

石灰石粉对水泥砂浆强度影响及作用机理

吕小武, 赵永伟, 闫永亮

(河南省交通运输发展集团有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要:该文研究了石灰石粉掺量、细度对砂浆抗压强度的影响,并基于水化热测试和边界成核与增长模型计算了水泥浆体的水化动力学参数,通过毛细吸水测试以及压汞试验分析了砂浆的孔结构,揭示了石灰石粉对砂浆抗压强度的作用机理。结果表明:随石灰石粉掺量增加,砂浆抗压强度逐渐降低,掺量增加至30%时,7、28、56 d龄期砂浆的抗压强度降低均超过了20%;随石灰石粉细度增加,砂浆抗压强度逐渐增大,石灰石粉由 $1.084 \mu\text{m}^2/\mu\text{m}^3$ 增加到 $2.168 \mu\text{m}^2/\mu\text{m}^3$ 时,7、28、56 d龄期砂浆的强度分别增加了6.1%、4.2%、4.8%。石灰石粉减小了水泥浆体的水化放热速率、水化热和水化产物的成核速率 K_N 、增长速率 K_G ,进而降低了浆体的水化程度,从而增加了砂浆的毛细吸水量、空隙率、最可几孔孔径,最终导致砂浆抗压强度的降低。

关键词:石灰石粉; 抗压强度; 水化动力学; 孔结构

中图分类号: U414 **文献标志码:** A

石灰石粉由于其资源丰富、分布广泛,用于矿物掺合料具有巨大的环境与经济效益。已有很多学者研究了石灰石粉对砂浆、混凝土强度的影响^[1-4]。石灰石粉对砂浆、混凝土抗压强度的作用主要与其填充效应、成核效应、稀释效应等有关^[5]。石灰石粉细度较大时,其可以填充在水泥颗粒之间,改善颗粒的堆积状态,提高颗粒堆积密实度,进而对强度有提高作用^[6]。同时石灰石粉可以为水化产物的成核提供成核位点,进而促进水泥浆体的水化反应,从而提高强度^[7]。当石灰石粉掺量较高且等量替代水泥时,石灰石粉主要发挥稀释效应,这是因为掺入石灰石粉减少了水泥用量,增大了实际水灰比,进而降低了抗压强度^[8]。目前,石灰石粉掺入混凝土中产生的各种效应对强度的机理解释主要从水化程度以及水化产物的形貌、体积进行解释^[9],这本质上仍取决于水泥颗粒等胶凝材料水化产物的成核速率和增长速率^[10]。水化产物成核、增长速率越大,则相同时间内水泥的水化程度越高、水化产物体积越大。然而,关于水泥或混凝土中水化产物成核速率、增长速率的定量研究较少,且是研究领域的难点。定量水化产物的成核、增长速率有助于从本质上揭示石灰石粉对砂浆抗压强度的作用机理。

基于此,该文研究石灰石粉掺量、细度对砂浆抗压强度的影响,基于水化热和BNG(边界成核或增长模型)水化动力学模型计算水化产物的成核、增长速率,

并结合毛细吸水测试和压汞试验分析石灰石粉对砂浆孔结构的影响,进而揭示石灰石粉对砂浆抗压强度的作用机理,从而促进石灰石粉在混凝土中的应用。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料及配合比

水泥采用P. O42.5普通硅酸盐水泥,记为P,其物理力学性能和矿物组成分别如表1、2所示。石灰石粉CaCO₃含量为99%,比表面积分别为1.084、1.626和 $2.168 \mu\text{m}^2/\mu\text{m}^3$,依次记为L I、L II、L III。砂采用河砂,细度模数2.8,为中砂,其分计筛余、累计筛余曲线如图1所示。水采用自来水。

表1 水泥的物理力学性能

安定性	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
良好	175	235	6.8	8.9	24.3	44.9

表2 水泥的矿物成分

%						
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	f-CaO	MgO	其他
53.38	20.53	6.10	12.43	0.98	3.49	3.09

石灰石粉水泥砂浆配合比如表3所示。

收稿日期:2021-01-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51878622)

