

中小河道生态护岸工程再生透水混凝土试验研究

仝道斌¹, 陈敏², 丰蕾¹, 陆纯³, 李玮鹏³, 郭俊⁴, 张鸣³

(1. 宿迁市宿城区水利局, 江苏 宿迁 223800; 2. 宿迁市宿城区水利工程建设服务中心, 江苏 宿迁 223800;
3. 扬州大学 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 4. 南京振高建设有限公司, 江苏 南京 211300)

摘要: 为了研究再生透水混凝土在中小河道生态护岸工程应用中的性能表现, 通过煅烧与助磨剂助磨改善再生微粉的活性, 并利用煅烧再生微粉、再生粗骨料等制备中小河道护岸用植生透水混凝土进行试验研究。结果表明: 煅烧后的再生微粉粒径、需水量比、浆体粘度、减水剂饱和掺量和浆体强度均有所提高, 其中400℃煅烧的再生微粉需水量比和粘度最大, 600℃煅烧的再生微粉浆体强度最高, 煅烧温度超过800℃时, 再生微粉生成 β -C₂S和钙铝黄长石, 浆体强度有所降低。煅烧后的再生微粉颗粒变粗, 参加0.8%丙二醇助磨60 min后煅烧再生微粉 D_{50} 粒径由137 μm 降到20.85 μm , 以煅烧再生微粉25.0%取代水泥制备再生骨料透水混凝土, 各项性能满足植生混凝土规范要求。

关键词: 生态护岸; 透水混凝土; 再生微粉; 煅烧; 粉磨; 活化

中图分类号: TU528.44

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)04-0181-09

Experimental Investigation of Recycled Pervious Concrete for Small and Medium-sized Riverbank Protection Engineering

TONG Daobin¹, CHEN Min², FENG Lei¹, LU Chun³, LI Weipeng³, GUO Jun⁴, ZHANG Ming³

(1. Suqian Sucheng District Water Resources Bureau, Suqian, Jiangsu 223800, China;
2. Suqian Sucheng District Water Conservancy Engineering Construction Service Center, Suqian, Jiangsu 223800, China;
3. College of Architectural Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225127, China;
4. Nanjing Zhengao Construction Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211300, China)

Abstract: Limited by the technical level, the ecological level of small and medium-sized river treatment in rural areas is not high, meanwhile, a large amount of construction waste in rural areas is not fully utilized, which affect the environmental safety. Experimental investigate the preparation of calcined recycled fine powder by calcination and grinding with grinding agents, and then prepare generation-growing pervious concrete with calcined recycled fine powder and recycled coarse aggregate for medium and small riverbank protection. The results show that the particle size, water demand ratio, paste viscosity, saturation dosage of superplasticizer, paste strength of recycled fine powder become higher after the recycled calcined, among these recycled fine powders, the water demand ratio and paste viscosity reach to highest when the recycled fine powder calcined at 400℃, and that of paste strength reach to highest when the recycled fine powder calcined at 600℃, and when calcination temperature beyond 800℃, β -C₂S and gehlenite formed, which lead to reduction of paste strength. The particle become coarse after the recycled powder calcined, and the particle size of D_{50} decreased from 137 μm to 20.85 μm when the calcined recycled fine powder ground with 0.8% propylene glycol, with the 20% replacement of cement of the calcined recycled fine powder, the prepared pervious concrete reach to various properties requirements regulated by specification for vegetation-growing concrete. The research results could provide valuable reference for ecological riverbank protection of small and medium-sized river.

Keywords: ecological riverbank protection; pervious concrete; recycled fine powder; calcination; grinding; activation

全球建筑领域每年释放数亿吨 $\text{CO}_2^{[1-2]}$, 水泥工业产生的碳排放占人类活动碳排放的 8.0%^[3], 减少水泥用量是建筑领域降碳排放最有效手段。另外, 随着经济发展水平的提高, 近些年来由于基础设施建设持续快速发展, 我国每年产生废弃混凝土超过 15 亿吨, 且呈逐年递增趋势^[4], 预计至 2050 年能达到 50 多亿吨^[5]。大量废弃混凝土的倾倒、填埋会带来土壤污染、水污染、土地占用等一系列问题^[6]。尤其在乡村地区, 由于技术薄弱, 废弃混凝土更难以实现资源化利用。

开发再生微粉和再生骨料利用技术, 既可降低碳排放, 又能减少建材生产对自然资源的消耗, 缓解部分地区由自然资源短缺造成的建材生产成本增加^[1]。废弃混凝土资源化利用主要是生产再生骨料和再生微粉, 对于再生骨料目前已有大量研究成果, 但对于再生微粉的应用技术研究, 目前尚处于起步阶段^[7], 有研究人员将再生微粉直接作为掺和料制备混凝土, 但单纯的机械磨细无法有效提高再生微粉的活性^[8], 导致其利用率较低^[9-10]。再生微粉的活性低、多孔导致需水量大、其混凝土工作性差等问题目前没有得到很好的解决。

近些年我国大力发展生态环境建设, 已有大量县市获得国家财政支持开展水系连通及水美乡村建设, 其中乡村中小河道治理是水美乡村建设的重要一环。现浇混凝土护岸、干砌块石护岸、预制混凝土砌块护岸等传统护岸形式已不能满足时代要求。本文针对再生微粉活性低问题, 研究煅烧与助磨剂助磨的方式制得提高活性的煅烧再生微粉, 并利用煅烧再生微粉不同掺量取代水泥、全再生粗骨料制备中小河道护岸用再生透水混凝土, 可促进护岸材料生产的低碳化发展。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

水泥用 P·O42.5 级普通硅酸盐水泥, 由江苏磊达股份有限公司生产; 再生微粉, 自制; 聚羧酸复合外加剂, 含固量 51.47%, 由江苏苏博特新材料股份有限公司产。硅灰, SiO_2 含量 93.0%, 由灵寿县土运矿产品加工厂生产; 再生粗骨料, 粒径 25.0 mm ~ 31.5 mm, 由江苏菲尤斯环保科技有限公司生产; 无水硫酸钠、无水碳酸钠, 分析纯, 由天津市科密欧化学试剂有限公司生产; 六偏磷酸钠, 分析纯, 由西陇科学股份有限公司生产; 三乙醇胺、丙二醇, 分析

