

DOI:10.11918/202106026

对混凝土柱静态破碎效果的分析

李瑞森^{1,2}, 王英^{1,2}, 郑文忠^{1,2}, 姜智盛^{1,2}, 郭常顺^{1,2}

(1. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090;

2. 土木工程智能防灾减灾工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090)

摘要: 为考察混凝土强度及是否割断箍筋对柱静态破碎效果的影响, 对不同强度等级的8个混凝土柱在柱顶沿柱高钻孔并注入静态破碎剂浆体, 其中4个试件在孔侧面割断箍筋, 使用裂缝的平均宽度之和表示试件的破碎效果。试验结果表明: 试件的破碎效果随着混凝土强度的提高而降低, 不割断箍筋的试件, 破碎效果的降低幅度逐渐增大, 割断箍筋的试件, 破碎效果的降低幅度逐渐减小; 当柱截面、配筋、成孔、静态破碎剂浆体的注入等都相同的情况下, 割断箍筋能有效提高静态破碎效果, 但随着混凝土强度的提高, 割断箍筋对破碎效果的提升程度逐渐降低; 不割断箍筋的试件, 裂缝分布密集, 静态破碎过程中没有块体脱落, 但去除保护层后, 试件内部酥碎; 割断箍筋的试件, 在静态破碎过程中柱角部会有块体脱落。

关键词: 静态破碎; 混凝土柱; 混凝土强度; 割断箍筋; 破碎效果

中图分类号: TU398.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)04-0032-11

Analysis of static crushing effect of concrete column

LI Ruisen^{1,2}, WANG Ying^{1,2}, ZHENG Wenzhong^{1,2}, JIANG Zhisheng^{1,2}, GUO Changshun^{1,2}

(1. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China;

2. Key Lab of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters (Harbin Institute of Technology),
Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: In order to investigate the impact of concrete strength and whether the stirrups are cut off on the static crushing effect of columns, eight concrete columns with different strength grades were drilled at the top of the columns along the column height and injected with static crushing agent slurry, and the stirrups were cut off at the side of the holes for four specimens. The sum of the average width of the cracks was used to indicate the crushing effect of the specimens. Test results show that the crushing effect of the specimens decreased with the increase in concrete strength. For the specimens without cutting off stirrups, the decreasing range of the static crushing effect increased with the increase in concrete strength. For the specimens with the stirrups cut off, the decreasing range of the static crushing effect decreased with the increase in concrete strength. Under the conditions that the column section, reinforcement, pore-forming, and static crushing agent slurry injection were all the same, cutting off stirrups could effectively improve the static crushing effect. However, with the increase in concrete strength, the impact of cutting off stirrups on the improvement of the crushing effect decreased gradually. Specimens without cutting off stirrups had densely distributed cracks, and no blocks fell off during the static crushing process, while after removing the protective layer, the inside of the specimens was crumbly; for the specimens with the stirrups cut off, blocks fell off at the corners of the column during the static crushing process.

Keywords: static crushing; concrete column; concrete strength; cut off stirrups; crushing effect

静态破碎技术是一种非爆破破碎技术^[1]。静态破碎剂又称无声破碎剂、膨胀破碎剂和非爆炸性破碎剂^[1-3], 是一种粉末状化学制剂, 主要包含膨胀性物质、水硬性物质、外加剂和矿物掺合料^[4]。静态破碎剂在适宜的温度下与水混合后, 发生游离氧化钙的水化及钙矾石的生成等反应, 反应过程中温度可达150℃, 反应后体积增加2~3倍^[5]。通过对

待破碎试件合理确定孔深、孔径、孔距等参数, 可以获得较理想的破碎效果。静态破碎技术与机械拆除和爆破拆除相比, 噪音小、粉尘少、无飞石和振动, 对周围环境和居民日常生活的影响较小, 在城镇建筑密集区的建筑拆除方面具有广阔的应用前景。

唐世斌等^[6]通过计算机模拟发现, 当岩石的弹性模量在20、50和100 GPa之间变化时, 随着岩石弹性模量的增加, 注入岩石中的静态破碎剂浆体在膨胀结硬时产生膨胀压应力的速度明显增加, 静态破碎剂在岩石中所产生的最大膨胀压应力也逐渐增大。崔年生等^[7]制作了C20、C25和C30素混凝土

收稿日期: 2021-06-04

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0806100)

作者简介: 李瑞森(1995—), 男, 博士研究生;

郑文忠(1965—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 郑文忠, hitwzheng@163.com

试块各 3 个,尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm,中心设一个预制孔,孔深 110 mm、孔径 30 mm,试验结果表明混凝土强度与试件开裂时间呈负相关。现有的施工经验^[8-11]表明,破碎软质岩石选用的孔距一般为 400 ~ 600 mm、孔径一般为 35 ~ 50 mm;而在破碎硬质岩石时,通常需要选用更小的孔距(300 ~ 400 mm)和更大的孔径(55 ~ 65 mm),这表明待破碎体的抗压强度和弹性模量影响破碎效果。