作者简介:吕小武,男,硕士,教授级高工。E-mail:1057669897@qq.com

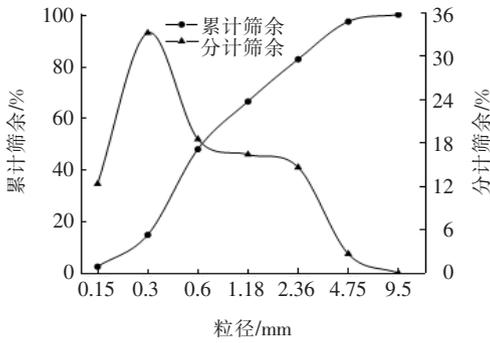


图 1 砂的分计筛余、累计筛余曲线

表 3 石灰石粉水泥砂浆配合比

试样编号	水泥/g	石灰石粉/g	比表面积/ $(\mu\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}^{-3})$	砂/g	水胶比	减水剂/%
P0	450	0	—	1 350	0.4	0.12
PL I 10	405	45	1.084	1 350	0.4	0.12
PL I 20	360	90	1.084	1 350	0.4	0.12
PL I 30	315	135	1.084	1 350	0.4	0.12
PL II 10	405	45	1.626	1 350	0.4	0.12
PL III 10	405	45	2.168	1 350	0.4	0.12

1.2 试验方法

1.2.1 强度试验

根据 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》^[11]测定砂浆试件的抗压强度。按表 3 所示配合比成型 40 mm×40 mm×160 mm 的棱柱体试件并在标准养护条件下分别养护至规定龄期,测定试件的抗压强度。

1.2.2 毛细吸水试验

按表 3 成型 40 mm×40 mm×160 mm 的试件,24 h 脱模后养护至 28 d。之后,将试件烘干并封闭其 5 个侧面,仅留 1 面用于吸水试验。将吸水面一端浸入水中,浸入深度不超过 5 mm,测定一定时间间隔 t 的试件累积吸水量 W ,称量时要擦干试件的表面明水。采用式(1)、(2)^[12]计算试件的毛细吸水系数,表征其毛细吸水能力。

$$i = W / (A \cdot \rho) \quad (1)$$

式中: i 为试件单位面积的吸水量(mm); W 为累积吸水量(g); A 为试件截面积(mm^2); ρ 为水的密度(g/cm^3)。

$$i = b + S \cdot t^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: b 为常数; S 为试件的毛细吸水系数($\text{mm}/\text{min}^{1/2}$); t 为测定的时间间隔(min)。

根据试验测得的试件单位面积吸水量随时间的变化,可得到 $i \sim t^{1/2}$ 曲线,对该曲线进行线性拟合可得到斜率 S ,表示毛细吸水系数。

1.2.3 水化热测试

采用 TAM Air 量热仪测定砂浆试件对应配合比水泥浆体的水化热。进行测试的水泥浆体质量与其水胶比有关,按试验设计水胶比 0.4 对浆体进行拌和,拌和完成后取 16.33 g^[10] 的水泥浆体于试验瓶中开始测试。试验时试样的环境温度控制为 20 °C。

1.2.4 压汞试验

取养护至 28 d 龄期的试样,采用尖铁锤将试样破碎成 3~5 mm 的小块并采用异丙醇终止水化,之后将试样置于真空箱中干燥用于压汞测孔。压汞试验的压力范围为 0~227.51 MPa,对应的孔径测试范围为 0.005 5~120 μm 。

1.3 水化动力学参数计算

边界成核与增长模型(BNG)可用于计算水泥浆体的水化动力学参数^[13-14]。但 BNG 模型的应用基于以下两点假设:① 整个水化过程中颗粒的成核和增长速率是恒定的;② 水泥颗粒表面 CSH 凝胶的成核是随机的^[10]。根据 BNG 模型,一定时间下水化产物的体积分数可通过式(3)求得,计算得到的水化产物体积分数可用于表征水化程度 $\alpha(T)$ 。

$$\alpha(T) = X(T) = 1 - \exp\left\{-2pBGT\int_0^1\left[1 - \exp\left[\frac{-\pi N}{3}gG^2T^3(1-\mu)^2(1+2\mu)\right]\right]d\mu\right\}, \mu < 1 \quad (3)$$

式中: N 和 G 分别为水泥颗粒的成核速率、增长速率; p 为水泥颗粒向内增长和向外增长速率的比值; B 为单位体积固体颗粒的表面积; T 为水化时间;由于水泥颗粒的成核增长是各向异性的,将其切向方向的速率记为 gG ; μ 为虚拟变量。

