

文章编号:1007-9629(2023)03-0221-07

矿物掺合料对含硼碱式硫酸镁水泥强度的影响

张晓媛¹, 吴成友^{1,2,*}, 张勇¹, 陈宏度¹

(1. 青海大学土木工程学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海大学青海省建筑节能材料与
工程安全重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘要:将 $Mg(OH)_2$ 作为煅烧 MgO 的前驱体, 同时以在 MgO 中掺入 H_3BO_3 的方式引入杂质硼, 采用水化热、X 射线衍射仪 (XRD)、扫描电镜 (SEM) 和压汞仪 (MIP) 等测试技术, 研究矿物掺合料对含 H_3BO_3 的碱式硫酸镁水泥 (BMSC) 凝结硬化过程的影响机理. 结果表明: 未掺加矿物掺合料时, 含 H_3BO_3 的 BMSC 水化放热速率较控制组慢、凝结硬化时间延长, 且对 BMSC 的早期强度影响较大; 掺加矿物掺合料后, 含 H_3BO_3 的 BMSC 后期强度提高, 其中外掺 H_3BO_3 的 BMSC 强度提高更加显著, 且进一步延缓了水化放热速率; 掺加矿物掺合料后, 含 H_3BO_3 的 BMSC 水化结晶相未发生改变, 仍为 $5 \cdot 1 \cdot 7$ 相和 $Mg(OH)_2$, 孔隙率较低, 原因是矿物掺合料发挥了微集料效应, 填充了 BMSC 内部孔隙, 使得内部结构更加致密.

关键词: 碱式硫酸镁水泥; 硼酸; 矿物掺合料; 抗压强度

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.03.001

Influence of Mineral Admixtures on Strength of Boron-Containing Basic Magnesium Sulfate Cement

ZHANG Xiaoyuan¹, WU Chengyou^{1,2,*}, ZHANG Yong¹, CHEN Hongdu¹

(1. School of Civil Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Building Energy-Saving Materials and Engineering Safety, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: Using $Mg(OH)_2$ as the precursor of calcined MgO , the impurity boron was introduced into MgO in the form of H_3BO_3 . The heat of hydration, X-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscope (SEM) and mercury intrusion porosimeter (MIP) were used to study and analyze the effect of adding mineral admixtures with the presence of H_3BO_3 on the setting and hardening process of basic magnesium sulfate cement (BMSC). The results show that without adding the mineral admixture the early strength is lower, the coagulation hardening time is longer, and hydration heat release rate of BMSC containing H_3BO_3 is lowered. Whereas with the addition of mineral admixture the late strength of BMSC containing H_3BO_3 increases significantly, and the exothermic rate of the BMSC that contained H_3BO_3 is further lowered. After the addition of mineral admixture, the hydrated crystalline phase of BMSC containing H_3BO_3 remains primarily to be the $5 \cdot 1 \cdot 7$ phase and $Mg(OH)_2$, and the porosity is low because of the mineral admixture has a microaggregate effect, filling the internal pores of BMSC and increasing the density of the internal structure.

Key words: basic magnesium sulfate cement (BMSC); boric acid; mineral admixture; compressive strength

碱式硫酸镁水泥 (BMSC) 是继磷酸镁水泥 (MPC)、氯氧镁水泥 (MOC) 之后发展起来的一种新

收稿日期: 2022-01-19; 修订日期: 2022-06-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52002202); 中国科学院西部之光项目; 青海省重点研发项目 (2023-GX-105)

第一作者: 张晓媛 (1997—), 女, 青海海东人, 青海大学硕士生. E-mail: 3216977690@qq.com

通讯作者: 吴成友 (1986—), 男, 山东临沂人, 青海大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: wuchengyou86@163.com

