

文章编号:1007-9629(2021)03-0578-07

## 微生物灌浆碳酸钙沉积规律

贾强<sup>1,2</sup>, 丁鹏<sup>1,2</sup>

(1. 山东建筑大学 土木工程学院, 山东 济南 250100; 2. 山东建筑大学  
建筑结构加固改造与地下空间工程教育部重点实验室, 山东 济南 250100)

**摘要:** 为揭示碳酸钙在混凝土裂缝内部的沉积规律,提高封堵效率,针对混凝土劈裂裂缝,设计了10组自重作用下的灌浆试验.试验参数包括灌菌量、裂缝底部有无菌液过滤层(医用棉团)、是否提前在裂缝内灌注菌液固定液等.结果表明:灌入菌液越多,修复裂缝效率越高.对于裂缝底部有菌液过滤层的试件,碳酸钙易在裂缝底部生成;对于裂缝底部没有菌液过滤层的试件,碳酸钙易在裂缝中下部生成.提前灌注菌液固定液的试件比未提前灌注试件的修复效果更佳.随着灌浆循环次数和裂缝竖向深度的增加,裂缝内壁碳酸钙层厚度不断增大.裂缝内壁越粗糙、竖向倾角越大,以及裂缝迂回处碳酸钙越容易沉积.

**关键词:** 细菌; 裂缝修复; 沉积规律; 灌浆; 菌液固定液

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.018

## Deposition Regularities of Calcium Carbonate on Microbial Grouting

JIA Qiang<sup>1,2</sup>, DING Peng<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250100, China; 2. Key Laboratory of Building Structural Retrofitting and Underground Space Engineering of Ministry of Education Shandong Jianzhu University, Jinan 250100, China)

**Abstract:** In order to reveal the deposition regularities of calcium carbonate in the crack and improve the sealing efficiency, ten groups of grouting tests under gravity in concrete split cracks were conducted. The test parameters included different volumes of bacterial liquid, whether the bottom pasted bacteria liquid filtered layer (medical cotton) at the bottom of the crack, or the bacterial fixation liquid is poured into the crack before grouting. The results show that the more bacterial liquid poured into the crack, the more efficient it is for repairing cracks. The calcium carbonate is firstly formed at the bottom of the crack in the specimen which has the bacterial liquid filter layer at the bottom of the crack and calcium carbonate is firstly formed in the middle and lower part of the crack in the specimen which has no bacterial liquid filter layer. The specimen filled with the bacterial fixation liquid before grouting has more repairing efficiency than the specimen that is not filled. With the increase of grouting cycles and depths of crack, the thickness of calcium carbonate in crack inner wall is increased. Calcium carbonate is more likely deposited in the rough, high vertical inclination and roundabout internal wall of the crack.

**Key words:** bacteria; crack sealing; deposition regularity; grout; bacterial fixation liquid

现有的许多化学灌浆材料,如环氧类树脂等在混凝土缺陷修复中发挥了重要作用.但是其与水泥基材料相容性差、易老化、黏性较高,只能封堵较宽

的、深度不大的裂缝<sup>[1]</sup>.微生物矿化封堵混凝土裂缝用材料固化前黏性很低,沉积生成的方解石等性质稳定,与混凝土材料结合性好<sup>[2]</sup>,因此在堵漏工程中

收稿日期:2019-12-21; 修订日期:2020-03-24

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0702900);国家自然科学基金资助项目(52038006)

第一作者:贾强(1970—)男,山东济南人,山东建筑大学教授,硕士生导师,博士. E-mail:jiaqiang@sdjzu.edu.cn

有广阔的应用前景.