目前,待破碎体强度对静态破碎效果影响的相关研究主要集中于岩石破碎领域,较少涉及到混凝土。混凝土柱是土木工程中重要的竖向构件,开展混凝土柱的静态破碎试验研究对推动静态破碎技术的发展与应用有重要意义。

1 试验概况

本试验 8 个混凝土柱均为边长为 450 mm 的正方形截面柱,在柱顶面沿柱高钻孔,试件设计见表 1。

表 1 混凝土柱设计参数

Tab. 1 Design parameters of concrete columns mm						
编号	柱高度	柱截面尺寸	混凝土强度等级	孔深	孔径	孔间距
C-20-N	1 250	450 × 450	C20	1 000	42	200
C-30-N	1 250	450 × 450	C30	1 000	42	200
C-40-N	1 250	450 × 450	C40	1 000	42	200
C-50-N	1 250	450 × 450	C50	1 000	42	200
C-20-S	1 250	450 × 450	C20	1 000	42	200
C-30-S	1 250	450 × 450	C30	1 000	42	200
C-40-S	1 250	450 × 450	C40	1 000	42	200
C-50-S	1 250	450 × 450	C50	1 000	42	200

钢筋配置见图 1。混凝土强度等级为 C20、C30、C40 和 C50 的混凝土柱,标准立方体抗压强度实测值分别为 24.41、35.22、44.33 和 55.50 MPa。表中 C-n-N 的数字 n 表示柱的混凝土设计强度等级,例如 n 为 20 时混凝土设计强度等级为 C20,N 表示不割断柱的箍筋,钻孔后直接注入静态破碎剂;C-n-S 的数字 n 与 C-n-N 的含义相同,S 表示钻孔后平行于孔在孔侧面割断箍筋。根据 Huynh 等^[12]提供的孔深确定原则及工程经验^[8-11],将孔深统一取为柱高度的 80%,孔间距取为 200 mm,孔边距取为 1/2 孔间距与混凝土保护层厚度之和,孔径取手持凿岩机最大钻头直径 42 mm^[13],钻孔布置见图 2。试验用静态破碎剂为施必达(大连)公司的 S-611 无声爆破剂,根据破碎剂体积膨胀率试验^[14]确定最优水剂比为 0.3,此时破碎剂体积膨胀率为 310%。利用“外管法”^[15-16]测量得到破碎剂 48 h 的径向膨胀压应力为 23.82 MPa,试验用无缝

钢管为 45 号钢,管外径 50.7 mm、壁厚 5.4 mm、管高 500 mm,为模拟混凝土破碎试验,钢管管口不采用封堵措施,管底采用 6 mm 厚钢板焊接封堵。

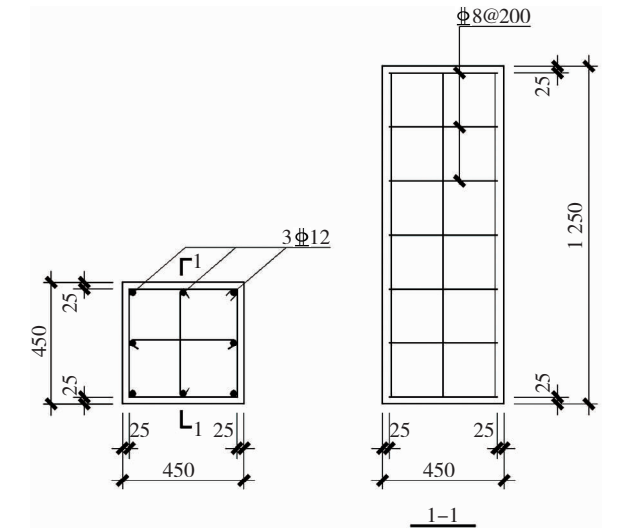


图 1 混凝土柱配筋 (mm)

Fig. 1 Reinforcing of concrete columns (mm)

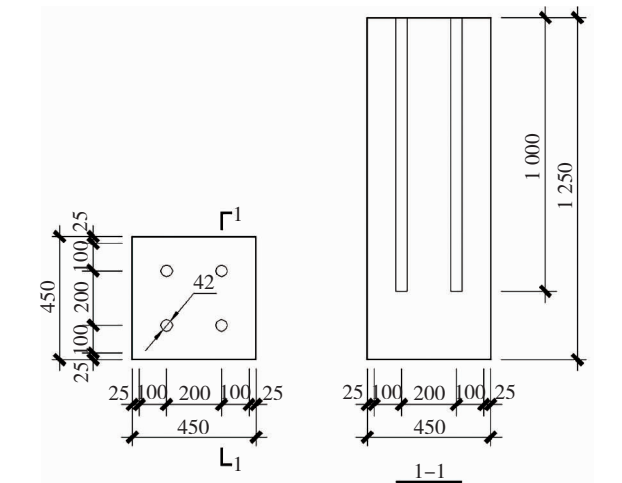


图 2 孔位布置 (mm)

Fig. 2 Arrangement of boreholes (mm)