型镁质胶凝材料^[1]. 基于早期强度高、轻质、加工装饰性能较好, BMSC 广泛用于各种墙体防火板材和装饰板材的生产中^[2-3]. BMSC 是由活性 MgO 与一定浓度的 $MgSO_4$ 溶液组成的 $MgO-MgSO_4-H_2O$ 三元胶凝体系, 其强度相为 $5Mg(OH)_2 \cdot MgSO_4 \cdot 7H_2O(5 \cdot 1 \cdot 7)$ 相^[4]. BMSC 与 MOC 相比有如下优点: (1) BMSC 对高温不敏感, 适用于需要抗高温的预制构件; (2) BMSC 中不含氯离子, 对钢筋的锈蚀程度较低; (3) BMSC 抗水性能好; (4) BMSC 不易吸潮反卤, 有望在钢筋混凝土材料中得到应用^[5]. 目前行业内生产 BMSC 所用的活性 MgO 主要来自煅烧菱镁矿, 但中国 90% 的菱镁矿集中在山东省和辽宁省^[6], 导致西部地区生产 BMSC 具有高额运输成本, 因而限制了 BMSC 在中国西部地区的大规模生产和应用. 中国西部盐湖钾锂产业可副产大量镁资源, 主要以 MgO 或者硫酸镁盐形式存在. 例如实际生产 1 t 钾肥, 可副产 8~10 t 水氯镁石^[6]. 通过卤水-石灰乳法^[7]或卤水-白云石法^[8]可将盐湖中的镁盐制备成 $Mg(OH)_2$, 进一步煅烧 $Mg(OH)_2$, 即可得到活性 MgO. 盐湖中的共存杂质元素(例如硼)等均可改变 MgO 的结晶特征, 进而影响 BMSC 的水化过程、水化产物及微观结构. 为此, 王倩等^[9]通过在不同活性 MgO 中掺入硅灰来制备胶凝材料, 发现随着养护时间的延长, 水化 $MgSO_4$ 的含量逐渐增加且硅酸盐聚合结构增加; 任强等^[10]通过研究矿物掺合料对 MPC 基修补砂浆强度的影响, 发现矿物掺合料的火山灰活性是改善 MPC 强度的重要因素.

鉴于此, 本文将粉煤灰和硅灰添加到含 H_3BO_3 的 BMSC 中, 来研究 BMSC 的水化规律, 并分析其水化机理, 以期开发基于盐湖镁资源的 BMSC 提供理论基础和技术支撑.

1 试验

1.1 原材料

氢氧化镁 ($Mg(OH)_2$), 分析纯, 购自阿拉丁化学试剂有限公司; 七水硫酸镁 ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$), 购自天津致远化学试剂有限公司; 外加剂 (CA), 分析纯柠檬酸钠 ($Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$), 购自天津致远化学试剂有限公司; 硼酸 (B, H_3BO_3), 分析纯, 购自国药集团化学试剂有限公司; 矿物掺合料为粉煤灰 (FA) 和硅灰 (SF), 其中粉煤灰购自中国辽宁发电厂, 硅灰购自青海海东加密硅灰厂, 两者的化学组成(质量分数, 文中的组成、含量等除特别注明外均为质量分数)见表 1、2.

1.2 活性 MgO 的制备与表征

在 $800^\circ C$ 下煅烧未含和含 5% H_3BO_3 的 $Mg(OH)_2$, 以获得不同活性 MgO (分别标记为 T8A 和 T8B). 图

表 1 粉煤灰的化学组成

Table 1 Chemical composition of fly ash

w/%									
SiO ₂	SO ₃	CaO	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	IL	
37.23	2.03	13.10	0.42	3.88	0.69	2.79	32.87	6.99	

表 2 硅灰的化学组成

Table 2 Chemical composition of silica fume

w/%							
SiO ₂	MgO	H ₂ O	Fe ₂ O ₃	C	CaO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O
89.42	0.89	0.67	0.49	5.10	0.60	0.30	0.40

1 为 2 种活性 MgO 的 XRD 图谱. 由图 1 可见: T8B 中活性 MgO 含量为 94.9%, 其中还有 5.1% 的 $Mg_3B_2O_6$; T8A 中活性 MgO 含量为 100%. 这说明高温煅烧过程中 $Mg(OH)_2$ 与 H_3BO_3 发生反应生成了 $Mg_3B_2O_6$.

表 3 为 2 种活性 MgO 的 BET 比表面积、晶粒尺寸及颗粒尺寸. 由表 3 可知, 相较 T8A, T8B 的 BET 比表面积较大, 晶粒尺寸较小.