微生物诱导生成碳酸钙的原理是微生物利用自身产生的尿素酶,将尿素分解为  $\text{NH}_3$  和  $\text{CO}_2$ ,若细菌周围有  $\text{Ca}^{2+}$ ,细菌细胞中带负电荷的有机单层膜就会不断地螯合  $\text{Ca}^{2+}$ ,引起碳酸钙晶体沉积<sup>[3]</sup>. Boquet 等<sup>[4]</sup>发现,自然界中有些微生物能够利用自身的生命活动诱导碳酸钙沉积.微生物封堵研究主要由荷兰研究机构 GeoDelft 发起,旨在通过调整土壤特性,改变土壤各项系数<sup>[5]</sup>. Blauw 等<sup>[6]</sup>通过向装满砂的 PVC 管中灌注营养物质,使管中央处隔板上的小孔得以封堵. Cyprien 等<sup>[7]</sup>将巴氏芽孢八叠球菌、氯化钙和尿素连续向砂柱中注入,发现砂柱中的渗透速度显著降低. Li 等<sup>[8]</sup>研究发现,先在较宽的裂缝内填注砂或石英粉,再用细菌修补裂缝非常有效. 钱春香等<sup>[9]</sup>利用细菌覆膜方法,将混凝土试样的吸水系数降低了 1 个数量级. 贾强等<sup>[10-11]</sup>在墙体外侧制作灌浆槽,实施生物灌浆,对天窗处的水平裂缝进行成功封堵. 由此可见,微生物修复裂缝的效果已在工程中得到验证,但封堵层的生成及演化机理还需要研究.

本文通过控制菌液量、裂缝底部有无菌液过滤层(医用棉团)、是否提前在裂缝内灌注菌液固定液这 3 种影响因素,阐明混凝土裂缝内碳酸钙的沉积分布规律,为微生物修复混凝土裂缝技术在地下工程防渗堵漏中的应用和推广提供理论依据.

## 1 试验设计

### 1.1 试验参数

混凝土裂缝采用劈裂法进行制作,灌浆液从裂缝顶端靠自重作用沿裂缝竖向流出. 为研究碳酸钙沉积规律,提出 3 种试验参数:(1)灌菌量 本试验用裂缝容积比表征. 裂缝宽度为 1 mm,长度和深度均为 15 cm,裂缝体积为 22.5 cm<sup>3</sup>. 将灌菌量设置为 45、135、270 mL,相应的裂缝容积比分别为 2:1、6:1、12:1. 同时,设置未添加菌液对照组,以验证菌液在诱导沉积碳酸钙中所起的作用.(2)裂缝底部是否设置过滤层 因试验用巴氏芽孢杆菌粒径为 2~3 μm,溶液分子粒径只有几 nm,在裂缝底部设置医用棉团作为过滤层,可将大部分菌液封堵在裂缝内,同时也可减缓溶液分子流出.(3)是否提前在裂缝内灌注菌液固定液. 依据以上 3 种参数,设计 10 组平行灌浆对比试验,如表 1 所示.

### 1.2 混凝土试件制作

混凝土试件设计强度等级为 C35,各对比组分别

表 1 微生物灌浆封堵裂缝试验设计表  
Table 1 Test design for sealing cracks by microbial grouting

| Group No.       | Amount of bacterial liquid (by volume) | Whether bottom pasted with bacteria liquid filtered layer | Whether bacterial fixation liquid is poured into crack before grouting |
|-----------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 1 <sup>≠</sup>  | 0                                      | Yes                                                       | Yes                                                                    |
| 2 <sup>≠</sup>  | 2:1                                    | Yes                                                       | Yes                                                                    |
| 3 <sup>≠</sup>  | 6:1                                    | No                                                        | Yes                                                                    |
| 4 <sup>≠</sup>  | 12:1                                   | Yes                                                       | No                                                                     |
| 5 <sup>≠</sup>  | 2:1                                    | No                                                        | Yes                                                                    |
| 6 <sup>≠</sup>  | 6:1                                    | Yes                                                       | No                                                                     |
| 7 <sup>≠</sup>  | 12:1                                   | Yes                                                       | Yes                                                                    |
| 8 <sup>≠</sup>  | 2:1                                    | Yes                                                       | No                                                                     |
| 9 <sup>≠</sup>  | 6:1                                    | Yes                                                       | Yes                                                                    |
| 10 <sup>#</sup> | 12:1                                   | No                                                        | Yes                                                                    |

预先制作 15 个尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体混凝土试件,实际所用试件数量会根据灌浆封堵次数有所增减. 试件标准养护完成后,采用劈裂法制作裂缝,具体步骤如下:在试件顶面和底面通过预埋截面为 5 mm×5 mm 的平直钢质方垫条,制作 2 个微小凹槽,作为劈裂裂缝位置;用压力机垫以三角形楔块,对准凹槽,以 0.04~0.06 MPa/s 的速率连续匀速加载,直至试件裂开;在裂缝内填入 1 mm 厚的硅胶带,以控制裂缝宽度,并用胶带将试件四周缠绕粘合在一起.