薛志翔^[17]制作了素混凝土和钢筋混凝土试块各 3 个,尺寸均为 200 mm × 200 mm × 200 mm,混凝土标准立方体抗压强度为 23.3 MPa,在试件中央预制直径 33 mm、孔深 175 mm 的孔。钢筋混凝土试块使用直径 3.5 mm 的刻痕钢丝充当钢筋,纵筋配置为 8Φ3.5,箍筋配置为 Φ3.5@180,试验结果表明:素混凝土试件的最大裂缝宽度可达钢筋混凝土试件的 4 倍。这说明钢筋约束会极大限制膨胀裂缝开展,降低静态破碎效果。因此,本文在进行静态破碎前,用墙锯在柱 C-20-S、C-30-S、C-40-S 和 C-50-S 的孔侧面割断箍筋,割缝深度为 35 mm,宽度为 4 mm^[13],具体处理方案见图 3。试件 C-20-N、C-30-N、C-40-N 和 C-50-N 不割断箍筋,便于形成对照。

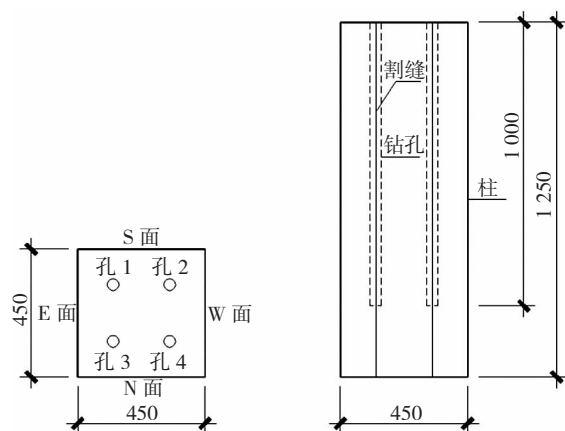


图3 待破碎试件割缝示意 (mm)

Fig. 3 Diagram of slits of specimens to be broken (mm)

将静态破碎剂浆体注入孔内后不进行堵孔。全部试件于2020年9月24日8:00至8:30注入静态破碎剂,记录51 h内混凝土柱膨胀裂缝的宽度变化,试验期间最高温度22℃,最低温度11℃。

2 试验结果与分析

2.1 不割断箍筋混凝土柱的静态破碎试验现象与分析

混凝土柱在静态破碎过程中顶面和侧面具有代表性的照片分别见图4、5。为便于描述现象,将混凝土柱的4个侧面按照试验过程中的朝向分为N面、S面、W面和E面,见图3。描述和分析试验现象时所用裂缝宽度均为表面宽度。