纯, 由上海苏懿化学试剂有限公司生产。

1.2 试验方法

再生浆体制备为采用水灰比 0.5:1 制备普通硅酸盐水泥浆体, 待终凝后将浆体铲碎并置于室外自然养护一年。再生微粉制备为将再生浆体磨碎、过 1 mm 筛制得粗再生粉, 将助磨剂与再生粉混合后放入球磨机 (5L II 型) 磨粉预设时间制得。再生微粉煅烧为将粗再生粉装入坩埚, 置于高温炉中, 10℃ 每分钟升温至目标温度后, 恒温 120 min 后缓慢降至室温后取出。

再生微粉性能检测参照《混凝土和砂浆用再生微粉》^[11] (JG/T 573—2020); 再生微粉浆体黏度以水灰比 0.4:1、再生微粉 20.0% 取代水泥制备浆体, 将浆体注入 500 ml 烧杯, 置于数显黏度计 (DV-2 型) 下方, 将粘度计转子没入浆体指定位置后开动机器, 每隔 1 min 记录粘度数据, 取三个粘度值的平均值作为最终结果; 掺有不同掺量减水剂的再生浆体性能测试参照《混凝土外加剂匀质性试验方法》^[12] (GB/T 8077—2012) 进行; 再生微粉电导率、pH 值测试参照文献 [13] 进行, 将再生微粉和蒸馏水按质量比 1:50 配成溶液后, 将装有溶液的烧杯置于水浴锅中恒温 25℃, 用电导率及 pH 值测定仪 (HI5522 型) 连续测试 24 h; 透水混凝土制备与测试参照《植生混凝土》^[14] (JC/T 2557—2020) 进行。

2 试验结果分析

2.1 煅烧温度对再生微粉性能的影响

2.1.1 新拌浆体性能

将粗再生粉粉磨 60 min 后煅烧不同温度的再生微粉需水量比、新拌浆体黏度 (水灰比 0.40:1), 如图 1、图 2 所示。

由于再生微粉自身的多孔结构特性, 掺有再生微粉的浆体工作性降低^[4]。由图 1、图 2 可知, 对于未煅烧的原状再生微粉 (original recycled powder, ORP) 和 200℃、400℃ 煅烧的再浆体需水量比和黏度随着煅烧温度的增加而增加, 400℃ 煅烧的再生微粉需水量比和黏度达最大, 其中黏度增加尤其明显, 比原状再生微粉的黏度增加了 299%, 这说明煅烧过程使再生微粉的多孔结构特性得到增强。煅烧温度超过 400℃ 后, 再生微粉的需水量比和黏度降低。

图 3 是掺有聚羧酸减水剂的不同温度煅烧的再生微粉浆体 5 min ~ 120 min 流动度, 由图 3 (a) 可知, 聚羧酸减水剂不同掺量的纯水泥浆体流动度经

时损失很小,甚至部分浆体的流动度在 60 min 内仍增长,减水剂饱和掺量 0.4%,这说明本文所用的普通硅酸盐水泥与减水剂具有良好的相容性。由图 3(b)可知,未煅烧再生微粉浆体经时损失变化不大,但减水剂饱和掺量增加到 0.6%。由图 3(c)—图 3(e)可知,200℃、600℃、700℃煅烧的再生微粉流动度经时损失、减水剂饱和掺量明显增大。由于 400℃煅烧的再生微粉在各减水剂掺量时浆体流动度均为 0,故本文中未提供其浆体流动度图。由图 3(f)可知,800℃煅烧的再生微粉浆体流动度经时损失和减水剂饱和掺量较 200℃~700℃煅烧的明显减少。由图 3(g)可知,1000℃煅烧的再生微粉浆体流动度经时损失和减水剂饱和掺量较其它煅烧微粉明显降低。

综上,再生微粉煅烧后的浆体流动度经时损失增大、减水剂饱和掺量增大,即煅烧再生微粉与减水剂相容性变差,其中 400℃煅烧的再生微粉最差,800℃、1000℃的煅烧微粉与减水剂相容性变好,但仍比未煅烧的再生微粉差。

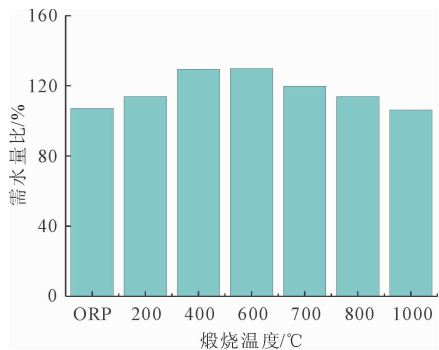


图 1 不同煅烧温度的再生微粉需水量比

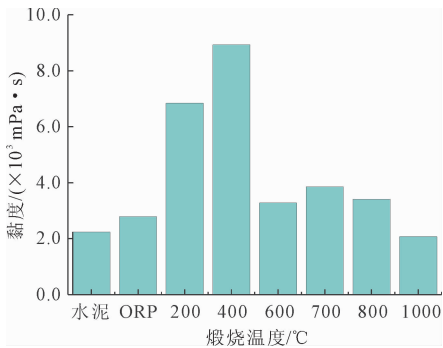


图 2 掺量 20.0% 不同煅烧温度的再生微粉浆体黏度

2.1.2 再生微粉浆体抗压强度

纯水泥、未煅烧原状再生微粉和不同温度煅烧的再生微粉浆体的各龄期抗压强度如图 4 所示,由图 4 可知,煅烧温度低于 600℃时,再生微粉浆体的

各龄期抗压强度随着煅烧温度的增加而提高,当煅烧温度超过 600℃后,再生微粉浆体抗压强度随着煅烧温度的提高而降低,当煅烧温度超过 800℃后,煅烧再生微粉浆体抗压强度低于未煅烧微粉浆体。基于上述试验结果,再生微粉最佳煅烧温度为 600℃,这与文献[8,15]研究结果相似。

