

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЫХЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД, УКРЕПЛЕННЫХ ДВУХКОМПОНЕНТНЫМИ ПОЛИМЕРНЫМИ СОСТАВАМИ

Татьяна Викторовна Шилова

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, к.т.н., старший научный сотрудник, тел. (923)708-97-29, e-mail: shilovatanya@yandex.ru

Леонид Алексеевич Рыбалкин

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, к.т.н., научный сотрудник, тел. (983)323-33-62, e-mail: leonid.rybalkin@gmail.com

Андрей Николаевич Дробчик

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, инженер, тел. (953)797-32-29, e-mail: valker.tiamant@mail.ru

В статье рассматриваются вопросы повышения физико-механических свойств рыхлых осадочных пород путем химического укрепления двухкомпонентными полимерными смолами. Приведены результаты лабораторных экспериментов по укреплению мелкозернистого кварцевого песка двухкомпонентными органоминеральными и полиуретановыми составами. В экспериментах нагнетание смол выполнялось двумя способами. Первый способ заключается в последовательной закачке отдельных компонент полимерных составов в образцы горной породы. Второй способ состоит в нагнетании готовых полимерных смесей. Получено, что использование двухкомпонентных органоминеральных композиций обеспечивает более эффективное укрепление рыхлых осадочных пород по сравнению с пенополиуретановыми композициями. Прочность на одноосное сжатие укрепленного мелкозернистого песка в среднем в 2,5 - 3 раза больше при последовательной закачке отдельных компонентов по сравнению с закачкой готовых композиций. Модуль упругости полученных образцов в 5,5-6 раз больше при последовательной закачке отдельных компонентов по сравнению с закачкой полностью приготовленных составов. Полученные данные могут быть использованы для выбора и оптимизации способа нагнетания двухкомпонентных полимерных композиций для стабилизации нарушенных пород и гидроизоляции подземных горных выработок.

Ключевые слова: двухкомпонентный полимерный состав, рыхлая горная порода, химическое укрепление, прочностные и деформационные свойства

LAB-SCALE TESTS OF INCOHERENT ROCK REINFORCEMENT USING TWO-COMPONENT POLYMER BLENDS

Tatyana V. Shilova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, +7 923 7089729, e-mail: shilovatanya@yandex.ru

Leonid A. Rybalkin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, +7 983 323 3362, e-mail: leonid.rybalkin@gmail.com

Andrei N. Drobchik

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Engineer, +7 953 797 3229, e-mail: valker.tiamant@mail.ru

The study addresses improvement of physical and mechanical properties of incoherent sediments by means of their chemical reinforcement using two-component resins. The lab-scale testing data on reinforcement of fine-grained quartz sand using two-component activated mineral and polyurethane resin blends are presented. Resins were injected by two ways on the tests. The first method was sequential injection of the polymer blend components in rock samples. The second method was injection of finished polymer blends. The two-component activated mineral and polyurethane resin blends ensure more effective reinforcement of incoherent sediment rocks as against foamed polyurethane blends. The uniaxial compression strength of reinforced fine-grained sand is 2.5–3 times higher in case of sequential injection of the components than in injection of finished mixtures. The elasticity modulus of the reinforced samples is 5.5–6 times higher in sequential injection than in injection of finished blends. The test results are useful for selection and optimization of injection method for two-component polymer blends in stabilization of broken rocks and in water-proofing of underground excavations.

Keywords: two-component polymer blend, incoherent rock, chemical reinforcement, strength and deformation characteristics

