

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.202000856



本刊网刊

镁基泡沫混凝土配合比试验

郝贞洪^{1,2,3}, 李洋蕊¹, 秦立达¹, 孙 浩¹, 邬卓轩¹

(1.内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2.内蒙古自治区土木工程结构与力学重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051; 3.内蒙古自治区建筑检测鉴定与安全评估工程技术研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘 要:分别以配制的氯氧镁水泥、硫氧镁水泥、磷酸镁水泥为胶凝材料, 采用化学发泡制备干密度等级为A05的3种镁基泡沫混凝土。通过设计正交试验, 确定水胶比、镁水泥组分分配比、缓凝剂掺量、粉煤灰掺量和聚丙烯纤维掺量对3种镁基泡沫混凝土抗压强度的影响程度, 对比分析影响因素的作用机理, 建立镁基泡沫混凝土比强度与镁水泥组分分配比的函数关系式。研究表明: 氯氧镁泡沫混凝土抗压强度影响因素的主次关系为: 镁水泥组分分配比>水胶比>粉煤灰掺量>聚丙烯纤维掺量>缓凝剂掺量, 各因素对硫氧镁泡沫混凝土抗压强度影响显著性与氯氧镁泡沫混凝土相同, 磷酸镁泡沫混凝土抗压强度影响因素的主次关系为: 镁水泥组分分配比>缓凝剂掺量>水胶比>粉煤灰掺量>聚丙烯纤维掺量, 与氯氧镁泡沫混凝土和硫氧镁泡沫混凝土略有不同, 缓凝剂掺量影响程度较高; 镁水泥的组分分配比是影响镁基泡沫混凝土强度的重要指标, 氯氧镁泡沫混凝土与硫氧镁泡沫混凝土的抗压强度随镁水泥组分分配比增加的变化趋势相同, 均先减小后增大, 而磷酸镁泡沫混凝土随镁水泥组分分配比增加呈现先增大后减小的趋势; 3种镁基泡沫混凝土的比强度与镁水泥组分分配比之间存在幂函数关系。

关键词:镁基泡沫混凝土; 配合比; 正交试验; 抗压强度; 比强度

中图分类号:TU528.43

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2021)06-0072-09

Experiment of the Mixture Ratio of Magnesium-based Foam Concrete

HAO Yunhong^{1,2,3}, LI Yangrui¹, QIN Lida¹, SUN Hao¹, WU Zhuoxuan¹

(1.School of Civil Eng., Inner Mongolia Univ. of Technol., Hohhot 010051, China;

2.The Inner Mongolia Key Lab. of Civil Eng. Structure and Mechanics, Hohhot 010051, China;

3.Eng. Technol. Research Center for Building Inspection, Appraisal and Safety Evaluation, Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010051, China)

Abstract: Three kinds of magnesium-based foamed concrete with dry density grade A05 were prepared by chemical foaming with magnesium oxychloride cement, magnesium oxysulfide cement and magnesium phosphate cement as cementing materials respectively. By designing orthogonal tests, the influences of water/cement ratio, magnesium cement component ratio, retarder content, fly ash content and polypropylene fiber content on the compressive strength of three kinds of magnesia-based foamed concrete were determined, the action mechanisms of the important influencing factors were compared and analyzed, and the functional relationships between the specific strength of magnesium-based foamed concrete and the component ratio parameters of magnesium-based foamed concrete were established. The results showed that the primary and secondary factors affecting the compressive strength of magnesium oxychloride foamed concrete were the ratio of magnesium cement components>water/cement ratio>fly ash content>polypropylene fiber content>retarder content. The influence of various factors on compressive strength of magnesium oxysulfide foam concrete was the same as that of magnesium oxychloride foam concrete. The relationship between the factors influencing the compressive strength of magnesium phosphate foamed concrete was as follows: the ratio of magnesium cement components>retarder

收稿日期:2020-10-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51468049; 11162011); 内蒙古自然科学基金面上项目(2018MS05047); 内蒙古科技计划项目(关键技术攻关项目); 内蒙古草原英才资助项目(107-841025); 内蒙古高校青年科技英才支持计划(NJYT-17-A09)

作者简介:郝贞洪(1977—), 男, 教授, 博士。研究方向: 新型节能建筑结构体系及其装配化。E-mail: 13947133205@163.com

网络出版时间:2021-10-18 17:23:00 网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20211018.0849.002.html

content>water/cement ratio>fly ash content>polypropylene fiber content. Different from magnesium oxychloride foam concrete and magnesium oxysulfide foam concrete, the content of retarder had a higher degree of influence. The component ratio of magnesium cement was an important index affecting the strength of magnesia-based foamed concrete. The compressive strength of magnesium oxychloride foamed concrete and magnesium sulfide foamed concrete had the same change trend with the increase of the component ratio of magnesium cement, both of which first decreased and then increased, while magnesium phosphate foamed concrete showed the trend of first increased and then decreased with the increase of the component ratio of magnesium cement. There was a power function relationship between the specific strength of three kinds of magnesium-based foamed concrete and the component ratio of magnesium-based foamed concrete.

