

文章编号:1007-9629(2024)03-0259-08

引气剂对轻质抹灰石膏砂浆性能的影响

刘洁^{1,2}, 张永明^{1,2,*}

(1. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804;

2. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804)

摘要: 比较了高引气剂掺量-低轻质集料掺量与无引气剂-高轻质集料掺量对轻质抹灰石膏(LPG)砂浆物理力学性能的影响,并结合压汞法(MIP)和扫描电镜(SEM)分析了引气剂对抹灰石膏孔隙特征的影响.结果表明:掺入引气剂和轻质集料的抹灰石膏内部孔隙主要是气孔,随着引气剂掺量的增加,抹灰石膏内部孔隙率增加,但内部孔隙尺寸先增大后减小;高引气剂掺量-低轻质集料掺量LPG砂浆和无引气剂-高轻质集料掺量LPG砂浆达到相同性能时,引气剂可以大幅减少玻化微珠掺量,达到绿色环保节能.

关键词: 引气剂;玻化微珠;轻质抹灰石膏;砂浆性能;孔隙特征

中图分类号: TU526

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.03.010

Effect of Air Entraining Agent on Properties of Lightweight Plastering Gypsum Mortar

LIU Jie^{1,2}, ZHANG Yongming^{1,2,*}

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The effects of high air entraining agent content-low lightweight aggregate content and non-air entraining agent-high lightweight aggregate content on the physical and mechanical properties of lightweight plastering gypsum (LPG) mortar were studied, and the effects of air entraining agent on the pore characteristic of plastering gypsum were analyzed using mercury intrusion porosimetry (MIP) and scanning electron microscopy (SEM). The results show that the internal pores of plaster gypsum mixed with air entraining agent and lightweight aggregate are mainly pores. With the increase of air entraining agent content, the internal porosity of plastering gypsum increases, but the internal pore size first increases and then decreases. When the high air entraining agent content-low lightweight aggregate content LPG mortar and the non-air entraining agent-high lightweight aggregate content LPG mortar achieve the same performance, the air entraining agent can significantly reduce the amount of vitrified microbeads, achieving green environmental protection and energy conservation.

Key words: air entraining agent; vitrified microbead; lightweight plastering gypsum; property of mortar; pore characteristic

建筑抹灰材料中,抹灰石膏作为一种绿色环保型抹灰材料,在碳中和碳达峰计划开始实施后引起了人们的重视^[1].石膏基抹灰砂浆具有质量轻、不出现空鼓开裂以及良好的体积稳定性等优点^[2].采用轻

质化手段处理抹灰石膏不仅可以降低砂浆的体积密度,还可以减少基体自身的负荷.

不同的轻质化手段对于抹灰石膏的影响不一.轻质抹灰石膏(LPG)砂浆通过在石膏中掺入轻质

收稿日期:2023-04-24; 修订日期:2023-06-25

第一作者:刘洁(1997—),女,河南信阳人,同济大学硕士生.E-mail:2032951@tongji.edu.cn

通讯作者:张永明(1969—),男,上海人,同济大学高级工程师,学士.E-mail:zym126@tongji.edu.cn

集料^[3-6]、外加剂^[7]和发泡剂^[8-9]等来降低其体积密度,优化材料孔隙结构,增加孔隙率,减少建筑物自重.添加轻质集料是轻质化的普遍手段.使用轻质填料可以增加孔隙率,降低材料的体积密度;但是生产轻质集料的过程需要利用电能或天然气能进行高温膨化^[10],大大消耗了能源,不利于环保节能.引气剂(AEA)是一种表面活性外加剂,可在砂浆中引入大量细小、均匀、稳定的气泡从而降低其体积密度^[11-12].用引气剂代替部分轻质集料,不仅可以降低生产成本、节约天然矿石的开采量^[13],还可以减少电能或天然气能源的损耗、降低导热系数^[14].综上,考虑采用复掺引气剂与轻质集料的方法来制备LPG砂浆.目前,高引气剂掺量-低轻质集料掺量对于轻质抹灰石膏材料性能的影响及机理尚未见报道.

本文通过复掺引气剂和轻质集料来制备轻质抹

灰石膏砂浆,探究轻质集料与引气剂掺量对轻质抹灰石膏材料性能的影响,并从微观性能角度来探索其影响机理,以期为引气剂在轻质抹灰石膏中的应用提供依据.

1 试验

1.1 原材料及配合比

原材料的基本性质见表1.采用脱硫石膏(FGD)作为胶凝材料,其粒径分布见图1(a),XRD图谱见图1(b),主要化学组成¹⁾见表2,主要性能见表3;采用玻化微珠(VMB)作为轻质集料,其中粒径为0.150~<0.212 mm、0.212~<0.425 mm、0.425~<0.850 mm和0.850~2.000 mm玻化微珠的质量比为1:2:3:4,主要性能见表4;使用2050P作为缓凝剂;采用纤维素醚作为保水剂,黏度为40 Pa·s;采用LP50作为引气剂;水采用自来水.