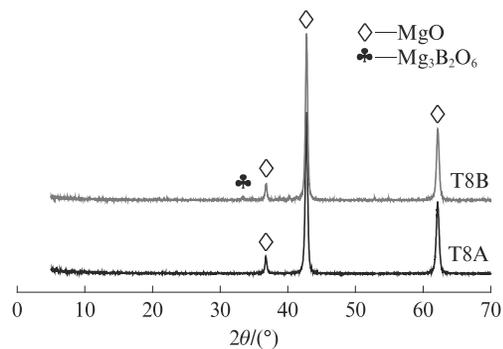


图 1 2 种活性 MgO 的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of two kinds of active MgO

表 3 2 种活性 MgO 的 BET 比表面积、晶粒尺寸及颗粒尺寸

Table 3 BET specific surface area, crystallite dimension and particle size of two kinds of active MgO

Sample	Crystallite dimension/nm	BET specific surface area / (m ² ·g ⁻¹)	Average particle size/μm
T8A	22.1	38.17	3.45
T8B	17.1	77.34	3.32

1.3 试件制备

本试验设置 $m(MgO):m(MgSO_4 \cdot 7H_2O):m(H_2O) = 8:1:20$, $Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$ 掺量为 0.5% (以 MgO 质量计). 表 4 为 BMSC 试件的配合比. 按表 4 制备 BMSC 试件, 先浇筑在 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的钢模中, 再在 $(20 \pm 3)^\circ C$ 、相对湿度为 $(50 \pm 5)\%$ 环境下养护 24 h, 拆模后养护至规定龄期. 为比较 H_3BO_3 的存在方式对 BMSC 产生的影响, 本研究除采用含共烧 H_3BO_3 的 MgO 制备的 BMSC 试件 (T8IA5 组) 外, 还制备了含游离态 H_3BO_3 (外掺 H_3BO_3) 的 BMSC 试件 (T8OA5 组).

表4 BMSC试件的配合比
Table 4 Mix proportions of BMSC specimens

Specimen No.	MgO	MgSO ₄ ·7H ₂ O solution	CA	B	FA	SF
T8A0	1 000	1 439	5	0	0	0
T8IA5	1 000	1 385	5	0	0	0
T8OA5	1 000	1 439	5	50	0	0
T8A0-20%FA	1 000	1 439	5	0	200	0
T8IA5-20%FA	1 000	1 385	5	0	200	0
T8OA5-20%FA	1 000	1 439	5	50	200	0
T8A0-10%SF	1 000	1 439	5	0	0	100
T8IA5-10%SF	1 000	1 385	5	0	0	100
T8OA5-10%SF	1 000	1 439	5	50	0	100

1.4 测试分析与表征

采用全自动压汞仪(MIP,型号 Auto PoreIV 9500)测定BMSC的孔隙分布;采用扫描电子显微镜(SEM,型号 JSM-6610LV)观察BMSC的微观形貌;采用X射线衍射仪(XRD,型号 D/max-2500PC)分析BMSC的水化相组成;采用等温量热仪(型号 Calmetrix-4000HPC)测定BMSC的水化放热速率.

2 结果与讨论

2.1 矿物掺合料对BMSC抗压强度的影响

图2为矿物掺合料对BMSC试件抗压强度的

影响.

由图2(a)可见:未掺矿物掺合料时,含H₃BO₃的BMSC试件(T8IA5和T8OA5)早期强度较低,养护1d时的抗压强度分别为34.0、29.5 MPa,相较于控制组(T8A0)的抗压强度(46.3 MPa)分别下降了26.6%、36.3%;随着养护龄期的延长,BMSC试件的抗压强度出现不同程度的倒缩现象,养护28d时含H₃BO₃的BMSC试件抗压强度较高,其中含共烧H₃BO₃的BMSC试件(T8IA5)强度最高,为57.8 MPa.

由图2(b)、(c)可见:掺入粉煤灰或硅灰在一定程度上避免BMSC试件,尤其是含H₃BO₃的BMSC试件出现强度倒缩现象;掺加矿物掺合料后,含共烧H₃BO₃的BMSC试件(T8IA5-20%FA、T8IA5-10%SF)早期抗压强度下降明显,养护1d时的抗压强度分别为2.0、7.4 MPa,相较于未掺矿物掺合料的T8IA5抗压强度(34.0 MPa)分别下降了94.1%、78.2%;当H₃BO₃以外掺形式存在时,BMSC试件(T8OA5-20%FA、T8OA5-10%SF)的后期抗压强度大幅提高,28d抗压强度分别为84.8、68.2 MPa,相较于未掺矿物掺合料的T8OA5抗压强度(34.1 MPa)分别增长了149.0%、100.0%.由此可知:未掺矿物掺合料时,含共烧H₃BO₃的BMSC试件抗压强度较高;掺加矿物掺合料后,外掺游离态H₃BO₃的BMSC试件抗压强度较高.

