

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.057



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



石灰石粉掺量及细度对水泥水化进程的影响 及其动力学分析

赵舶汛^{1,2}, 孙华敏¹, 谭勇², 苗超杰², 吴浩³, 余林文¹

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆渝湘复线高速公路有限公司, 重庆 401147; 3. 中铁四局集团有限公司第六工程分公司, 西安 710082)

摘要: 为探究不同掺量与细度的石灰石粉对水泥浆体水化行为的影响规律, 为优化石灰石粉在水泥基材料中的应用提供理论依据, 采用微热量仪对含不同掺量和细度石粉的水泥浆体进行水化热分析, 并基于 Krstulović-Dabić 模型得到实际水化反应速率曲线和各阶段理论水化反应速率曲线, 计算反应程度、反应级数和 NG、I、D 阶段的反应速率常数等反应动力学相关参数, 分析石灰石粉掺量和细度对水泥水化的影响。结果表明: 当掺量在 0%~35% 范围内, 细度在 465~665 m²/kg 范围内, 随着石粉掺量和细度的增大, 水泥水化反应速率加快, 水泥水化放热峰值增大、峰值出现的时间提前, 当石粉掺量为 35% 时, 峰值提升 26.2%、提前 3.17 h; 水泥水化 NG 过程(结晶成核与晶体生长过程)反应程度增大。石灰石粉的掺入和细度的提高, 在提高初期水化反应速率的同时, 会导致水泥的后期水化反应受限。

关键词: 石灰石粉; 掺量; 细度; 水泥水化进程; 水化放热速率; 水化动力学

中图分类号: TQ172.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-09

The influence and kinetic analysis of limestone powder dosage and fineness on cement hydration process

ZHAO Boxun^{1,2}, SUN Huamin¹, TAN Yong², MIAO Chaojie², WU Hao³, YU Linwen¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Chongqing Yuxiang Expressway Co., Ltd., Chongqing 401147, P. R. China; 3. The Sixth Engineering Branch of China Railway Fourth Bureau Group Co., Ltd., Xi'an 710082, P. R. China)

Abstract: This study aims to investigate the effects of varying dosages and fineness of limestone powder on the hydration behavior of cement paste, providing a theoretical basis for optimizing the application of limestone powder in cement-based materials. In this study, a microcalorimeter was used to analyze the hydration heat of cement pastes with different contents and fineness of limestone powder. Based on the Krstulović-Dabić model, the actual hydration reaction rate curve and the theoretical hydration reaction rate curve of each stage were obtained. The reaction kinetics related parameters including degree of reaction, reaction order, and reaction rate

收稿日期: 2025-01-06

基金项目: 重庆市交通科技项目(CQJT2022ZC15)

作者简介: 赵舶汛(1985-), 女, 高级工程师, 主要从事公路工程研究, E-mail: 614363618@qq.com。

余林文(通信作者), 男, 副教授, 博士生导师, E-mail: linwen.yu@cqu.edu.cn。

Received: 2025-01-06

Foundation items: Chongqing Transportation Research Program (No. CQJT2022ZC15)

Author brief: ZHAO Boxun (1985-), senior engineer, main research interest: highway engineering, E-mail: 614363618@qq.com.

YU Linwen (corresponding author), associate professor, doctoral supervisor, E-mail: linwen.yu@cqu.edu.cn.

constants for the NG, I, and D stages were calculated to analyze the influence of limestone powder content and fineness on cement hydration. Experimental results demonstrate that within the limestone powder dosage range of 0%-35% and specific surface area of 465~665 m²/kg, the correlated increase in both parameters enhances cement hydration kinetics, resulting in both elevated hydration heat peaks and accelerated peak occurrence. When the limestone powder content is 35%, the peak increases by 26.2% and occurs 3.17 hours earlier. Additionally, the reaction degree of the NG process (crystallization nucleation and crystal growth process) of cement hydration increases. The addition of limestone powder and the increased fineness enhance the early hydration reaction rate, while leading to a limited hydration degree in the later-stage.

Keywords: limestone powder; content; fineness; cement hydration process; heat flow of hydration; hydration kinetics

矿物掺合料是混凝土重要组成材料之一,对混凝土的工作性能、力学性能和耐久性均有重要影响,且在大体积混凝土中使用矿物掺合料还能调节混凝土的温控,对于保证工程质量具有重要意义。此外,矿物掺合料大部分是工业副产品或废弃物,同时可以取代部分水泥,这些材料的使用既能实现工业副产品和废弃物的利用,又能降低建材行业碳排放,具有显著的环境效益。然而,优质矿物掺合料资源有限,因此其他替代性矿物掺合料的使用越来越得到重视。例如,石灰石粉、煅烧黏土、粉煤灰等均得到了广泛研究。

石材开采和机制砂石骨料生产过程中会产生大量的石灰石粉,但骨料标准《建设用砂》对机制砂中石粉含量有严格限制,这些石灰石粉难以利用^[1],其堆积对资源和环境造成极大的影响。因此,石灰石粉作为矿物掺合料对水泥基材料性能的影响研究受到了广泛关注,且普遍发现石粉掺量及细度具有重要影响。研究表明^[2-8]石灰石粉通过提供大量的成核位点来加速水泥水化,石粉的加入使水泥水化放热量和放热速率提高,水化的加速期提前,第一放热峰升高并前移;石粉细度越大,对水泥水化的促进作用越显著^[8-9]。也有研究表明^[10],石粉促进水泥早期水化,而减缓后期水化,水灰比较高时,早期水化产物随石粉掺量的增加而增加。