2.1.3 再生微粉粉体颗粒性能

表 1、图 5、图 6 是粗再生粉粉磨 60 min 后采用不同煅烧温度后的粉体颗粒性能,由表 1 可知,与粉磨 60 min 的未煅烧再生微粉相比,200℃煅烧的再生微粉粒径变化不大,煅烧温度高于 400℃时,煅烧再生微粉的 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 值均随着煅烧温度的提高而增加。由图 5、图 6 可知,再生微粉煅烧后,各煅烧微粉的 1 μm ~ 100 μm 粒径的颗粒比例降低明显,这说明将再生微粉磨细后再煅烧可提高煅烧效果,同时煅烧后应再度粉磨以破坏煅烧导致的粉体变粗以充分发挥其水化活性。

表 1 不同煅烧温度制备的再生微粉的 D_{10} 、 D_{50} 和 D_{90} 粒径

煅烧温度/℃	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$
未煅烧再生粉	3.95	57.74	200.50
200	3.78	56.24	197.50
400	4.42	61.99	207.70
600	6.44	73.60	228.30
700	7.63	79.31	280.10
800	8.70	70.19	215.40
1000	9.66	76.09	228.40

2.1.4 再生微粉化学成分与水化性能

不同煅烧温度的再生微粉溶液电导率和 pH 值如图 7、图 8 所示,由图 7、图 8 可知,未煅烧再生微粉和不同煅烧温度的再生微粉的电导率与 pH 值均低于水泥,表明再生微粉的离子溶出性能低于水泥。对于再生微粉,未煅烧原状再生微粉和 200℃电导率与 pH 值相近,煅烧温度越高,再生微粉的电导率和 pH 值越低,即离子溶出性能越低。

未煅烧原状再生微粉和不同温度煅烧的再生微粉 XRD 图如图 9 所示,由图 9 可知,随着煅烧温度的提高,水化产物氢氧化钙的特征峰降低,这意味着其溶液中 Ca^{2+} 、 OH^- 的溶出量减少,从而导致电导率和 pH 降低。当煅烧温度提高到 800℃时,生成水硬性很弱的钙铝黄长石和活性较低的 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ ^[16-17],且 1000℃煅烧的再生微粉中钙铝黄长石和 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 特征峰更强,宏观表现为 800℃、1000℃煅烧的再生微粉浆体各龄期抗压强度低于其它再生微粉。

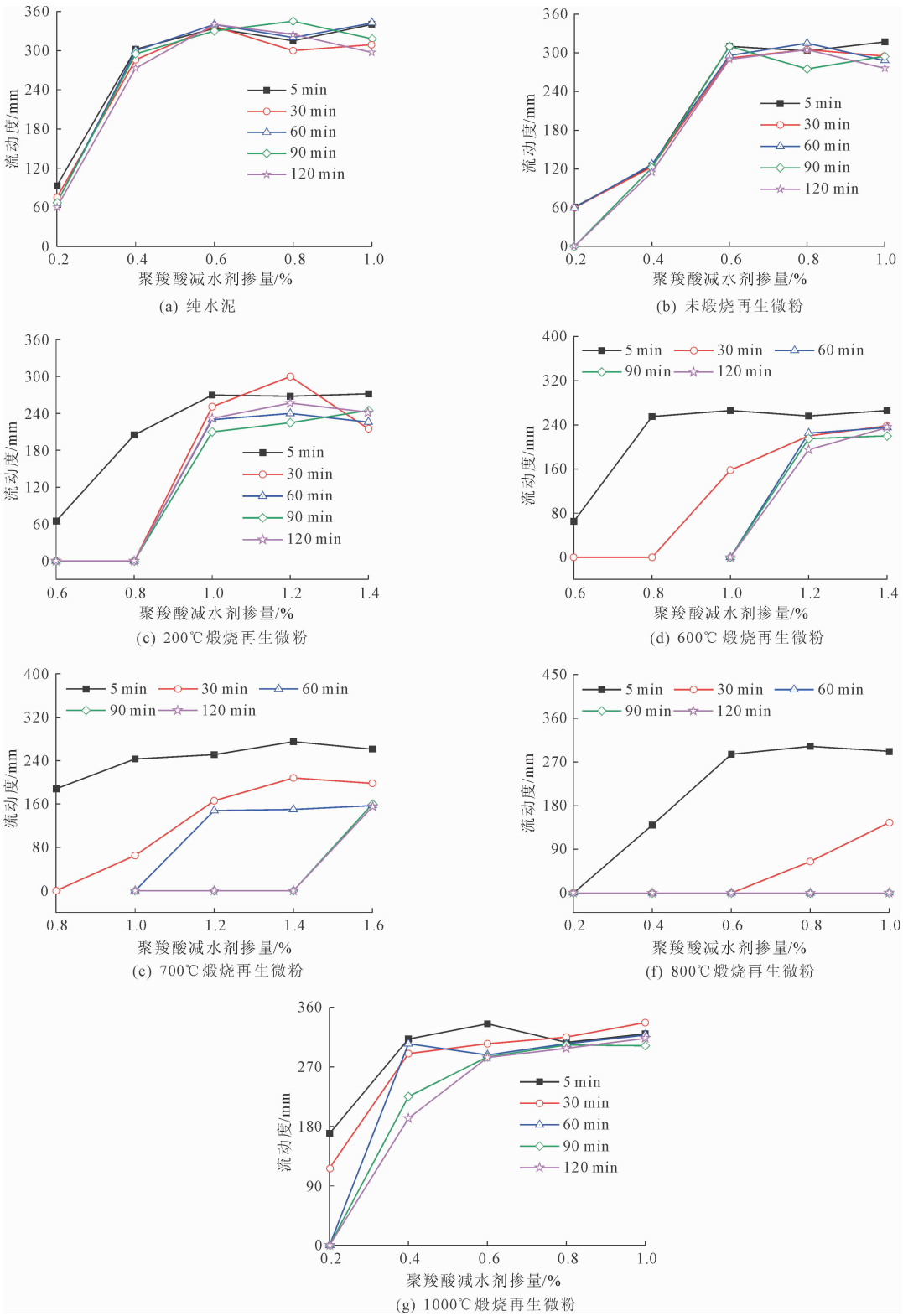


图3 掺量20%不同温度煅烧的再生微粉和不同掺量聚羧酸减水剂的水泥浆体流动度

2.2 助磨剂对煅烧再生微粉粉磨性能的影响

2.2.1 单一助磨剂

由于再生微粉煅烧后颗粒会变粗,有必要对煅烧后的再生微粉进行粉磨以充分发挥其活性,另由于600℃煅烧的再生微粉的活性最高,本节选用将

粗再生粉600℃煅烧120 min后掺加不同掺量的助磨剂粉磨60 min后测试粉体的粒径分布,试验结果如表2、图10—图13所示。由表2可知,六偏磷酸钠、碳酸钠、硫酸钠无明显助磨效果,三乙醇胺、丙二醇助磨效果明显,试验掺量范围内,掺加三乙醇胺、