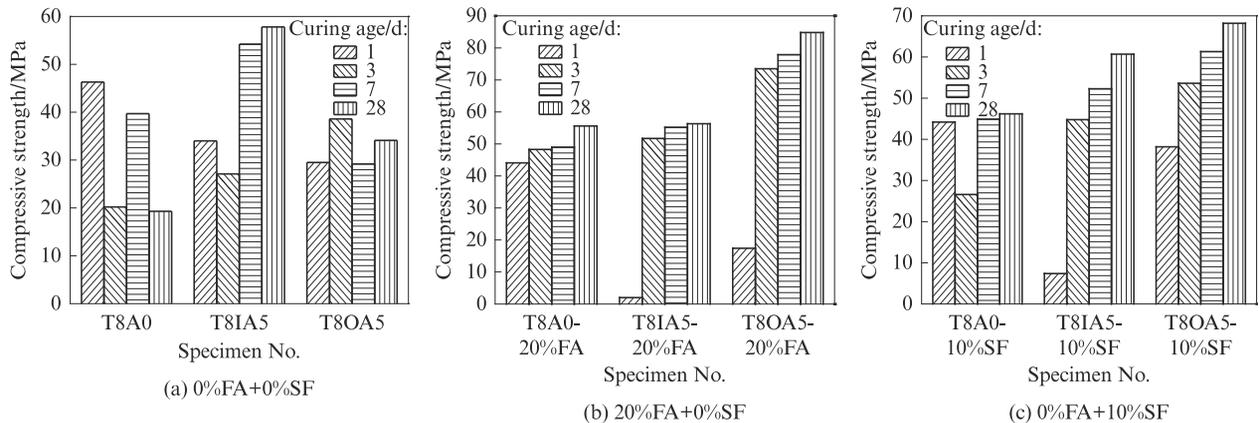


图2 矿物掺合料对BMSC试件抗压强度的影响

Fig. 2 Influence of mineral admixtures on compressive strength of BMSC specimens

2.2 矿物掺合料对BMSC水化规律的影响

图3为矿物掺合料对BMSC试件水化放热速率的影响.

由图3(a)可见:(1)未掺矿物掺合料时,含H₃BO₃的BMSC试件(T8IA5和T8OA5)诱导期延长,延缓进入加速期,其中含共烧H₃BO₃的BMSC试件(T8IA5)诱导期持续时间为25.1h,约为控制组(T8A0)的8.1倍,第1加速期开始时间约为27.4h,

约为控制组(T8A0)的7.6倍,说明共烧H₃BO₃对BMSC水化放热速率影响较大;外掺H₃BO₃的BMSC试件(T8OA5)诱导期持续时间为3.7h,第1加速期开始时间为4.1h.(2)未掺矿物掺合料时,除了T8OA5,T8A0和T8IA5均出现了新的水化放热峰,水化阶段分为诱导前期、诱导期、第1加速期、第1减速期、第2加速期、第2减速期和稳定期7个阶段^[11];新水化放热峰为Mg(OH)₂生成峰,Mg(OH)₂

的生成不利于BMSC的强度发展,导致BMSC出现不同程度的强度倒缩现象。

由图3(b)、(c)可见:(1)掺入粉煤灰或硅灰均会延缓BMSC试件的水化放热速率,且对含 H_3BO_3 的BMSC试件延缓效果更为显著。例如T8A0-20%FA的诱导期持续时间为4.3 h,第1加速期开始时间约为5.2 h,相较于T8A0分别延长了38.7%、44.5%;T8IA5-20%FA诱导期持续时间为27.1 h,第1加速期开始时间约为31.1 h,相较于T8IA5分别延长了8.0%、13.5%。(2)掺加矿物掺合料后,BMSC的水化

放热速率最高峰值均有所下降,降低了由 $Mg(OH)_2$ 引起的结晶膨胀应力,进而延长了诱导期。(3) H_3BO_3 的存在方式对BMSC试件的水化速率延缓程度也有影响,例如T8IA5-10%SF诱导期持续时间为26.3 h,相较于T8OA5-10%SF诱导期(15.9 h)延长了39.5%。虽然共烧 H_3BO_3 的MgO具有较大比表面积,但所制备的BMSC试件水化放热速率明显减慢,其原因是MgO前驱体共烧 H_3BO_3 过程中生成的 $Mg_3B_2O_6$ 附着在MgO表面,延缓了BMSC的水化速率。