Krstulović 等^[11]认为水泥的水化反应由 3 个基本过程组成,即成核与晶体生长过程(NG 过程)、相边界反应过程(I 过程)和扩散过程(D 过程)。很多学者^[12-15]利用 Krstulović-Dabić 模型对不同胶凝材料体系的水化动力学进行了分析研究,基于水泥水化各阶段理论与实际水化反应速率曲线,结合动力学相关参数,即可得出不同条件下水泥的水化特性和水化反应机理,如根据反应速率常数 K 值可以比较水化反应各阶段反应速率大小,根据各阶段水化程度可对比得出水泥水化历程的转变特征等。

不同掺量和细度的石粉会对水泥水化进程产

生不同的影响,但多数研究仅根据水化放热量与水化放热速率进行分析^[16-18]。为深入探究石粉对水泥水化的影响,笔者基于 Krstulović-Dabić 模型,通过水化热测试并结合相关水化动力学参数进行对比分析,更系统全面地探究石粉掺量与细度对水泥水化进程的影响。

1 实验

1.1 原材料

为排除水泥中其他矿物掺合料的影响,实验采用基准水泥(P·I 42.5 硅酸盐水泥),其密度为 3.10 g/cm³,比表面积为 352 m²/kg,主要化学组成(质量分数)见表 1,主要矿物组成和砂浆力学强度分别如表 2 和表 3 所示,图 1 为水泥 XRD 图谱。

表 1 水泥主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of cement

%					
CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃
62.3	3.73	3.66	4.16	21.18	1.81

表 2 水泥的主要矿物组成

Table 2 The main mineral phase composition of cement

%			
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
59.33	18.76	6.37	10.03

表 3 水泥砂浆力学强度

Table 3 The mortar mechanical strength of cement

抗折强度/MPa			抗压强度/MPa		
3d	7d	28d	3d	7d	28d
5.5	7.0	8.8	27.4	36.6	51.2

实验采用石灰石粉来自重庆钮龙新型材料有限公司,密度为 2.68 g/m³,需水量比为 101%,MB 值为 0.8,比表面积为 332 m²/kg,其主要化学组成(质量分数)见表 4,XRD 图谱如图 2 所示。使用 WZM-实验球磨机将原石灰石粉磨细,设定工作时

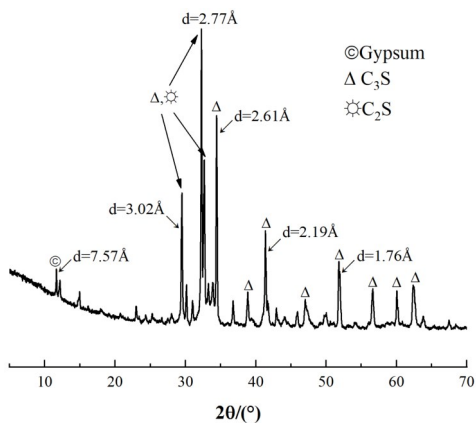


图 1 水泥的 XRD 谱

Fig. 1 X-ray diffraction patterns of cement

间分别为 2、3、5、6 h,测得磨细后石灰石粉的比表面积分别为 465、572、665 m²/kg。

拌和用水为自来水。

表 4 石灰石粉主要化学成分

Table 4 The main chemical composition of limestone powder

%				
CaCO ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O
92.34	0.49	1.22	4.05	0.12

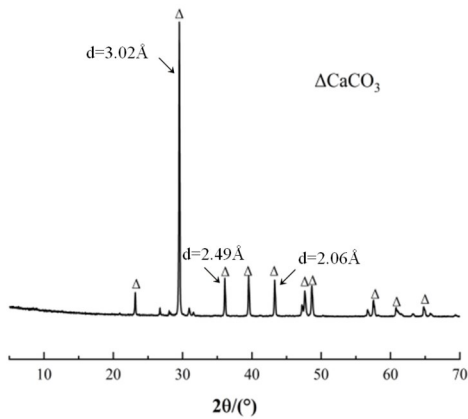


图 2 石灰石粉的 XRD 谱

Fig. 2 X-ray diffraction patterns of limestone powder

1.2 配合比

实验采用的配合比如表 5 所示。水胶比为 0.4。表 5 中 A、B、C、D 分别代表比表面积分别为 332、465、572、665 m²/kg 的石灰石粉。A-5 代表掺入 5% 比表面积为 332 m²/kg 的石灰石粉的浆体,其他组别以此类推。

1.3 测试方法

采用美国 TAM Air-八通道微量热仪对表 5 中各配合比的水泥浆体进行水化热测试。按配合比称取的水泥与石灰石粉的总质量为 50 g,水为 20 g,实验开始时须一次性将水加入胶凝材料中搅拌 1 min 至浆体均匀,称取其中 15 g 浆体放入预先稳定

表 5 净浆配合比

Table 5 Mix proportion of cement paste

组别	石灰石粉/%	水泥/%	水胶比
Base-0	0	100	0.4
A-5, B-5, C-5, D-5	5	95	0.4
A-15, B-15, C-15, D-15	15	85	0.4
A-25, B-25, C-25, D-25	25	75	0.4
A-35, B-35, C-35, D-35	35	65	0.4

的微量热仪通道内进行测试。称量精度为 0.01 g。

2 结果与讨论

2.1 石灰石粉对放热速率和放热量的影响

2.1.1 石灰石粉掺量对水泥水化速率的影响

图 3 为石灰石粉掺量对单位质量水泥水化速率的影响。由图 3 可以看出,石粉掺量越大,水泥水化速率越快,水化放热速率峰值越大,随着石粉掺量增加,水化放热峰值出现的时间均呈现较为明显的前移走势,说明石粉可加快水泥水化放热速率,促进水泥水化,这与先前的研究结果一致^[14]。图 4 为石灰石粉掺量对单位质量掺石灰石粉水泥的水化速率的影响,石粉掺量的增大使得胶凝材料体系总体的放热速率降低,说明石粉自身对体系水化放热速率的贡献很小,体系放热主要来源于水泥的水化反应。图 5 为石灰石粉掺量对单位质量水泥累计放热量的影响,由图 5 可以看出,随着石粉掺量的增加,单位质量水泥的累计放热量是增加的。