丙二醇的煅烧再生微粉的 D_{10} 、 D_{50} 和 D_{90} 均随着助磨剂的掺量增加而降低。

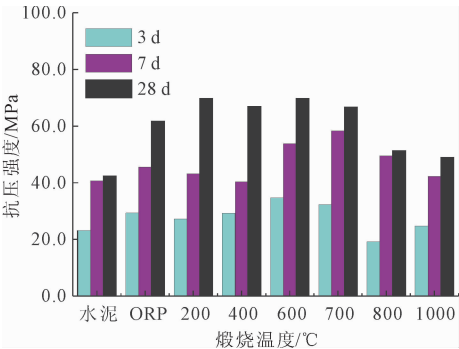


图 4 掺量 20% 不同温度煅烧的再生微粉水泥浆体抗压强度

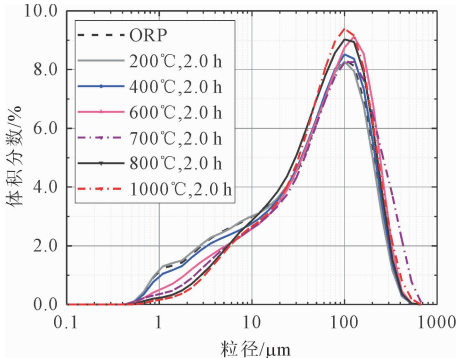


图 5 不同煅烧温度制备的再生微粉的粒径分布

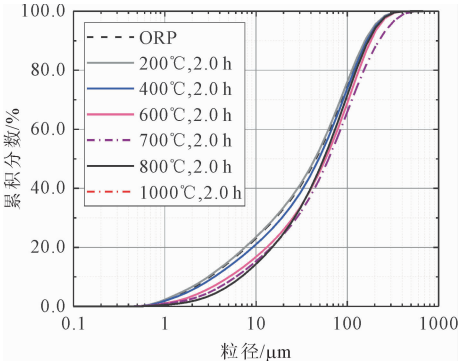


图 6 不同煅烧温度制备的再生微粉的累计粒径分布

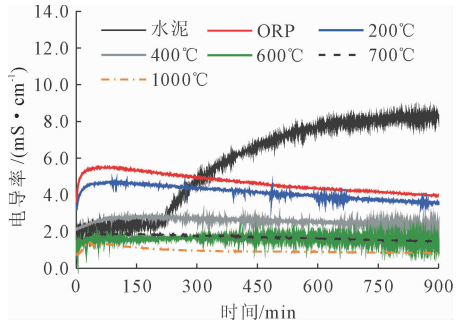


图 7 不同煅烧温度制备的再生微粉溶液电导率

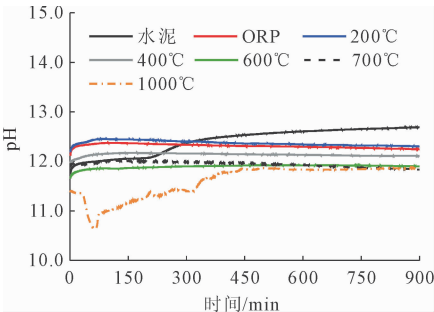
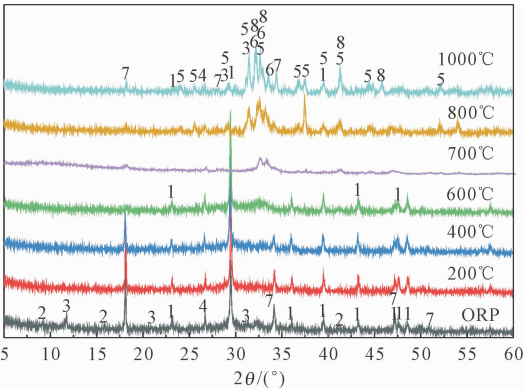


图 8 不同煅烧温度制备的再生微粉溶液 pH 值



1 - 碳酸钙; 2 - AFt; 3 - 石膏; 4 - AFm; 5 - 钙铝黄长石; 6 - β - C_2S ; 7 - $Ca(OH)_2$; 8 - C_3S

图 9 不同煅烧温度制备的再生微粉的 XRD 图

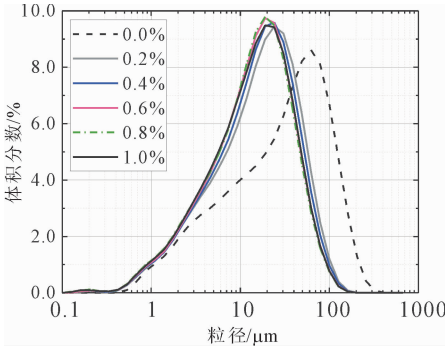


图 10 不同掺量三乙醇胺助磨的煅烧再生微粉体粒径分布

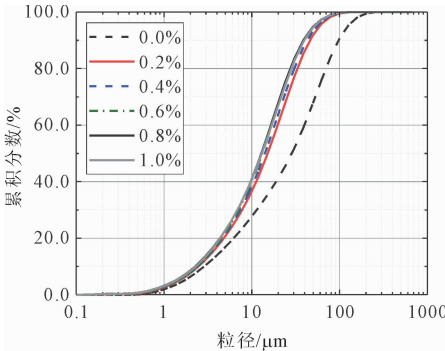


图 11 不同掺量三乙醇胺助磨的煅烧再生微粉累计粒径分布

由图 10、图 11 可知,三乙醇胺不同掺量时,煅烧再生微粉的各粒径颗粒的含量比空白样明显降低。由图 12、图 13 可知,丙二醇掺量为 0.2%~0.8% 时,煅烧再生微粉各粒径颗粒比例明显降低,但丙二醇掺量 0.8%、1.0% 时粒径变化不明显。