水化时间为 T 时,水泥颗粒的水化程度可通过式(4)计算:

$$\alpha(T) = \frac{Q(T)}{Q_{\max}} \quad (4)$$

式中: $Q(T)$ 为 T 时刻的累积放热量; Q_{\max} 为水泥水化过程中的最大放热量。

水泥浆体的最大放热量等于水泥完全水化时各矿物组成的放热量之和^[15]。水泥中主要参与水化放热的矿物有 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 、 C_4AF 且其完全水化时的放热量分别为 510、260、1 100、410 J/g^[16-17]。根据表 2

所示的水泥矿物组成,可计算得单位质量水泥完全水化时的放热量为 443.679 J/g。

由于成核速率 N 和增长速率 G 是相互影响的,因此采用这两个参数分别表征水泥颗粒的成核与增长是比较困难的。基于此,在 N 和 G 的基础上引入 K_N 和 K_G 两个参数表征水泥颗粒的成核与增长速率。 K_N 、 K_G 通过式(5)、(6)计算:

$$K_N = \pi g G^2 N / 3 \quad (5)$$

$$K_G = \rho B G \quad (6)$$

式中: $1/(K_N)^{1/3}$ 为水泥颗粒边界的水化产物成核需要的时间; $1/K_G$ 为水化产物达到可形成“桥接”半径需要的时间。采用 K_N 、 K_G 表征水泥颗粒的水化程度,如式(7)所示,并根据式(7)拟合实测的水化程度曲线可得到水化产物成核速率 K_N 、增长速率 K_G 。

$$X(T) = 1 - \exp\left\{-2K_G T \int_0^1 \left\{1 - \exp[-K_N T^3(1-\mu)^2(1+2\mu)]\right\} d\mu\right\}, \mu < 1 \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 石灰石粉对砂浆强度的影响

图2为石灰石粉掺量、比表面积对水泥砂浆强度的影响。

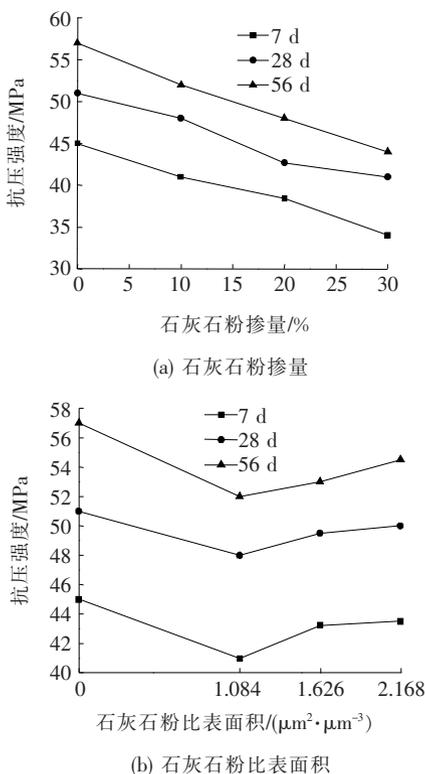


图2 石灰石粉对水泥砂浆强度的影响

由图2可以看到:掺入石灰石粉后砂浆的抗压强度降低且随石灰石粉掺量的增加,强度降低的幅度逐渐增大。7、28、56 d龄期,相比于未掺石灰石粉的砂浆,石灰石粉掺量增加到30%时砂浆的强度分别降低了24.4%、22.2%和28.9%,均超过20%。这主要与石灰石粉的稀释效应有关,石灰石粉比表面积不变的条件下,增加石灰石粉的掺量则降低了水泥用量,进而增大了水灰比,从而对强度有降低作用^[8]。图2(b)为石灰石粉比表面积对砂浆抗压强度的影响。可以看到:在石灰石粉掺量不变的条件下,虽然掺入石灰石粉降低了砂浆的强度,但增大石灰石粉的比表面积则对砂浆的强度有提高作用。石灰石粉比表面积由 $1.084 \mu\text{m}^2/\mu\text{m}^3$ 增加到 $2.168 \mu\text{m}^2/\mu\text{m}^3$ 时,7、28、56 d龄期砂浆的强度分别增加了6.1%、4.2%、4.8%。

2.2 水化热及水化动力学分析

水泥浆体水化过程中生成的水化产物是砂浆形成强度的重要组成部分^[18],因此对水泥浆体的放热过程进行量热测试,分析其水化进程,有助于分析对应砂浆强度的变化。图3为石灰石粉掺量对水泥浆体水化放热速率、累计放热量的影响。