表1 原材料的基本性质

Table 1 Basic characteristic of raw materials

Material	Appearance	pH value	Material	Appearance	pH value
FGD	White powder	7.06	Cellulose ether	Ivory powder	8.18
2050P	Grey powder	12.58	LP50	White powder	10.24

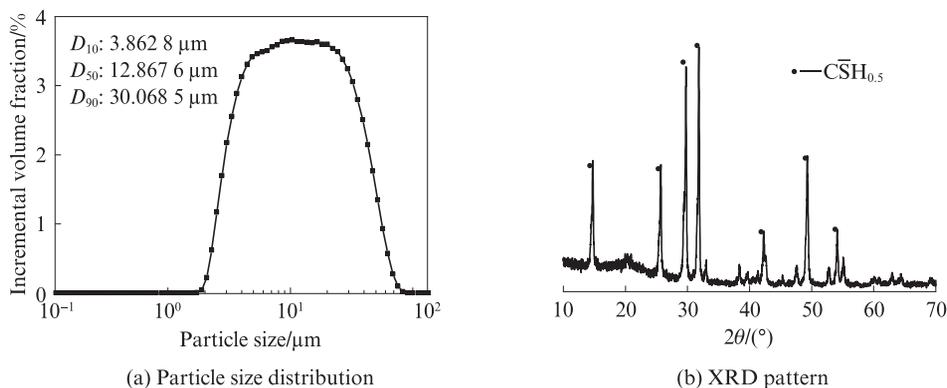


图1 脱硫石膏的粒径分布和XRD图谱

Fig. 1 Particle size distribution and XRD pattern of FGD

表2 脱硫石膏的化学组成

Table 2 Chemical composition (by mass) of FGD

Al_2O_3	SO_3	CaO	K_2O	SiO_2	MgO	Fe_2O_3	TiO_2	SrO
1.09	55.47	39.26	0.19	1.93	0.64	0.61	0.07	0.15

Unit: %

表3 脱硫石膏的主要性能

Table 3 Main performance of FGD

Standard consistency/%	Initial setting time/min	Flexural strength (2 h)/MPa	Compressive strength (2 h)/MPa	Flexural strength (24 h)/MPa	Compressive strength (24 h)/MPa
57	4.30	4.30	11.40	4.70	13.20

1)文中涉及的组成和掺量等除特别说明外均为质量分数.

表4 玻化微珠的主要性能
Table 4 Main performance of VMB

Partical size/mm	Density/(kg·m ⁻³)	Surface vitrification rate/%	Service temperature/°C	Water absorption(by mass)/%	Numerical tube pressure/MPa
0.1-1.2	100-110	90	≤800	40-50	0.15

1.2 试验方法

1.2.1 新拌砂浆性能测试

新拌砂浆性能测试均在(20±5)℃、相对湿度(65±10)%环境下进行.轻质抹灰石膏砂浆的配合比见表5,其中NL为无引气剂-高轻质集料掺量LPG砂浆,AL为掺引气剂-低轻质集料掺量LPG砂浆,原材料掺量均以FGD质量计.混合料的拌制、成型参照GB/T 28627—2012《抹灰石膏》

进行,搅拌方式为手动快速搅拌3 min;新拌砂浆的初凝时间和标准稠度用水量测试参照GB/T 28627—2012标准进行;湿密度测试参照JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》进行;含气量测试参照标准JGJ/T70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》进行,采用含气量测定仪直接读取含气量^[15].试验结果均取2次测试的平均值.

表5 轻质抹灰石膏砂浆的配合比
Table 5 Mix proportion(by mass) of LPG mortar

						Unit: %					
Code	FGD	VMB	2050P	Cellulose ether	LP50	Code	FGD	VMB	2050P	Cellulose ether	LP50
NL-1	100.00	5.00	0.20	0.25	0	AL-1	100.00	5.00	0.20	0.25	0.02
NL-2	100.00	7.00	0.20	0.25	0	AL-2	100.00	5.00	0.20	0.25	0.04
NL-3	100.00	9.00	0.20	0.25	0	AL-3	100.00	5.00	0.20	0.25	0.06
NL-4	100.00	11.00	0.20	0.25	0	AL-4	100.00	5.00	0.20	0.25	0.08
NL-5	100.00	13.00	0.20	0.25	0	AL-5	100.00	5.00	0.20	0.25	0.10
NL-6	100.00	15.00	0.20	0.25	0						

1.2.2 力学性能测试

力学性能测试试样的成型和养护均在(20±5)℃、相对湿度(65±10)%环境下进行.抗压、抗折强度测试龄期为7 d,测试前试样在温度为(40±2)℃的电热鼓风干燥箱中干燥至恒量,测试参照GB/T 17669.3—1999《建筑石膏力学性能的测定》进行.拉伸黏结强度测试参照JGJ/T 70—2009标准进行,测试龄期为7 d,测试前24 h用高强黏结剂将拉拔铁块粘贴在试样成型面上,继续放置于养护环境下24 h后进行测试.

1.2.3 微观性能测试

压汞(MIP)和扫描电镜(SEM)测试样品均取自7 d抗压、抗折测试完毕试样的中间部分,未经涂层、抛光等处理.MIP测试仪型号为AutoPore Iv 9510,浸入角为140°,平衡时间为50 s.SEM测试仪型号为ZEISS Sigma 300VP,样品经喷金处理.