表 2 掺不同助磨剂粉磨 60 min 的煅烧再生微粉的 D_{10} 、 D_{50} 和 D_{90} 粒径

种类	掺量/%	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$
六偏磷酸钠	0.0	3.64	36.32	123.20
	0.2	2.84	30.29	106.70
	0.4	5.01	56.56	193.90
	0.6	3.79	48.45	174.00
	0.8	4.91	59.09	201.80
	1.0	4.97	62.19	212.50
无水碳酸钠	0.2	3.66	37.90	140.80
	0.4	3.41	35.17	128.50
	0.6	3.88	43.46	164.40
	0.8	3.67	39.18	147.60
	1.0	3.95	44.29	164.30
三乙醇胺	0.2	3.13	19.25	58.28
	0.4	3.09	17.92	53.93
	0.6	3.02	16.68	50.10
	0.8	2.87	16.32	49.05
	1.0	2.92	16.51	50.24
丙二醇	0.2	2.80	23.64	84.15
	0.4	2.60	20.32	73.40
	0.6	2.68	16.52	52.16
	0.8	2.63	14.99	47.03
	1.0	2.61	15.01	47.00
无水硫酸钠	0.2	4.03	46.65	174.70
	0.4	4.83	60.55	212.30
	0.6	4.70	60.77	210.80
	0.8	4.25	54.51	199.70
	1.0	3.78	43.12	159.30

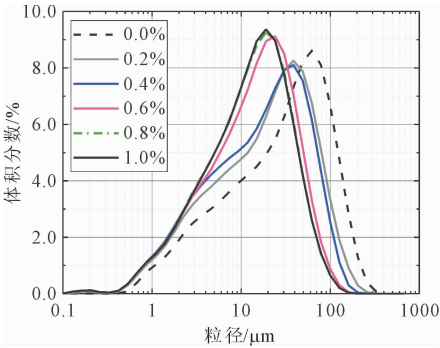


图 12 不同掺量丙二醇助磨的煅烧再生微粉体粒径分布

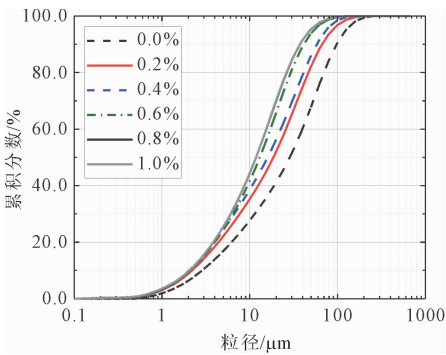


图 13 不同掺量丙二醇助磨的煅烧再生微粉累计粒径分布

表 3 掺加 0.8% 丙二醇粉磨不同时间的煅烧再生微粉的 D_{10} 、 D_{50} 和 D_{90} 粒径

粉磨时间/min	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$
0	11.77	137.00	391.50
30	4.70	36.49	104.70
60	3.06	20.85	67.52
90	2.53	16.39	57.43
120	2.04	13.13	52.77

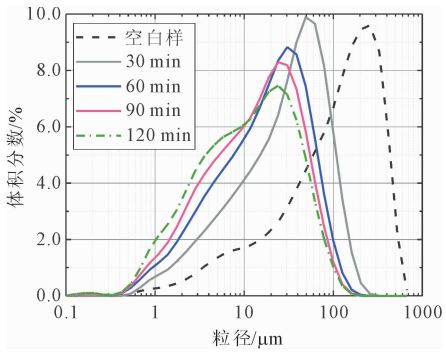


图 14 掺加 0.8% 丙二醇粉磨不同时间的煅烧再生微粉粒径分布

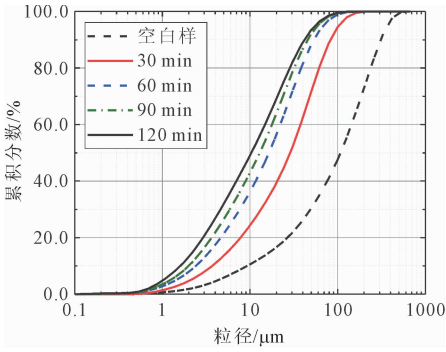


图 15 掺加 0.8% 丙二醇粉磨不同时间的煅烧再生微粉累计粒径分布

以丙二醇掺量 0.8%, 试验粉磨 0~120 min 的煅烧再生微粉的颗粒粒径变化, 试验结果如表 3、图 14、图 15 所示。由表 3 可知, 煅烧再生微粉 D_{10} 、 D_{50}

和 D_{90} 粒径随着粉磨时间的延长而降低,粉磨时间超过 60 min 后 D_{10} 、 D_{50} 和 D_{90} 粒径降低趋缓。由图 14、图 15 可知,煅烧微粉各粒径比例随着粉磨时间延长明显降低。提高再生微粉细度是改善混凝土性能的有效途径,Tang 等^[18]研究表明,再生微粉的 D_{50} 不应超过 30 μm ,基于粉磨效果与经济性考虑,确定单一助磨剂为 0.8% 丙二醇、粉磨 60 min, D_{50} 低于 30 μm 。

2.2.2 复合助磨剂

为检验复合助磨剂的助磨效果,以 D_{50} 为评价指标,设计 $L_{16}(4^5)$ 正交试验,试验结果如表 4 所示。由表 4 可知,由直接观察可得第 6 组的 D_{50} 粒径最小,即 $A_2B_2C_1D_3E_4$ 组(六偏磷酸钠: 碳酸钠: 三乙醇胺: 丙二醇: 硫酸钠 = 0.2% : 0.2% : 0.0% : 0.4% : 0.6%),由极差法可得最优组 $A_2B_3C_2D_4E_4$ (六偏磷酸钠: 碳酸钠: 三乙醇胺: 丙二醇: 硫酸钠 = 0.2% : 0.4% : 0.2% : 0.6% : 0.6%)。为检验两种复合助磨剂组成,分别将掺有两种复合助磨剂的煅烧再生粉粉磨 0~120 min,分析粒径分布,试验结果如表 6、图 16—图 19 所示。由表 6 可知,掺有两种复合助磨剂煅烧再生粉随着粉磨时间的延长, D_{10} 、 D_{50} 和 D_{90} 粒径均明显降低,但极差法得到的最优助磨剂组成略优于直接观察法。由图 16—图 19 可知,掺加两种复合助磨剂的煅烧再生粉各粒径的比例随着粉磨时间的延长明显降低。

