导致轻烧镁粉掺量增大时,混合料的最大干密度反而降低。

3.3 卤水浓度的影响

当固定轻烧镁粉的掺量为3%和卤水掺量为8%时,随着卤水浓度增加,体系中的 MgCl_2 含量逐渐增加,击实混合料的干密度逐渐增加(图6)。在此条件下,体系中增加的 MgCl_2 也表现出填充作用。卤水浓度越大,填充进去的 Mg^{2+} 和 Cl^- 越多,颗粒间的空隙越小,击实混合料的干密度越大。该现象与固化盐渍土中含盐量对混合料干密度的影响类似^[12]。

4 结 论

1) 随卤水掺量增加,击实混合料的干密度先增加后降低;

2) 随轻烧镁粉掺量增加,混合料的干密度伴随卤水掺量或 Mg/Cl 比增加而先增加后减小;

3) 随卤水浓度增加,混合料的干密度伴随轻烧镁粉掺量增加或 Mg/Cl 比减小而增加。

参考文献:

[1] 陈花林. 石灰改良泥质粉砂岩路基填料的试验研究[J]. 铁

道工程学报, 2008, (3): 10-14.

[2] 陈志波, 朱俊高, 王强. 宽级配砾质土压实特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 446-449.

[3] Kalipcilar R, Mardani-Aghabaglou A, Sezer G N, et al. Assessment of the effect of sulfate attack on cement stabilized montmorillonite[J]. Geomech. Eng., 2016, 10(6): 807-826.

[4] 王天亮, 刘建坤, 田亚护. 冻融作用下水泥及石灰改良土静力特性研究[J]. 岩土力学, 2011, (1): 193-198.

[5] Sharma R K, Hymavathi J. Effect of fly ash, construction demolition waste and lime on geotechnical characteristics of a clayey soil: a comparative study [J]. Environ Earth Sci, 2016, 75(5): 1-11.

[6] 李颖, 余红发. 基于测量高温侵蚀厚度的氯氧镁水泥抗水性的快速评价方法[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(8): 1047-1054.

[7] Yang P, Huang X, Pi J, et al. Study on new cementitious materials used for pile and stabilized soil in super saline soil [J]. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2016, 2(62): 2111-2114.

[8] 李颖, 余红发, 董金美, 等. 氯氧镁水泥的水化产物、相转变规律和抗水性评价方法的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(11): 1465-1473.

[9] 董金美, 余红发, 张立明. 水合法测定活性 MgO 含量的试验条件研究[J]. 盐湖研究, 2010, 18(01): 38-41.

[10] 肖学英, 常成功, 郑卫新, 等. 氯氧镁水泥混凝土路面力学性能研究[J]. 盐湖研究, 2016, 20(3): 50-54.

[11] 张卫芳, 杨俊, 李浩, 等. 不同改性材料改良硫酸盐渍土的击实特性试验研究[J]. 施工技术, 2013, 42(12): 100-103.

[12] 文桃, 米海珍, 杨鹏, 等. 硫酸盐渍土击实性能及影响因素试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1945-1952.

The Influence of Raw Material Ratio of Magnesium Oxychloride Cement on Dry Density of Solidified Gravel Soil

XIAO Xue-ying^{1,2}, CHANG Cheng-gong^{1,2}, LI Ying^{1,2}, AN Sheng-xia^{1,2,3}, WEN Jing^{1,2},
ZHENG Wei-xin^{1,2}, HUANG Qing^{1,2,3}, DONG Jin-mei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Qinghai Xining, 810008;

2. Key Laboratory of Salt Lake Resources Chemistry of Qinghai Province, Qinghai Xining, 810008;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049)

Abstract: Dry density is an important indicator of the quality of soft soil solidification generally obtained by indoor compaction test. The effects of raw material ratio on the densification performance of gravel soil consolidated by magnesium oxychloride cement (MOC) were studied. The compaction test were carried out considering

the effects of light burn magnesia content, brine concentration, brine content, and active MgO/MgCl₂ ratio (Mg/Cl) on the dry density of solidified gravel soil. The results reveals that the dry density of the gravel soil solidified with MOC increased firstly and then decreased with the increase of brine content, increased firstly and then decreased with the increase of light-burn magnesia content and Mg/Cl, increased with the increasing of brine concentration and light-burn magnesia content, and increased with the increase of brine concentration and the decrease of Mg/Cl.

Key words: Magnesium oxychloride cement (MOC); Raw material ratio; Solidified gravel soil; Compaction characteristics; Dry density.

(上接第 74 页)

- [7] 黄涛, 乔建江, 张颀年, 等. 氢氧化镁阻燃剂的制备及其应用 [J]. 华东理工大学学报, 2015, 41(1): 60-65.
- [8] Chen Y, Zhou T, Fang H, *et al.* A novel preparation of nanosized hexagonal Mg(OH)₂ as a flame retardant [J]. Particuology, 2016, (24): 177-182.
- [9] 宋雪雪, 李丽娟, 刘志启, 等. 氨气法制备氢氧化镁工艺研究 [J]. 化学工程, 2014, 42(6): 74-78.
- [10] Song X, Li L, Liu Z. Hydrothermal synthesis and characterization of hexagonal Mg(OH)₂ flame retardant with bischofite and NH₃ [J]. Advanced Materials Research, 2014, (936): 919-928.
- [11] 苏明阳, 李珊珊. 双柱沉淀-水热处理法制备高分散氢氧化镁 [J]. 盐业与化工, 2015, 44(2): 23-27.
- [12] 杜高翔, 王柏昆. 利用菱镁矿尾矿制备纳米级片状氢氧化镁 [J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 142-145.

Preparation of Nano and Micron-sized Hexagonal Magnesium Hydroxide

SONG Xue-xue^{1,2}, LI Li-juan^{1,2}, JI Lian-min^{1,2}, LIU Zhi-qi^{1,2}, NIE Feng^{1,2}, ZENG Zhong-min^{1,2},
SONG Fu-gen^{1,2}, SHI Dong^{1,2}, PENG Xiao-wu¹, ZHANG Li-cheng¹, LI Hui-fang¹

- (1. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China;
2. Qinghai Engineering and Technology Research Center of Comprehensive Utilization of Salt Lake Resources, Xining, 810008, China)

Abstract: In this work, magnesium hydroxide with uniform morphology and particle size was synthesized via double injected precipitation-hydrothermal treatment method without any organic additive or catalyst using bischofite and NaOH solution as raw materials, NaCl solution as the substrate. The influence of feed speed, $2N_{Mg}/N_{Na}$, concentrations, hydrothermal temperatures, hydrothermal durations on the particle size, morphology and filtration property of magnesium hydroxide was investigated. The particle size and its distribution, crystal phase and morphology of the product were characterized by laser particle size analyzer, XRD and SEM. The experimental results indicated that the prepared samples are in regular hexagonal plates, having a diameter of 400-600 nm or 1-2 μm, and with even sizes and good dispersibility.

Key words: Hydrothermal modification; Nano-magnesium hydroxide; Hexagonal