2 结果与分析

2.1 新拌性能

图2给出了轻质抹灰石膏砂浆的标准稠度用水量和初凝时间.由图2(a)可见:玻化微珠会显著增加无引气剂砂浆的标准稠度用水量,当玻化微珠掺量 w (VMB)由5%增加至15%时,标准稠度用水量增

加了12%;掺引气剂砂浆在引气剂掺量 w (LP50)少于0.04%时,标准稠度用水量基本无变化;当引气剂掺量继续增加时,标准稠度用水量逐渐增大,且变化速率相同.由图2(b)可见,新拌砂浆的初凝时间随轻质集料和引气剂掺量的变化趋势总体一致,但掺引气剂砂浆的初凝时间略大于无引气剂砂浆.

图3给出了无引气剂砂浆含气量(体积分数)、湿密度及其相关性.由图3(a)可见:新拌无引气剂砂浆含气量随玻化微珠掺量增加而增加,当玻化微珠掺量由5%增加至15%时,含气量增加了9%;随着玻化微珠掺量的增加,NL砂浆的湿密度呈降低趋势,玻化微珠掺量增加10%,湿密度降低20%.由图3(b)可见,NL砂浆湿密度与含气量的线性相关系数 R^2 为0.947,两者呈负相关,说明湿密度的降低与含气量的增加有关.

图4给出了掺引气剂砂浆含气量、湿密度及其相关性.由图4(a)可见:随引气剂掺量增加,AL砂浆含气量增加,当引气剂掺量在0.04%以下时,含气量的增加值远超添加轻质集料的影响;但继续增加引气剂掺量至0.10%时,含气量增加速率减缓.由图4(b)可见,随着引气剂掺量的增加,AL砂浆湿密度降低.

2.2 力学性能

图5是轻质抹灰石膏砂浆的7 d力学性能测试结

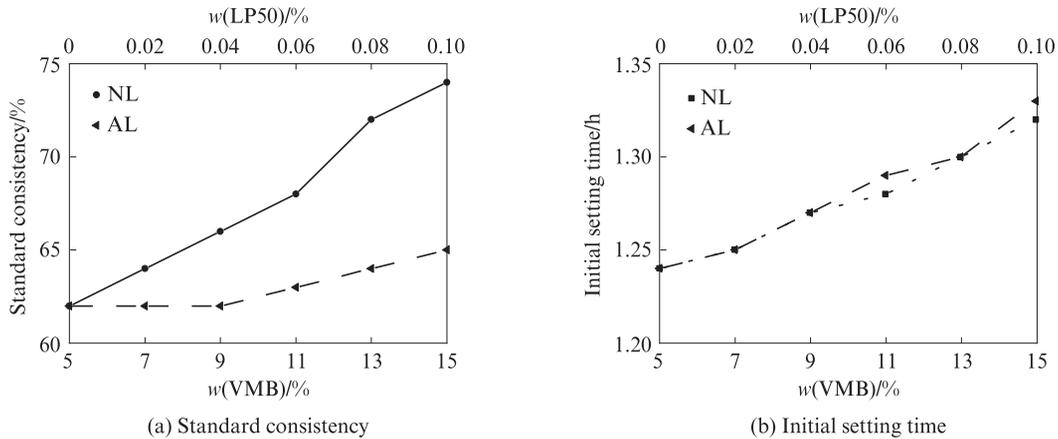


图2 轻质抹灰石膏砂浆的标准稠度用水量和初凝时间
Fig. 2 Standard consistency and initial setting time of LPG mortar samples

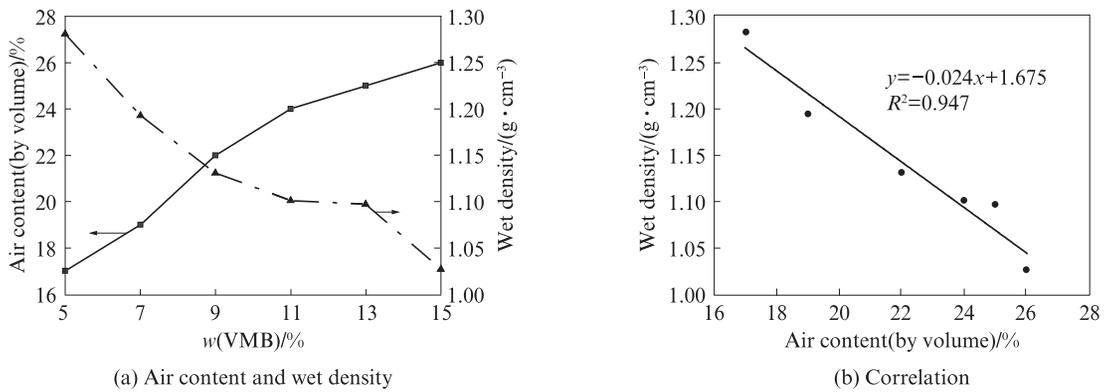


图3 无引气剂掺量砂浆含气量、湿密度及其相关性
Fig. 3 Air content and wet density of NL mortar samples and their correlation