### 1.3 微生物、营养盐及钙源溶液的制备

本试验选用的微生物为巴氏芽孢杆菌,培养基中各物质组成为 20 g/L 酵母提取物、10 g/L 硫酸铵、10 μmol/L 氯化镍. 采用 0.1 mol/L 的氢氧化钠溶液,将培养基 pH 值调至 9.0. 培养过程包括高温高压灭菌、接种、恒温振荡培养箱培养和检测酶活性 4 个步骤,其中恒温振荡培养时间设定为 22 h,温度设定为 30 ℃,振荡床转速设置为 180 r/min.

选用电化学方法对菌液酶活性进行测定. 采用电导率仪测量溶液电导率,以此来反映酶的活性. 取 5 mL 培养好的菌液加至 45 mL、浓度为 1.1 mol/L 的尿素溶液中,测量 5 min 溶液的电导率值,乘以稀释倍数(10),即为菌液酶活性.

采用分光光度计测定菌液浓度,检测用波长为 600 nm,所测值用 OD<sub>600</sub> 表示. 单位体积细菌数量通过式(1)进行换算<sup>[12]</sup>:

$$Y=8.59\times10^7Z^{1.3627} \tag{1}$$

式中:Y 为单位体积细胞数量,cell/mL;Z 为 600 nm 波长的吸光度(OD<sub>600</sub>).

巴氏芽孢杆菌在培养完成后,OD<sub>600</sub> 值在 2.7 左

右,通过式(1)计算可知,单位体积细菌数量约为  $3.33 \times 10^8$  cell/mL.

试验选用氯化钙溶液作为钙源溶液和固定液.钙源溶液和掺入菌液后的尿素溶液浓度均根据之前的优化试验确定<sup>[13]</sup>.其中钙源溶液浓度为  $1.00$  mol/L,体积为相应菌液的  $1.5$  倍;固定液浓度为  $0.05$  mol/L;试验用营养盐为尿素,掺入菌液后的浓度为  $2.50$  mol/L.

#### 1.4 微生物沉积碳酸钙修复裂缝试验过程

试件灌浆前,保证其处于干燥状态.为防止灌浆液外溢,在试件顶面安装钢板灌浆槽.灌浆液从裂缝顶部灌入,渗滤液从混凝土底部裂缝排出.试验采用蠕动泵灌注,可以有效控制灌入速度,使菌液、营养盐和钙源溶液充分混合、反应.为增加菌液的酶活性,提高碳酸钙的产量,提前  $60$  min 将尿素掺入菌液中.灌浆方式采用不连续灌浆,第  $1$  d 时,先灌入菌液和尿素混合液,第  $2 \sim 6$  d 时,每天灌入钙源溶

液,  $5$  d 内灌入钙源溶液总量为菌液体积的  $1.5$  倍.上述  $6$  d 为  $1$  个灌浆循环,随后开始下一轮灌浆循环.如果需要提前灌注固定液,则在灌注菌液和尿素混合液的前  $1$  d,灌入  $20$  mL 固定液.将蠕动泵灌注菌液和尿素混合液的速率控制在  $3\,200\ \mu\text{L}/\text{min}$ ,灌注钙源溶液速率控制在  $4\,800\ \mu\text{L}/\text{min}$ .所有试件底部流出的灌浆液不再重复使用.每次灌浆循环完成后,测定  $150$  mm 水头高度下  $5$  min 裂缝的渗水量.当完全封堵后先用切割机将试件切割开,再用电子显微镜观测沿裂缝深度方向生成物质的分布情况.试验采用多试件同条件灌浆方案,每次灌浆循环后均保留  $1$  个试件开展渗水试验和生成物的称量、观测,其他试件继续下一轮灌浆循环,直至试件完全封堵.需要说明的是,虽然可以利用菌液和钙源存在的浓度差对裂缝内的空隙进行继续填充,但考虑到本试验以堵漏为目的,因此试验停止以裂缝不再渗水为准.