各配比浆体的放热速率峰值和出现时间如图 6 所示。总体来看,随着石粉掺量的增大,水化速率峰值及其出现的时间几乎呈线性变化。其中,掺入 35% 比表面积为 665 m²/kg 的 D 组石粉的浆体水化速率峰值为 3.76 mW/g,相比于基准组(2.98 mW/g)峰值提升了 26.2%,同时水化速率峰值出现的时间也从 12.50 h 缩短至 9.33 h,提前了 3.17 h。

2.1.2 石灰石粉细度对水泥水化速率的影响

通过对比图 3 中同一颜色的线条可以看出,在相同掺量下,随着石粉细度增大,水泥水化放热速率峰值呈增大趋势,峰值出现的时间逐渐提前,说明石粉细度的增长加快了水泥水化进程。

当石粉掺量为 5% 时(蓝色虚线),掺入细度较小的石粉 A 与 B 时(图 4(a)和 4(b)),单位质量胶材的放热速率低于基准组;在掺入细度较大的石粉 C 与 D 时(图 4(c)和 4(d)),单位质量胶材的放热速率峰值甚至高于基准组,说明此时石粉对水泥水化的加速作用弥补了水泥量减少对体系放热速率的不利影响,进一步证实了石粉细度的增大可加快水泥水化速率。

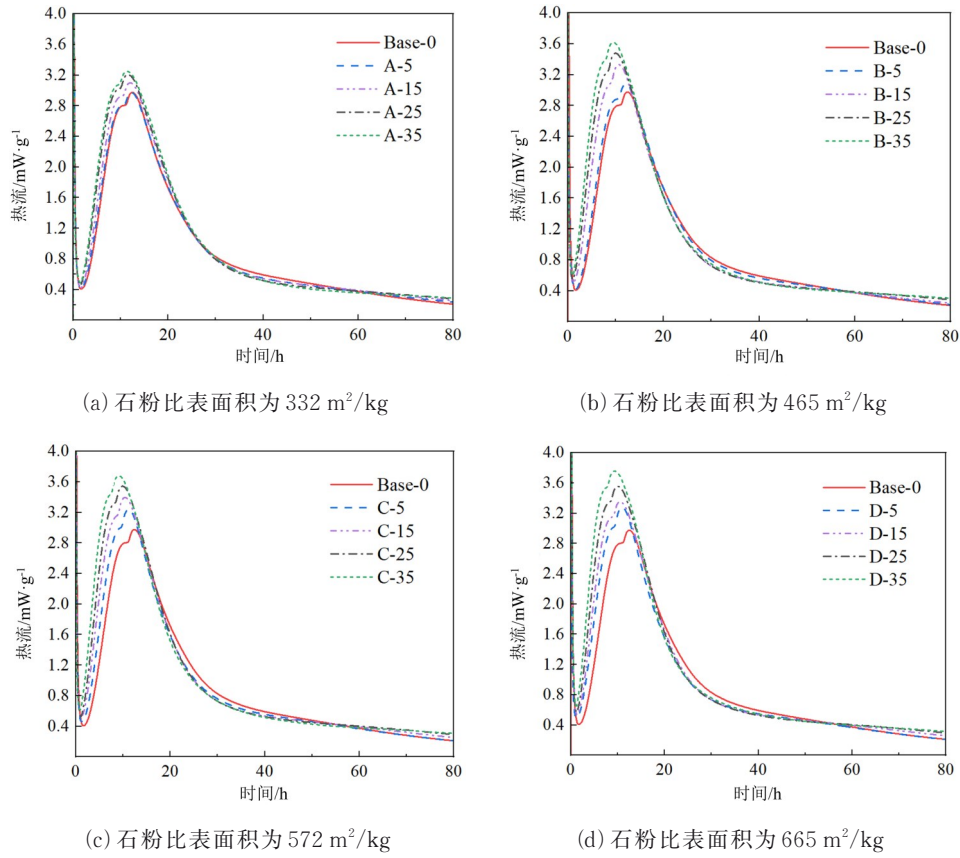


图 3 石粉掺量对单位质量水泥的水化放热速率的影响

Fig. 3 Effect of limestone powder content on the hydration rate of cement per unit mass