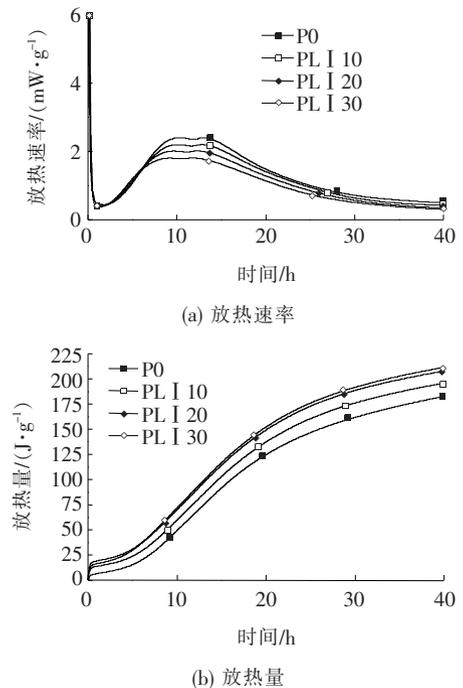


图3 石灰石粉掺量对水化放热速率和累积放热量的影响

由图3(a)可以看到:随石灰石粉掺量的增加,浆体的放热速率峰值逐渐降低且诱导期变长。这主要是因为石灰石粉的稀释效应减小了用于水化的水泥颗粒的数量,从而减小了水化产物量^[8]。随石灰石粉掺量的增加,石灰石粉的稀释效应越强,因此水化放热速率

逐渐降低。图 3(b) 为石灰石粉掺量对单位质量水泥累积水化热的影响, 由于研究的是单位质量水泥的累积水化热, 即排除了石灰石粉的稀释效应。可以看到: 随石灰石粉掺量的增加, 单位质量水泥的累积水化热逐渐增加, 这主要是因为石灰石粉的成核效应。掺入水泥浆体中的石灰石粉颗粒为生成的水化产物提供了成核位点, 从而促进了水泥的水化^[7], 进而增加了累积放热量。

图 4 为石灰石粉比表面积对水泥浆体水化放热速率和放热量的影响。由图 4(a) 可以看出: 掺入石灰石粉降低了水泥浆体的水化放热速率峰值, 但随石灰石粉比表面积的增加, 水化放热速率峰值逐渐增大; 由图 4(b) 可以看出: 随石灰石粉比表面积的增加, 单位质量水泥的累积水化热逐渐增大。在石灰石粉掺量一定的条件下, 石灰石粉比表面积越大, 比表面积越大, 则可用于提供水化产物结晶成核的位点越多, 成核效应越强, 进一步促进了水泥的水化。

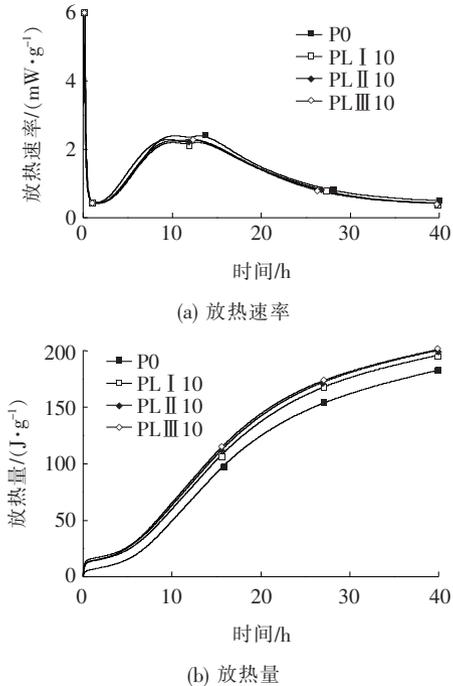


图 4 石灰石粉比表面积对水化放热速率和累积放热量的影响

水泥—石灰石粉浆体中水泥颗粒的水化主要表现为水化产物的成核和增长。BNG 模型可用于表征水泥产物的成核和增长, 该模型假设整个水化过程中水化产物的成核、增长速率是恒定的且水化放热主要来源于 C_3S 的放热, 水化产物的成核与增长从水泥颗粒与水接触时开始并在诱导期持续进行^[10,19]。根据各时刻水泥的放热量以及 1.3 节中计算的单位质量水泥