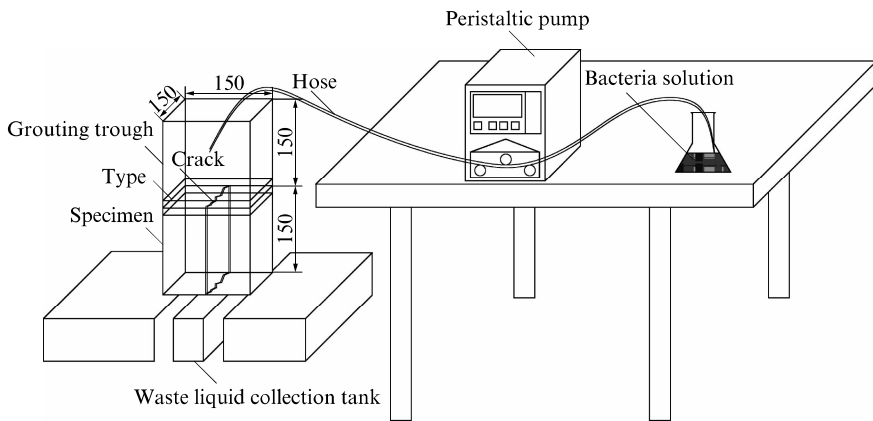


图1 灌浆装置图

Fig. 1 Schematic of perfusion device(size:mm)

## 2 试验结果与分析

### 2.1 渗水试验结果

以  $150$  mm 水头高度下  $5$  min 的渗水量,换算出每块试件的平均渗水速率,如表2所示.由表2可以看出:灌入裂缝内的菌液量越多,试件渗水速率降低就越快,其中  $4^\#$ 、 $7^\#$ 、 $10^\#$  组试件所需灌浆循环次数最少,均为  $4$  次; $5^\#$  组试件所需的灌浆循环次数最多,为  $11$  次;无菌液灌注的对照组( $1^\#$  组)试件则没有封堵,渗水速率也无明显下降,说明菌液在碳酸钙沉积过程中发挥了重要作用.

为对比设置过滤层和添加固定液后的封堵效果,以菌液量相同(与裂缝容积比均为  $2:1$ )的  $2^\#$  组、 $5^\#$  组和  $8^\#$  组试件为例,进行分析.由表2还可

知,在灌菌量相同的条件下, $2^\#$  组试件灌浆循环  $8$  次即完成封堵, $8^\#$  组试件需要  $9$  次,而  $5^\#$  组试件需要  $11$  次.这说明设置过滤层和添加固定液这  $2$  项措施均能有效提高封堵效率,且设置过滤层效果明显好于添加固定液.底部加设过滤层对菌液和生成物有阻隔作用,不会随着灌浆液流出.而提前灌入固定液的对比组修复效果优于无固定液对比组,这是因为固定液可以提供少量钙离子,吸附细菌细胞表面负电荷,使细胞体容易固定在裂缝内壁或填充颗粒表面上,从而使细菌体不被后续的灌菌液带出,加速了碳酸钙的沉积.

### 2.2 碳酸钙称重结果

为了更直观地比较  $3$  种影响因素对混凝土裂缝内碳酸钙生成量的影响,测量试件裂缝内碳酸钙的

表 2 各对比组试件平均渗水速率  
Table 2 Average water seepage rate of each comparison group mL/min