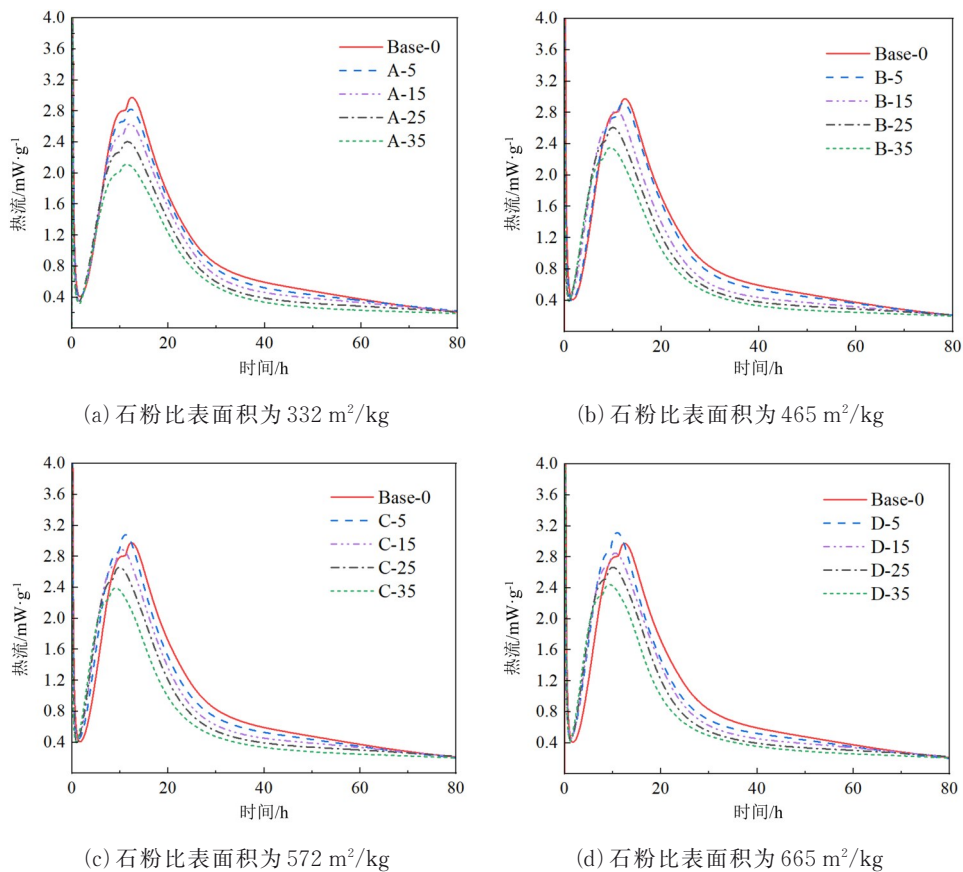


图 4 石粉掺量对单位质量掺石灰石粉水泥的水化放热速率的影响

Fig. 4 Effect of limestone powder content on the hydration rate of cement containing limestone per unit mass

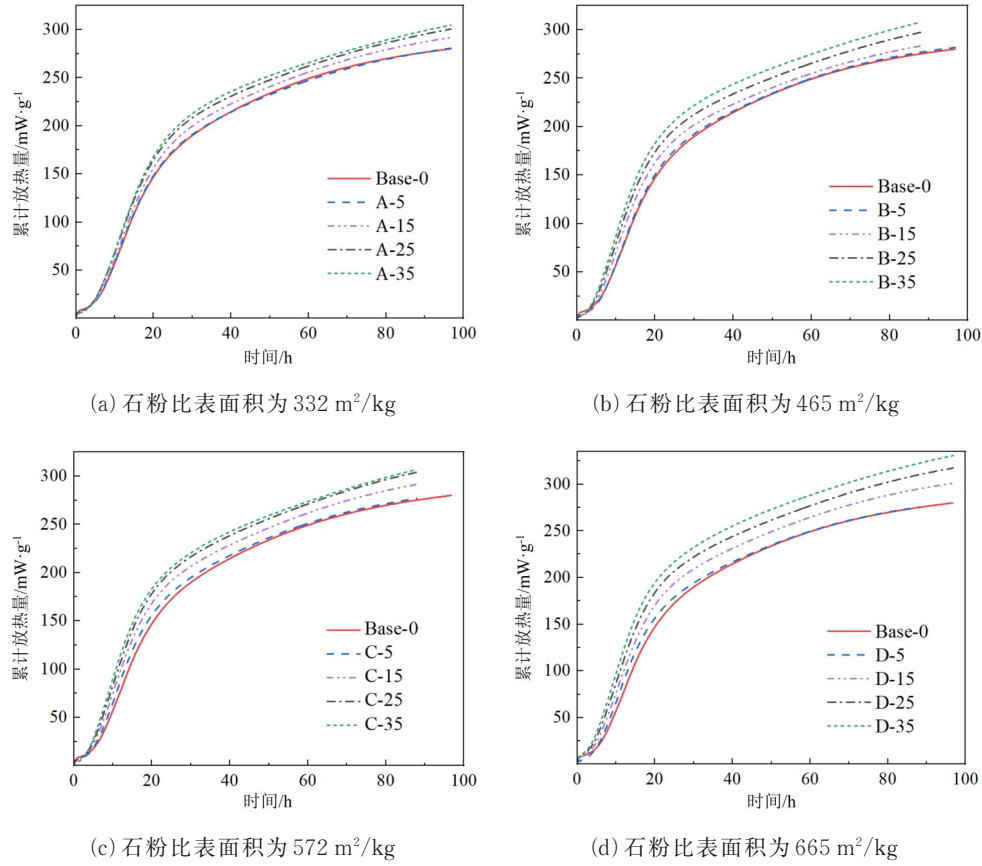


图5 石粉掺量对单位质量水泥的水化累计放热量的影响

Fig. 5 Effect of limestone powder content on the cumulative heat release of cement per unit mass