Key words: magnesia-based foamed concrete; mixture ratio; orthogonal test; compressive strength; specific strength

镁基泡沫混凝土是以氧化镁为主要胶凝材料制备的一类新型绿色轻质泡沫混凝土。相比于普通水泥泡沫混凝土, 镁基泡沫混凝土具有轻质、保温、隔热、隔声、防火等特点^[1-3]。水泥是泡沫混凝土的主要胶凝材料, 也是泡沫混凝土的主要强度来源。普通硅酸盐水泥不仅凝结硬化慢, 而且在生产过程释放出的二氧化碳气体占全球二氧化碳排放量的10%^[4], 对环境产生不利影响。来源于菱镁矿石的氧化镁粉是镁水泥的主要成分, 世界范围内约三分之一的菱镁矿资源分布在中国, 而且中国广泛分布的白云石和水氯镁石资源也可以作为生产氧化镁的原材料。镁水泥作为一种潜在可持续发展的绿色胶凝材料, 具有与多种材料界面黏结良好的特点^[5], 可以利用工业废料和再生粉体^[6-7]等材料制备泡沫混凝土。

镁水泥主要包括氯氧镁水泥(magnesium oxychloride cement, MOC)、硫氧镁水泥(magnesium sulfide cement, MSC)、磷酸镁水泥(magnesium phosphate cement, MPC)3种。MOC是由MgO、MgCl₂和H₂O按照一定比例配制而成的气硬性胶凝材料, 具有导热系数低、耐磨性好、水泥碱度低、机械强度高等优点^[8-11]; MSC由MgO·MgSO₄·H₂O三元体系构成, 具有早期强度高、凝结时间短等优点^[12-14]; MPC是以重烧氧化镁、磷酸盐为反应物, 辅加缓凝剂制备而成的新型胶凝材料, 具有快硬、高强、耐火性高等优点^[15-17]。目前, 学者们单独研究MOC、MSC或MPC中一种的水化机理及力学性能较多, 而将3种镁水泥综合分析的研究较少。比强度是材料的强度与其干密度之比, 是衡量材料轻质高强的一项重要指标^[18]。比强度越大, 材料轻质高强性能越好。研究配合比对泡沫混凝土比强度的影响规律, 对泡沫混凝土的应用具有积极的推动作用。

本文利用MOC、MSC、MPC 3种镁水泥分别制备干密度等级为A05的镁基泡沫混凝土, 通过正交设计试验, 确定水胶比、镁水泥组分配比、缓凝剂掺量、粉煤灰掺量和聚丙烯纤维掺量对3种镁基泡沫混凝土抗压强度的影响, 对比分析作用机理, 研究影响程度较大的因素与各镁基泡沫混凝土比强度的非线性回归模型, 为镁基泡沫混凝土的制备提供理论参考。

1 试 验

1.1 试验材料

水泥为配制氯氧镁水泥、配制硫氧镁水泥、配制磷酸镁水泥, 分别以氧化镁和镁盐组成; 轻烧氧化镁、重烧氧化镁由山东合展化工有限公司生产, 氧化镁粉化学组成如表1所示; 六水氯化镁(MgCl₂·6H₂O)、七水硫酸镁(MgSO₄·7H₂O)、磷酸二氢铵(NH₄H₂PO₄), 由廊坊鹏彩精细化工有限公司生产, 有效含量99%; 发泡剂采用天津市大茂化学试剂厂生产的30%浓度过氧化氢(H₂O₂)溶液; 催化剂采用天津市大茂化学试剂厂生产的二氧化锰(MnO₂)试剂, 分析纯; 稳泡剂采用上海臣启化工科技有限公司生产的羟丙基甲基纤维素(HPMC), 20万黏度; 缓凝剂采用实验室自制复合缓凝剂A、B、C; 粉煤灰采用灵寿县永德顺矿业加工厂生产的一级粉煤灰, 化学组成如表2所示; 纤维采用聚丙烯纤维, 由廊坊双森建材有限公司生产, 物理性能指标如表3所示; 拌合水采用普通自来水。

表 1 氧化镁粉化学组成

Tab. 1 Chemical composition of magnesium oxide powder

成分	MgO	NaOH	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	其他
质量分数/%	90.68	3.11	3.73	1.40	0.70	0.30	0.08

表 2 粉煤灰化学组成

Tab. 2 Chemical composition of fly ash

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	其他
质量分数/%	56.71	33.90	1.50	3.44	1.20	1.00	1.10	1.02	0.13

表 3 聚丙烯纤维性能指标

Tab. 3 Performance indexes of polypropylene fiber

密度/ (g·cm ⁻³)	直径/ μm	长度/ mm	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	断裂伸长率/ %
0.91	31	9	460	3.5	30

1.2 正交试验设计

为提高泡沫混凝土在实际工程应用中的强度, 研究发现水胶比、镁水泥组分配比、缓凝剂掺量、粉煤灰掺量和聚丙烯纤维掺量对镁基泡沫混凝土抗压强度影响较大^[19-21], 因此, 分别考察干密度等级为A05的MOC泡沫混凝土、MSC泡沫混凝土与MPC泡

沫混凝土的水胶比、镁水泥组分配比、缓凝剂掺量、粉煤灰掺量和聚丙烯纤维掺量5因素对其抗压强度的影响规律及显著性,各个因素均取4个水平,选用L16(4⁵)的正交表,且不考虑各因素之间的交互作用,分析研究各因素的影响,具体正交试验因素及水平情况如表4、5、6所示。

表 4 MOC泡沫混凝土L16(4⁵)正交试验因素、水平

Tab. 4 Orthogonal test factors and levels of MOC foamed concrete L16 (4⁵)

水平	水胶比	$m(\text{MgO}):$ $m(\text{MgCl}_2)$	缓凝剂A 掺量/%	粉煤灰 掺量/%	聚丙烯纤维 掺量/%
1	0.25	5	0	0	0
2	0.30	7	0.5	10	0.1
3	0.35	9	1.0	20	0.2
4	0.40	11	1.5	30	0.3

表 5 MSC泡沫混凝土L16(4⁵)正交试验因素、水平

Tab. 5 Orthogonal test factors and levels of MSC foam concrete L16(4⁵)

水平	水胶比	$m(\text{MgO}):$ $m(\text{MgSO}_4)$	缓凝剂B 掺量/%	粉煤灰 掺量/%	聚丙烯纤维 掺量/%
1	0.40	14	0	0	0
2	0.45	16	0.5	10	0.1
3	0.50	18	1.0	20	0.2
4	0.55	20	1.5	30	0.3

表 6 MPC泡沫混凝土L16(4⁵)正交试验因素、水平

Tab. 6 Orthogonal test factors and levels of MPC foamed concrete L16(4⁵)