完全水化时的放热量, 可计算得到各时刻水泥—石灰石粉浆体的水化程度, 如图 5 所示。

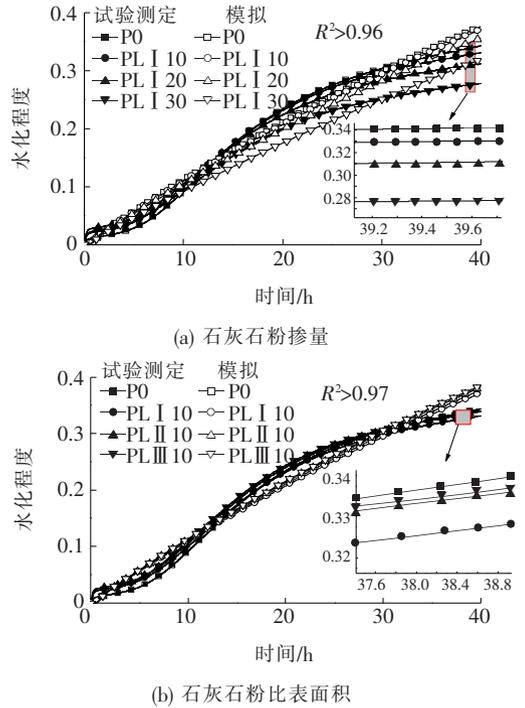


图 5 石灰石粉掺量、比表面积对水化程度的影响

采用 BNG 模型[式(7)]拟合试验测得的水泥—石灰石粉浆体水化程度曲线, 可得到相应的拟合曲线, 如图 5 所示。由图 5 可以看到: 整体上拟合曲线十分接近试验测得的水化程度曲线, 二者的相关系数 R^2 达到 0.96 以上, 表明 BNG 模型可用于表征水泥—石灰石粉浆体的水化进程。基于 BNG 模型拟合得到的成核速率 K_N 、增长速率 K_G 见表 4。

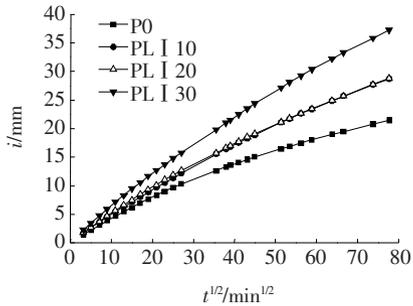
由表 4 可知: 掺入石灰石粉减小了水化产物的成核速率 K_N 、增长速率 K_G 且 K_N 、 K_G 随石灰石粉掺量的增加而减小, 随石灰石粉比表面积的增加而增大。成核速率 K_N 指的是单位体积浆体中水化产物覆盖水泥颗粒表面的速率, 增长速率 K_G 指的是单位体积浆体中水化产物填充颗粒间孔的速率^[19]。 K_N 越大, 则水泥颗粒表面水化产物成核的速率越大, 颗粒间形成 CSH 桥接的速率越大; K_G 越大, 则颗粒间 CSH 桥接生长的速率以及强度发展越快。砂浆混凝土等悬浮体硬化后的强度与水泥的主要水化产物 CSH 的数量和强度紧密相关。因此, 水化产物成核速率 K_N 、增长速率 K_G 的增大一定程度上解释了石灰石粉对砂浆强度的影响。

2.3 毛细吸水及孔结构分析

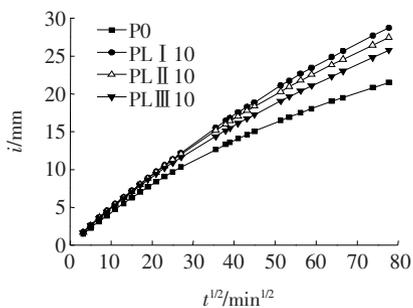
图 6 为石灰石粉掺量、比表面积对砂浆毛细吸水量的影响。

表4 水泥-石灰石粉浆体水化产物成核速率、增长速率

编号	试样	$K_N/$ (10^{-3}h^{-3})	$K_G/$ (h^{-1})	编号	试样	$K_N/$ (10^{-3}h^{-3})	$K_G/$ (h^{-1})
1	P0	0.104	0.004 88	4	PL I 30	0.047	0.003 41
2	PL I 0	0.068	0.004 00	5	PL II 10	0.072	0.004 40
3	PL I 20	0.061	0.003 85	6	PL III 10	0.074	0.004 72



