

## 15. ИНЖЕКЦИОННО ЗАЗДРАВЯВАНЕ И УПЛЪТНЯВАНЕ НА СКАЛИ

### 1. Уводни бележки

Дълбочинното здравяване и уплътняване на скали се осъществява чрез инжектиране на циментови, глинести, битумни и силикатни флуиди. То има широко приложение при строителството на язовирни стени, минни изработки и различни видове тунели. С негова помощ се решават следните основни задачи:

- намаляване на противоналягането при строителство на язовирни стени;
- понижаване на филтрационните загуби или водопритока към дълбоки изкопи и подземни съоръжения;
- предпазване на скалите от химична и механична суфозия;
- подобряване на якостното и деформационно поведение на скалния масив.

Инжектирането на скалите обикновено се прави на интервали отдолу нагоре или отгоре надолу в сондажи с диаметър обикновено 50 mm. При инжектирането на интервали се осъществява по-ефикасен контрол и се намаляват загубите на флуид. Интервалите се изолират с пакери.

Най-важната инженерногеоложка информация за успешното провеждане на инжектирането на скали се свежда накратко до следното:

- размери на пукнатините и празнините и степен на запълненост;
- геометрия на прекъснатостите;
- водоносност на пукнатините и празнините;
- проницаемост на масива (първоначална и след инжектиране);
- химичен състав на подземната вода;
- необходима дълготрайност на ефекта от инжектирането;
- достъпност на мястото за провеждане на инжекционните работи.

### 2. Инжектиране на циментова суспензия (циментация)

Циментацията на напуканите скали е една от най-добре разработените и най-широко прилагани инжекционни дейности в практиката. Тя се осъществява чрез нагнетяване на циментова суспензия под налягане от 0,03 до 1,0 МРа в предварително пробити сондажи. Суспензията запълва пукнатините в скалата, след което се втвърдява и увеличава нейната водоплътност и якост. Първоначално тя се движи турбулентно, но със запълване на пукнатините скоростта на движение намалява и се установява ламинарен режим, при който настъпва постепенно нейното свързване и намаляване на поглъщането ѝ от скалата.

Опитът показва, че циментацията е невъзможна, ако преобладаващият размер на пукнатините е под 0,1 mm и много трудна при пукнатини под 0,5 mm. При приближаване на тези граница дори с високи циментни отношения ( $V:C > 10\div 12$ ) и голямо налягане не може да се постигне дълбоко проникване на суспензията. Налага се повишаване на нейната дисперсност (допълнително смилане на цимента, добавка на глина и на повърхностно активни вещества) или се прибегва до химически разтвори.

Най-подходящи за циментация са напуканите скали, които имат коефициент на водопоглъщане  $q$  между 0,01 и 10 l/min. Допустимата скорост на движение на подземната вода е под 200 m/24 h. Водата не трябва да съдържа в

значително количество вещества агресивни спрямо цимента, каквито например са сулфатите. Върху хидролизата и хидратацията на циментовите минерали вредно влияе и повишената киселинност на средата.

Циментацията на напуканите скали се извършва в следния ред:

- Прокарване на инжекционни сондажи;
- Промивка на сондажите и пукнатините - целта е да се измие от тях запълнителя (най-често глинест), който затруднява проникването на циментовата суспензия. За увеличаване на ефекта промивната вода може да се аерира или да се добавят към нея химични реагенти.
- Измерване на относителното водопоглъщане;
- Приготвяне на циментовата суспензия и нейното транспортиране до сондажа. Тази процедура се извършва механизирано, като се използват специални бъркалки, напорни тръбопроводи и система от измерителни уреди.
- Нагнетяване на циментова суспензия. Обикновено се започва със суспензия с високо водо-циментно отношение (В:Ц до 8÷10) при малко налягане (0,03÷0,15 МРа) и се завършва с гъста суспензия (В:Ц до 0,6) при голямо налягане (до 1,0÷1,5 МРа). Инжектирането се прекратява обикновено при разход на суспензията под 0,01 l/min на 1 m от сондажа. При определяне на максимално възможното налягане се взема под внимание опасността от повдигане на повърхността на терена, от разтваряне на съществуващите и образуване на нови пукнатини. Прогнозирането на тези процеси е осъществимо на базата на опити на място.
- Прокарване на контролни сондажи и провеждане на опитни водонагнетявания за установяване на ефекта от циментацията.

В зависимост от конкретните условия инжектирането може да се извършва с единични сондажи или с група от сондажи. Нагнетяването на суспензията в редки случаи се извършва по цялото протежение на сондажа и най-често на интервали от него (средно от 3 до 5 m). Тектонските зони и големите пукнатини се третират отделно. Суспензията се нагнетява по циркулационния начин, ако при нагнетяването на вода налягането се държи постоянно, а безциркулационният начин се използва, ако не може да се поддържа постоянно налягане. При наличие на равномерно разпределени дребни пукнатини нагнетяването се извършва непрекъснато и с високо налягане. Поглъщането на цимент обикновено е под 50 kg/m.