水平	水胶比	$w(\text{MgO}):$ $w(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)$	缓凝剂C 掺量/%	粉煤灰 掺量/%	聚丙烯纤维 掺量/%
1	0.26	6	15	0	0
2	0.30	5	20	10	0.1
3	0.34	4	25	20	0.2
4	0.38	3	30	30	0.3

1.3 试验方法

根据干密度等级A05与正交设计因素水平计算得到3种镁基泡沫混凝土每组配合比^[22],试验步骤如下:将氧化镁粉、粉煤灰、缓凝剂与聚丙烯纤维加入搅拌桶内,使用手动搅拌机干拌180 s;将镁盐和水按照一定比例配成的盐溶液加入干料中,搅拌120 s,制成均匀的水泥料浆;将过氧化氢溶液与二氧化锰试剂加入水泥料浆中,快速搅拌120 s,待搅拌均匀后倒入100 mm×100 mm×100 mm与40 mm×40 mm×40 mm模具中,并将模具置于恒温恒湿箱中静停发泡,刮平表面静置24 h后拆模;拆模后存放在干缩养护室中,养护28 d。试验中涉及的比例均是相对于胶凝材料的质量百分比。

尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的试件用于干

密度与抗压强度的测试,尺寸为40 mm×40 mm×40 mm的试件用于孔隙度的测试。

1.4 性能测试

干密度试验依照中华人民共和国建筑工业行业标准《泡沫混凝土》(JG/T266—2011)进行测定。取一组试件,逐块量取长、宽、高3个方向的长度值,每一方向的长度值应在其两端和中间各测量1次,再在其相对的面上再各测1次,共测6次,测量的平均值作为该方向的长度值,从而计算每块试件的体积*V*。将3块试件放在温度为(60±5)℃干燥箱内,烘干至前后两次相隔4 h的质量差不大于1 g;取出后,试件应放入干燥器内,并在试件冷却至室温后称取试件烘干质量。质量除以体积即可得到干密度,每组试件的干密度为3块试件干密度的平均值。

抗压强度试验依照中华人民共和国建筑工业行业标准《泡沫混凝土》(JG/T266—2011)进行测定。使用600 kN电液伺服万能试验压力机,以1.5 kN/s的加压速度连续均匀地加荷,直至试件破坏,记录最大破坏荷载。每组试件的抗压强度为3块试件抗压强度的平均值。

孔隙度采用上海纽迈牌MesoMR-60S核磁共振仪(NMR)进行测试,仪器恒温32℃,磁体扫描范围0~60 mm,由于核磁共振测试的原理是采集试件内部孔隙水信号^[23],所以将40 mm×40 mm×40 mm的泡沫混凝土试块放入自来水中浸泡48 h后再测试。

取镁基泡沫混凝土试样内部断面,表面经过喷金处理后进行场发射扫描电子显微镜微观形貌分析以及对其微观晶体形貌进行表征。

2 结果与讨论

2.1 正交实验结果

干密度等级A05的3种镁基泡沫混凝土干密度、抗压强度、孔隙度的试验结果如表7所示。

2.2 极差结果分析

镁基泡沫混凝土抗压强度极差分析结果如表8~10所示。

由表8可知:各因素对MOC泡沫混凝土抗压强度影响的主次关系为MgO与MgCl₂摩尔比>水胶比>粉煤灰掺量>聚丙烯纤维掺量>缓凝剂A掺量。MgO与MgCl₂摩尔比对MOC水化产物种类有直接影响,进而影响MOC泡沫混凝土的强度,而且对MOC凝结速度也有影响;此外,MgO与MgCl₂摩尔比对MOC泡沫混凝土的孔结构也有影响,泡沫混凝土强度正是由胶凝材料强度与孔结构两者共同提供。水胶比一方面影响水化产物,对胶凝材料的强度会有直接影响;另一方面,对于水泥浆体流动性有影响,因影响双氧

表 7 3种镁基泡沫混凝土的试验结果

Tab. 7 Test results of three kinds of magnesium-based foamed concrete

组别	MOC 泡沫混凝土			MSC 泡沫混凝土			MPC 泡沫混凝土		
	干密度/(kg·m ⁻³)	抗压强度/MPa	孔隙率/%	干密度/(kg·m ⁻³)	抗压强度/MPa	孔隙率/%	干密度/(kg·m ⁻³)	抗压强度/MPa	孔隙率/%
1	468.67	4.93	70.35	730.00	3.80	58.94	471.00	0.70	73.45
2	424.33	3.30	73.33	574.67	3.76	66.49	732.67	1.83	59.90
3	520.00	2.97	68.46	472.33	1.20	71.03	661.67	1.97	63.05
4	417.00	2.07	73.69	457.67	1.57	74.23	539.33	1.37	71.57
5	422.00	3.77	73.44	428.67	1.80	74.46	726.67	1.03	58.40
6	476.67	2.73	69.23	499.67	1.63	71.27	641.33	0.87	64.15
7	436.00	2.30	73.42	448.67	1.87	73.34	642.67	1.67	65.56
8	536.33	3.77	65.04	429.00	2.27	75.14	555.33	1.43	70.02
9	407.00	2.50	74.77	398.33	2.03	78.16	728.67	0.90	61.00
10	434.67	3.27	73.85	455.33	2.10	73.27	691.67	1.03	63.20
11	434.67	2.43	73.03	431.00	1.30	74.44	636.33	1.47	66.13
12	542.33	2.83	67.13	525.00	1.80	69.34	584.67	1.17	68.46
13	433.33	3.03	73.61	429.00	2.07	74.28	796.67	1.07	57.26
14	434.50	2.70	72.30	477.67	1.59	72.07	657.33	1.20	63.80
15	425.00	1.67	74.95	415.67	0.84	76.69	677.00	1.17	62.66
16	503.33	2.00	68.26	447.00	1.87	72.94	591.33	0.77	67.30

