

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ УПРОЧНЕННОГО ГРУНТА НА ОСНОВЕ ГЕОПОЛИМЕРА С БАЗАЛЬТОВЫМ ВОЛОКНОМ

ПЭЙ ВЭНЬДА

*Школа гражданского строительства, Внутреннемонгольский политехнический университет,
Хух-Хото, Китайская Народная Республика*

ШИ ЦЗИНЬНА

*Лаборатория зеленого строительства и интеллектуального обслуживания гражданских сооружений
Внутренней Монголии,
Хух-Хото, Китайская Народная Республика*

ЧЖАН ЧЖИСИНЬ

*Внутреннемонгольский университет архитектурных технологий,
Хух-Хото, Китайская Народная Республика*

Ю. Н. ДУБРОВА, И. А. РОМАНОВ, С. В. НАБЗДОРОВ

*УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407*

(Поступила в редакцию 14.04.2026)

Для решения проблем повторного использования техногенно-нарушенного пылеватого суглинка, контроля трещинообразования в закрепленном грунте, а также для достижения баланса между текучестью и прочностью геополимерного закрепленного грунта в данном исследовании базальтовое волокно объединено с геополимером для получения нового фиброцементирующего состава, который затем смешивается с техногенным пылевым суглинком. Путём изменения влажности и содержания геополимера проводятся испытания на прочность при сжатии с целью изучения влияния влажности, содержания геополимера, времени твердения и базальтового волокна на прочность закрепленного грунта при сжатии. Результаты служат теоретической основой для подбора оптимального состава смеси.

В качестве объекта исследования выбран пылеватый суглинок одного из строительных объектов в городе Хух-Хото. Содержание геополимера варьировалось на уровнях 10 %, 15 %, 20 %, 25 %; влажность составляла 63 %, 64 %, 65 %; содержание базальтового волокна — 0,3 % от массы прекурсора геополимера. Образцы выдерживались в течение 7 и 28 суток с последующим определением прочности на сжатие.

Результаты показывают, что влажность оказывает значительное негативное влияние на прочность закрепленного грунта при сжатии. Наилучшие показатели прочности достигаются при влажности 63 %. Превышение этого значения приводит к потере ранней прочности, которую невозможно компенсировать последующим твердением. Содержание геополимера положительно коррелирует с прочностью на сжатие: при содержании менее 15 % рост прочности незначителен, тогда как при превышении 15 % наблюдается существенное увеличение. Влияние времени твердения возрастает с увеличением содержания геополимера. Эффективность базальтового волокна в повышении прочности зависит от содержания геополимера: при содержании 10–15 % заметного улучшения не наблюдается, тогда как при содержании 20 % и более базальтовое волокно даёт значительный прирост прочности. Волокно выполняет армирующую роль, связываясь с цементирующими материалами.

Ключевые слова: геополимер; базальтовое волокно; прочность; влагосодержание.

To address the issues of reusing man-made silt loam, controlling cracking in stabilized soil, and achieving a balance between the flowability and strength of geopolymer stabilized soil, this study combined basalt fiber with geopolymer to produce a new fiber cementitious composition, which is then mixed with man-made silt loam. Compressive strength tests were conducted by varying the moisture content and geopolymer content to study the effects of moisture content, geopolymer content, curing time, and basalt fiber on the compressive strength of the stabilized soil. The results provide a theoretical basis for selecting the optimal mixture composition.

Silty loam from a construction site in Hohhot was chosen as the test sample. Geopolymer content varied at 10 %, 15 %, 20 %, and 25 %; moisture content was 63 %, 64 %, and 65 %; and basalt fiber content was 0.3 % of the geopolymer precursor mass. Samples were cured for 7 and 28 days, followed by determination of compressive strength.

The results show that moisture content has a significant negative impact on the compressive strength of the stabilized soil. The best strength values are achieved at a moisture content of 63 %. Exceeding this value leads to a loss of early strength, which cannot be compensated for by subsequent curing. Geopolymer content correlates positively with compressive strength: at a content of less than 15 %, strength gain is insignificant, while at levels above 15 %, a significant increase is observed. The effect of curing time increases with increasing geopolymer content. The effectiveness of basalt fiber in increasing strength depends on the geopolymer content: at a content of 10–15 %, no noticeable improvement is observed, while at a content of 20 % or more, basalt fiber provides a significant increase in strength. The fiber acts as a reinforcement by bonding with cementitious materials.