Введение

В настоящее время способы, применяемые для стабилизации горных пород и гидроизоляции выработок, включают упрочнение и уплотнение массива нагнетанием полимерных смол, заполнение куполов и пустот путем тампонажа вспенивающимися составами и др. В технологиях химического воздействия на массив горных пород используются полимерные, полимерцементные составы, включающие смолы, пены, гели, материалы для нанесения слоевых покрытий на поверхность выработок и др. [1-6]. Преимущества и недостатки основных типов композиций рассмотрены в работах [7-11]. Известные методы физико-химического воздействия на горные породы основаны на нагнетании либо однокомпонентных, либо двухкомпонентных составов, компоненты которых смешиваются заранее. В результате в массив подается уже готовый полимеризующийся состав, глубина проникновения которого зависит от времени его отверждения, а также от изменения вязкости и адгезии в процессе полимеризации. Это ограничивает зону воздействия, особенно в низкопроницаемых породах, а также в породах с развитой поверхностью микроструктурных дефектов – берегов трещин, обломочного материала и т.п. [12-15]. В настоящем исследовании для увеличения времени пропитки и зоны воздействия предлагается использовать двухкомпонентные составы на полиуретановой и органоминеральной основах, но с покомпонентной закачкой, при которой сначала закачивается один компонент, затем – другой, а их взаимодействие между собой происходит не при объемном смешивании, а непосредственно в горной породе [16]. В статье приведены результаты экспериментальных исследований укрепления мелкозернистого песка двухкомпонентными органоминеральными и полиуретановыми составами в условиях нагнетания готовых композиций и последовательной закачки отдельных компонент.

Методы и материалы

Эксперименты проводили с мелкозернистым кварцевым песком, который подвергался предварительной обработке. Предварительная обработка включала промывание, высушивание в лабораторном сушильном шкафу при 105-110°C до постоянной массы, определение гранулометрического состава. Пробы песка после высушивания взвешивали 3 раза, при этом приемлемой считалась погрешность не более 0,01г, затем определяли гранулометрический состав. Основная фракция (размер частиц 0,150-0,210мм) составила более 60 масс. % [17].

В экспериментах использовали два двухкомпонентных полимерных состава: органоминеральная смола, предназначенная для инъекционного заполнения пустот в массиве; вспенивающаяся полиуретановая смола, предназначенная для укрепления неустойчивых и нарушенных горных пород. Обе композиции готовятся смешиванием компонентов А и Б в объёмном соотношении 1:1 непосредственно перед вводом в горную породу, их технические характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства двухкомпонентных органоминерального и полиуретанового составов

	Вязкость при 25°C, мПас	Плотность при 25°C, г/см ³	Фактор вспенива- ния	Время начала реакции/пол- ного отверде- вания, с	Темпера- тура (макс.) ре- акции, °C
Двухкомпонентный органоминеральный состав					
Компонент А	137+/-2	1,4	-	-	-
Компонент Б	131+/-5	1,2	-	-	-
Готовый со- став (А+Б в объемном соотноше- нии 1:1)	-	-	1	210-240	45
Двухкомпонентный полиуретановый состав					
Компонент А	180+/-5	1,1	-	-	-
Компонент Б	230+/-20	1,2	-	-	-
Готовый со- став (А+Б в объемном соотноше- нии 1:1)	-	-	6	150/480-600	140

Тестовый образец мелкозернистого песка объемом 400см³ размещали в цилиндрической емкости, в которую в дальнейшем закачивали составы. Эксперименты проводили для двух различных способов нагнетания полимерных композиций: по-

компонентная закачка (последовательная подача компонентов А и Б, начало полимеризации происходит внутри образца горной породы) и нагнетание готовых составов (подача сразу после смешивания компонентов А и Б, начало реакции происходит вне образца породы). Объем каждого компонента в экспериментах составлял 100мл. Нагнетание проводили при импульсной и ступенчатой подаче давления. В первом случае подача полимерных составов в образце горной породы осуществлялась при ступенчатом повышении давления от 0 до 0,5 МПа с шагом 0,02 МПа. Время выдерживания на каждом шаге составляло 60 секунд. Импульсная закачка осуществлялась при резком повышении давления от 0 до 1,5 МПа. После нагнетания полимерных составов выдерживали время их полного отверждения, затем извлекали образец, оценивали объем укрепленной части породы, изготавливали цилиндрические керны и проводили испытания для определения деформационных и прочностных характеристик песка. Объем консолидированной части определяли, как разницу между начальным объемом пробы и объемом рыхлого (сыпучего) материала, оставшегося после нагнетания полимерных смол. Деформационно-прочностные испытания укрепленного мелкозернистого песка проводили в соответствии со стандартами ГОСТ 21153.2-84, ГОСТ 28985-91, ГОСТ 28985-9 и др. [18-20].