При големи пукнатини и каверни инжектирането се извършва с прекъсвания след нагнетяване на големи количества суспензия (до 400÷500 kg/m). Използват се гъсти суспензии с добавка на едри фракции. Налягането обикновено е много ниско.

Консистенцията на нагнетяваната суспензия може да се определи приблизително според стойността на коефициента на относително водопоглъщане  $q$  (Табл. 15.1.).

За инжектиране на напукани скали се използват различни видове цимент, чиито избор зависи от характера на напукаността и размера на пукнатините, от скоростта на движение и състава на водата, и от икономически съображения.

Таблица 15.1. Зависимост между коефициента на водопоглъщане и отношението вода/цимент (В:Ц) на нагнетявания разтвор.

Коефициент на водопоглъщане $q$ , l/min	0,01÷0,1	0,1÷0,5	0,5÷1	1÷3 1÷2 *	3÷5 2÷5 *	5÷10
В:Ц по Воронкевич, 1981	8:1	6:1	4:1	2:1	1:1	0,5:1
В:Ц по Банник, 1976	10:1	8:1	6:1	4:1	2:1	-

\* границите са по Банник (1976)

Марката на цимента трябва да е по-висока от 40, а неговото качество да отговаря на изискванията на БДС и на инструкциите за провеждане на инжекционни работи. При големи пукнатини и скорости на движение на водата се използва бързо втвърдяващ се цимент и се добавят ускорители на втвърдяването – например,  $\text{CaCl}_2$ . При дребни пукнатини се работи с бавно втвърдяващ се цимент, към който се добавят различни пластификатори.

Специален обект на циментацията представляват окарстените варовици, скалите с много големи пукнатини и фугите между бетонните блокове на язовирните стени.

При окарстените скали и изоставените минни изработки се прибегва до т. н. запълнителна циментация. Технологиата на нейното осъществяване зависи от размера на празнините и от връзката между тях, от наличието на подземна вода и запълнител и от техниката, с която се разполага. Използват се циментно-пясъчни суспензии, циментни разтвори с добавка на пепел от ТЕЦ, каменно брашно и смляна шлага, циментоглинени разтвори с или без добавка на пясък, бързосвързващи и разширяващи се разтвори. Към разтворите могат да се добавят водно стъкло, алуминий на прах (разширяваща добавка) и др.

Циментационната техника трябва да осигурява предаване на големи количества гъста суспензия при значителен разход - 300÷500 l/min. Водопроводите за суспензията са с диаметър 38÷60 mm, а диаметърът на циментационните сондажи е над 90 mm. Суспензията се подава без или с малко налягане. Показател за запълване на карстова празнина е излизането на суспензия през сондажния отвор. При затворени празнини е целесъобразно пробиването на въздухоотвеждащ сондаж. Появата на суспензия през него показва, че празнината е запълнена.

Напоследък за запълване на карстови празнини се използват пеносуспензии. Това са циментови суспензии, към които се добавят химически вещества, допринасящи за отделяне на голямо количество въздух. Например, при реакцията на алуминиев прах с вар се отделя голямо количество водород. Голям обем въздушни мехури се образуват при добавка към суспензията на полиуретанова смола или на повърхностно-активни вещества. От 1 l циментова суспензия с тези добавки може да се получат до 3,8 l пеносуспензия, с което се спестяват много време и средства.

Характерно за пеносуспензиите е, че имат управляем обем, вискозитет и якостни свойства. Дори когато са подложени на големи деформации те не се напукват, което ги прави подходящи за изграждане на различни противифилтрационни диафрагми. Когато въздухът в пеносуспензията е 90÷180%, коефициентът на филтрация е  $10^{-6} \div 10^{-5}$  cm/s.

С помощта на циментацията се намалява не само филтрацията на напуканите скали, но се подобрява и тяхното деформационно поведение като земна основа. В резултат на циментацията модулът на общата деформация на земната основа може да нарасне 1,5÷2,5 пъти (Адамович, 1980; Воронкевич, ред., 1981).

### 3. Инжектиране на глинеста суспензия (глинизация)

Глинизацията на напукани скали се осъществява по технологията на циментацията. Както беше посочено в гл. 13, в практиката често се използват глино-циментни суспензии или към циментовата суспензия се прибавя глина за подобряване на нейната подвижност, проникваща способност и за избягване на разслояването ѝ.