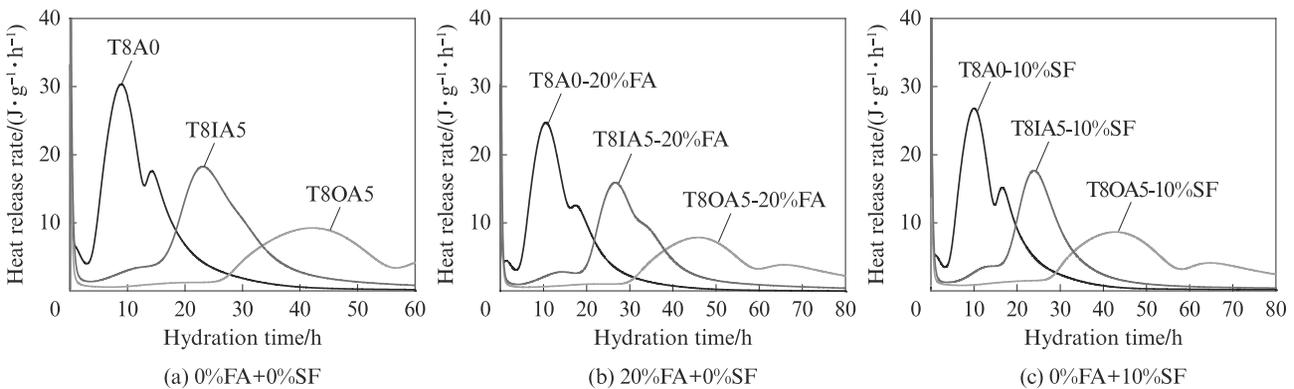


图3 矿物掺合料对BMSC试件水化放热速率的影响

Fig. 3 Influence of mineral admixtures on hydration heat release rate of BMSC specimens

2.3 矿物掺合料对BMSC水化产物及微观形貌的影响

图4为BMSC试件养护28 d时的XRD图谱。

由图4(a)可见:未掺加矿物掺合料时,控制组(T8A0)的主要水化产物为5·1·7相,另外还含有大量 $Mg(OH)_2$,导致其后期强度较低。其原因是随着水化反应的进行, $MgSO_4$ 溶液逐渐消耗完, MgO 与 H_2O 继续发生水化反应生成 $Mg(OH)_2$;含 H_3BO_3 的BMSC试件(T8IA5、T8OA5)主要水化产物也为

5·1·7相和少量 $Mg(OH)_2$ 、 MgO 。进一步说明 H_3BO_3 的存在会延缓BMSC的水化速率,降低后期 $Mg(OH)_2$ 的生成量,且含共烧 H_3BO_3 的BMSC试件(T8IA5)中 $Mg(OH)_2$ 生成量降低较明显,因此T8IA5养护28 d时具有较高的强度。