Результаты

В результате нагнетания полиуретанового и органоминерального составов в режиме покомпонентной закачки и ступенчатой подачи давления, объем укрепленной породы составил 35-45%. Отмечается неравномерное распределение отвержденных полимерных композиций в образцах (рис. 1). При покомпонентной закачке и импульсной подаче давления объем составил 20-35%. Отвержденная композиция равномерно распределена в полученном образце. В режиме нагнетания готового органоминерального состава и ступенчатой подачи давления объем укрепленной породы составил 10-15% от начального образца. Результаты прочностных и деформационных испытаний образцов укрепленного мелкозернистого песка приведены в табл. 2.

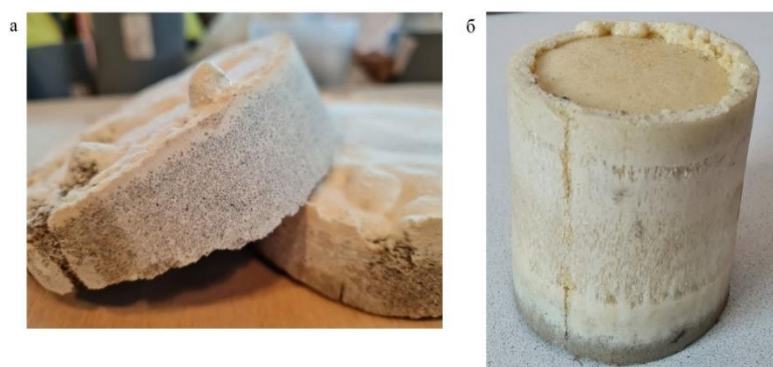


Рис. 1. Укрепленный мелкозернистый песок, полученный в результате нагнетания: готового органоминерального состава при резком повышении давления от 0 до 1,5МПа (а) и готового вспенивающегося полиуретанового состава при ступенчатом повышении давления (б)

Таблица 2

Деформационно-прочностные характеристики образцов мелкозернистого песка, укрепленного двухкомпонентными полимерными составами

Способ закачки двухкомпонентного состава в образец горной породы	Давление закачки, МПа	Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	Модуль упругости, МПа
Двухкомпонентный органоминеральный состав			
Покомпонентная	0-0,5МПа	12	883,2
		7,6	953,9
		16,9	1450,5
Готовый состав	0-0,5МПа	9,8	214,7
		7,7	157,8
		7,5	153,0
Двухкомпонентный полиуретановый состав			
Покомпонентная	0-0,5МПа	0,5	4,5
		0,9	-
		1,5	45,4
Готовый состав	0-0,5МПа	0,9	28,0
		0,8	13,8
		0,6	8,2

Обсуждение

Экспериментально исследовано укрепление рыхлых осадочных пород двухкомпонентными полимерными составами, включающее покомпонентную закачку и нагнетание готовых композиций в образцы. Методы апробированы на образцах мелкозернистого песка (основная фракция - размер частиц 0,150-0,210мм более 60 мас. %.), двухкомпонентных органоминеральных и вспенивающихся полимерных смолах. Установлено, что предпочтительным является последовательное покомпонентное нагнетание композиций при плавном ступенчатом повышении давления с выдерживанием временного интервала на каждом шаге. При этом обеспечивается более обширная зона пропитки вмещающих пород (на 15-25 % больше по сравнению с нагнетанием готовых композиций) и высокие деформационно-прочностные характеристики укрепленных горных пород. Проведенные деформационные испытания образцов мелкозернистого песка показали, что при покомпонентной закачке составов предел прочности на одноосное сжатие в среднем в 2,5 – 3 раза, модуль деформации в 5,5 - 6 выше по сравнению с нагнетанием готовых композиций. Физико-механические свойства образцов укрепленного песка, полученных при импульсной и ступенчатой подаче составов близки. Использование двухкомпонентных органоминеральных составов обеспечивает более эффективное упрочнение рыхлой породы, по сравнению с вспенивающимися полиуретановыми композициями. Предел прочности на од-

ноосное сжатие и модуль деформации образцов укрепленного мелкозернистого песка в среднем в 8 раз и 11 раз выше при упрочнении органоминеральным составом, чем при использовании полиуретанового. Существенные различия прочностных свойств связаны с различием реологических свойств композиций в процессе отверждения, фактором вспенивания, которые определяют распределение составов в объеме рыхлой породы в процессе нагнетания.