Глинизацията е приложима при коефициент на водопоглъщане  $q$  от 0,1 до 100 l/min, но най-често се използва при силно или много силно проницаеми скали, при наличие на карстови празнини, на колматирани пукнатини, които не могат да се промият и на подземна вода, агресивна спрямо цимента.

След инжектиране на суспензията настъпва постепенно отделяне на вода от нея и в крайна сметка пукнатините се запълват с глина, която намалява светлото им сечение.

Най-същественият недостатък на глинизацията е недостатъчната суфозионна устойчивост на инжектираната глина, особено при големи напорни градиенти. Освен това с нея не се подобряват якостните и деформационни свойства на скалата.

С тези преимущества и недостатъци глинизацията се е утвърдила като икономичен метод за прокарване на шахти в напукани и водообилни скали (например, шахти в Урал, Русия). С нейна помощ се прекратява водопритока, а след изграждане на бетоновата облицовка се отстраняват възможностите за възникване на суфозия. Когато шахтата навлезе в напуканата скала, в нейното дъно се изгражда предпазна възглавница и през нея се прокарват инжекционните сондажи. След като се постигне необходимата водоплътност шахтният отвор се прокарва през напуканата скала и се изгражда неговата облицовка.

Глинизацията може да се осъществи от повърхността при дълбочина на уплътняваните скали до 75÷100 m. Количеството сондажи и разстоянието между тях се определя опитно. При пукнатини с ширина до 5 mm то е обикновено около 2 m. Диаметърът на сондажната колона отначало е по-голям (80÷200 mm), а крайният достига до 30÷50 mm. Нагнетяването обикновено се прави на интервали и по-рядко в целия сондаж едновременно, като се използва налягане 0,15÷0,2 МРа. В края на инжектирането се извършва допълнително уплътняване на пукнатините с налягане 50% над работното.

Инжекционните глинести суспензии имат плътност 1,1÷1,5 g/cm<sup>3</sup>. Видът на глината и начина на нейната подготовка зависи от размерите на пукнатините и празнините в скалата. При дребни пукнатини се използват финодисперсни

глини, а при карстови празнини към глината се добавя пясък. Суспензията трябва да има подходящ вискозитет, гарантиращ доброто ѝ проникване в скалата. Необходимо е освен това тя да отдава бързо водата след инжектиране, поради което се предпочитат каолиново-хидрослюдестите глини. За тази цел могат да се използват и различни коагулатори ( $MgCl_2$ ,  $CaCl_2$ ,  $Ca(OH)_2$  и др. ) в количество  $0,4 \div 1\%$ .

Освен при прокарване на шахти глинизацията е използвана за противифилтрационни завеси на малки язовири, за водозащитни екрани и др.

#### 4. Инжектиране на химически разтвори

При изграждане на високи язовирни стени и други напорни съоръжения в скали с малка водопроницаемост ( $q < 0,1$  l/min), но податливи към механична и химична суфозия, каквито са някои пясъчници, алевролити, мергели, варовици, доломити и др., се налага инжекционно уплътняване и заздравяване. Поради малката водопроницаемост на тези скали и при наличие на тесни пукнатини циментацията и глинизацията са съпроводени с големи затруднения и се прибегва до инжектиране на химически разтвори.

Най-често се използват разтвори на водно стъкло, съдържащи различни втвърдители. Алумосиликатните разтвори са подходящи за фионапукани скали, тъй като имат малък вискозитет и контролируемо свързване. Те обаче са чувствителни към температурата на околната среда. С нейното понижаване се забавя гелообразуването и се създават условия за разсейване на разтвора от подземната вода.

Разтворите с втвърдител силикофлуороводородна киселина ( $H_2SiF_6$ ) имат също добри качества за инжектиране на скали с тесни пукнатини или малки пори, но изискват охлаждане на компонентите на разтвора до  $10^\circ$ , освен това са агресивни спрямо метали и замърсяват подземната вода.

Посочените недостатъци на тези и на подобни на тях разтвори, прилагани при условията на напукани скали са предизвикали разработване на нови рецептури, отговарящи на следните изисквания: висока проникваща способност при тесни пукнатини; здрава и водоустойчива структура на втвърдения гел; добра адхезия към скали от типа на аргилитите, мергелите и варовиците и устойчивост спрямо действие на минерализирана вода. На тези изисквания отговаря разтвор на водно стъкло с втвърдител  $Al_2(SO_4)_3$  и оксалова киселина  $H_2C_2O_4$  (Воронкевич, ред., 1981). Използува се разтвор на водно стъкло с плътност  $1,13 \div 1,19$  g/cm<sup>3</sup>, като времето за гелообразуване е управляемо и може да достигне до няколко часа. То практически не се влияе от температурните условия на масива.