Key words: geopolymer; basalt fiber; strength; moisture content.

Введение

На протяжении последних лет в строительной отрасли Китая имеется тенденция поиска альтернативы традиционным вяжущим веществам таким как портландцемент, потому что производство цемента энергозатратный процесс и выделяет много углекислого газа.

Одной из перспективных замен являются геополимеры. Геополимеры представляют материал, который получается из отходов промышленности (например, золы от сжигания угля или измельченного

шлака) преобразованный путем химической реакции. По своей структуре он похож на цемент, но для его производства не нужен обжиг. Поэтому на него тратится всего 10–30 % энергии, и практически не создается вредных выбросов [1]. Кроме того, геополимеры обладают высокой термостойкостью, химической стойкостью и обеспечивают высокую прочность на сжатие, поэтому многие ученые считают их хорошей заменой цементу [2].

При строительстве дорог, зданий или насыпей часто приходится укреплять грунт (например, глину или суглинок), чтобы он не проседал и не разрушался. Одним из способов является добавить в грунт цемент. Исследования [3] показали, что чем больше цемента, тем плотнее получается смесь, а глина под действием щёлочи и кальция превращается в прочный каменный материал. Другие эксперименты [4] подтвердили, что свойства такого грунта сильно зависят от его внутренней структуры.

Одна из главных проблем укрепленного грунта является появление трещин. С ними можно бороться, добавляя в смесь короткие прочные волокна (так называемое фибровое армирование). Очень хорошо подходят базальтовые волокна, получаемые путем плавления горных пород (базальта) при температуре 1400–1600 °С с последующим вытягиванием в тонкие нити. Это экологичный, прочный и огнестойкий материал [5]. Эксперименты [6] показали: чем больше таких волокон и чем они короче, тем ниже прочность материала на сжатие (иногда падает на 28 %), зато заметно повышается прочность на изгиб и растяжение и материал становится менее хрупким.

Сейчас в строительстве используют и цемент, и геополимеры для укрепления грунта. Опыты [7] показали, что на ранних сроках цемент даёт более прочный грунт, но спустя длительное время геополимерный грунт становится более прочным. Если не применять специальную активацию, то просто добавленный шлак почти не укрепляет грунт, а только заполняет пустоты. Другое исследование [8] показало, что геополимер из рисовой шелухи делает грунт более цельным, объединяя его частицы.

Однако до сих пор нет четких правил, как именно контролировать трещины в укрепленном грунте. Также неясно, как правильно подбирать влажность и текучесть смеси для самоуплотняющихся геополимерных грунтов (чтобы они сами растекались и заполняли форму).

Основная часть

Для эксперимента использовался пылеватый суглинок, взятый со строительной площадки (глубина отбора 12 м) при реконструкции больницы в городе Хух-Хото, Регион Внутренняя Монголия, Китайская Народная Республика. Основные физические свойства грунта были определены по действующему национальному стандарту Китая, устанавливающий методы лабораторных испытаний грунтов GB/T 50123-2019. Результаты приведены в табл. 1.

Использовалась летучая зола первого сорта, шлак марки S105. Щелочной активатор представлял смесь жидкого стекла и гидроксида натрия. Жидкое стекло использовалось от компании LuBoshu (провинция Хэнань). Гидроксид натрия был в виде гранул, химчистоты «аналитическая чистота».

Базальтовое волокно длиной 9 мм.

Таблица 1. Основные физические показатели материалов

Свойство грунта						
Удельный вес, кН/м³	Естественная влажность, %	Максимальная плотность сухого вещества, г/см³	Удельная плотность	Предел текучести, %	Предел пластичности, %	Число пластичности
19.8	24.3	1.59	2.72	27.0	14.0	13.0
Химический состав золы, в %						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	SO ₃	Другое
53.97	31.15	4.16	4.01	1.13	0.73	4.85
Химический состав шлака, в %						
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	-
35.3	34.5	16.7	1.24	1.5	5.01	-
Основные параметры жидкого стекла						
Плотность (г/см³)	Силикатный модуль	Градус Боме (Bé)	SiO ₂ (%)	Na ₂ O(%)		
1.5	2.5	50°	33.11	14.12		