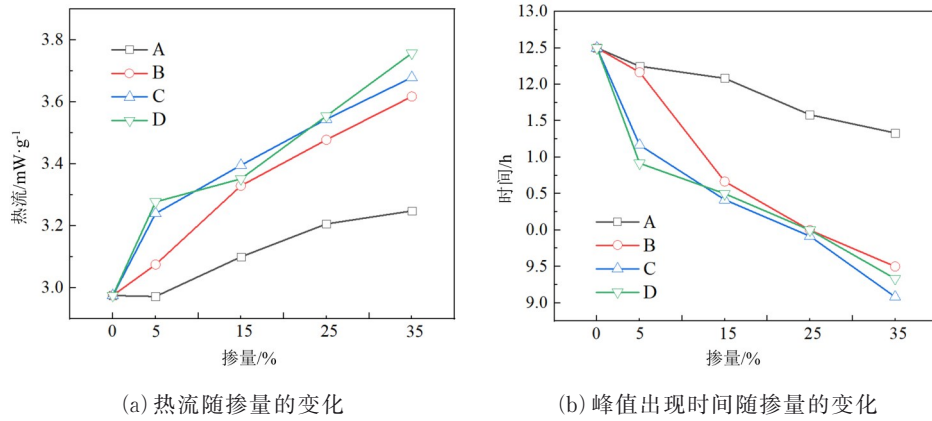


图6 石灰石粉对水泥水化放热峰值及出现时间的影响

Fig. 6 Effect of limestone powder on the (a) peak hydration rate and (b) occurrence time of peak hydration rate

具体的放热峰值速率变化和出现的时间如图6所示。掺入比表面积最小的石粉A时,虽然相对于基准组有一定的加速水化作用,但相比于B、C、D组,水化放热速率峰值明显较小,峰值出现的时间明显较晚,掺量为5%时,A、D组的水泥水化放热峰值分别为 2.97 、 3.28 mW/g ,出现时间分别为 12.25 、 10.92 h ,说明石粉细度对水泥水化的影响不容忽视,掺量仅为5%时就显现出较大差异。

2.2 水泥水化过程的动力学分析

2.2.1 水化反应速率曲线分析

根据水化热实验数据对 Krstulović-Dabić 模型中相关动力学参数进行求解,将各阶段反应方程中的反应程度 α 对时间 t 求导,如式(1)~式(3)所示,将求得的参数代入,即可得到各阶段反应速率曲线。

NG 过程:

$$\frac{d\alpha}{dt} = F_{NG}(\alpha) = K_{NG} n (1 - \alpha) [-\ln(1 - \alpha)]^{n-1/n} \quad (1)$$

I 过程:

$$\frac{d\alpha}{dt} = F_I(\alpha) = 3K_I (1 - \alpha)^{2/3} \quad (2)$$

D 过程:

$$\frac{d\alpha}{dt} = F_D(\alpha) = \frac{3}{2} K_D (1 - \alpha)^{2/3} [1 - (1 - \alpha)^{1/3}] \quad (3)$$

式中: α 为反应程度; n 为反应级数; K_{NG} 、 K_I 、 K_D 分别为 NG、I、D 阶段的反应速率常数。

将水泥水化各阶段 $\alpha \sim d\alpha/dt$ 的水化速率曲线分别表示为 $F_{NG}(\alpha)$ 、 $F_I(\alpha)$ 和 $F_D(\alpha)$, 结合实际水化反应速率曲线 $F(\alpha)$, 结果如图 7 所示。当实际水化反应速

率曲线与理论水化反应速率曲线重合时, 意味着在该阶段水化反应进程基本按照理论模型的预期进行, 且反应速率达到理论值, 未发生明显的偏离或异常。 $F_{NG}(\alpha)$ 和 $F_I(\alpha)$ 、 $F_D(\alpha)$ 和 $F_I(\alpha)$ 之间的交点代表反应从前一过程转化到下一过程的临界状态, 对应的水化程度为对应的临界反应程度, 分别用 α_1 和 α_2 表示 (如图 7 所示), α_0 表示水化加速期对应的反应程度。水化反应不是单一的过程, 其有复杂且多样化的水化反应机制^[14]。水化初期水化产物较少且自由水充足, 主要为结晶成核与晶体生长过程 (NG 过程); 后期水化产物增多, 离子迁移受到阻碍, 反应转变为相边界反应阶段 (I 过程) 或扩散阶段 (D 过程)。