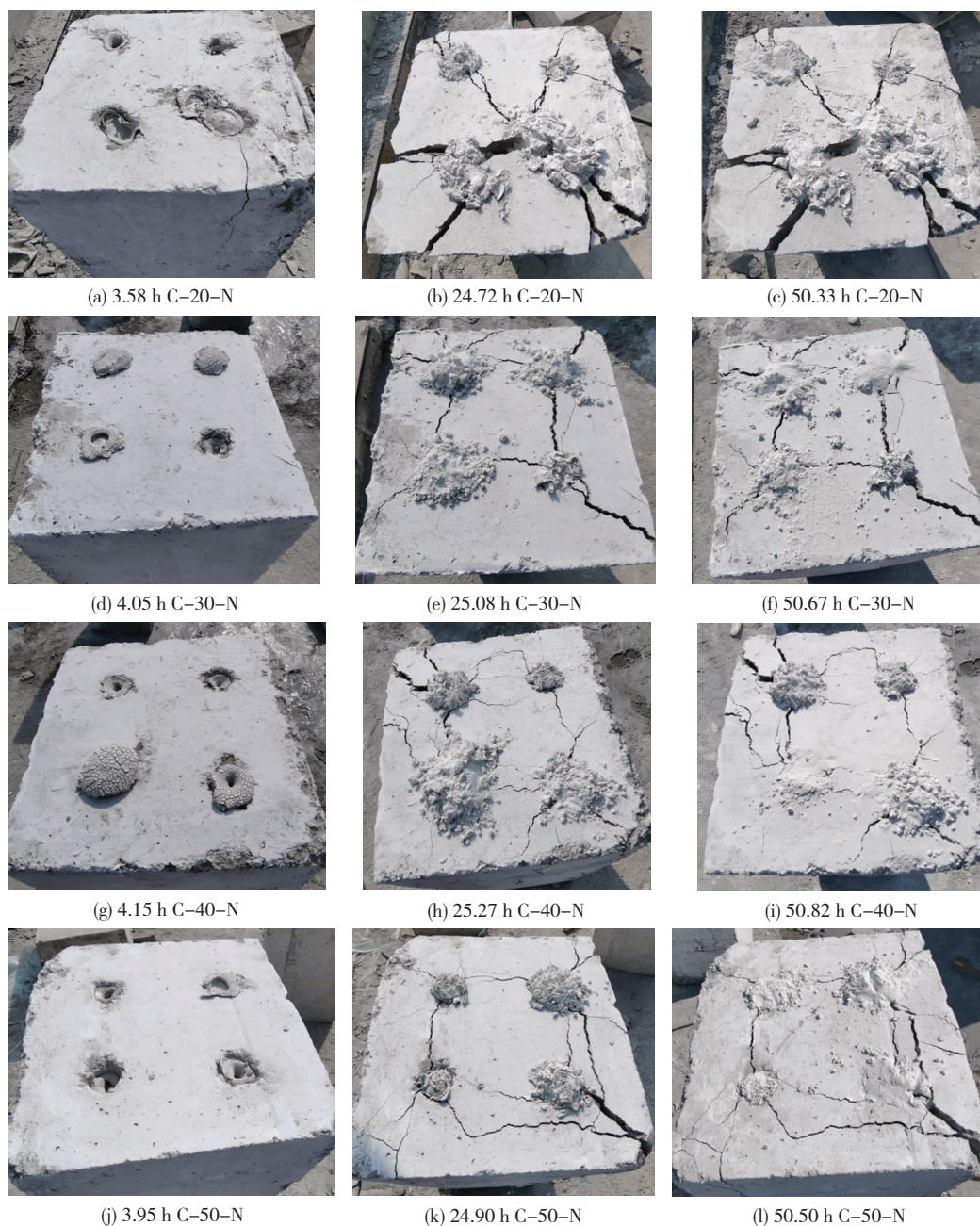


图4 不割断箍筋混凝土柱顶面破碎过程

Fig. 4 Top surface crushing process of concrete columns without cutting off stirrups



图5 不割断箍筋混凝土柱侧面破碎过程

Fig.5 Side crushing process of concrete columns without cutting off stirrups

对比在静态破碎过程中4个不割断箍筋混凝土柱的试验现象,发现:

1) 0~4.0 h, 试件 C-20-N 的顶面和侧面均出现裂缝, 顶面孔4与孔3及孔4与孔2之间的裂缝均已连通。注入静态破碎剂浆体后 0~4.0 h, 除试件 C-20-N 之外, 其余试件的顶面和侧面均未出现裂缝。

2) 4.0~6.7 h, 所有试件顶面和侧面均出现裂缝。除试件 C-20-N 之外, 其他试件顶面每相邻两孔之间的裂缝全都连通, 并延伸至试件边缘。试件 C-20-N 孔1和孔4之间的裂缝连通, 但孔1

与相邻角孔之间的裂缝并未连通, 其余试件则无对角两孔之间的裂缝连通, 产生这种现象的原因可能是 C-20-N 的孔4向顶面中心有一定偏移。

3) 6.7~8.9 h, 试件 C-20-N 孔2新增一条延伸至试件边缘处的裂缝, 其余试件无新裂缝产生。

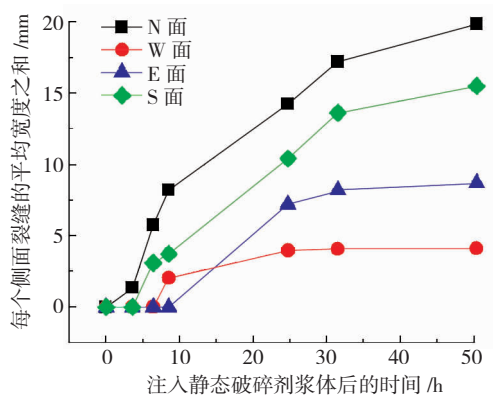
4) 8.9~25.2 h, 所有试件的裂缝宽度明显增大, 侧面均有新裂缝产生。试件 C-20-N 孔3和孔4延伸至试件边缘的裂缝进一步发展, 同时产生体积较小的混凝土碎块; 试件 C-40-N 孔1和孔2之间出现一条新的裂缝并连通; 试件 C-50-N 孔3处出现一条延伸至试件右侧边缘的裂缝。

5) 25.2 ~ 50.8 h, 所有试件的顶面和侧面均无新裂缝产生, 但裂缝宽度进一步发展。

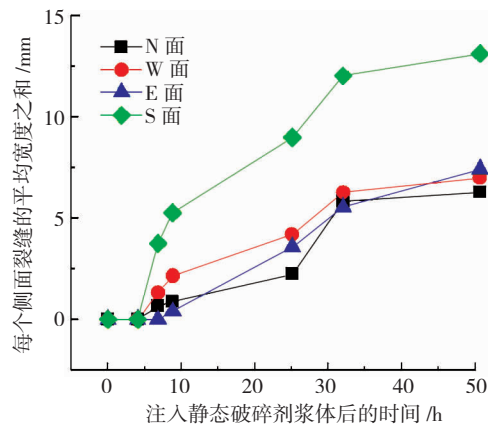
以注入静态破碎剂浆体后的时间为横轴, 试件每个侧面裂缝的平均宽度之和为纵轴, 建立各试件