Заключение

Результаты исследований эксплуатационных свойств двухкомпонентных полимерных составов и укрепленного мелкозернистого песка показали, что предпочтительным является последовательное покомпонентное нагнетание композиций при плавном ступенчатом повышении давления с выдерживанием временного интервала на каждом шаге. При этом обеспечивается более обширная зона пропитки вмещающих пород (на 15-25 % больше по сравнению с нагнетанием готовых композиций) и высокие деформационно-прочностные характеристики укрепленных горных пород. Полученные результаты могут быть использованы для выбора и оптимизации способа нагнетания двухкомпонентных полиуретановых и органоминеральных композиций с целью стабилизации нарушенных пород и гидроизоляции подземных горных выработок.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 20-45-543009.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев В. В. Полимерные композиции в горном деле. – Наука, 1986.
2. Климчук, И.В. Опыт применения полимерных технологий на горнодобывающих предприятиях России / И.В. Климчук, В.М. Маланченко // Горная промышленность. – 2007. – № 4. – С. 22–25.
3. Hu X., Cheng W., Wang D. Properties and applications of novel composite foam for blocking air leakage in coal mine //Russian Journal of Applied Chemistry. – 2014. – Т. 87. – №. 8. – С. 1099-1108.
4. Cornely W. Elastified silicate resins and polyurethane foam resins for the stabilisation of strata - a comparison // Proceedings of the 6th International Seminary Reinforcement and sealing of rock and construction at the beginning of 21st century. - Ostrava, 2001.
5. Holter K. G. et al. Testing of sprayed waterproofing membranes for single-shell sprayed concrete tunnel linings in hard rock //Proceedings of the world tunnel congress. – 2014.
6. Šňupárek R. Laboratory testing of chemical grouts / R. Šňupárek, K. Souček // Tunnelling and Underground Space Technology. - 2000. - т. 15. - №. 2. - С. 175-185.
7. Hu X. M., Wang D. M. Enhanced fire behavior of rigid polyurethane foam by intumescent flame retardants //Journal of applied polymer science. – 2013. – Т. 129. – №. 1. – С. 238-246.
8. Hu X., Cheng W., Wang D. Properties and applications of novel composite foam for blocking air leakage in coal mine //Russian Journal of Applied Chemistry. – 2014. – Т. 87. – №. 8. – С. 1099-1108.
9. Shen H., Nutt S. Mechanical characterization of short fiber reinforced phenolic foam //Composites Part A: Applied science and manufacturing. – 2003. – Т. 34. – №. 9. – С. 899-906.

10. Rangari V. K. et al. Cloisite clay-infused phenolic foam nanocomposites //Journal of applied polymer science. – 2007. – Т. 103. – №. 1. – С. 308-314.
11. Чубриков А. В., Марков А. С., Хрипков В. В. Технология упрочнения зон нарушения полимерной смолой для сохранения высоких нагрузок на очистной забой //Уголь. – 2005. – №. 5. – С. 69-71.
12. Serdyukov S. V., Shilova T. V., Drobchik A. N. Polymeric insulating compositions for impervious screening in rock masses //Journal of Mining Science. – 2016. – Т. 52. – №. 4. – С. 826-833.
13. Shilova T. et al. Development of the impermeable membranes using directional hydraulic fracturing //Procedia engineering. – 2017. – Т. 191. – С. 520-524.
14. Шилова Т. В., Сердюков С. В. Формирование химически активного реагента в породном массиве для укрепления, изоляции и гидроразрыва горных пород //Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2017. – №. 3. – С. 36-41.
15. Anagnostopoulos C. A. et al. Physical and mechanical properties of chemically grouted sand //Tunnelling and underground space technology. – 2011. – Т. 26. – №. 6. – С. 718-724.
16. Anagnostopoulos C. A. Laboratory study of an injected granular soil with polymer grouts //Tunnelling and Underground Space Technology. – 2005. – Т. 20. – №. 6. – С. 525-533.
17. ГОСТ 12536-79 Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. – М.: Стандартиформ, 2008. – 17с.
1. 18. ГОСТ 21153.2-84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. - М.: Издательство стандартов, 2001. – 7с.
2. 19. ГОСТ 28985–91 Породы горные. Методы определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 10с.
3. 20. ГОСТ 21153.8-88 Породы горные. Методы определения предела прочности при объёмном сжатии. - М.: Издательство стандартов, 1988. – 16с.

© Т. В. Шилова, Л. А. Рыбалкин, А. Н. Дробчик, 2021