对比单掺、复掺助磨剂助磨效果可得,相同粉磨时间时,单掺丙二醇的助磨效果最优。

2.3 再生微粉透水混凝土及植生性能

表 7 是将粗再生粉 600℃ 煅烧 120 min 后掺加 0.8% 丙二醇粉磨 60 min 的煅烧再生微粉不同掺量取代水泥制备的透水混凝土。

表 4 $L_{16}(4^5)$ 正交试验因素水平表

水平	因素				
	A 六偏磷酸钠 /%	B 碳酸钠 /%	C 三乙醇胺 /%	D 丙二醇 /%	E 硫酸钠 /%
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

表 5 $L_{16}(4^5)$ 正交设计实验结果

序号	A 六偏磷酸钠/%	B 碳酸钠/%	C 三乙醇胺/%	D 丙二醇/%	E 硫酸钠/%	D_{50} / μm
1	1(0.0)	1(0.0)	1(0.0)	1(0.0)	1(0.0)	36.32
2	1(0.0)	2(0.2)	2(0.2)	2(0.2)	2(0.2)	16.84
3	1(0.0)	3(0.4)	3(0.4)	3(0.4)	3(0.4)	15.63
4	1(0.0)	4(0.6)	4(0.6)	4(0.6)	4(0.6)	14.13
5	2(0.2)	1(0.0)	2(0.2)	4(0.6)	3(0.4)	13.89
6	2(0.2)	2(0.2)	1(0.0)	3(0.4)	4(0.6)	13.79
7	2(0.2)	3(0.4)	4(0.6)	2(0.2)	1(0.0)	14.65
8	2(0.2)	4(0.6)	3(0.4)	1(0.0)	2(0.2)	16.18
9	3(0.4)	1(0.0)	3(0.4)	2(0.2)	4(0.6)	15.16
10	3(0.4)	2(0.2)	4(0.6)	1(0.0)	3(0.4)	17.41
11	3(0.4)	3(0.4)	1(0.0)	4(0.6)	2(0.2)	16.58
12	3(0.4)	4(0.6)	2(0.2)	3(0.4)	1(0.0)	17.19
13	4(0.6)	1(0.0)	4(0.6)	3(0.4)	2(0.2)	17.31
14	4(0.6)	2(0.2)	3(0.4)	4(0.6)	1(0.0)	16.20
15	4(0.6)	3(0.4)	2(0.2)	1(0.0)	4(0.6)	15.03
16	4(0.6)	4(0.6)	1(0.0)	2(0.2)	3(0.4)	20.58
$\bar{K}_1$	20.73	20.67	21.82	21.24	21.09	
$\bar{K}_2$	14.63	16.06	15.74	16.81	16.73	
$\bar{K}_3$	16.59	15.47	15.79	15.98	16.88	
$\bar{K}_4$	17.28	17.02	15.88	15.20	14.53	
R	6.10	5.20	6.08	6.04	6.56	

表 6 直接观察和极差法的最优组成复合助磨剂粉磨不同时间后的粉体的 D_{10} 、 D_{50} 和 D_{90} 粒径

助磨剂	六偏磷酸钠: 碳酸钠: 三乙醇胺: 丙二醇: 硫酸钠	粉磨时间 /min	D_{10} / μm	D_{50} / μm	D_{90} / μm
空白样	—	0	11.77	137.00	391.50
		30	5.48	44.61	129.30
		60	3.49	24.53	77.50
		90	2.80	20.13	68.74
观察法最优助磨剂组成($A_2B_2C_1D_3E_4$)	0.2%:0.2%:0.0%:0.4%:0.6%	120	2.50	17.23	69.50
		30	5.59	42.25	119.80
		60	3.61	22.46	67.45
		90	2.82	16.36	50.56
极差法最优助磨剂($A_2B_3C_2D_4E_4$)	0.2%:0.4%:0.2%:0.6%:0.6%	120	2.55	13.77	43.11

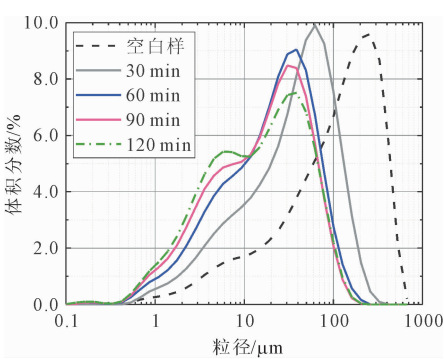


图 16 观察法最优助磨剂 ($A_2B_2C_1D_3E_4$) 助磨不同时间的
煅烧再生微粉体粒径分布

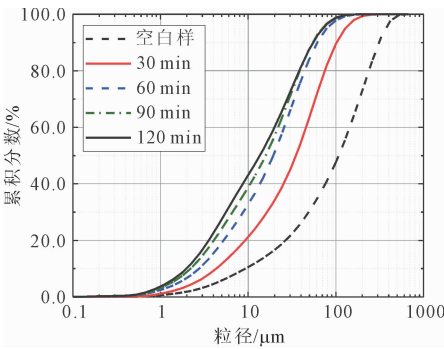


图 17 观察法最优助磨剂 ($A_2B_2C_1D_3E_4$) 助磨不同时间的
煅烧再生微粉累计粒径分布

由表 7 可知,煅烧再生微粉掺量为 10.0%~25.0% 时,透水混凝土 7 d、28 d 抗压强度随着煅烧再生微粉掺量的增加而增加,25 次冻融循环后的强度损失率、质量损失率降低,当煅烧再生微粉掺量超过 25.0% 后,各测试性能下降。Tang 等^[18]认为混凝土中再生微粉掺量不应超过 30.0%,与本文试验