表 8 MOC泡沫混凝土抗压强度结果极差分析

Tab. 8 Range analysis of compressive strength results of MOC foamed concrete

K	水胶比(A)	$\frac{m(\text{MgO})}{m(\text{MgCl}_2)}$ (B)	缓凝剂A 掺量(C)	粉煤灰 掺量(D)	聚丙烯纤维 掺量(E)
K ₁	3.32	3.56	3.23	3.19	3.41
K ₂	3.14	3.00	2.89	3.13	2.53
K ₃	2.76	2.34	2.98	3.00	2.89
K ₄	2.35	2.67	2.46	2.24	2.74
R	0.97	1.22	0.77	0.95	0.88

表 9 MSC泡沫混凝土抗压强度结果极差分析

Tab. 9 Differential analysis of the compressive strength of MSC foamed concrete

K	水胶比(A)	$\frac{m(\text{MgO})}{m(\text{MgSO}_4)}$ (B)	缓凝剂B 掺量(C)	粉煤灰 掺量(D)	聚丙烯纤维 掺量(E)
K ₁	2.58	2.43	2.35	2.27	2.25
K ₂	1.89	2.27	2.05	2.35	2.38
K ₃	1.81	1.30	1.77	1.74	1.68
K ₄	1.59	1.88	1.70	1.52	1.57
R	0.99	1.12	0.65	0.83	0.82

水发泡速率而影响孔结构。适量的粉煤灰具有“火山灰效应”,在镁水泥的水化产物条件下,其活性成分SiO₂与Al₂O₃反应生成大量水化硅酸镁凝胶,填充了泡沫混凝土孔壁上的孔隙,使孔壁也更加密实;同时,粉煤灰颗粒与水泥颗粒组成良好的微级配,提高了料浆的流动性,使气孔孔径分布比较均匀。单一掺入固定长径比的聚丙烯纤维,并不能大幅提高MOC泡

表 10 MPC泡沫混凝土抗压强度结果极差分析

Tab. 10 Range analysis of compressive strength results of MPC foamed concrete

K	水胶比(A)	$\frac{w(\text{MgO})}{w(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)}$ (B)	缓凝剂C 掺量(C)	粉煤灰 掺量(D)	聚丙烯纤维 掺量(E)
K ₁	1.47	0.93	0.84	1.19	1.08
K ₂	1.25	1.23	1.30	1.45	1.29
K ₃	1.14	1.57	1.38	1.20	1.27
K ₄	1.05	1.19	1.40	1.08	1.27
R	0.42	0.65	0.55	0.37	0.21

沫混凝土的强度。相比水胶比、MgO与MgCl₂的摩尔比、粉煤灰掺量与聚丙烯纤维掺量,缓凝剂掺量仅影响MOC泡沫混凝土凝结时间,并且缓凝剂掺量较小,其掺量变化对MOC泡沫混凝土抗压强度影响微小。

由表9可知:各因素对MSC泡沫混凝土抗压强度影响的主次关系与MOC泡沫混凝土相同,即为MgO与MgSO₄摩尔比>水胶比>粉煤灰掺量>聚丙烯纤维掺量>缓凝剂B掺量。其原因主要是MOC泡沫混凝土与MSC泡沫混凝土性能相似。

由表10可知:各因素对MPC泡沫混凝土抗压强度影响的主次关系为MgO与NH₄H₂PO₄质量比>缓凝剂C掺量>水胶比>粉煤灰掺量>聚丙烯纤维掺量。由于MPC凝结速度相比MOC与MSC迅速很多,加入缓凝剂必不可少,缓凝剂对MPC水化过程影响较大。

2.3 因素分析

2.3.1 MOC泡沫混凝土

MgO与MgCl₂摩尔比对MOC泡沫混凝土抗压强

度的影响最大,如图1所示。由图1可以看出:当MgO与MgCl₂摩尔比小于9时,泡沫混凝土的抗压强度都随MgO与MgCl₂摩尔比增大而减小;当MgO与MgCl₂摩尔比为5时,抗压强度达到最大值3.56 MPa;当MgO与MgCl₂摩尔比由9增加到11时,抗压强度上升14%。原因为摩尔比影响反应的最终产物,由理论配比可知,在室温环境下,MOC水化反应主要生成3Mg(OH)₂·MgCl₂·8H₂O(3.1.8相)和5Mg(OH)₂·MgCl₂·8H₂O(5.1.8相)。当MgO与MgCl₂摩尔比小于3时,先生成5.1.8相,之后向3相转化;当MgO与MgCl₂摩尔比在4~6时,主要为5.1.8相;当MgO与MgCl₂摩尔比大于6时,生成5.1.8相和Mg(OH)₂^[1]。一般5.1.8相为针杆状,由于受到不同反应空间等外界因素的影响,有时也会出现颗粒状或纤维状束,这些颗粒状或纤维束相互交叉分布、重叠,形成毡状多相多孔网络结构,其强度较高,如图2所示。随着MgO与MgCl₂摩尔比的提高,MOC胶凝材料中剩余MgO和Mg(OH)₂的含量会增大,使结构疏松,抗压强度降低^[24]。

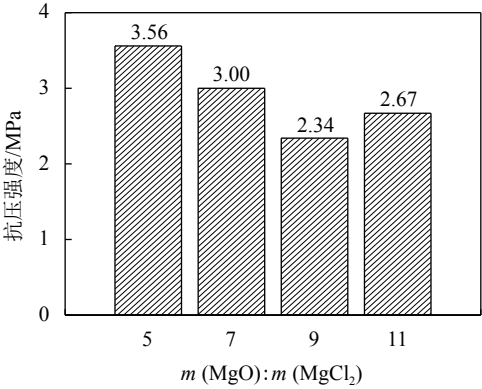


图 1 MgO与MgCl₂摩尔比对抗压强度的影响

Fig. 1 Influence of the molar ratios between MgO and MgCl₂ on compressive strength