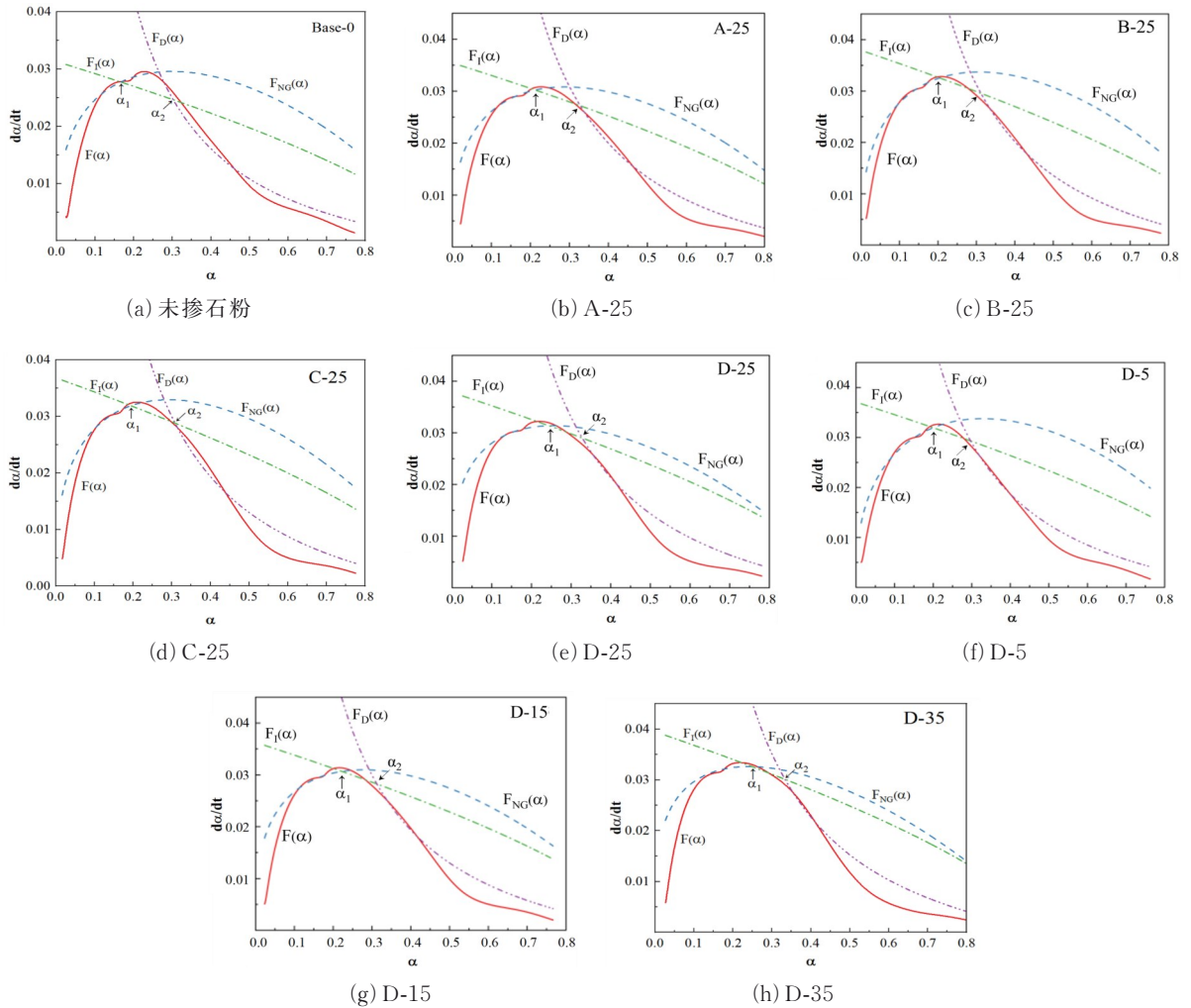


图 7 水泥水化各阶段的反应速率曲线

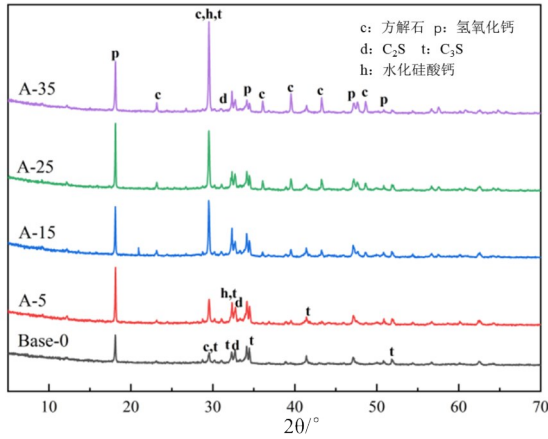
Fig. 7 Reaction rate curves of different stages of cement hydration

石粉的掺入使水化机理逐渐发生改变, 从图 7 (a) 可知, 基准组水化反应速率曲线与 NG-D 过程的曲线吻合性较好; 石粉掺入后水泥水化接近 NG-I-D 类型水化反应历程。已有研究表明^[14], 当石灰石粉掺量为 50% 时, 水化迅速由 NG 过程向 I 过程转变。

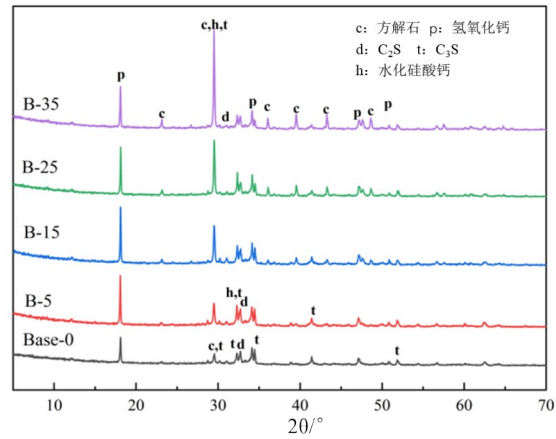
出现这种现象的原因为: 1) 由于石粉的吸水效应, 随着石粉掺量的提高, 浆体的实际水胶比减小。基准组水胶比较大, 早期浆体中自由水充足, 水化产物在短期内大量生成, 离子迁移的势垒剧增, 反应直接转由 D 过程控制。2) 石粉掺入后水泥含量减

少,水化产物总量减少。图8为不同石粉掺量的水泥净浆在标准养护1 d龄期时的XRD图谱。从图8可以看出,随着石粉掺量增大, CaCO_3 衍射峰强度明显增强,同时生成的水化产物如 18° 处的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 峰

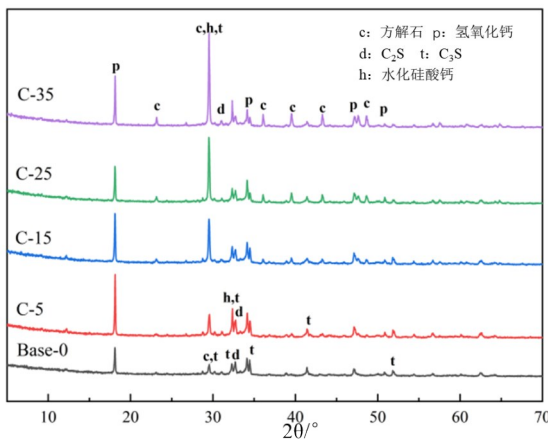
比基准组强。3)石粉为水化产物提供了成核位点,未水化水泥颗粒外的水化产物包裹层相对较薄。因此随着石粉掺量和细度的增大,I过程的拟合曲线与实际曲线愈来愈接近。