侧面裂缝宽度的时程曲线见图 6。

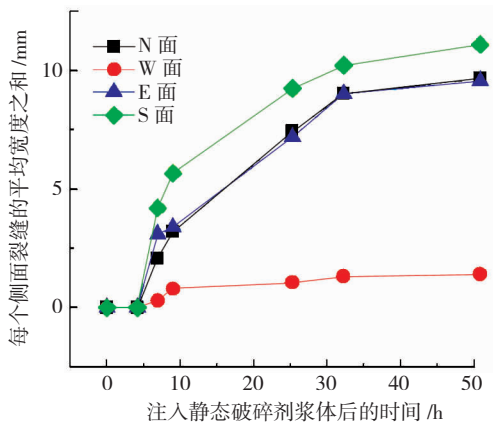
以注入静态破碎剂浆体后的时间为横轴, 试件顶面每个孔周裂缝宽度之和为纵轴, 建立各试件孔周裂缝宽度的时程曲线见图 7。



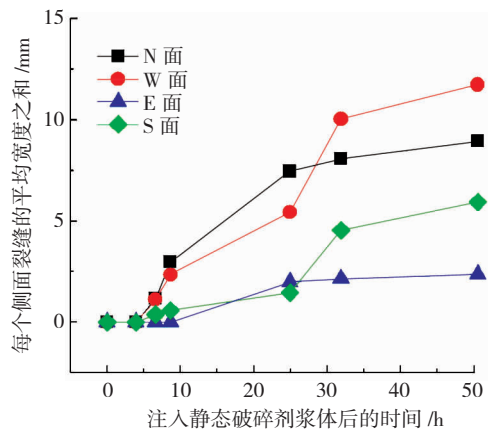
(a) C-20-N



(b) C-30-N



(c) C-40-N



(d) C-50-N

图 6 不割断箍筋混凝土柱各侧面裂缝的宽度时程曲线

Fig. 6 Time history curves of crack width on each side of concrete columns without cutting off stirrups

由图 6、7 结合考察可以发现: 0 ~ 4.0 h 时, 侧面裂缝和孔周裂缝均未开始发展, 这是由于静态破碎剂的膨胀力发展过程中存在一段时间的休止期^[6], 休止期内不产生膨胀力, 且静态破碎剂在试件内产生的拉应力需要高于材料的抗拉强度, 才能产生膨胀裂缝; 4.0 ~ 8.6 h 时, 裂缝宽度增长迅速, 增长速率达到最大值, 在图中表现为曲线斜率最大; 8.6 ~ 32.0 h 时, 裂缝宽度的增长速率有所降低, 32.0 h 时裂缝宽度均比 8.6 h 的裂缝宽度大 1 倍左右; 32.0 ~ 50.8 h 时, 除未产生裂缝的阶段, 裂缝的增长速率最低, 宽度发展趋于稳定。

为考察混凝土强度对混凝土柱顶面和侧面破碎效果的影响, 以注入破碎剂浆体 50.8 h 时, 每个混凝土柱所有孔的孔周裂缝宽度之和代表混凝土柱顶面的破碎情况; 以注入破碎剂浆体 50.8 h 时, 每个混凝土柱 4 个侧面的裂缝平均宽度之和代表混凝土柱侧面的破碎情况; 建立以混凝土标准立方体抗压强

度为横轴, 裂缝宽度之和为纵轴的关系曲线见图 8。

由图 8 可知, 随着混凝土强度的增加, 顶面和侧面的裂缝宽度之和均呈下降趋势。混凝土强度由 24.4 MPa 升高到 55.5 MPa 时, 侧面裂缝宽度减小 39.9%, 顶面裂缝宽度减小 63.8%。对于不割断箍筋的混凝土柱, 顶面裂缝宽度之和 (w_u) 及侧面裂缝宽度之和 (w_s) 与混凝土标准立方体抗压强度 (f) 之间的关系分别为:

$$w_u = 270.38 - 6.53f + 0.05f^2 \quad (1)$$

曲线的拟合优度 $R^2 = 0.95$

$$w_s = 98.30 - 2.73f + 0.03f^2 \quad (2)$$

曲线的拟合优度 $R^2 = 0.97$

由式 (1) 和式 (2) 可知, 随着混凝土强度的增加, 顶面裂缝宽度和与侧面裂缝宽度的降低幅度逐渐减小。

利用电镐去除试件保护层后, 试件内部破碎情况见图 9。

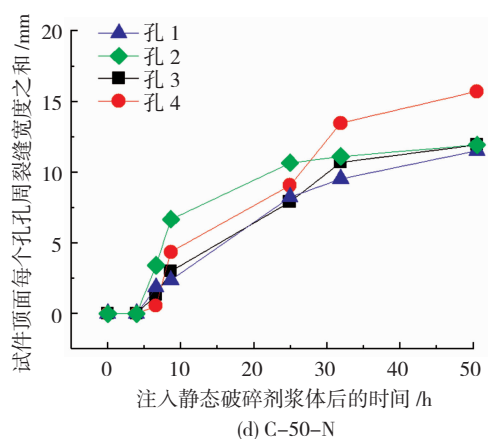
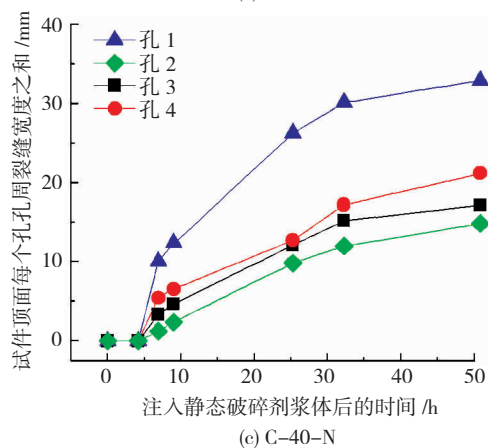
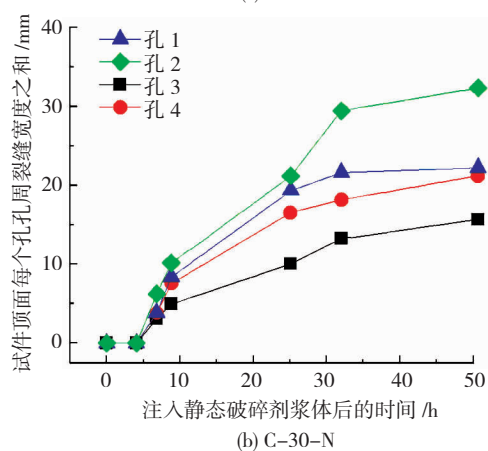
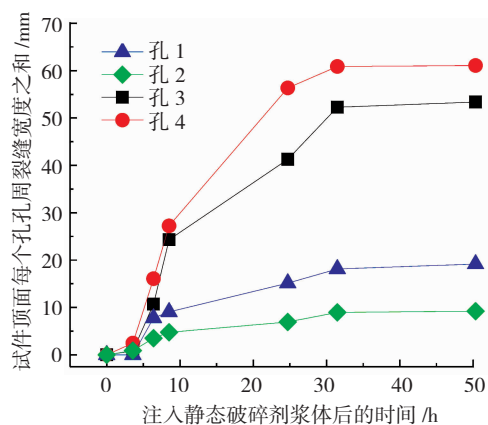


图7 不割断箍筋混凝土柱顶面孔周裂缝的宽度时程曲线

Fig. 7 Time history curves of crack width on the top surface of concrete columns without cutting off stirrups

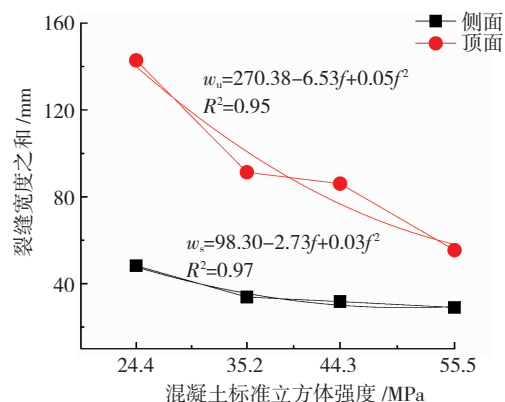


图8 注入静态破碎剂浆体 50.8 h 时混凝土柱的裂缝宽度之和与混凝土强度关系曲线

Fig. 8 Relation curves between sum of crack width of concrete columns and concrete strength with static crushing agent slurry injected for 50.8 h



图9 不割断箍筋混凝土柱的内部破碎情况

Fig. 9 Internal crushing of concrete columns without cutting off stirrups

由图 9 可以发现,虽然钢筋骨架会降低试件表面破碎效果,但静态破碎后试件内部是酥碎的。去除保护层并剔除钢筋后,可以通过简单触碰将由裂缝分割形成的混凝土块体分离。

2.2 箍筋割断后混凝土柱静态破碎的试验现象与分析

选取割断箍筋后 4 个混凝土柱在静态破碎过程中顶面和侧面的照片,分别见图 10、11。分析时采用的裂缝宽度和割缝宽度均为表面宽度,由于试验过程中存在块体脱落的情况,因块体脱落而消失的裂缝或割缝宽度取为块体脱落前最后一次测量的结果。

由图 10、11 结合考察发现:

1) 0 ~ 4.1 h, 所有试件侧面割缝宽度均有一定

发展。试件 C-40-S 和 C-50-S 顶面出现裂缝,其余试件顶面无裂缝,原因可能为试件 C-40-S 的孔 3 和 C-50-S 的孔 2 孔位向试件边缘有一定的偏移,削弱了混凝土对孔内破碎剂的约束。

2) 4.1 ~ 7.5 h, 所有试件顶面孔周都出现裂缝,不做处理时试件顶面的孔周裂缝主要向试件角部斜向延伸或在两孔之间连通,而割断箍筋时试件顶面的孔周裂缝趋向于向割缝方向延伸,主要是因为割缝在解除了箍筋约束的同时削弱了混凝土截面,形成了较为薄弱的地带。侧面割缝发展较大,但每个侧面仅一个割缝的宽度发展较明显,另一个割缝宽度变化不大。