В качестве отвердителя используется щелочной активатор с добавлением базальтового волокна. Щелочной активатор готовился следующим образом: соотношение шлака и летучей золы принимали 1:1. Для получения активатора с модулем 1,4 задавали жидко-твёрдое отношение, равное 0,7 (где твердая фаза – это зола и шлак, а жидкая – вода и раствор жидкого стекла с гидроксидом натрия). При этом вода составляет 40 % жидкой фазы, а смесь жидкого стекла и гидроксида натрия – 60 %. Соотношение между жидким стеклом и гидроксидом натрия составляет 100:13,32.

Базальтовое волокно вводится по массовой доле в количестве 0,3 % от суммарной массы золы и шлака. Грунт, отобранный на строительной площадке, разбивался на части (размер не более 5 см), высушивался в сушильном шкафу, затем измельчается в вибромельнице и просеивался через сито с ячейкой 2 мм. Полученный порошок использовали для приготовления смесей. Отвердитель добавляли в количестве 10 %, 15 %, 20 % и 25 % от массы грунта. Поскольку введение волокна снижает подвижность (текучесть) смеси, полное водосодержание (влажность) соответствующе увеличивали до

значений 63 %, 64 % и 65 %. Влажность определялась как отношение массы воды к массе сухого грунта. Приготовленную смесь заливали в формы размером 70,7×70,7×70,7 мм. После извлечения из форм образцы помещают в камеру нормального твердения с температурой 20±2 °С и влажностью не менее 95 % на 28 суток. Прочность на сжатие определяли через 7 и 28 суток. Для оценки влияния базальтового волокна дополнительно готовят контрольную смесь с влажностью 63 %, но без волокна. Составы геополимерного закрепленного грунта приведены в табл. 2.

Таблица 2. Пропорции компонентов смеси для грунта, стабилизированного геополимерами

Номер образца	Содержание прекурсора геополимера	Содержание базальтового волокна от массы прекурсора	Полное водосодержание
X10-63	10%	0.3%	63%
X15-63	15%	0.3%	63%
X20-63	20%	0.3%	63%
X25-63	25%	0.3%	63%
X10-64	10%	0.3%	64%
X15-64	15%	0.3%	64%
X20-64	20%	0.3%	64%
X25-64	25%	0.3%	64%
X10-65	10%	0.3%	65%
X15-65	15%	0.3%	65%
X20-65	20%	0.3%	65%
X25-65	25%	0.3%	65%
D10-63	10%	0%	63%
D15-63	15%	0%	63%
D20-63	20%	0%	63%
D25-63	25%	0%	63%

Используемый прибор для определения прочности на сжатие пресс модели WDW-100G производства Чанчуньской компании. Скорость сжатия была управляемой и составляла 1 мм/мин. Нагрузка регистрировалась в момент разрушения. Для каждой группы геополимерного отвержденного грунта испытывались 3 параллельных образца.

Согласно стандарту T/CECS 1175-2022 «Технические условия на самоуплотняющиеся затвердевшие грунты», начальная текучесть самоуплотняющегося затвердевшего грунта должна соответствовать требованиям 160–200 мм. После испытаний для дальнейших исследований использовалась дозировка добавки, обеспечивающая требуемую текучесть. Результаты испытаний (табл. 3) показывают, что текучесть соответствует стандарту T/CECS 1175-2022 «Технические условия на самоуплотняющиеся затвердевшие грунты».

Таблица 3. Испытание на текучесть самоуплотняющегося затвердевшего грунта из базальтового волокна и геополимера

Соотношение смешивания	Текучесть (мм)	Соотношение смешивания	Текучесть (мм)
X10-63	152	D10-63	153
X15-63	161	D15-63	161
X20-63	170	D20-63	169
X25-63	178	D25-63	178
X10-64	157	X10-65	160
X15-64	165	X15-65	169
X20-64	175	X20-65	179
X25-64	182	X25-65	188

На рис. 1 представлены значения прочности через 7 суток на сжатие. Установлено, что образцы с начальным влагосодержанием 63 % обладают систематически более высокой прочностью по сравнению с образцами при влагосодержании 64 % и 65 %. Во всех случаях с ростом дозировки геополимера прочность возрастает. Для влажности 63 % выявлен пороговый характер: при дозировке менее 15 % прирост незначителен (5,17 %), тогда как превышение этого порога вызывает резкое увеличение прочности – на 62,3 % при повышении дозировки с 15 до 20 % и на 58,59 % – с 20 до 25 %. Для образцов с влажностью 64 и 65 % зависимость прочности от дозировки линейна, а общий прирост превышает 40 %.