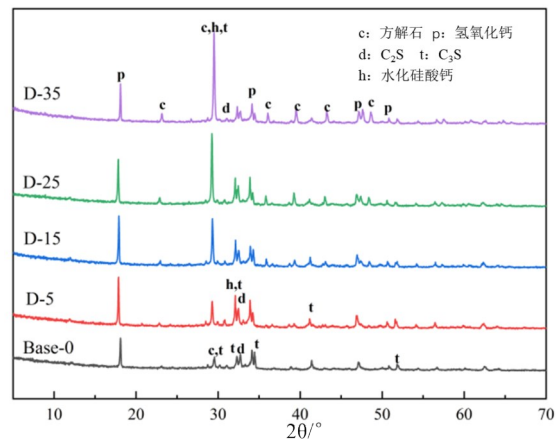
(a) 石粉比表面积为 $332 \text{ m}^2/\text{kg}$



(b) 石粉比表面积为 $465 \text{ m}^2/\text{kg}$



(c) 石粉比表面积为 $572 \text{ m}^2/\text{kg}$



(d) 石粉比表面积为 $665 \text{ m}^2/\text{kg}$

图8 不同石粉掺量净浆试件1 d龄期时的XRD谱

Fig. 8 X-ray diffraction patterns of cement paste with different limestone powder contents at 1 d

2.2.2 水化动力学相关参数分析

表6为水化各阶段动力学相关参数。 $\Delta\alpha_{\text{NG}}$, $\Delta\alpha_{\text{I}}$, $\Delta\alpha_{\text{D}}$ 分别表示NG、I和D过程的反应程度。可以看出,不同反应阶段的K值大小明显不同,NG过程的K值约为D过程的20倍,约为I过程的3倍,说明NG过程的化学反应速度较大。I过程也随着细度的增加而减小,这表明细度加速了I过程^[19]。整体来看,随着石灰石粉掺量和细度增大,三个反应过程的反应速率常数总体均呈增大趋势,说明石粉可加快水泥水化速率。

从表6中数据可以看出,NG与I过程的反应程度都很小,大部分水化反应发生在D过程,这是因为胶凝材料凝结硬化较快,在短期内可生成大量水化产物,NG与I过程反应受阻,而水泥水化反应持

续时间较长,未水化的水泥颗粒在后期只能通过扩散作用水化,所以D过程反应程度最大。

石粉掺量和细度的提高使NG阶段的反应程度逐渐增大,这是因为此时石粉的晶核作用加强,加速水泥水化,单位质量水泥的水化产物生成量增加。I过程的反应程度随着石粉掺量和细度的增加而降低。I过程主要发生在水泥颗粒的水化产物层,新生成的水化产物打破已有的水化产物包裹层,直至包裹层厚度过大无法打破^[10],由于NG阶段的反应程度提高,可发生相边界反应的水泥的量减少,所以I过程反应程度减小。这一现象表明,石灰石粉的掺入和细度的提高改善了水泥的水化反应的初期阶段(即I过程),使得实际反应速率更接近理论模型。这可能是由于石灰石粉对水泥水化过

程的促进作用,尤其是在初期阶段,增强了水化反应的反应速率。然而,尽管I过程曲线趋于理论曲线,反应程度逐渐减小,这表明石灰石粉的掺入导致后续水化速率的降低。这说明石灰石粉掺量和细度的提高在优化初期水化反应速率的同时,可能

导致水泥的后期水化反应受限。因此,合理控制石灰石粉的掺量和细度对水泥的整体水化性能非常重要,以平衡水化反应的各个阶段,确保水泥的最终强度和耐久性。

表 6 水泥水化过程动力学相关参数

Table 6 Parameters related to kinetics of cement hydration process

组别	NG		K_I	K_D	α_0	α_1	α_2	$\Delta\alpha_{NG}$	$\Delta\alpha_1$	$\Delta\alpha_D$	水化机理
	n	K_{NG}									
Base-0	1.551 53	0.039 3	0.010 44	0.002 35	0.025 9	0.167 5		0.141 6		0.832 5	NG-D
A-25	1.519 70	0.041 2	0.011 81	0.002 93	0.020 9	0.212 1	0.327 5	0.191 2	0.115 4	0.672 5	NG-I-D
B-25	1.579 36	0.044 5	0.012 64	0.002 96	0.013 1	0.205 8	0.312 2	0.192 7	0.106 4	0.687 8	NG-I-D
C-25	1.527 43	0.044 0	0.012 28	0.002 84	0.016 8	0.192 8	0.309 5	0.176 0	0.116 7	0.690 5	NG-I-D
D-25	1.418 44	0.042 6	0.012 60	0.003 13	0.026 7	0.242 7	0.328 0	0.216 0	0.085 3	0.672	NG-I-D
D-5	1.659 22	0.043 7	0.012 36	0.002 74	0.012 9	0.202 3	0.298 5	0.189 4	0.096 2	0.701 5	NG-I-D
D-15	1.481 90	0.041 7	0.012 09	0.002 84	0.022 7	0.222 1	0.313 3	0.199 4	0.091 2	0.686 7	NG-I-D
D-35	1.380 66	0.044 4	0.013 16	0.003 33	0.026 7	0.248 4	0.334 3	0.221 7	0.085 9	0.665 7	NG-I-D

3 结论

1)随着石粉掺量和细度的增大,水化前期水化速率明显加快,放热速率峰值增大且出现的时间提前。掺入 35% 比表面积为 665 m²/kg 的 D 组石粉的浆体水化速率峰值比基准组提升了 26.2%,同时水化速率峰值出现的时间提前了 3.17 h。细度不同的 A、D 组当掺量仅为 5% 时,水泥水化放热峰值分别为 2.97、3.28 mW/g,出现时间分别为 12.25、10.92 h,说明石粉细度对水泥水化的影响较大。