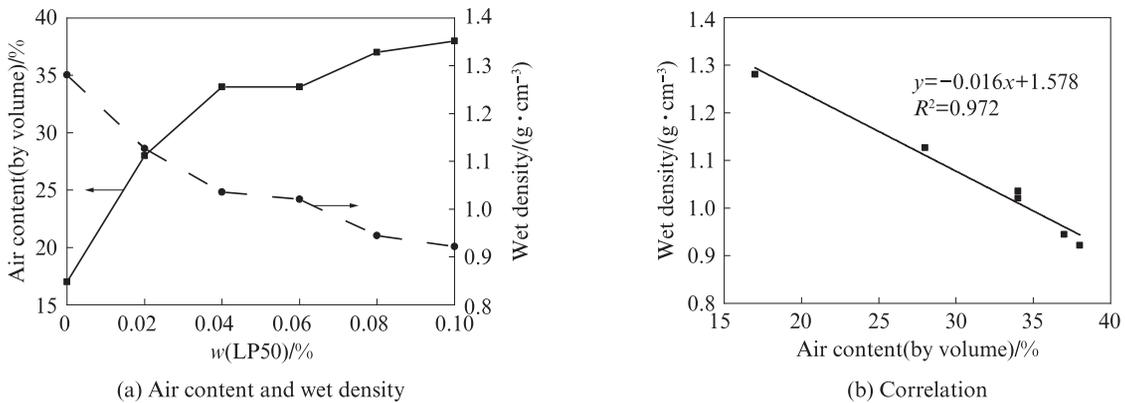


图4 掺引气剂砂浆含气量、湿密度及其相关性
Fig. 4 Air content and wet density of AL mortar samples and their correlation

果.由图5(a)可见,随着玻化微珠和引气剂掺量的增加,砂浆的抗压强度均降低,NL砂浆的抗压强度呈线性降低,而AL砂浆的抗压强度呈曲线降低,且在引气剂掺量达到0.06%后降低幅度逐渐减小.由图5(b)可见,砂浆的抗折强度均随着玻化微珠或引气剂掺量的增加而降低.抗折强度与硬化砂浆内部孔隙有关,玻化微珠和引气剂都会增大内部孔隙率,因而宏观上表现为强度降低.但抗折强度降低趋势与抗

压强度的降低趋势不同.由图5(c)可见,增大玻化微珠与引气剂掺量均会导致砂浆拉伸黏结强度降低且降低的趋势近似,单掺15%玻化微珠和复掺5%玻化微珠及0.10%引气剂制备的轻质抹灰石膏砂浆的拉伸黏结强度降低趋势与抗折强度相似.

表6对比了相同拉伸黏结强度下,NL砂浆和AL砂浆的湿密度、干密度和力学强度.由表6可见,拉伸黏结强度相同时,NL砂浆的湿密度和抗压强度高于

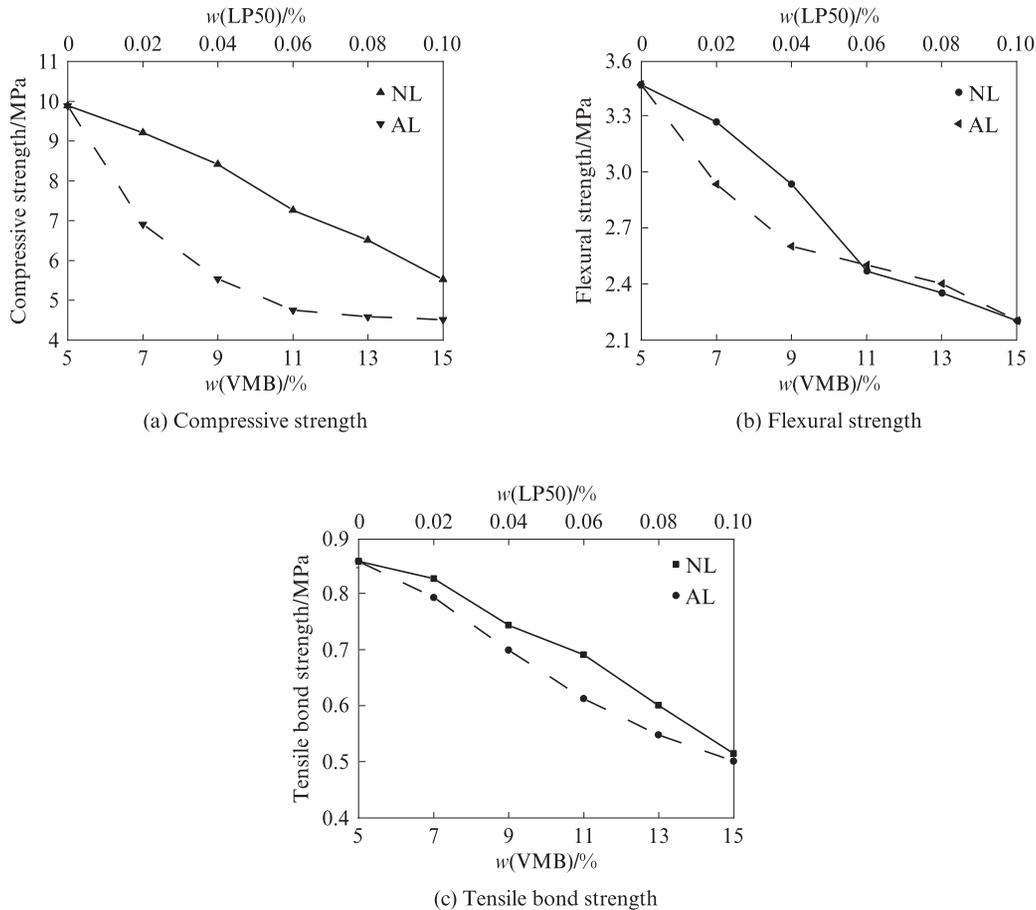


图5 轻质抹灰石膏砂浆的7 d力学性能

Fig. 5 Mechanical properties of LPG mortar samples at 7 d

表6 轻质抹灰石膏砂浆7 d试样的密度和力学强度
Table 6 Density and strength of LPG mortar samples at 7 d