Увеличение дозировки геополимера повышает содержание летучей золы и шлака. В щелочной среде происходит разрыв связей Si–O и Al–O (деполимеризация) с образованием дополнительных кремне- и алюмоокислородных тетраэдров. Они взаимодействуют с ионами Ca²⁺ и Na⁺, формируя гели C–A–S–H (Calcium Aluminosilicate Hydrate) и N–A–S–H (Sodium Aluminosilicate Hydrate).

Эти гели связывают глинистые частицы, заполняют поры, а базальтовое волокно выполняет предположительно мостиковую роль, что на макроуровне проявляется в росте прочности.

Результаты испытаний при 28-дневной прочности представлены на рис. 2. Качественно картина повторяет 7-дневные данные: максимальная прочность зафиксирована при влажности 63 %, минимальная – при 65 %. При влажности 63 % пороговая дозировка также составляет 15 %: прирост ниже порога – 6,79 %, выше – 48,4 % (15→20 %) и 97,3 % (20→25 %). Для влажности 64 % тенденция аналогична, а для 65 % – рост остается линейным с приростом, превышающим 55 %.

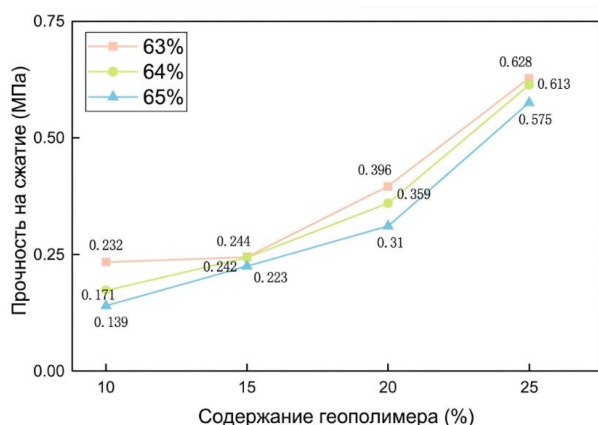


Рис. 1. Величина прочности на сжатие через 7 суток

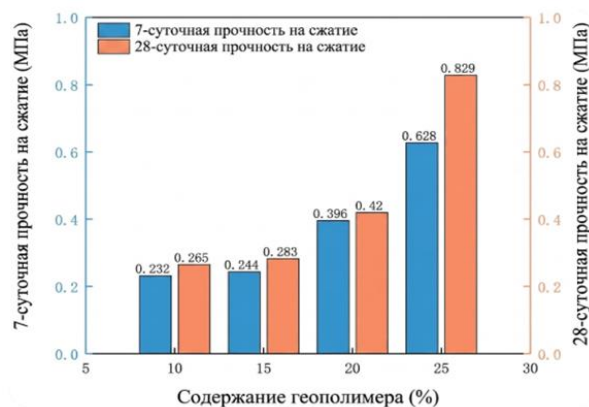


Рис. 2. Величина прочности на сжатие через 7 суток и 28 суток при фиксированной влажности (63 %)

Важно отметить, что с увеличением срока твердения различия между образцами с разным начальным влагосодержанием уменьшаются, то есть влияние начальной влажности снижается. Однако при превышении некоторого порога (между 64 % и 65 % в данной работе) потеря прочности на ранней стадии в дальнейшем не компенсируется. Причина в раннем характере геополимерных реакций. В начале процесса, в сильнощелочной среде, образуется мало геля, поры многочисленны, скорость реакции высока, но физическая прочность мала. Увеличение влажности разбавляет щёлочь, снижая концентрацию OH^- и «эффективную площадь реакции» с твердой фазой [9–11]. На поздних стадиях из-за ослабления зародышеобразования и замедления синтеза количество гелей C-A-S-H и N-A-S-H оказывается недостаточным для достижения высокой прочности.