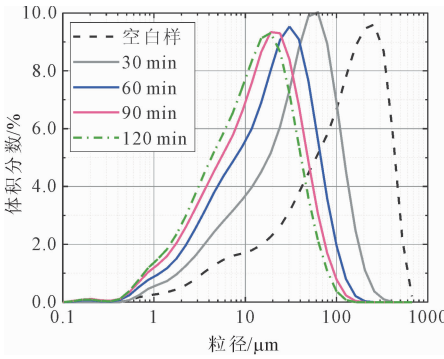


图 18 极差法最优助磨剂 ($A_2B_3C_2D_4E_4$) 助磨不同时间的
煅烧再生微粉体粒径分布

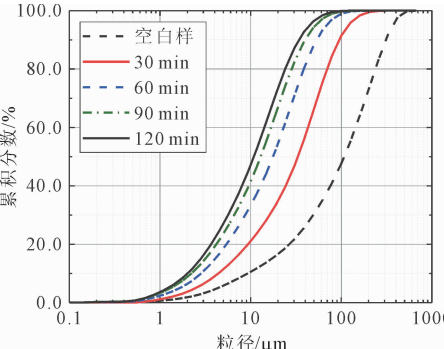


图 19 极差法最优助磨剂 ($A_2B_3C_2D_4E_4$) 助磨不同时间的
煅烧再生微粉累计粒径分布

结果相似。煅烧再生微粉掺加对连续孔隙率无明显影响,但对透水混凝土工作性有不利影响,为满足混凝土成型要求,减水剂需随着煅烧再生微粉的掺量增加而增加。由上,7.3 组配比性能最优,各项性能满足《植生混凝土》^[14](JC/T 2557—2020)要求。

表 7 煅烧再生微粉不同掺量的透水混凝土配合比及性能

组别	水泥 /kg	煅烧再生微粉		硅灰 /kg	再生骨料 /kg	拌合水 /kg	减水剂 /kg	连续孔 隙率/%	抗压强度/MPa		25 次冻融循环	
		取代率/%	质量/kg						7 d	28 d	强度损失率/%	质量损失率/%
7.1	337.3	10.0	42.2	42.2	1401.4	84.3	1.3	25.2	5.4	8.2	17.2	5.1
7.2	316.2	15.0	63.3	42.2	1401.4	84.3	1.4	25.3	7.2	9.3	14.0	4.7
7.3	295.2	20.0	84.3	42.2	1401.4	84.3	1.6	24.6	9.5	12.0	12.1	4.3
7.4	274.1	25.0	105.4	42.2	1401.4	84.3	1.8	25.0	9.8	12.8	10.2	3.6
7.5	253.0	30.0	126.5	42.2	1401.4	84.3	2.0	25.4	7.7	11.0	13.2	4.5

3 结 论

(1) 对于煅烧再生微粉,从未煅烧到煅烧 400℃ 时,煅烧再生微粉的需水量比、浆体黏度、减水剂饱和掺量随着煅烧温度的增加而增加,不同掺量减水剂的浆体流动性经时损失变大;400℃~1000℃ 时,需水量比、浆体黏度、减水剂饱和掺量降低;煅烧

温度对新拌再生微粉浆体密度无明显影响;未煅烧~600℃ 时,再生微粉浆体强度增加,600℃ 时达最高,超过 600℃ 后强度降低;煅烧温度超过 800℃ 后再生微粉产生 β - C_2S 和钙铝黄长石,再生微粉浆体强度降低、工作性提高;600℃ 煅烧 120 min 的再生微粉活性高,浆体工作性较好。

(2) 再生微粉煅烧后颗粒变粗,应采用助磨剂

助磨以进一步提高活性。对于单一助磨剂,六偏磷酸钠、碳酸钠、硫酸钠无明显助磨效果,三乙醇胺、丙二醇助磨效果明显,0.8% 丙二醇助磨 60 min 可使煅烧再生微粉明显磨细;对于复合助磨剂,六偏磷酸钠:碳酸钠:三乙醇胺:丙二醇:硫酸钠=0.2%:0.4%:0.2%:0.6%:0.6% 时助磨效果最佳,但比单掺丙二醇差,即煅烧再生微粉优化粉磨方法为丙二醇掺量 0.8%、粉磨 60 min。

(3) 600℃煅烧 120 min 后掺加 0.8% 丙二醇、粉磨 60 min 的再生微粉、水泥、硅灰、再生粗骨料、拌合水、减水剂质量分别为 105.4 kg、274.1 kg、42.2 kg、1 401.4 kg、84.3 kg、1.8 kg 时,透水混凝土抗压强度达最高、工作性良好,连续孔隙率 25.0%,28 d 抗压强度 12.8 MPa,25 次冻融循环后的强度和 质量损失分别为 10.2%、3.6%,性能满足《植生混凝土》(JC/T 2557—2020)要求。

参考文献:

[1] 姜义,马梓涵,申培亮,等. 废弃混凝土碳化资源化技术研究进展[J]. 硅酸盐学报,2023,51(9):2433-2445.

[2] Huang Lizhen, Guri Krigsvoll, Fred Johansen. Carbon emission of global construction sector[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018,81(2):1906-1916.

[3] Gkiokchan Moumin, Maximilian Ryssel, Li Zhao, et al. CO₂ emission reduction in the cement industry by using a solar calciner[J]. Renewable Energy, 2020,145:1578-1596.

[4] 彭术,陈浩,水中和,等. 废弃混凝土再生粉制备超高性能混凝土基体的性能研究[J]. 硅酸盐通报,2019,38(7):2125-2130.

[5] 肖建庄,叶涛华,隋同波,等. 废弃混凝土再生微粉的基本问题及应用[J]. 材料导报,2023,37(10):5-14.

[6] Nissim Seror, Boris A Portnov. Estimating the effectiveness of different environmental law enforcement policies

on illegal C&D waste dumping in Israel[J]. Waste Management, 2020,102:241-248.