2)使用 Krstulović-Dabić 模型模拟出掺加石灰石粉后水泥的水化动力学过程,后期水化阶段 D 过程的影响逐渐增强,再者是结晶成核与晶体生长过程(NG 过程),最小的是相边界反应过程(I 过程)。

3)水胶比为 0.4 的纯水泥基准组的水化反应机理为 NG-D,此时自由水丰富,水化产物大量生成并包裹未水化的水泥颗粒,离子渗透受阻,反应直接进入扩散过程;随着石粉掺量和细度逐渐增大,石粉的晶核作用更为显著,同时体系实际水灰比和可发生水化反应的水泥量减小,水化反应转变为 NG-I-D 反应类型,且随着石粉掺量和细度的增大 I 过程的实际水化速率曲线越来越接近理论曲线。

4)石灰石粉的掺入和细度的提高,在提高初期水化反应速率的同时,会导致水泥的后期水化反应受限。因此实际使用过程中应合理控制石灰石粉的掺量和细度,以确保水泥基材料的最终强度和耐久性。

参考文献

- [1] 熊远柱. 高掺量石灰石粉对混凝土耐久性的影响 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
XIONG Y Z. Study on the durability of concrete mixed with large limestone powder [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [2] MOON G D, OH S, JUNG S H, et al. Effects of the fineness of limestone powder and cement on the hydration and strength development of PLC concrete [J]. Construction and Building Materials, 2017, 135: 129-136.
- [3] BRIKI Y, ZAJAC M, HABA MBEN, et al. Impact of limestone fineness on cement hydration at early age [J]. Cement and Concrete Research, 2021, 147: 106515.
- [4] AQEL M, PANESAR D K. Hydration kinetics and compressive strength of steam-cured cement pastes and mortars containing limestone filler [J]. Construction and Building Materials, 2016, 113, 359-368.
- [5] 邓懋, 申波, 吴洪梅, 等. 石灰石粉含量和粒径对水泥水化热的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(2): 420-428, 438.
DENG M, SHEN B, WU H M, et al. Effects of limestone powder content and particle size on hydration heat of cement [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(2): 420-428, 438. (in Chinese)
- [6] 郑亚南, 丛钢, 杨长辉, 等. 磨细石灰石粉对水泥浆体水化特性的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(2): 397-400.
ZHENG Y N, CONG G, YANG C H, et al. Influence of limestone powder on hydration characteristics of cement pastes [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(2): 397-400. (in Chinese)
- [7] KHAN R I, ASHRAF W. Effects of ground wollastonite on cement hydration kinetics and strength develop-

- ment [J]. Construction and Building Materials, 2019, 218: 150-161.
- [8] HAN F H, WANG Q, LIU M T, et al. Early hydration properties of composite binder containing limestone powder with different finenesses [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2016, 123(2): 1141-1151.
- [9] REN Q, XIE M J, ZHU X P, et al. Role of limestone powder in early-age cement paste considering fineness effects [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(10): 04020289.
- [10] 肖佳, 金勇刚, 勾成福, 等. 石灰石粉对水泥浆体水化特性及孔结构的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(6): 2313-2320.
- XIAO J, JIN Y G, GOU C F, et al. Effect of ground limestone on hydration characteristics and pore structure of cement pastes [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(6): 2313-2320. (in Chinese)
- [11] KRSTULOVIĆ R, DABIĆ P. A conceptual model of the cement hydration process [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(5): 693-698.
- [12] 阎培渝, 郑峰. 水泥基材料的水化动力学模型[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(5): 555-559.
- YAN P Y, ZHENG F. Kinetics model for the hydration mechanism of cementitious materials [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2006, 34(5): 555-559. (in Chinese)
- [13] 李洋, 何真, 郭文康, 等. 碱对低热水泥早期水化进程和微结构的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(4): 549-555.
- LI Y, HE Z, GUO W K, et al. Influence of alkali on early-age hydration process and microstructure of low-heat cement [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(4): 549-555. (in Chinese)
- [14] 饶美娟, 刘数华, 方坤河, 等. 石灰石粉对水泥基材料水化动力学的影响[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(6): 734-736, 741.
- RAO M J, LIU S H, FANG K H, et al. Effect of limestone powder on hydration kinetics of cement-based composites [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(6): 734-736, 741. (in Chinese)
- [15] 刘家文. 碳酸钙-铝酸盐矿物复合体系的水化行为与胶凝性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- LIU J W. Research on hydration behavior and cementitious properties of calcium carbonate and aluminate minerals composite systems [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. (in Chinese)
- [16] 郑宇. 碳酸钙-铝酸盐矿物复合体系水化反应的影响因素 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- ZHENG Y. Influence factor on hydration reaction of calcium carbonate and aluminate minerals composite systems [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021. (in Chinese)
- [17] LIU Y J, GUO H, ZHANG Z C, et al. Hydration mechanism and photocatalytic antibacterial performance of cement-based composites modified by hydrophilic nano-TiO₂ particles [J]. Construction and Building Materials, 2024, 419: 135538.
- [18] MENG S Q, SHI Z M, OUYANG X W. Comparison of the effects of carbon-based and inorganic nanomaterials on early cement hydration [J]. Construction and Building Materials, 2024, 421: 135705.
- [19] LIU S H, WANG L, GAO Y X, et al. Influence of fineness on hydration kinetics of supersulfated cement [J]. Thermochimica Acta, 2015, 605: 37-42.

(编辑 XXX)