Также представляет интерес и влияние срока твердения при фиксированной влажности. При влагосодержании 63 % (рис. 2) для дозировок геополимера $\leq 20\%$ влияние возраста на прочность выражено слабо. При дозировке 25 % 28-дневная прочность превышает 7-дневную на 32 %, что объясняется увеличением выхода гелевой фазы и более эффективной работой базальтового волокна. При влажности 64 % (рис. 3) тенденция та же, но абсолютные значения 28-дневной прочности несколько ниже из-за снижения pH и концентрации активатора. При влажности 65 % (рис. 4) прочность снижается ещё заметнее.

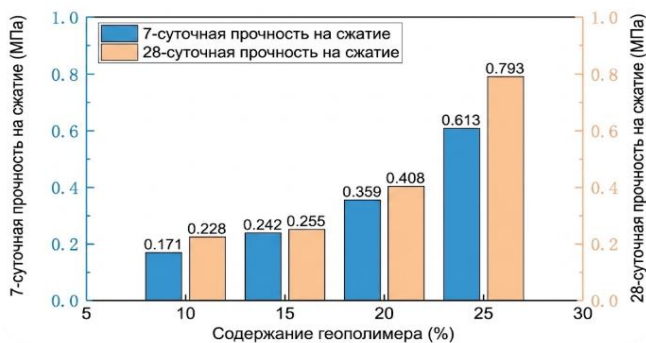


Рис. 3. Величина прочности на сжатие через 7 суток и 28 суток при фиксированной влажности (64 %)

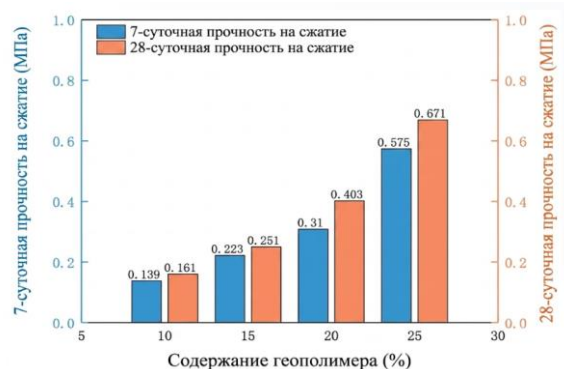


Рис. 4. Величина прочности на сжатие через 7 суток и 28 суток при фиксированной влажности (65 %)

Добавление базальтового волокна практически не сказывается на прочности при дозировках геополимера 10 % и 15 %, но при 25 % приводит к значительному расхождению значений (рис. 5). Так как при малом количестве геополимера образуется недостаточно геля C-(N)-A-S-H, адгезия волокна к матрице не реализуется. С ростом дозировки количество геля увеличивается, волокно эффективно связывается, проявляя предположительно «мостиковый эффект», что дает заметный прирост прочности. При 28-дневном наборе прочности закономерность та же: при дозировках 10 и 15 % прирост прочности за счёт волокна не превышает 5,16 и 4,01 % соответственно, а при более высоких дозировках достигает 29,5 % (рис. 6).

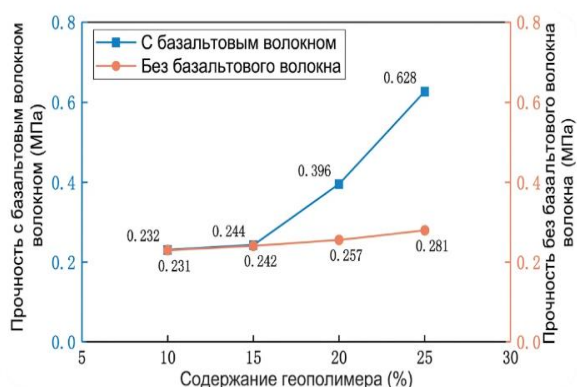


Рис. 5. Величина прочности на сжатие через 7 суток при фиксированной влажности (65 %)