[7] 田青,屈孟娇,张苗,等. 废弃混凝土再生微粉激活方式研究进展[J]. 硅酸盐通报,2020,39(8):2476-2484.

[8] 李晓,梁亮. 再生混凝土微粉活化及其性能研究[J]. 混凝土,2023(11):105-108,113.

[9] 周长顺,吉红波,赵丽颖. 再生微粉在水泥基材料中的应用与研究进展[J]. 硅酸盐通报,2016,38(8):2456-2463.

[10] Bonavetti V L, Rahhal V F, Irassar E F. Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements[J]. Cement and Concrete Research, 2001,31(6):853-859.

[11] 混凝土和砂浆用再生微粉:JG/T 573—2020[S]. 北京:中国标准出版社,2020.

[12] 混凝土外加剂匀质性试验方法:GB/T 8077—2012[S]. 北京:中国标准出版社,2020.

[13] 施宇磊. 纳米 C-S-H-PCE 对水泥早期水化及其微结构演变研究[D]. 扬州:扬州大学,2022.

[14] 植生混凝土:JC/T 2557—2020[S]. 北京:中国建材工业出版社,2020.

[15] 王盘龙,杨光. 废弃混凝土粉体活化试验研究[J]. 山西建筑,2016,42(15):14-116.

[16] 杜超,刘飞,万媛媛,等. 低质高碳粉煤灰制备粉煤灰贝利特水泥及其特性研究[J]. 材料导报,2017,31(12):30-34.

[17] 朱明,雪高瑞,穆元冬. γ-C2S 和 β-C2S 的碳化与水化活性研究[J]. 硅酸盐通报,2017,36(9):3036-3040.

[18] Tang Qin, Ma Zhiming, Wu Huixia, et al. The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review[J]. Cement and Concrete Composites, 2020,114:103807.

- 实践教学产教融合模式构建路径[J]. 西部素质教育, 2023, 9(7): 9-12.
- [10] 王要武, 王 硕, 孙成双, 等. 我国工程管理本科专业发展状况分析[J]. 工程管理学报, 2021, 35(5): 153-158.
- [11] 范大波, 金 波, 雷彩虹, 等. 新版专业目录下土建类专业人才培养模式构建与实施策略——杭州科技职业技术学院的探索与实践[J]. 中国职业技术教育, 2023(5): 74-80, 91.
- [12] 中国工程教育专业认证协会 教育部教育质量评估中心. 关于发布已通过工程教育认证专业名单的通告[Z]. 工程教育认证通告[2023]1号, 2023-06-21.
- [13] 郑兵云, 张 恒, 钱应苗. 新工科建设与智能建造双重驱动下工程管理专业创新型人才培养路径研究[J]. 长春师范大学学报, 2021, 40(12): 147-149, 181.
- [14] 唐文静. 绿色施工理念下的建筑工程管理模式创新路径探究[J]. 工程与建设, 2021, 35(6): 1381-1382.
- [15] 李丽民, 周 基, 蒋小玲, 等. CDIO 理念下地方本科院校应用型创新人才培养模式思考与探索——以土建类专业为例[J]. 湖南科技学院学报, 2022, 43(5): 107-109.
- [16] 邵玉伟. 土建类专业课程思政的反思与实践路径[J]. 建筑结构, 2023, 53(3): 155.
- [17] 宋宇名. 课程思政理念下工程管理教学实践探索——评《工程管理专业业务实训教程》[J]. 科技管理研究, 2022, 42(23): 253.
- [18] 米文静, 杨小锋. 1+X 证书制度下工程管理专业课证融合人才培养模式研究[J]. 商洛学院学报, 2022, 36(4): 91-96.
- [19] 严景宁. 新工科背景下工程管理专业课程思政建设探索[J]. 西部素质教育, 2021, 7(23): 1-3.
- [20] 宫培松, 肖天龙, 孙 峻, 等. 基于知识嵌入的工程化管理信息化人才培养[J]. 高等工程教育研究, 2021(6): 55-61.
- [21] 孙林娜, 时 伟, 郭 栋, 等. “智能+教育”背景下的 MOOC + SPOC 教学模式改革与探索——以《土力学》为例[J]. 水利与建筑工程学报, 2022, 20(1): 207-210.
- [22] 廖红建, 黎 莹. 工科专业课程思政教学探索——以《土力学》混合式教学为例[J]. 水利与建筑工程学报, 2022, 20(1): 195-198.
- [23] 王文静, 许念勇. 产教融合视阈下工程管理专业校企协同育人途径探究[J]. 创新创业理论与实践, 2022, 5(21): 106-108.
- [24] 中共中央 国务院. 关于全面深化新时代教师队伍建设改革的意见[Z]. 2018-01-20. https://www.gov.cn/zhengce/2018-01/31/content_5262659.htm.
- [25] 国务院. 关于印发国家职业教育改革实施方案的通知[Z]. 国发[2019]4号, 2019-01-14.
- ~~~~~

(上接第 199 页)

- [46] Aydin S, Mohsen S, Anikender K, Hossein G. Prediction of air quality in Tehran by developing the nonlinear ensemble model[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 259: 120825.
- [47] 范科科, 段利民, 张 强, 等. 基于多种高分辨率卫星数据的 TRMM 降水数据降尺度研究——以内蒙古地区为例[J]. 地理科学, 2017, 37(9): 1411-1421.
- [48] 王 雷, 龙永清, 杨勤科. 重采样方法对 DEM 数据质量的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 72-77.
- [49] 付 超, 湛 芸, 单九生. 地形因子对降水的影响研究综述[J]. 气象与减灾研究, 2017, 40(4): 318-324.
- [50] 赵 琪, 王 琳, 潘世兵, 等. 荒漠-绿洲过渡带 NDVI 演变及影响因子相关性分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2024, 22(3): 239-249.
- [51] 皇 彦, 宋海清, 胡 琦, 等. 2000—2020 年内蒙古 NDVI 时空动态及其对水热条件的响应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 197-204, 213.
- [52] Wang J, Rich P M, Price K P. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(11): 2345-2364.
- [53] 闵庆文. 内蒙古草甸草场天然牧草产量形成的农业气象模式及其应用[J]. 大气科学学报, 1993, 16(2): 156-162.