Code	Wet density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Dry density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Compressive strength/ MPa	Flexural strength/ MPa	Tensile bond strength/MPa
NL-4	1 101	815	7.26	2.47	0.69
AL-2	1 056	820	5.54	2.60	0.70
NL-6	1 027	723	5.52	2.20	0.51
AL-5	922	780	4.52	2.20	0.50

AL砂浆,但干密度与抗折强度略低于AL砂浆.说明相同拉伸黏结强度的轻质抹灰石膏砂浆中,增加引气剂掺量不仅可以大幅减少轻质集料的掺量,而且可以降低湿密度.

2.3 微观性能

砂浆的孔隙率(体积分数)和孔结构与砂浆的物理力学性能密切相关,孔隙分布能够显示孔隙体积或者孔隙率随着孔隙尺寸的变化^[16].按照砂浆内部孔径(D)的大小,可以将孔分为凝胶孔、毛细孔和气泡^[17].凝胶孔为 $D < 10 \text{ nm}$ 的孔;毛细孔分为孔径为 $10 \text{ nm} \leq D < 50 \text{ nm}$ 的小毛细孔和 $50 \text{ nm} \leq D < 1\,000 \text{ nm}$ 的大毛细孔;气泡为 $D \geq 1\,000 \text{ nm}$ 的孔^[18].

各组砂浆7 d试样的MIP测试结果如表7和图6

所示.由表7和图6可见:砂浆内部孔隙主要是气泡;随引气剂掺量增加,砂浆内部孔隙率增加,平均孔径和中值孔径先增大后减小,总孔容先增大后减小;当引气剂掺量增加至0.06%时,平均孔径最大,为2 801.1 nm,中值孔径也最大,为1 169.9 nm;当引气剂掺量增至0.10%时,孔隙率增至40.06%;掺入玻化微珠会显著增加大孔体积,导致砂浆中值孔径增大;掺0.10%引气剂的AL-5砂浆与掺13%轻质集料NL-5的砂浆具有相同孔隙率,但是NL-5砂浆内部大孔占比明显高于AL-5砂浆.

图7为7 d轻质抹灰石膏砂浆的光学显微图像和SEM图像.由图7可见,增加引气剂或轻质集料掺量,砂浆孔径 D 均增大,总孔隙体积均增大.由图7

表7 轻质抹灰石膏砂浆7 d试样的MIP测试结果
Table 7 MIP results of LPG mortar samples at 7 d

Code	Porosity (by volume)/%	Average pore size/nm	Median pore size/nm	Total pore volume/(mL·g ⁻¹)	Volume density/(g·mL ⁻¹)	Code	Porosity (by volume)/%	Average pore size/nm	Median pore size/nm	Total pore volume/(mL·g ⁻¹)	Volume density/(g·mL ⁻¹)
NL-1	28.06	1 569.5	687.6	0.451 1	0.621 9	NL-2	30.62	347.3	2 823.4	0.647 5	0.681 5
AL-1	30.94	2 107.0	752.8	0.627 1	0.493 4	NL-3	34.62	379.9	3 258.1	0.617 0	0.858 2
AL-2	32.43	2 300.3	1 003.4	0.611 1	0.530 7	NL-4	35.99	393.9	2 944.8	0.646 7	0.869 4
AL-3	37.21	2 801.1	1 169.9	0.728 1	0.511 0	NL-5	40.99	439.1	3 104.4	0.556 2	1.248 7
AL-4	38.66	2 165.5	601.5	0.745 1	0.518 8	NL-6	41.14	466.8	3 592.2	0.742 9	0.940 8
AL-5	40.06	2 484.1	907.0	0.729 5	0.549 1						