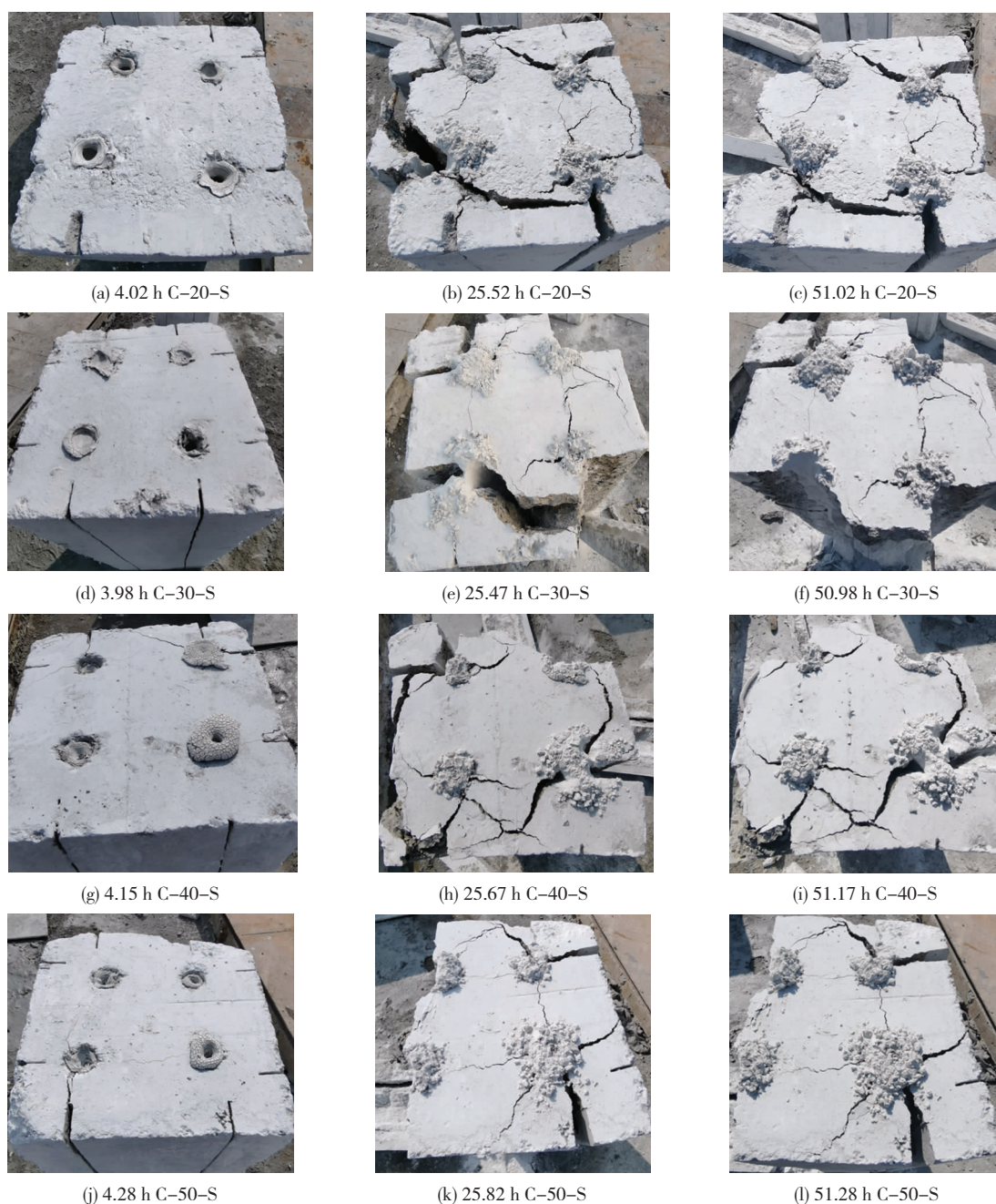


图 10 割断箍筋混凝土柱的顶面破碎过程

Fig. 10 Crushing process of the top surface of concrete columns after cutting off stirrups



图 11 割断箍筋混凝土柱的侧面破碎过程

Fig. 11 Crushing process of the side of concrete columns after cutting off stirrups

3) 7.5 ~ 9.3 h, 所有试件顶面和侧面无新裂缝产生, 仅是裂缝宽度有所增加。

4) 9.3 ~ 25.6 h, 所有试件角部均有块体沿着割缝脱落。除试件 C-40-S 顶面孔 1 和孔 3 之间的裂缝未连通之外, 其余试件相邻两孔之间的裂缝全部连通。试件侧面无新裂缝产生。