由图4(b)、(c)可见:掺加矿物掺合料后,BMSC试件的水化结晶相未发生改变,仍为5·1·7相和 $Mg(OH)_2$,与未含矿物掺合料时规律类似。

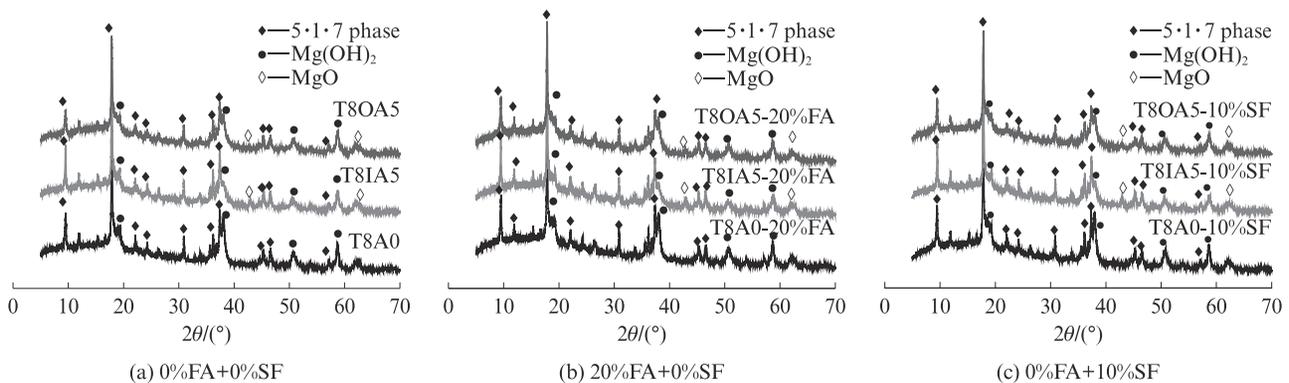


图4 BMSC试件养护28 d时的XRD图谱

Fig. 4 XRD patterns of BMSC specimens curing for 28 d

图5为BMSC试件养护28 d时的SEM照片。由图5可见:T8A0水化产物主要为针状5·1·7相和片

状 $Mg(OH)_2$,两者相互交错;T8A0-20%FA和T8A0-10%SF的水化产物仍为针状5·1·7相和片状

Mg(OH)₂,但5·1·7相分布较为稀疏错乱.原因是矿物掺合料发挥了微集料效应,且H₃BO₃促进水化硅

酸镁(M-S-H)凝胶的生成,导致针状5·1·7相更为稀疏.

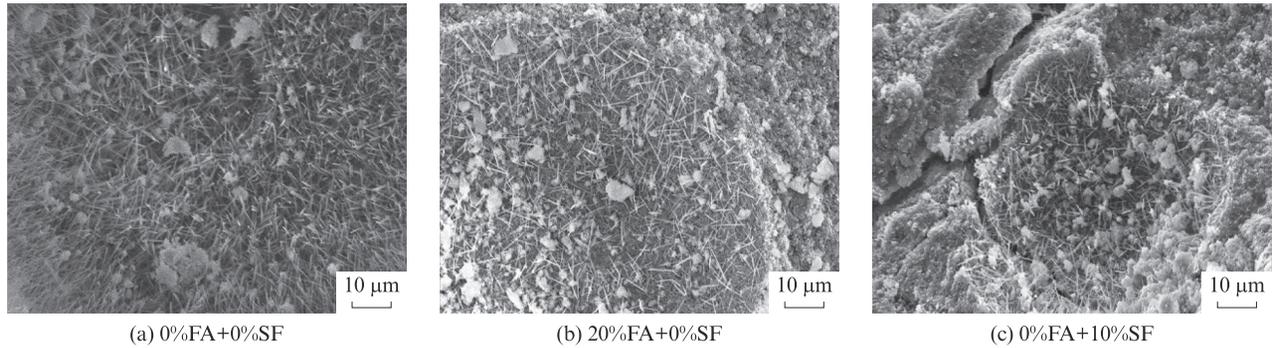


图5 BMSC试件养护28 d时的SEM照片

Fig. 5 SEM images of BMSC specimens curing for 28 d

2.4 矿物掺合料对BMSC孔隙结构的影响

图6和表5为BMSC试件养护28 d时的累积孔隙率和孔隙结构特征.由图6(a)和表5可见:未掺加矿物掺合料时,T8A0的孔隙率最大为51.38%,T8IA5、T8OA5的孔隙率均小于T8A0,原因是MgO前驱体共烧H₃BO₃后生成的MgO表面附着大量粗糙Mg₃B₂O₆,而该络合物并不参与BMSC的水化过程,只起到填充BMSC内部孔隙的作用;含H₃BO₃的BMSC试件平均孔径较小,T8A0的平均孔径为

141.00 nm,而T8OA5的平均孔径为89.46 nm.由图6(b)、(c)和表5可见:掺加矿物掺合料后,含H₃BO₃的BMSC试件孔隙率变小,例如T8A0-20%FA的孔隙率为39.00%,而T8OA5-20%FA的孔隙率为26.77%;掺加矿物掺合料后,BMSC试件的平均孔径变小,例如T8OA5的平均孔径为89.46 nm,T8OA5-20%FA的平均孔径为44.16 nm.其原因是BMSC形成的水化产物结晶尺寸减小,且H₃BO₃的存在使得BMSC孔隙较小且致密,掺入的矿物掺合