| Number of grouting cycle/times | 1 <sup>#</sup> | 2 <sup>#</sup> | 3 <sup>#</sup> | 4 <sup>#</sup> | 5 <sup>#</sup> | 6 <sup>#</sup> | 7 <sup>#</sup> | 8 <sup>#</sup> | 9 <sup>#</sup> | 10 <sup>#</sup> |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 0                              | 2 753          | 2 356          | 2 543          | 2 837          | 2 367          | 2 156          | 2 867          | 2 474          | 2 567          | 2 678           |
| 1                              | 2 759          | 2 165          | 2 295          | 2 034          | 2 282          | 1 889          | 1 947          | 2 364          | 2 043          | 1 996           |
| 2                              | 2 742          | 1 943          | 1 945          | 1 157          | 2 195          | 1 531          | 1 039          | 2 216          | 1 486          | 1 251           |
| 3                              | 2 750          | 1 853          | 1 733          | 519            | 2 089          | 1 156          | 407            | 2 023          | 946            | 635             |
| 4                              | 2 746          | 1 689          | 1 405          | 0              | 1 975          | 701            | 0              | 1 788          | 358            | 0               |
| 5                              | 2 741          | 1 255          | 1 038          |                | 1 846          | 221            |                | 1 499          | 0              |                 |
| 6                              | 2 743          | 889            | 459            |                | 1 724          | 0              |                | 1 172          |                |                 |
| 7                              | 2 740          | 455            | 0              |                | 1 571          |                |                | 796            |                |                 |
| 8                              | 2 737          | 0              |                |                | 1 283          |                |                | 375            |                |                 |
| 9                              | 2 732          |                |                |                | 954            |                |                | 0              |                |                 |
| 10                             | 2 736          |                |                |                | 548            |                |                |                |                |                 |
| 11                             | 2 732          |                |                |                | 0              |                |                |                |                |                 |

生成量.利用锉刀和尖锥,沿裂缝断面磨下所生成的碳酸钙粉末(仍有少量紧贴裂缝内壁生成物无法取下),并用电子天平称量.10 组试件裂缝内碳酸钙的生成量见表 3.

表 3 裂缝内碳酸钙的生成量  
Table 3 Production of calcium carbonate in cracks g

| Number of grouting cycle/times | 1 <sup>#</sup> | 2 <sup>#</sup> | 3 <sup>#</sup> | 4 <sup>#</sup> | 5 <sup>#</sup> | 6 <sup>#</sup> | 7 <sup>#</sup> | 8 <sup>#</sup> | 9 <sup>#</sup> | 10 <sup>#</sup> |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 1                              | 0              | 2.6            | 3.5            | 5.1            | 1.9            | 3.0            | 5.3            | 2.2            | 3.6            | 4.0             |
| 2                              | 0              | 5.5            | 6.3            | 11.9           | 4.1            | 8.0            | 11.5           | 4.6            | 8.5            | 11.2            |
| 3                              | 0              | 8.1            | 9.5            | 18.1           | 6.7            | 13.7           | 17.8           | 7.4            | 14.7           | 16.3            |
| 4                              | 0              | 12.7           | 12.6           | 23.7           | 9.3            | 18.5           | 25.5           | 10.9           | 20.6           | 21.1            |
| 5                              | 0              | 16.4           | 16.4           |                | 12.5           | 22.7           |                | 14.0           | 26.1           |                 |
| 6                              | 0              | 22.3           | 20.3           |                | 15.7           | 27.5           |                | 18.3           |                |                 |
| 7                              | 0              | 28.2           | 25.9           |                | 18.9           |                |                | 24.8           |                |                 |
| 8                              | 0              | 32.0           |                |                | 22.4           |                |                | 29.6           |                |                 |
| 9                              | 0              |                |                |                | 26.6           |                |                | 33.4           |                |                 |
| 10                             | 0              |                |                |                | 30.2           |                |                |                |                |                 |
| 11                             |                |                |                |                | 35.6           |                |                |                |                |                 |

由表 3 可以看出:在前 4 次灌浆循环中,由于 7<sup>#</sup>组试件的菌液量最多,所以产生的碳酸钙最多;随着菌液量的减少,9<sup>#</sup>组和 2<sup>#</sup>组试件产生的碳酸钙逐渐减少;之后由于 7<sup>#</sup>组试件已封堵,无需继续灌浆,9<sup>#</sup>组和 2<sup>#</sup>组试件可继续灌浆,最终碳酸钙产量均超过 7<sup>#</sup>组试件.由表 3 还可以看出,在灌菌量 and 有无菌液固定液条件相同时,有过滤层的对比组 2<sup>#</sup>和 9<sup>#</sup>,在相同灌菌循环次数时,碳酸钙生成总量多于无过滤层对比组 5<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>.在灌菌量 and 有无过滤层条件相同时,有固定液对比组 2<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>在相同灌菌循环次数时,碳酸钙生成量也多于无固定液对比组 8<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>.此规律与渗水试验的规律相同.