От опити на място е установено е, че с оксалово-алуминиево-сулфатната рецептура се постига по-голямо проникване на разтвора и по-добро запълване на пукнатините, дори когато водопоглъщането  $q$  е под  $0,01$  l/min.

Друг успешно изпитан инжекционен разтвор е от фенолспирт с 5% разтвор на натриева основа (Адамович, 1981). Инжектирани са слабо циментирани конгломерати, пясъчници и глини с маломощни прослойки от други разновидности.

Подходяща за инжектиране на напукани скали е резорцинформалдехидната смола. Тази смола е едно от малкото синтетични

вещества, полимеризиращи бързо при нормални и по-ниски положителни температури в алкална, неутрална и кисела среда. Разтваря се лесно във вода и дава добър ефект при понижена концентрация. За затвърдител може да се използват алкални и кисели реагенти: негасена вар на прах, водно стъкло, амониев сулфат, солна киселина и др. Разтвор от резорцинформалдехидна смола е успешно използван за изграждане на противофилтрационна завеса в язовирното строителство.

Такъв е случаят със стената “Кайнджи” в Нигерия, където на контакта между гранити и амфиболити е установен разлом с ширина около 0,60 m запълнен с глина. Останалата част от скалата е била слабопроницаема. Най-напред е направена неуспешна циментация, въпреки че е нагнетяван разтвор с високо водоциментно отношение (В:Ц=8). След това е използвано инжектиране на резорцинол-формалдехидна смола под налягане 0,3-0,4 МПа, на сондажни интервали от 5 m при разход на разтвора 100-200 l/h. Опитните водонагнетявания са показали, че водопроницаемостта на скалата е сведена до 0.

#### 5. Инжектиране на битумни продукти (битумизация)

Методът се състои в нагнетяване с помощта на сондажи на горещ битум или на битумна емулсия. Приложим е при напукани скали и несвързани почви и най-много досега е използван в минното строителство. Различава се предварителна и последваща битумизация. Първата се прилага за запълване на водоносните пукнатини и празнини в масива преди прокарване на минната изработка. Последващата битумизация се прави след изграждане на крепежа за увеличаване на водоплътността на стените на галерията.

Горещата битумизация се осъществява с предварително нагрят битум, който се инжектира под налягане 0,05÷0,20 МПа. След затвърдяване на битума в пукнатините и порите неговият обем намалява с 8-11%, поради което нагнетяването се извършва на няколко пъти. Горещата битумизация е приложима при скали имащи отвори над 0,2 mm и при чакълести почви с  $K_f > 60$  m/24h. При силно напукани скали и големи празнини към битума се прибавят запълнители като пепел от ТЕЦ, парафин, смлени варовик, доломит, тухли и др. Добра добавка от гледна точка на уплътняването е азбест в количество 5-15%. Ефективен напълнител е и трепелът, който повишава температурата на размекване на битума.

Нагнетяването на горещия битум се затруднява от бързото охлаждане на сместа. Температурата на битума може да се понижи с 38° на 1 m от сондажа при инжектиране на сухи пукнатини. По тази причина при инжектиране на сондажи с дълбочина повече от 3 m се налага допълнително нагриване на битума в ствола на сондажа. Най-добре с горещ битум се работи при сухи пукнатини, но наличието на вода дори силно минерализована по принцип не представлява сериозно препятствие. Разстоянието между сондажите зависи от ширината на пукнатините (Табл. 15.1.).

Табл.15.1. Приблизително разстояние между сондажите при горещата битумизация

Ширина на пукнатините mm	Разстояние между сондажите m
>20	3÷3,5
20÷10	2÷3,0
10÷5	1,5÷2,0
5÷1,5	1,0÷1,5
1,5÷0,2	0,8÷1,0

Студената битумизация се осъществява с емулсия съдържаща 25÷50% битум, емулгиран във вода с помощта на повърхностно активни вещества. Тя е приложима при по-тесни пукнатини и при пясъци с  $k_f > 10$  m/24h. След инжектиране емулсията се пресича от коагулаторите и битумът се утаява по стените на пукнатините и порите като намалява светлото им сечение. След повторно инжектиране е възможно пълното им затваряне.

Битумизацията дава добър ефект при голяма скорост на подземните води независимо от тяхната агресивност. Битумът се свързва добре с карбонатните скали, при които адхезията с цимента е слаба. Сравнително лесно се осъществява допълнителното инжектиране, когато се установи, че не е достигната желаната степен на водонепроницаемост. Общо взето разходът на инжектиран материал е по-малък.

Недостатъци на битумизацията са енергийните разходи и сложната апаратура (при горещия вариант). Освен това якостта и деформационните качества на инжектирания масив не се подобряват съществено, което е от значение при тежки съоръжения.