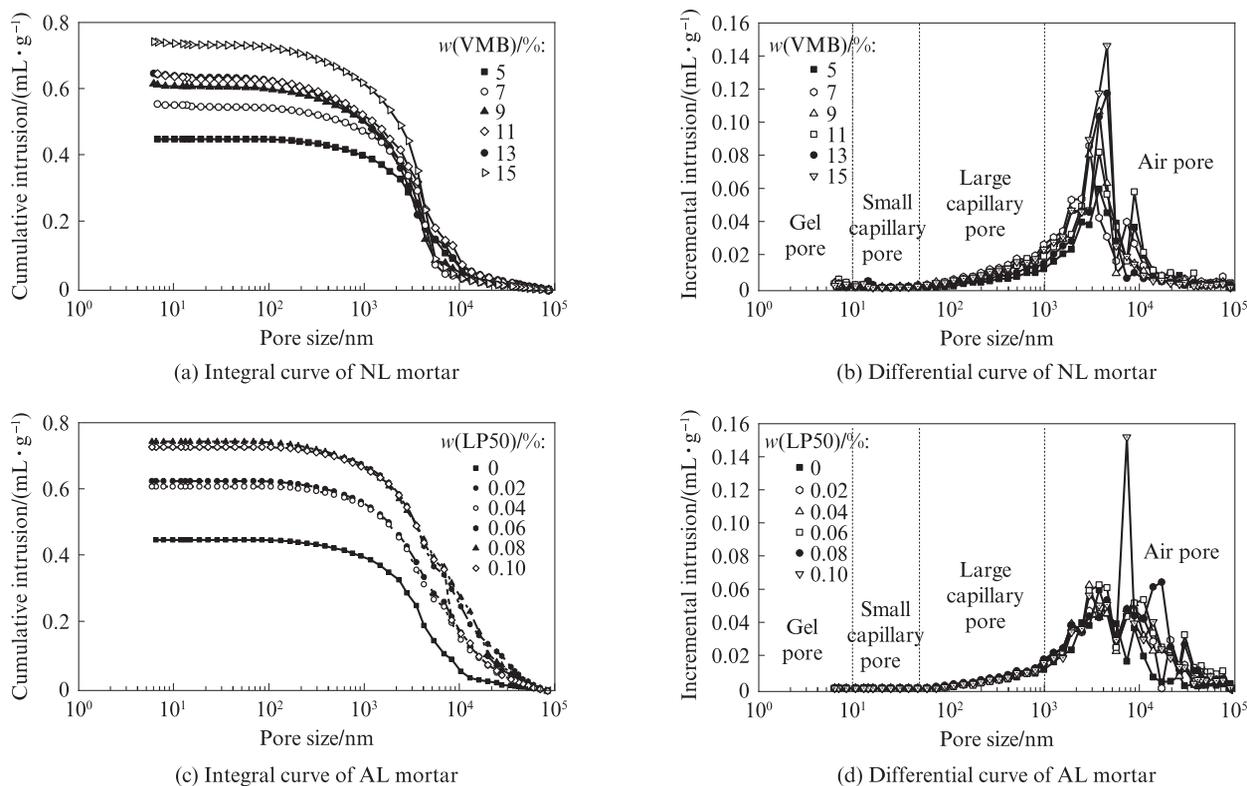


图6 轻质抹灰石膏砂浆7 d试样的孔径分布积分曲线和微分曲线

Fig. 6 Integral curves and differential curves of pore size distribution of LPG mortar samples at 7 d

(a)可见,随着引气剂掺量的增加,砂浆内部孔隙增多的同时其分布更均匀,孔径明显减小,贯通孔隙增多.由图7(b)可见,随着玻化微珠掺量的增加,孔径略微增大,这与MIP结果相符.由SEM图像可见:随着引气剂或玻化微珠掺量的增加,孔隙数量增加,大孔增多;并且引气剂掺量越多,孔隙分布越均匀,内部破碎孔壁越多;NL砂浆中,脱硫石膏水化产物与孔壁杂乱分布;随玻化微珠掺量增加,孔隙外层水化产物增多,孔隙内部夹杂水化产物数量减少.

3 机理讨论

硬化砂浆内部孔隙主要由4部分组成:(1)石膏水化过程中形成具有一定强度和稳定性的毛细多孔

结构^[19];(2)新拌砂浆在搅拌过程中由于旋涡作用(vortex action),内部形成微小的气泡孔隙;(3)轻质集料像三维的筛网(three dimensional screen)一样吸入空气,并在其颗粒之间的孔隙网络中形成气泡孔隙;(4)引气剂在新拌砂浆搅拌过程中由于表面张力的作用而引入气泡孔隙.

图8给出了轻质抹灰石膏砂浆7 d抗压、抗折强度与体积密度的相关性.由图8(a)可见,NL砂浆7 d抗压、抗折强度与体积密度均呈正相关,线性相关系数 R^2 分别为0.986和0.945,说明玻化微珠所致砂浆的抗压、抗折强度损失与砂浆孔隙率增加、体积密度减少呈正相关关系.由图8(b)可见,引气剂的加入主要影响大毛细孔,随着引气剂掺量的增加,大毛细孔