### 2.3 扫描电镜观测结果

利用电锯从垂直于裂缝的方向对试件进行切

割,利用电子显微镜观测裂缝断面处碳酸钙的沉积情况.自裂缝上部,沿裂缝竖直方向,每隔 35 mm 取 1 个观察点,放大 20 倍,得到观察点处碳酸钙的微观照片,并记录该位置碳酸钙的厚度.

#### 2.3.1 灌浆循环次数

图 2 为 7<sup>#</sup>组试件裂缝内壁碳酸钙厚度与灌浆循环次数的变化曲线.由图 2 可知,随着灌浆循环次数的增加,裂缝内壁碳酸钙层的厚度也不断增大.

#### 2.3.2 裂缝竖向深度

由图 2 还可以看出:(1)碳酸钙沉积厚度从灌浆口沿竖直方向向下逐渐增大.这是由于灌浆液在自重作用下更容易向裂缝下部聚集;同时碳酸钙沉积的化学反应需要时间,灌浆液流至裂缝中下部时,有更多碳酸钙生成.(2)裂缝底部有菌液过滤层的试

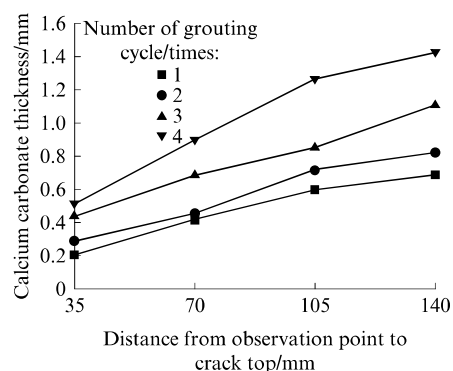


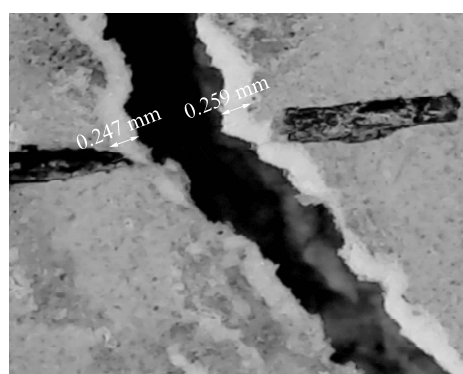
图2 不同灌浆循环次数裂缝内碳酸钙沉积厚度  
Fig.2 Calcium carbonate deposition thickness in cracks with different grouting cycles

件,碳酸钙易在裂缝底部生成;裂缝底部没有菌液过滤层的试件,碳酸钙易在裂缝中下部生成。

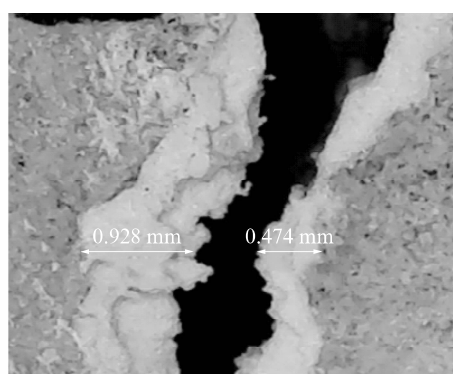
### 2.3.3 裂缝内壁粗糙度

裂缝内部粗糙度是影响裂缝内部碳酸钙沉积、附着、架桥作用的一个重要影响因素。采用劈裂方法制作的裂缝,其内壁粗糙度并不一致,粗糙度的不同影响了碳酸钙在裂缝内部的沉积。图3为平滑裂缝内壁和粗糙裂缝内壁形成的碳酸钙沉积图。

由图3可以看出:对于粗糙度较为平滑的裂缝,其两侧均有相近厚度的碳酸钙生成;对于粗糙度较为粗糙的裂缝,左侧凹陷处的碳酸钙沉积厚度远大于右侧碳酸钙沉积厚度。这是因为同样平滑的内壁