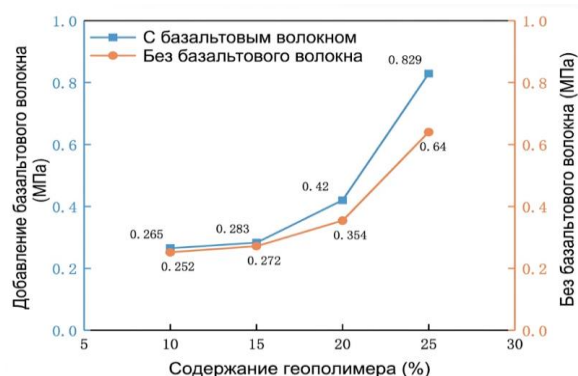


Рис. 6. Результаты испытания на сжатие при 28-суточном наборе прочности с варьируемой дозировкой геополимера и базальтовыми волокнами

Это подтверждает, что положительное влияние волокна проявляется только при достаточном количестве гелевой фазы.

Заключение

В данном исследовании было изучено комплексное влияние влажности, содержания геополимера, продолжительности твердения и армирования базальтовыми волокнами на прочность стабилизированного грунта при одноосном сжатии.

На основе анализа механизмов протекания химических реакций установлено, что влажность выступает критическим фактором, оказывающим существенное негативное воздействие: оптимальная прочность достигается при показателе 63 %, тогда как превышение этого порога ведет к значительному снижению щелочности реакционной среды, что подавляет синтез цементирующих веществ и ослабляет эффект стабилизации.

Напротив, дозировка геополимера демонстрирует прямую положительную корреляцию с прочностными характеристиками, причем после преодоления порога в 15 % наблюдается качественный скачок в приросте прочности за счет более обильного образования продуктов гидратации.

Этот эффект усиливается фактором времени: влияние возраста образцов становится наиболее выраженным при высоких дозировках (до 25 %), где прочность на 28-е сутки значительно превосходит показатели 7-суточного периода. Роль базальтовых волокон также тесно сопряжена с концентрацией связующего: при низких дозировках (10–15 %) их влияние минимально, однако при содержании геополимера от 20 % и выше, вероятно, активируется «мостиковый эффект», обеспечивающий дополнительное упрочнение за счет сцепления волокон с развитой матрицей цементирующих веществ.

Обобщая результаты, можно сделать вывод, что оптимальными условиями в рамках эксперимента являются влажность 63 %, дозировка геополимера не менее 20 % в сочетании с базальтовым армированием и 28-суточным периодом твердения, при этом отсутствие признаков стабилизации прочности на уровне содержания геополимера в 25 % указывает на потенциальную целесообразность дальнейшего повышения дозировки для достижения максимального технологического эффекта.

ЛИТЕРАТУРА

- Li J, Xie X, Li B Q, et al. Research progress of geopolymer[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(6): 141-148.
- Sun H, Ma Z B, Lu G J, et al. Research progress on alkali-activated fly ash geopolymer[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(11): 140-153.
- Fan H H, Gao J E, Wu P T, et al. Physicochemical mechanism of cement-based soil stabilizer solidified soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3741-3745.
- Yuan L, Yang Z Y, Wu Z Y, et al. Deformation and energy dissipation characteristics of silty clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(6): 1870-1877.
- Shi J N, Zhao Y R, Hao S, et al. Study on uniaxial compressive stress-strain curve of basalt fiber concrete using DIC technology[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(6): 1668-1673, 1680.
- Yu B, Zhang Y L, Xu Y, et al. Mechanical properties of chopped basalt fiber reinforced cement-based composites[J]. Industrial Construction, 2024, 54(6): 197-205.
- Tian W., Yun W., He W.H., et al. Study on compressive strength and solidification mechanism of slag-based geopolymer stabilized loess. Tumugongxue Xuebao [Journal of Civil Engineering], 2025, vol. 58, no. 11, pp. 140-152.
- Chen C, Cheng T, Gong W L, et al. Analysis of influencing factors in fly ash geopolymer reaction system[J]. Materials Review, 2016, 30(24): 118-123.
- Peng Y Q, Guo R X, Lin Z W, et al. Review on factors affecting mechanical properties of fly ash geopolymer[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(3): 858-866.
- Yang S Y, Zhao R D, Jin H S, et al. Study on parameters affecting early strength of fly ash geopolymer mortar[J]. Journal of Engineering Science and Technology, 2020, 52(6): 162-169.
- He J F. Study on activation effect of alkali content on water glass-activated geopolymer[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.