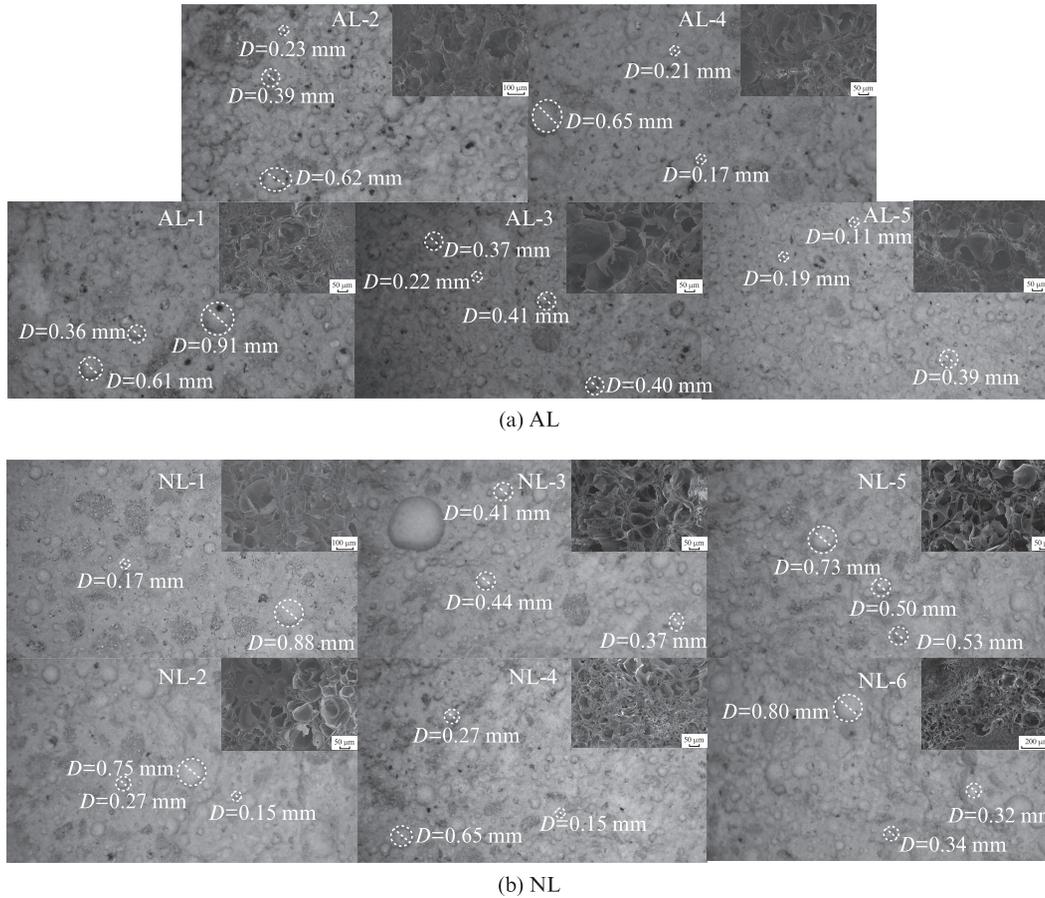


图7 7 d轻质抹灰石膏砂浆的光学显微图像和扫描电镜图谱
Fig. 7 Optical microscopy images and SEM images of LPG mortars at 7d

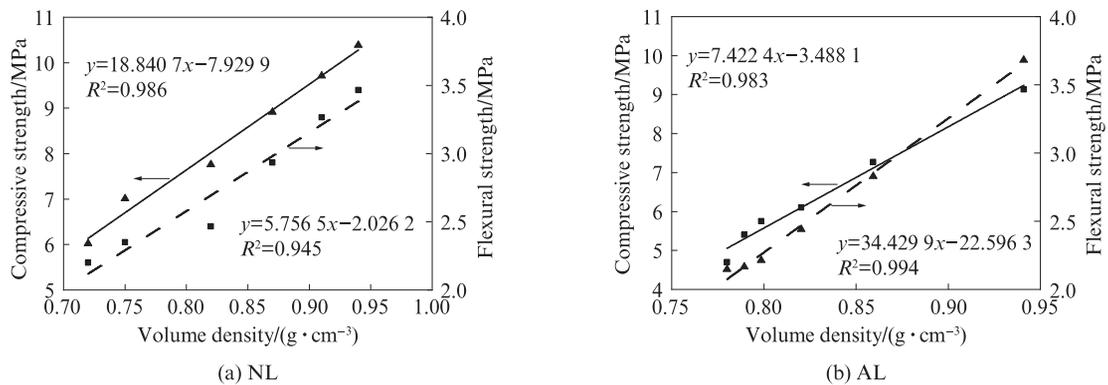


图8 轻质抹灰石膏砂浆7 d抗压、抗折强度与体积密度的相关性
Fig. 8 Correlation between flexural strength, compressive strength and volume density of LPG mortars at 7 d

数量增多.引气剂不仅能增加气泡的表面张力,而且能增加气泡的数量.新拌砂浆在搅拌过程中形成大量的小气泡,且这些小气泡可以长期存在,导致硬化砂浆中小气泡形成的孔隙分布更均匀.另外,引气剂对石膏水化反应有延迟阻碍作用,导致水化反应产生的孔径减小^[20].引气剂可以产生大量微小气泡,这些气泡可以起到浮球的作用,减少了颗粒之间的摩擦.

玻化微珠可增大砂浆的标准稠度用水量,由于

玻化微珠吸附和吸入水从而提高了砂浆系统的需水量,且玻化微珠越多,吸附水越多,系统所需水分越多.无引气剂砂浆含气量的增加是由玻化微珠自身孔隙夹带空气所致.这说明当玻化微珠掺量增大时,轻质抹灰石膏的孔隙率增加.