(a) Smooth



(b) Rough

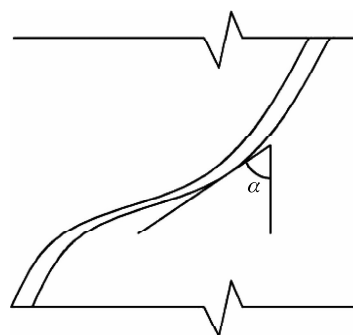
图3 不同粗糙度的裂缝两侧碳酸钙沉积厚度

Fig.3 Calcium carbonate thickness on both sides of cracks with different roughness

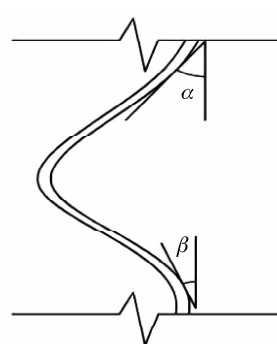
碳酸钙附着能力相当,两侧所沉积的碳酸钙厚度较为接近;内壁粗糙的裂缝,粗糙处提高了灌浆液与裂缝接触的表面积,阻滞了灌浆液的流动,碳酸钙有更多机会反应、沉积,因此碳酸钙层较裂缝平滑处更厚。

### 2.3.4 裂缝竖向倾角与迂回度

采用劈裂法制作的裂缝并非都是竖向裂缝,部分有竖向倾角(见图4(a)中的 $\angle\alpha$ )和迂回度(见图4(b)中的 $\angle(\alpha+\beta)$ )处的碳酸钙沉积量与竖向裂缝有明显不同<sup>[14]</sup>。



(a) Cracks with vertical inclination



(b) Cracks with roundabout

图4 有竖向倾角和迂回度的裂缝示意图

Fig.4 Sketch map of vertical inclination and roundabout cracks

图5为无竖向倾角和迂回度的裂缝与有明显竖向倾角和迂回裂缝内碳酸钙沉积厚度的对比图。由图

5可以看出:(1)竖向倾角更大的裂缝,内壁生成碳酸钙的也更多。灌浆液在自重下会发生沿深度方向的沉

降扩张,当裂缝竖向倾角越大,竖向的流动分力越小,同时内壁摩擦和吸附力越大,沉降效果就越弱,而且竖向倾角大的裂缝有更长的渗流路径,比竖向倾角小

的裂缝更容易形成碳酸钙晶体。(2)有迂回的裂缝较无迂回处沉积了更厚的碳酸钙,这是由于裂缝迂回处凹陷比较多,灌浆液在此处更易阻滞和停留的缘故。

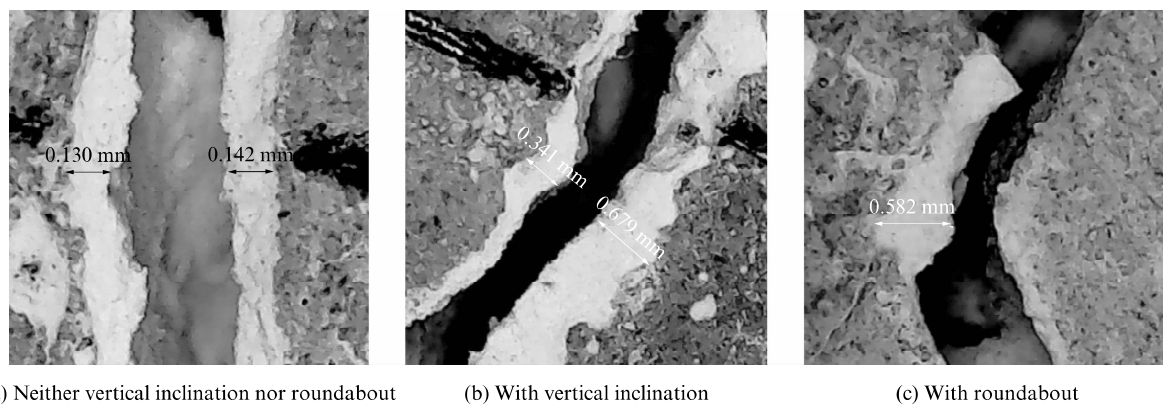


图5 不同形态裂缝两侧碳酸钙的沉积厚度

Fig. 5 Calcium carbonate thickness on both sides with different shape cracks

### 3 结论

(1)以堵漏为目的的灌浆试验,一旦不渗漏即停止灌浆。每次循环灌注的菌液量越多,封堵所需要的灌浆循环次数就越少,但碳酸钙沉积沿裂缝竖向分布越不均匀,碳酸钙总生成量也越少。