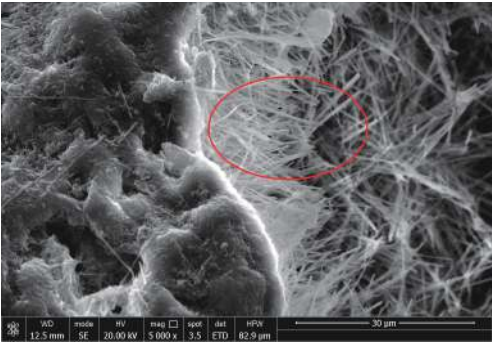


图 2 MOC泡沫混凝土水化产物微观形貌

Fig. 2 Microstructure of MOC foam concrete hydration products

2.3.2 MSC泡沫混凝土

由极差R可知,MgO与MgSO₄摩尔比对MSC泡沫混凝土抗压强度的影响最大,如图3所示。由图3可以

看出:随着MgO与MgSO₄摩尔比的增加,抗压强度先减小再增大;当MgO与MgSO₄摩尔比为18时,抗压强度达到最小值;当MgO与MgSO₄摩尔比为14时,抗压强度为2.43 MPa,MgO与MgSO₄摩尔比的最优值应小于等于14。这主要由于MgO与MgSO₄摩尔比大于14后,反应产物存在大量MgO和Mg(OH)₂。一方面,会由于密度不同而产生应力集中,从而导致材料内部产生微观裂缝;另一方面,由于水化反应产生5Mg(OH)₂·MgSO₂·7H₂O(5.1.7相),其为针棒状晶体,且相互交织成网状结构,使泡沫混凝土趋向于更稳定的状态^[25]。当MgO与MgSO₄摩尔比大于14后,大量生成Mg(OH)₂,5.1.7相减少,导致强度降低,如图4所示。

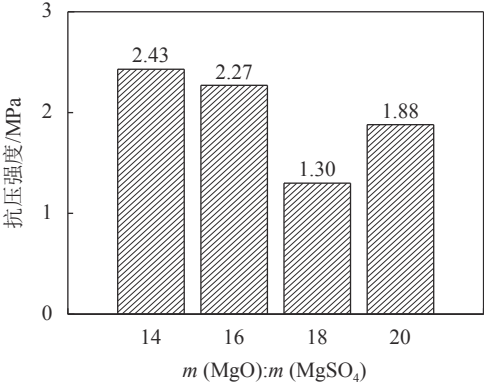


图 3 MgO与MgSO₄摩尔比对抗压强度的影响

Fig. 3 Influence of molar ratios between MgO and MgSO₄ on compressive strength

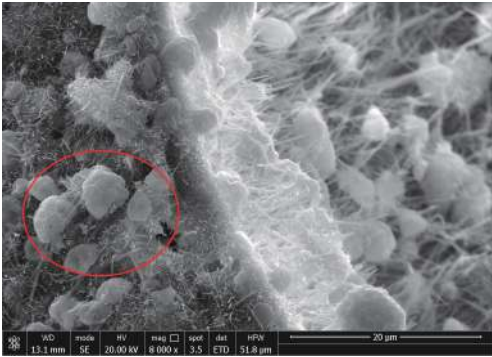


图 4 MSC泡沫混凝土水化产物微观形貌

Fig. 4 Microstructure of MSC foam concrete hydration products

2.3.3 MPC泡沫混凝土

由极差R可知,MgO与NH₄H₂PO₄质量比对MPC泡沫混凝土抗压强度的影响最大,如图5所示。由图5可以看出:随着MgO与NH₄H₂PO₄质量比的增加,抗压强度先增大后减小;当MgO与NH₄H₂PO₄质量比为4时,抗压强度达到最大值为1.57 MPa。其原因为当MgO与NH₄H₂PO₄质量比较大时,MgO相对过剩,不能生成足够的水化产物将大量未反应的MgO颗粒粘接在一起,晶体结构的交错搭接程度下降,MPC基体

变得松散, 如图6所示, 并且由于过量剩余MgO的阻隔和H⁺的减少导致水化反应速率快速下降, 因此强度较低; MgO与NH₄H₂PO₄质量比为4时, 水化反应速率逐渐上升, 水化产物与MgO颗粒之间产生了一种比较好的比例关系, MPC基体结构变得密实牢固, 强度达到最大值; 进一步减小MgO与NH₄H₂PO₄质量比, 水化体系中MgO的量相对较少, MgO与H⁺的接触机会减少, 水化反应速率减小, 并且NH₄H₂PO₄相对过剩, 水化产物减少, MPC基体产生裂缝, 强度降低^[26]。

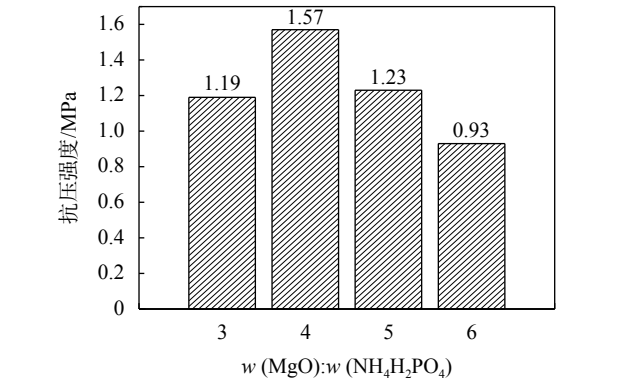


图 5 MgO与NH₄H₂PO₄质量比对抗压强度的影响
Fig. 5 Influence of mass ratios of MgO and NH₄H₂PO₄ on compressive strength

镁水泥组分配比是影响镁基泡沫混凝土抗压强度的重要指标, MOC泡沫混凝土抗压强度随MgO与MgCl₂摩尔比的增加, 先减小后增大, MgO与MgCl₂摩尔比为5时较大; MSC泡沫混凝土抗压强度随MgO与MgSO₄摩尔比的增加, 先减小后增大, MgO与MgSO₄摩尔比为14时抗压强度较大; MPC泡沫混凝土抗压强度随MgO与NH₄H₂PO₄质量比的增加, 先增