引气剂掺量较少时,引气剂水合反应需水量对石膏水化用水量影响不大.但当引气剂掺量增加至0.06%时,由于石膏掺量不变,引气剂影响逐渐增大,因此标准稠度用水量增加.在水化过程中石膏中的

CaSO₄会分解成Ca²⁺和SO₄²⁻, Ca²⁺增加了阴离子表面活性剂的表面张力,这是因为Ca²⁺使阴离子表面活性剂凝结,减少了界面吸附自由表面活性剂的数量,增加了微小气泡的稳定性^[12],但是过高的引气剂掺量会导致气泡融合,进一步降低宏观力学强度。

4 结论

(1)掺引气剂和无引气剂轻质抹灰石膏砂浆内部孔隙主要是气孔,随引气剂掺量增加,轻质抹灰石膏砂浆内部孔隙率增加,但内部孔隙尺寸先增大后减小。

(2)掺引气剂-低轻质集料掺量砂浆中,增加引气剂掺量可以显著增加轻质抹灰石膏砂浆的含气量,降低其体积密度;但当引气剂掺量过高时,对砂浆含气量和体积密度的影响减弱,因此引气剂掺量不宜过高。掺引气剂-低轻质集料掺量砂浆和无引气剂-高轻质集料掺量砂浆达到同样性能时,掺引气剂的砂浆中轻质集料掺量较低,可以大幅减少玻化微珠掺量,达到绿色环保节能。

参考文献:

- [1] 唐江昱. 轻质抹灰石膏的制备及性能研究[D]. 重庆:重庆大学, 2019.
TANG Jiangyu. Preparation and properties of lightweight gypsum plaster[D]. Chongqing:Chongqing University, 2019. (in Chinese)
- [2] DOLEŽELOVÁ M, KREJSOVÁ J, VIMMROVÁ A. Lightweight gypsum based materials: Methods of preparation and utilization[J]. International Journal of Sustainable Development and Planning, 2017, 12(2):326-335.
- [3] JIANG J, LU Z Y, LI J, et al. Preparation and hardened properties of lightweight gypsum plaster based on pre-swelled bentonit[J]. Construction and Building Materials, 2019, 215:360-370.
- [4] JIMÉNEZ RIVERO A, DE GUZMÁN BÁEZ A, GARCÍA NAVARRO J. New composite gypsum plaster-ground waste rubber coming from pipe foam insulation[J]. Construction and Building Materials, 2014, 55:146-152.
- [5] GENCEL O, DEL COZ DIAZ J J, SUTCU M, et al. A novel lightweight gypsum composite with diatomite and polypropylene fibers [J]. Construction and Building Materials, 2016, 113:732-740.
- [6] SINGH M, GARG M. Perlite-based building materials - A review of current applications[J]. Construction and Building Materials, 1991, 5(2):75-81.
- [7] ÇOLAK A. Density and strength characteristics of foamed gypsum [J]. Cement and Concrete Composites, 2000, 22(3):193-200.
- [8] CAPASSO I, IUCOLANO F. Production of lightweight gypsum using a vegetal protein as foaming agent [J]. Materials and Structures, 2020, 53(2):35.
- [9] ISERN E R, MESSING G L. Direct foaming and seeding of highly porous, lightweight gypsum [J]. Journal of Materials Research, 2016, 31(15):2244-2251.
- [10] 周友财. 一种用于生产玻化微珠的高温膨化炉装置: CN213514986U[P].2021-06-22.
ZHOU Youcai. A high-temperature expansion furnace device for producing vitrified microspheres: CN213514986U [P]. 2021-06-22. (in Chinese)
- [11] 朱绘美,王培铭,张国防. 引气剂对水泥基饰面砂浆泛白的影响及其机理[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(1):1-6.
ZHU Huimei, WANG Peiming, ZHANG Guofang. Effect of air entraining agent on efflorescence of cement-based decorative mortar and its mechanism [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(1):1-6. (in Chinese)
- [12] TUNSTALL L E, LEY M T, SCHERER G W. Air entraining admixtures: Mechanisms, evaluations, and interactions [J]. Cement and Concrete Research, 2021, 150:106557.
- [13] 范树景,王培铭. 引气剂对玻化微珠保温砂浆长期干燥收缩的影响[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1):1-7.
FAN Shujing, WANG Peiming. Effect of air entraining agents on the long-term drying shrinkage of glazed hollow beads thermal insulation mortar[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(1):1-7. (in Chinese)
- [14] 陈峭卉. 石膏基外墙内保温节能材料的研究[D]. 广州:华南理工大学, 2012.
CHEN Qiaohui. Resarch on energy saving product for inner insulation of external wall base on gypsum[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [15] LAWRENCE P, RINGOT E, HUSSON B. About the measurement of the air content in mortar [J]. Materials and Structures, 1999, 32(8):618-621.
- [16] 李立辉,陈歆,田波,等. 大气压强对混凝土引气剂引气效果的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4):866-873. (in Chinese)
LI Lihui, CHEN Xin, TIAN Bo, et al. Effect of atmospheric pressure on air-entraining performance of air-entraining agent of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4):866-873. (in Chinese)
- [17] POWERS T C. Structure and physical properties of hardened portland cement paste [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1958, 41(1):1-6.
- [18] 李磊,王茹,武雪杉,等. HPMC对铝酸盐水泥-石膏二元胶凝体系砂浆性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(4):415-423.
LI Lei, WANG Ru, WU Xueshan, et al. Effect of hydroxypropyl methyl cellulose on aluminat cement-gypsum mortar[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(4):415-423. (in Chinese)
- [19] YU Q L, BROUWERS H J H. Microstructure and mechanical properties of β -hemihydrate produced gypsum: An insight from its hydration process[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(7):3149-3157.
- [20] HU J H, ZHAO F W, KUANG Y, et al. Microscopic characteristics of the action of an air entraining agent on cemented paste backfill pores[J]. Alexandria Engineering Journal, 2020, 59(3):1583-1593.