(2)提前灌入菌液固定液使碳酸钙在裂缝内壁更容易附着,修复效果和碳酸钙生成量优于不灌入固定液对比组。

(3)底部设置有菌液过滤层的对比组,阻滞了细菌和沉积物的迅速流出,使碳酸钙更易贴近过滤层生成。

(4)随着灌菌循环次数和裂缝竖向深度的增加,裂缝内壁碳酸钙的沉积厚度也不断增加。

(5)裂缝内壁越粗糙、竖向倾角越大,以及迂回处的碳酸钙更容易沉积。

#### 参考文献:

- [1] 钱春香,王安辉,王欣.微生物灌浆加固土体研究进展[J].岩土力学,2015,36(6):1537-1548.  
QIAN Chunxiang, WANG Anhui, WANG Xin. Advances of soil improvement with bio-grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1537-1548. (in Chinses)
- [2] 侯宏涛,张鑫,贾强.微生物修复技术在土木工程中的研究[J].施工技术,2011,40(增刊1):14-17.  
HOU Hongtao, ZHANG Xin, JIA Qiang. Research progress of bioremedying in civil engineering[J]. Construction Technology 2011, 40(Suppl 1): 14-17. (in Chinses)
- [3] 贾强,姜欢,张鑫.微生物沉积碳酸钙封堵混凝土裂缝的试验研究[J].建筑材料学报,2018,21(4):663-666.

- JIA Qiang, JIANG Huan, ZHANG Xin. Effectiveness of microbiological precipitation of calcium carbonate in sealing concrete crack[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(4): 663-666. (in Chinses)
- [4] BOQUET T, BORONAT A, RAMOS-CORMENZANA A. Productiong of calcite(calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a common phenomenon[J]. Nature, 1973, 45(5): 527-530.
- [5] KNIGHT L, NOVAKOWSKI K, RAMSAY J. Biostimulation of groundwater microorganisms in gractured bedrock through nutrient addition: A field trial[C]//Proceedings of 1st International Conference BGCE. Netherlands: TU Delft, 2008: 67-75.
- [6] BLAUW M, VAN BEEK V, VAN DER ZON W, et al. Bio-sealing, a biological sealing method for ground, is induced by mechanical weathering of ground particles due to fermentation [C]//Proceedings of 1st International Conference BGCE. Netherlands: TU Delft, 2008: 14-18.
- [7] CYPRIEN R, CHENG X H, LI M. Biological clogging in tangshan sang columns under salt water intrusion by sporosarcina pasteurii [J]. Advanced Materials Research, 2011, 250: 2040-2046.
- [8] LI Rongzhong, ISLAM M R. 一种新型微生物封堵工艺的实验研究[J]. 国外油田工程, 1998(4): 12-13.  
LI Rongzhong, ISLAM M R. Experimental study on a new microbial clogging technology[J]. Foreign Oil Field Engineering, 1998(4): 12-13. (in Chinses)
- [9] 钱春香,李瑞阳,潘庆峰,等.混凝土裂缝的微生物自修复效果[J].东南大学学报(自然科学版),2013,43(2):360-364.  
QIAN Chunxiang, LI Ruiyang, PAN Qingfeng, et al. Microbial self-healing effects of concrete cracks[J]. Journal of Southeast University(Natural Science), 2013, 43(2): 360-364. (in Chinses)
- [10] 贾强,张鑫,侯宏涛,等.微生物沉积碳酸钙修复混凝土裂缝的现场试验[J].建筑材料学报,2013,16(4):667-672.

(下转第 623 页)