图 6 MPC泡沫混凝土水化产物微观形貌
Fig. 6 Microstructure of MPC foam concrete hydration products

大后减小, MgO与NH₄H₂PO₄质量比为4时较大。由于镁水泥组分不同导致水化反应不同, 水化产物决定镁基泡沫混凝土的抗压强度, 故3种镁基泡沫混凝土抗压强度随镁水泥组分配比的变化趋势不同。

2.4 比强度的非线性回归模型

干密度等级为A05的3种镁基泡沫混凝土镁水泥组分配比对应的比强度与孔隙度如表11所示。利用Origin数据处理软件, 对比强度的试验数据做散点图, 并利用增加趋势线的方法对其进行拟合。泡沫混凝土是由小体积的物料与大体积的气孔构成的, 其强度是两者共同作用的结果^[27]。在制备镁基泡沫混凝土过程中, 当双氧水添加量一定, 镁水泥组分配比变化时, 不仅镁水泥强度发生变化, 而且试件内气孔结构会因双氧水发泡时间与胶凝材料凝结时间的契合度而变化, 孔隙度增大, 气孔占据的体积就越多, 试件干密度就越小。因此, 镁水泥组分配比参数与比强度的关系可以从胶凝材料强度与气孔参数两方面加以分析。

表 11 3种镁基泡沫混凝土的比强度与孔隙度

Tab. 11 Specific strength and porosity of three different magnesium-based foamed concrete									
组别	MOC 泡沫混凝土			MSC 泡沫混凝土			MPC 泡沫混凝土		
	$m(\text{MgO}):m(\text{MgCl}_2)$	比强度/ (N·m·kg ⁻¹)	孔隙率/%	$m(\text{MgO}):m(\text{MgSO}_4)$	比强度/ (N·m·kg ⁻¹)	孔隙率/%	$w(\text{MgO}):w(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)$	比强度/ (N·m·kg ⁻¹)	孔隙率/%
1	5	8 146.85	73.04	14	4 831.49	71.46	6	1 370.46	62.53
2	7	6 810.14	72.18	16	4 436.43	70.77	5	1 792.25	62.76
3	9	5 125.02	72.47	18	2 936.39	73.88	4	2 403.55	64.35
4	11	5 297.78	68.53	20	4 083.45	72.91	3	2 104.63	69.34

MOC泡沫混凝土的拟合结果如图7所示, 其相关系数R²为0.997, 拟合程度良好。由图7可知: MOC泡沫混凝土比强度随MgO与MgCl₂摩尔比先减小后增大, 此趋势与MOC泡沫混凝土抗压强度随MgO与MgCl₂摩尔比变化趋势吻合; MgO与MgCl₂摩尔比为5时, 比强度取最大值。当MgO与MgCl₂摩尔比为5时, 一方面, MOC抗压强度较高; 另一方面, 由表11可知, 此时孔隙度较大, 并且过氧化氢溶液发泡时间与MOC凝

时间相匹配, 孔径均匀、分布状态较好, 如图8所示。
MSC泡沫混凝土的拟合结果如图9所示, 其相关系数R²为0.997, 拟合程度良好。由图9可知: MSC泡沫混凝土比强度随MgO与MgSO₄摩尔比的增加先稍微增大, 然后快速大幅减小; 当MgO与MgSO₄摩尔比为14.5左右时, 比强度达到最大值。由表11可知: MgO与MgSO₄摩尔比由14增加到16时, 孔隙度有所减小, 但由于此时试件孔径小且均匀, 连通孔少, 如图10

所示,再加上MgO与MgSO₄摩尔比为14时, MSC抗压强度较大,因此比强度较高。

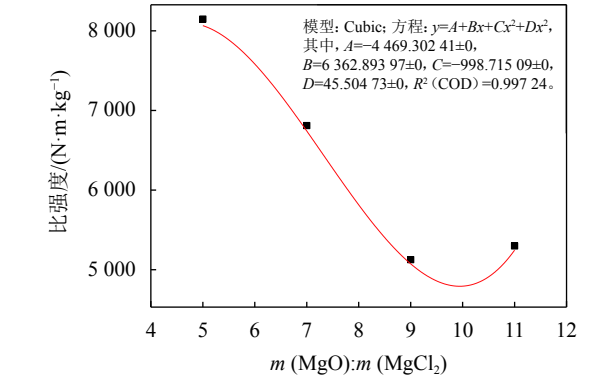


图 7 MOC泡沫混凝土MgO与MgCl₂摩尔比和比强度的拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of MgO and MgCl₂ molar ratio and specific strength of MOC foamed concrete

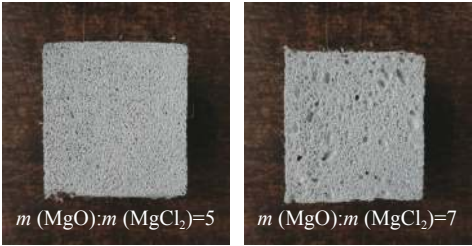


图 8 MOC泡沫混凝土试件

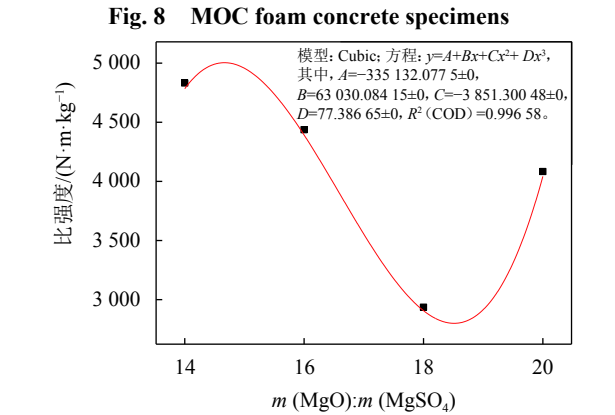


图 9 MSC泡沫混凝土MgO与MgSO₄摩尔比和比强度的拟合曲线

Fig. 9 Fitting curve of MgO and MgSO₄ molar ratio and specific strength of MSC foamed concrete