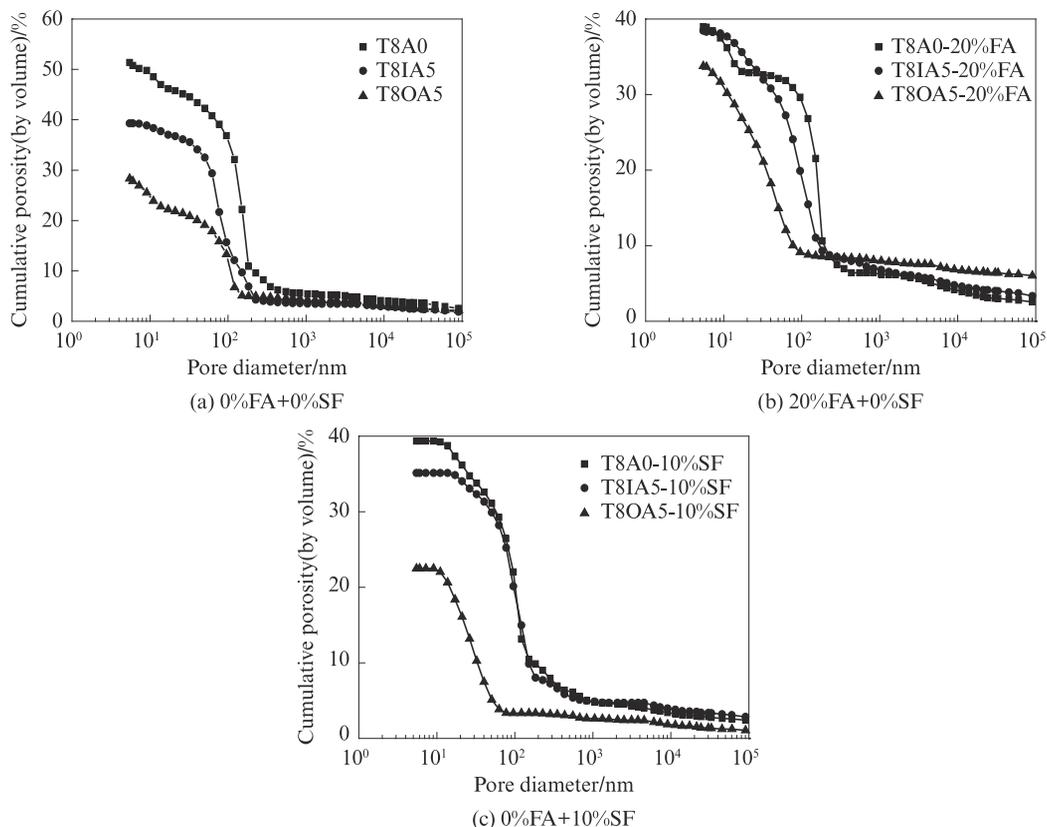


图6 BMSC试件养护28 d时的累积孔隙率

Fig. 6 Cumulative porosity of BMSC specimens curing for 28 d

表5 BMSC试件养护28 d时的孔隙结构特征
Table 5 Pore structure characteristic of BMSC specimens curing for 28 d

Specimen No.	Porosity(by volume)/%	Average pore size/nm	Proportion of different pore sizes/%		
			≤20 nm	20-100 nm	>100 nm
T8A0	51.38	141.00	12.33	25.16	62.51
T8IA5	39.28	98.89	30.26	53.21	16.53
T8OA5	28.30	89.46	29.58	47.00	23.42
T8IA0-20%FA	39.00	133.54	18.60	5.39	76.01
T8IA5-20%FA	38.45	98.29	12.71	51.72	35.57
T8OA5-20%FA	26.77	44.16	33.58	39.31	27.11
T8A0-10%SF	39.35	101.97	8.79	35.21	56.00
T8IA5-10%SF	35.13	97.99	3.26	57.32	39.42
T8OA5-10%SF	22.49	30.20	39.78	45.37	14.85

料发挥了微集料效应,填充于BMSC试件内部孔隙中,使其内部结构更加致密.由此说明,掺加矿物掺合料可以进一步优化含硼BMSC的孔结构,减小由膨胀应力引起的BMSC体积形变,从而提高BMSC的强度.

3 结论

(1)MgO前驱体共烧 H_3BO_3 后,尽管制备得的MgO具有较大比表面积,但MgO表面附着大量粗糙的 $Mg_3B_2O_6$,导致共烧 H_3BO_3 对BMSC试件水化放热速率的延缓作用较外掺 H_3BO_3 对BMSC试件水化放热速率的影响显著.