(a) 石灰石粉掺量



(b) 石灰石粉比表面积

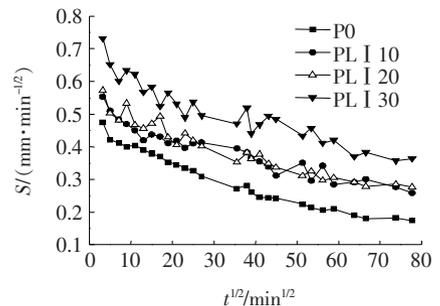
图6 石灰石粉对砂浆毛细吸水量的影响

由图6可以看出:砂浆试件单位面积的吸水量随时间的增加逐渐增大,但呈现出非线性增加的趋势。掺入石灰石粉增加了砂浆单位面积的吸水量且增大程度随石灰石粉掺量的增加而增大。与未掺石灰石粉的砂浆相比,吸水100 h时石灰石粉掺量10%、20%和30%的砂浆单位面积吸水量分别增加了33.6%、34.2%和73.5%。石灰石粉增加至30%时砂浆的单位面积吸水量显著增加,而石灰石粉掺量为10%和20%时砂浆的单位面积吸水量差别不大。图6(b)为石灰石粉比表面积对砂浆单位面积吸水量的影响。掺入石灰石粉虽增大了砂浆单位面积的吸水量,但随石灰石粉比表面积的增加砂浆单位面积吸水量逐渐减小。相比于未掺石灰石粉的砂浆,吸水100 h时掺10%的比表面积 $2.168 \mu\text{m}^2/\mu\text{m}^3$ 的石灰石粉,砂浆单位面积吸水量增加20.0%,远低于掺10%的比表面积 $1.084 \mu\text{m}^2/\mu\text{m}^3$ 的石灰石粉砂浆。

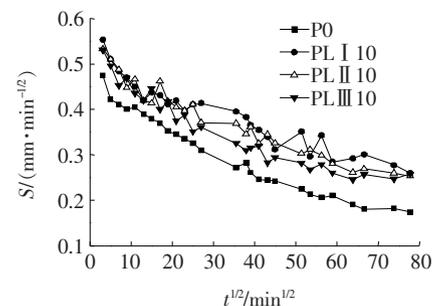
砂浆混凝土的毛细吸水量与其内部孔隙的数量、

大小等参数紧密相关,毛细吸水量大一定程度表明砂浆内部的孔隙多、孔隙大^[20],而孔隙的数量、大小等孔结构特征对砂浆的抗压强度有重要的影响,因此研究砂浆的毛细吸水量对研究其强度的变化有重要的参考意义。水泥水化过程中,原来的充水空间逐渐被水化产物CSH凝胶等固相填充,未被水化产物填充的空间称为毛细孔^[21]。结合图5和表4可知,掺入石灰石粉后,水泥砂浆的成核速率、增长速率降低且随石灰石粉掺量的增加而增大,随石灰石粉比表面积的增加而减小,即生成的水化产物较少及其增长速率较低,这与图6得到的砂浆毛细吸水量随石灰石粉掺量、比表面积变化的规律是一致的。

图7为石灰石粉对砂浆毛细吸水系数的影响。



(a) 石灰石粉掺量



(b) 石灰石粉比表面积

图7 石灰石粉对砂浆毛细吸水系数的影响

由图6可知:砂浆毛细吸水量随时间的增加呈非线性增长,与式(2)描述的线性增长并不一致,这主要是因为没有考虑重力对吸水过程的影响^[20]。当考虑重力影响时,可采用指数函数描述毛细吸水量与时间

平方根的关系, $W = a[1 - \exp(-b\sqrt{t})]$, 对该式进行求导则可得到毛细吸水系数与时间平方根的关系, $S(t) = c \exp(-b\sqrt{t})$, 可以看到毛细吸水系数并非常数, 而是随时间呈指数变化的函数, 如图 7 所示。由图 7 可知: 当吸水时间达到 100 h 时, 各石灰石粉砂浆的吸水系数逐渐达到稳定, 即吸水速率逐渐保持不变。此外, 砂浆的毛细吸水系数随石灰石粉掺量的增加而增大, 随石灰石粉比表面积的增加而减小, 这与图 6 得到的结论是相同的。

正如前文所述, 孔隙的数量、大小等孔结构特征决定了砂浆试件的毛细吸水量, 进而影响了砂浆的抗压强度等宏观性能^[1], 研究清楚砂浆内部孔结构的特征可为其抗压强度的变化提供可靠的依据。压汞法由于其所测孔径范围广泛、操作简便、测试速度较快以及测试结果直观等优点使得其成为测量水泥基材料孔结构最常用的技术手段之一^[22]。