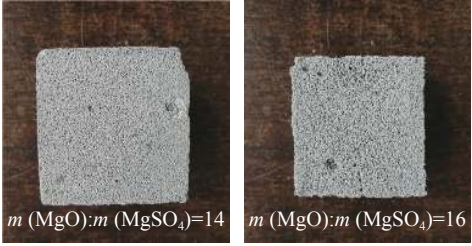


图 10 MSC泡沫混凝土试件

Fig. 10 MSC foam concrete specimens

MPC泡沫混凝土的拟合结果如图11所示,其相关系数 R^2 为0.997,拟合程度良好。由图11可知: MPC泡沫混凝土比强度随MgO与NH₄H₂PO₄质量比的增加,先增加再显著降低;当MgO与NH₄H₂PO₄质量比在4左右时,比强度取得最大值。一方面, MPC抗压强度随MgO与NH₄H₂PO₄质量比由3增加到4而增大;另一方面,由表11可知,随MgO与NH₄H₂PO₄质量比由3增加到4,孔隙度仅减小7%,因此比强度随MgO与NH₄H₂PO₄质量比由3增加到4而增大。

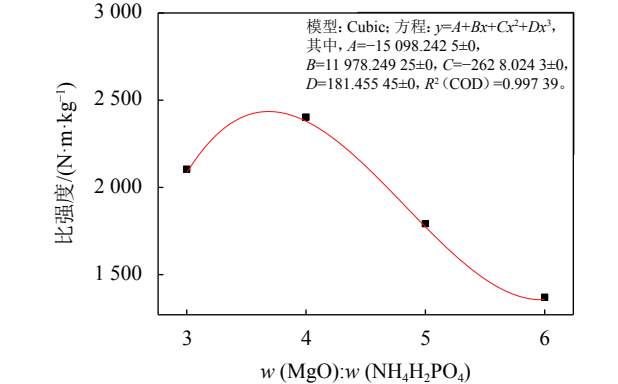


图 11 MPC泡沫混凝土MgO与NH₄H₂PO₄质量比和比强度的拟合曲线

Fig. 11 Fitting curve of MgO and NH₄H₂PO₄ mass ratio and specific strength of MPC foamed concrete

3种镁基泡沫混凝土的镁水泥组分配比参数和比强度的关系式均符合幂函数关系(式(1)),说明二者之间存在明显的相关性,该关系式可为镁基泡沫混凝土的制备提供参考依据。

$$y=A+Bx+Cx^2+Dx^3 \quad (1)$$

式中, y 为镁基泡沫混凝土的比强度, x 为镁基泡沫混凝土的镁水泥组分配比参数, A 、 B 、 C 、 D 为参数。

3 结 论

1)MOC泡沫混凝土抗压强度影响因素依次为: 镁水泥组分配比>水胶比>粉煤灰掺量>聚丙烯纤维掺量>缓凝剂掺量;各因素对MSC泡沫混凝土抗压强度影响显著性与MOC泡沫混凝土相同; MPC泡沫混凝土抗压强度影响因素主次关系为镁水泥组分配比>缓凝剂掺量>水胶比>粉煤灰掺量>聚丙烯纤维掺量,与MOC泡沫混凝土和MSC泡沫混凝土略有不同,缓凝剂掺量影响程度较高。

2)MOC泡沫混凝土与MSC泡沫混凝土的抗压强度随镁水泥组分配比增加的变化趋势相同,均先减小后增大。MgO与MgCl₂摩尔比为5时, MOC泡沫混凝土抗压强度较大; MgO与MgSO₄摩尔比为14时, MSC泡沫混凝土抗压强度较大; MPC泡沫混凝土随镁水泥组分配比增加,呈现先增大后减小的趋势,

MgO与 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 质量比为4时抗压强度较大。镁水泥组分配比决定镁基泡沫混凝土水化产物的种类、微观结构与数量,为影响镁基泡沫混凝土强度的重要指标,与胶凝材料为泡沫混凝土的主要强度来源相符。

3)3种镁基泡沫混凝土的镁水泥组分配比和比强度之间存在幂函数关系,镁水泥抗压强度与孔隙率均对泡沫混凝土比强度影响较大,需综合考虑。

参考文献:

- [1] Zhang Cuimiao, Yang Hongjian, Ma Xuejing. Research progress of magnesium oxychloride cement[J]. China Silicate Bulletin, 2014, 33(1): 117–121. [张翠苗, 杨红健, 马学景. 氯氧镁水泥的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(1): 117–121.]
- [2] He Z H, Yang H, Song H, et al. Effect of mixing on properties and microstructure of magnesium oxychloride cement[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 3(1): 38–45.
- [3] Li Zhenguo. Effect of admixtures on the microstructure and properties of magnesium sulfide cement[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017. [李振国. 外掺料对硫氧镁水泥组织及性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.]
- [4] Gartner E. Industrially interesting approaches to “low- CO_2 ” cements[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(9): 1489–1498.
- [5] Wang Yichao, Yu Jiangtao, Wei Linzhuo, et al. Water resistance of super-ductile magnesium oxychloride cement matrix composites[J]. Materials Bulletin, 2019, 33(16): 2665–2670. [王义超, 余江滔, 魏琳卓, 等. 超高韧性氯氧镁水泥基复合材料的耐水性能[J]. 材料导报, 2019, 33(16): 2665–2670.]
- [6] Xiao Jianzhuang, Zhang Hanghua, Tang Chenjun, et al. Low strength recycled concrete and its application[J]. Journal of Building Science and Engineering, 2020, 37(2): 20–26. [肖建庄, 张航华, 唐晨隽, 等. 低强再生混凝土及其应用[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(2): 20–26.]
- [7] Xiao Jianzhuang, Ma Zhiming, Sui Tongbo, et al. Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 188: 720–731.
- [8] Bilinski H. The formation of magnesium oxychloride phases in the systems $\text{MgO-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ and $\text{NaOH-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2010, 67(3): 266–269.
- [9] Wang Fugen, Xu Xuedong, Zhou Baomu, et al. Study on preparation of straw-magnesium oxychloride cement composite[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(1): 135–141. [王付根, 徐学东, 周宝木, 等. 秸秆-氯氧镁水泥复合材料制备研究[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(1): 135–141.]
- [10] Wen Jing, Yu Hongfa, Wu Chengyou, et al. Influencing factors and hydration kinetics of magnesium oxychloride cement hydration process[J]. Acta Silicate, 2013, 41(5): 588–596. [文静, 余红发, 吴成友, 等. 氯氧镁水泥水化历程的影响因素及水化动力学[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(5): 588–596.]
- [11] Wang Meijuan, Yu Hongfa, Li Ying, et al. Influence of the ratio of active MgO to raw material amount on the deformability of magnesium oxychloride cement[J]. China Silicate Bulletin, 2011, 30(3): 629–633. [王梅娟, 余红发, 李颖, 等. 活性MgO与原料物质的量比对氯氧镁水泥变形性的影响[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(3): 629–633.]
- [12] Chen Cong, Wu Chengyou, Zhang Huifang, et al. Preparation and properties of new foamed concrete based on basic magnesium sulfate cement[J]. Chinese Journal of Silicate, 2012, 37(3): 1022–1027. [陈聪, 吴成友, 张慧芳, 等. 基于碱式硫酸镁水泥的新型泡沫混凝土的制备及性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2012, 37(3): 1022–1027.]
- [13] Li Dongdong, Gao Dandan, Dong Yaping, et al. Modeling of phase relations and thermodynamics in the $\text{Mg}(\text{OH})_2\text{-MgSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ system with implications on magnesium hydroxide sulfate cement[J]. Calphad, 2019, 67: 101675.
- [14] Ba Mingfang, Zhu Jiezhao, Xue Tao, et al. Effects of raw material mole ratio on properties of magnesium thioxide gelling materials[J]. Journal of Construction Materials, 2012, 21(1): 124–130. [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, 2012, 21(1): 124–130.]
- [15] Mathieu Le Rouzic, Thierry Chaussadent, Gérard Platret, et al. Mechanisms of k-struvite formation in magnesium phosphate cements[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 91: 117–122.
- [16] Gemma Mestres, Maria-Pau Ginebra. Novel magnesium phosphate cements with high early strength and antibacterial properties[J]. Acta Biomaterialia, 2011, 7(4): 1853–1861.
- [17] Gao Ming, Liu Ning, Chen Bing. Experimental study on modified magnesium phosphate cement mortar with micro-silicon powder[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1): 29–34. [高明, 刘宁, 陈兵. 微硅粉改性磷酸镁水泥砂浆试验研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1): 29–34.]
- [18] Wang Fan. Optimization design of mix ratio of high strength and high performance concrete based on specific strength[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014. [王帆. 基于比强度的高强高性能混凝土配合比优化设计[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.]
- [19] Zheng Weixin. Basic research on design and application of magnesium oxychloride cement foam concrete[D]. Xining: University of Chinese Academy of Sciences(Qinghai Salt Lake Research Institute, Chinese Academy of Sciences), 2019. [郑卫新. 氯氧镁水泥泡沫混凝土设计与应用基础研

- 究[D].西宁:中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所),2019.]
- [20] Li Tian.Study on key influencing factors and preparation of high performance foamed concrete[D].Chongqing:Chongqing University,2018.[李天.高性能泡沫混凝土关键影响因素与制备的研究[D].重庆:重庆大学,2018.]
- [21] Li Meng,Huang Yinsheng,Zhang Shaobo,et al.Research progress and prospect of foam concrete[J].Material Report,2016,30(Supp1):402–405.[李猛,黄寅生,张少波,等.泡沫混凝土的研究进展及展望[J].材料导报,2016,30(增刊1):402–405.]
- [22] 张巨松,王才智,黄灵玺,等.泡沫混凝土[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2016:75–79.
- [23] Coates G,肖立志,Prammer M.核磁共振测井原理与应用[M].孟繁莹,译.北京:石油工业出版社,2007.
- [24] Li Ying,Yu Hongfa,Dong Jinmei,et al.Research progress on hydration products,phase transition law and water-resistance evaluation method of magnesium oxychloride cement[J].*Acta Silicate Sinica*,2013,41(11):1465–1473.[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.]
- [25] Wu Chengyou.Basic theory of basic magnesium sulfate cement and its application in civil engineering[D].Xining:Graduate University of Chinese Academy of Sciences(Qinghai Salt Lake Research Institute),2014.[吴成友.碱式硫酸镁水泥的基本理论及其在土木工程中的应用技术研究[D].西宁:中国科学院研究生院(青海盐湖研究所),2014.]
- [26] Zhang Qizhi.Research status of hydration mechanism of magnesium phosphate cement[J].*New Building Materials*,2008,45(11):63–66.[张启志.磷酸镁水泥水化机理的研究现状[J].*新型建筑材料*,2008,45(11):63–66.]
- [27] Fang Yonghao,Wang Rui,Pang Erbo,et al.Relationship between compressive strength and stomatal structure of cement-fly ash foam-concrete[J].*Acta Silicate Sinica*,2010,38(4):621–626.[方永浩,王锐,庞二波,等.水泥-粉煤灰泡沫混凝土抗压强度与气孔结构的关系[J].*硅酸盐学报*,2010,38(4):621–626.]

(编辑 张凌之)

引用格式:Hao Yunhong,Li Yangrui,Qin Lida,et al.Experiment of the mixture ratio of magnesium-based foam concrete[J].*Advanced Engineering Sciences*,2021,53(6):72–80.[郝贻洪,李洋蕊,秦立达,等.镁基泡沫混凝土配合比试验[J].*工程科学与技术*,2021,53(6):72–80.]