(2)未掺矿物掺合料时, H_3BO_3 的存在形式影响BMSC的抗压强度,含共烧5% H_3BO_3 的BMSC试件(T8IA5)养护28 d时抗压强度最高.

(3)掺加矿物掺合料后,BMSC试件的后期抗压强度得到明显改善. H_3BO_3 的存在形式不同,矿物掺合料对BMSC试件后期强度的改善程度也有所不同,其中外掺 H_3BO_3 的BMSC试件抗压强度改善效果较明显.原因是外掺 H_3BO_3 后矿物掺合料更加有利于形成M-S-H凝胶,且矿物掺合料的加入进一步延缓了BMSC试件的水化放热速率,但其主要水化结晶相并未发生明显变化.

(4)掺加矿物掺合料后,BMSC试件的孔隙率及平均孔径均有所减小,原因是矿物掺合料发挥了微集料效应,填充了BMSC试件的内部孔隙,使得内部结构更加致密.

参考文献:

[1] 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: 中国科学院青海盐湖研究所, 2014.
WU Chengyou. The basic theory of basic magnesium sulfate

cement and its application technology in civil engineering [D]. Xining: Qinghai Salt Lake Institute of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)

- [2] 吴成友, 邢赛南, 张吾渝, 等. BMSC水化规律研究[J]. 功能材料, 2016, 47(11): 11120-11124, 11130.
WU Chengyou, XING Sainan, ZHANG Wuyu, et al. Research on the hydration law of BMSC [J]. Functional Materials, 2016, 47(11): 11120-11124, 11130. (in Chinese)
- [3] ZENG X C, YU H F. Review of studies on structural performance of basic magnesium sulfate cement concrete in China (2014—2019) [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(2): 1524-1530.
- [4] GUO T, WANG H F, YANG H J, et al. The mechanical properties of magnesium oxysulfate cement enhanced with 517 phase magnesium oxysulfate whiskers [J]. Construction and Building Materials, 2017, 150: 844-850.
- [5] ZHOU X M, LI Z J. Light-weight wood-magnesium oxychloride cement composite building products made by extrusion [J]. Construction and Building Materials, 2012, 27(1): 382-389.
- [6] 乌志明, 李法强. 青海盐湖氯化镁资源开发[J]. 盐湖研究, 2001, 9(2): 61-65.
WU Zhiming, LI Faqiang. Development of magnesium chloride resources in salt lakes of Qinghai [J]. Salt Lake Research, 2001, 9(2): 61-65. (in Chinese)
- [7] XU B Q, DENG H, DAI Y N, et al. Preparation of nanoparticle of magnesium hydroxide from bittern [J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(A02): 671-675.
- [8] 胡庆福, 宋丽英, 胡晓湘. 卤水-碳酸铵法制取活性氧化镁工艺研究[J]. 盐业与化工, 2007, 36(6): 17-20, 37.
HU Qingfu, SONG Liying, HU Xiaoxiang. Study on the preparation of activated magnesium oxide by brine-ammonium carbonate process [J]. Salt Industry and Chemical Industry, 2007, 36(6): 17-20, 37. (in Chinese)
- [9] 王倩, 武志红, 胡亚茹, 等. MgO活性对MgO-SiO₂-H₂O胶凝体系的影响[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(4): 771-777.
WANG Qian, WU Zhihong, HU Yaru, et al. Influence of MgO activity on MgO-SiO₂-H₂O gelling system [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4): 771-777. (in Chinese)

- [10] 任强,蒋正武,马敬畏.矿物掺和料对磷酸镁水泥基修补砂浆强度的影响[J].建筑材料学报,2016,19(6):1062-1067.
REN Qiang, JIANG Zhengwu, MA Jingwei. Influence of mineral admixtures on strength of magnesium phosphate cement-based repair mortar[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(6): 1062-1067. (in Chinese)
- [11] 吴成友,苗梦,余红发.MgO活性和摩尔比对碱式硫酸镁水泥强度的影响机理[J].建筑材料学报,2022,25(4):360-366.
WU Chengyou, MIAO Meng, YU Hongfa. Influence mechanism of MgO activity and ratio on strength of basic magnesium sulfate cement [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(4): 360-366. (in Chinese)