空隙率和可几孔孔径是常用的表征孔结构特征的参数。图 8 为石灰石粉对砂浆空隙率以及最可几孔孔径的影响。由图 8 可以看到: 掺入石灰石粉后, 砂浆的空隙率和最可几孔孔径均增大。同时, 空隙率和最可几孔孔径随石灰石粉掺量的增加而增大, 随石灰石粉比表面积增加而减小, 但比表面积从 $1.626 \mu\text{m}^2/\mu\text{m}^3$ 增加至 $2.168 \mu\text{m}^2/\mu\text{m}^3$ 时, 空隙率和最可几孔孔径变化较小。

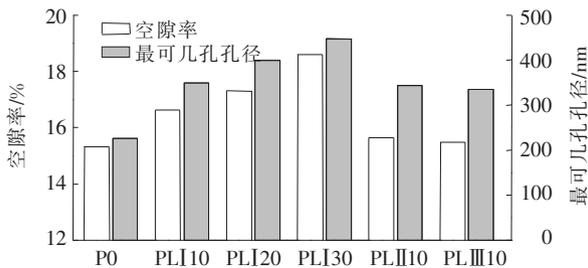


图 8 石灰石粉对砂浆空隙率以及最可几孔孔径的影响

为了进一步分析石灰石粉对砂浆孔结构特征的影响, 将砂浆内部的孔按孔径大小分为凝胶孔 ($0 \sim 10 \text{ nm}$)、过渡孔 ($10 \sim 100 \text{ nm}$)、毛细孔 ($100 \sim 1000 \text{ nm}$) 和大孔 ($>1000 \text{ nm}$)^[23], 研究石灰石粉对不同孔径范围内的孔隙率的影响, 结果见图 9。由图 9 可知: $10 \sim 100 \text{ nm}$ 范围内的毛细孔的空隙率最大, $>1000 \text{ nm}$ 范围的大孔的空隙率最小。整体上, 掺入石灰石粉使各类孔的空隙率均增大, 增加石灰石粉掺量增大了各类孔的空隙率, 而增大石灰石粉比表面积对空隙率有减小作用。石灰石粉对 $100 \sim 1000 \text{ nm}$ 范围内孔的空

隙率影响最大, 如石灰石粉掺量增加至 30% 时, $0 \sim 10$ 、 $10 \sim 100$ 、 $100 \sim 1000$ 、 $>1000 \text{ nm}$ 类孔的孔隙率分别增加了 35.5%、4.6%、107.8% 和 33.3%。结合图 2、8 和图 9 可知: 空隙率、最可几孔孔径等参数随石灰石粉掺量、比表面积的变化规律与抗压强度一致, 石灰石粉对空隙率等参数的增大作用导致了抗压强度的降低。

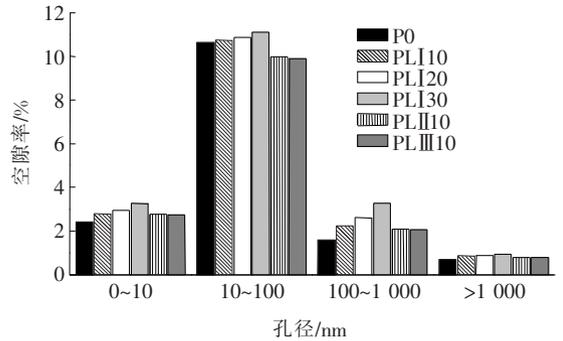


图 9 石灰石粉对砂浆不同孔径空隙率的影响

3 结论

(1) 掺入石灰石粉, 砂浆的抗压强度降低且随石灰石粉掺量的增加而降低, 石灰石粉掺量增加至 30% 时, 7、28、56 d 龄期砂浆的抗压强度降低均超过了 20%; 随石灰石粉比表面积的增加, 砂浆抗压强度逐渐增大, 石灰石粉比表面积由 $1.084 \mu\text{m}^2/\mu\text{m}^3$ 增加到 $2.168 \mu\text{m}^2/\mu\text{m}^3$ 时, 7、28、56 d 龄期砂浆的强度分别增加了 6.1%、4.2%、4.8%。

(2) 掺入石灰石粉减小了水泥浆体的水化热、水化产物成核速率 K_N 、增长速率 K_G , 且其随石灰石粉掺量的增加而减小, 随石灰石粉比表面积的增加而增大。

(3) 掺入石灰石粉, 砂浆的毛细吸水系数、空隙率及最可几孔孔径增大且其随石灰石粉掺量、比表面积的变化规律与抗压强度一致。石灰石粉对砂浆空隙率等的增大作用导致了抗压强度的降低。

参考文献:

- [1] HOSAN Anwar, SHAIKH Faizuddinahmed. Compressive Strength Development and Durability Properties of High Volume Slag and Slag-Fly Ash Blended Concretes Containing Nano- CaCO_3 [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 10: 1 310-1 322.
- [2] PHAM Vantoan, MENG Phalkong, BUI Phuongtrinh, et al. Effects of Shirasu Natural Pozzolan and Limestone

- Powder on the Strength and Aggressive Chemical Resistance of Concrete[J]. *Construction & Building Materials*, 2020, 239:117-679.
- [3] KLATHAE Tawich, TRAN Trinhnhatho, MEN Sambath, et al. Strength, Chloride Resistance, and Water Permeability of High Volume Sugarcane Bagasse Ash High Strength Concrete Incorporating Limestone Powder[J]. *Construction & Building Materials*, 2021, 311:125-326.
- [4] LI Chenzhi, JIANG Linhua. Utilization of Limestone Powder as an Activator for Early-Age Strength Improvement of Slag Concrete[J]. *Construction & Building Materials*, 2020, 253:119-257.
- [5] WANG Dehui, SHI Caijun, FARZADNIA Nima, et al. A Review on Effects of Limestone Powder on the Properties of Concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 192:153-166.
- [6] BOSILJKOV Violetabokan. SCC Mixes with Poorly Graded Aggregate and High Volume of Limestone Filler[J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(9):1-279-1-286.
- [7] KADRI Eh, AGGOUN S, De SCHUTTER G, et al. Combined Effect of Chemical Nature and Fineness of Mineral Powders on Portland Cement Hydration[J]. *Materials and Structures*, 2010, 43(5):665-673.
- [8] COURARD Luc, MICHEL Frédéric. Limestone Fillers Cement Based Composites: Effects of Blast Furnace Slags on Fresh and Hardened Properties[J]. *Construction & Building Materials*, 2014, 51:439-445.
- [9] WANG Dehui, SHI Caijun, FARZADNIA Nima, et al. A Review on Use of Limestone Powder in Cement-Based Materials: Mechanism, Hydration and Microstructures [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 181:659-672.
- [10] HUANG Hai, HUANG Tingjie, YUAN Qiang, et al. Temperature Dependence of Structural Build-Up and its Relation with Hydration Kinetics of Cement Paste[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 201:553-562.
- [11] 中国建筑材料科学研究院水泥科学与新型建筑材料研究所. 水泥胶砂强度检验方法(ISO法):GB/T 17671-1999[S]. 北京:中国标准出版社, 1999.
- [12] HALL C. Water Sorptivity of Mortars and Concretes: A Review [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1989, 41(147):51-61.
- [13] THOMAS Jeffrey. A New Approach to Modeling the Nucleation and Growth Kinetics of Tricalcium Silicate Hydration[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2007, 90(10):3-282-3-288.
- [14] SCHERER Georgew, ZHANG Jie, THOMAS Jeffrey. Nucleation and Growth Models for Hydration of Cement [J]. *Cement and Concrete Research*, 2012, 42(7):982-993.
- [15] LAWRENCE Philippe, CYR Martin, RINGOT Erick. Mineral Admixtures in Mortars [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(12):1-939-1-947.
- [16] Van BREUGEL K. Simulation of Hydration and Formation of Structure in Hardening Cement-Based Materials [D]. Delft University, 1991.
- [17] HYDRATION Odleri. Setting and Hardening of Portland Cement [J]. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 1998.
- [18] ROUSSEL N, OVARLEZ G, GARRAULT S, et al. The Origins of Thixotropy of Fresh Cement Pastes [J]. *Cement and Concrete Research*, 2012, 42(1):148-157.
- [19] MOSTAFA Ahmedm, YAHIA Ammar. Physico-Chemical Kinetics of Structural Build-Up of Neat Cement-Based Suspensions [J]. *Cement and Concrete Research*, 2017, 97:11-27.
- [20] 鲍玖文, 胡文文, 张鹏, 等. 有机硅憎水剂对混凝土强度与毛细吸水性能的影响 [J]. *硅酸盐学报*, 2020, 48(10):1-644-1-652.
- [21] POWERS Tc. Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1958, 41(1):1-6.
- [22] RÜBNER Katrin, HOFFMANN Dirk. Characterization of Mineral Building Materials by Mercury-Intrusion Porosimetry [J]. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2006, 23(1):20-28.
- [23] 郭剑飞. 混凝土孔结构与强度关系理论研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2004.