5) 25.6 ~ 51.1 h, 试件 C-20-S、C-30-S 和 C-40-S 依旧有块体脱落, C-50-S 无新裂缝产生。

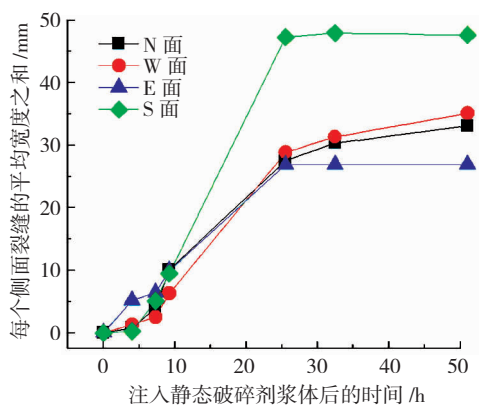
以注入静态破碎剂浆体后的时间为横轴, 试件每个侧面裂缝的平均宽度之和为纵轴, 建立各试件侧面裂缝宽度的时程曲线见图 12, 裂缝宽度均已扣

除割缝初始宽度 4 mm。

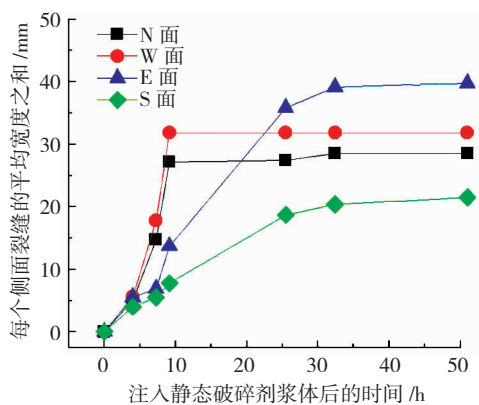
以注入静态破碎剂浆体后的时间为横轴, 试件顶面每个孔周裂缝宽度之和为纵轴, 建立各试件孔周裂缝宽度的时程曲线见图 13。

结合图 10 ~ 13 考察可发现: 在不考虑块体脱落的情况下, 割缝及顶面孔周裂缝的发展情况与不做处理混凝土柱的裂缝发展情况相似, 即 0 ~ 4.1 h 时裂缝及割缝的宽度发展缓慢; 4.1 ~ 9.3 h 裂缝和割缝的平均宽度增长迅速, 曲线斜率最大; 9.3 ~ 32.6 h 时裂缝和割缝的平均宽度继续增长, 但增长速率减缓; 32.6 ~ 51.1 h 时裂缝和割缝的宽度发展速率进

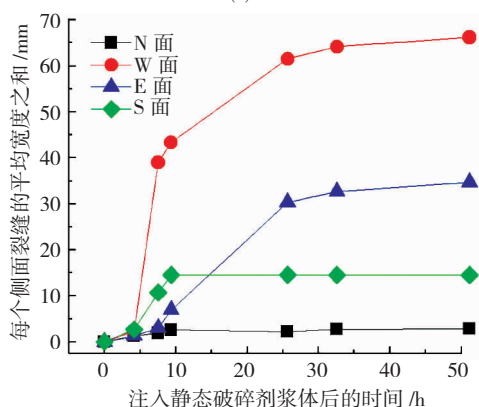
一步降低,宽度发展趋于稳定。



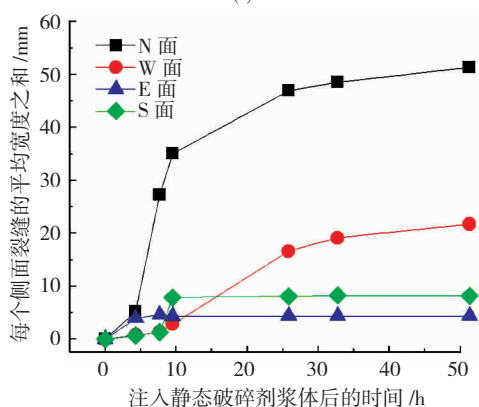
(a) C-20-S



(b) C-30-S



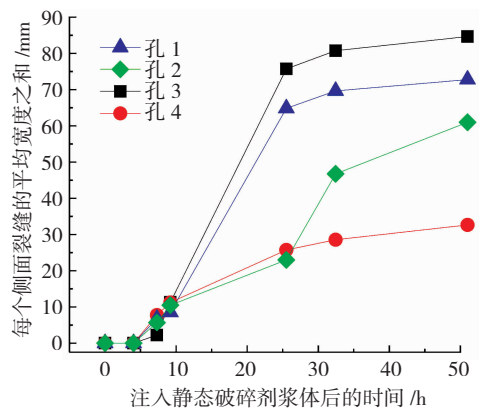
(c) C-40-S



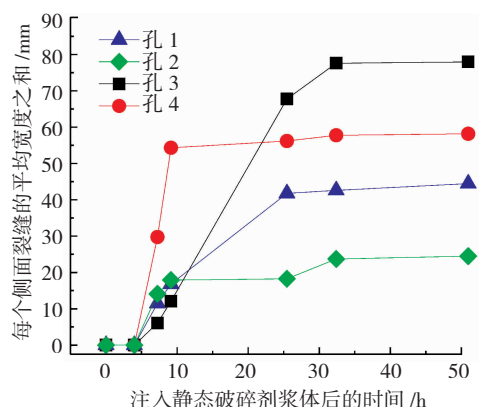
(d) C-50-S

图 12 切断箍筋时混凝土柱各侧面裂缝的宽度时程曲线

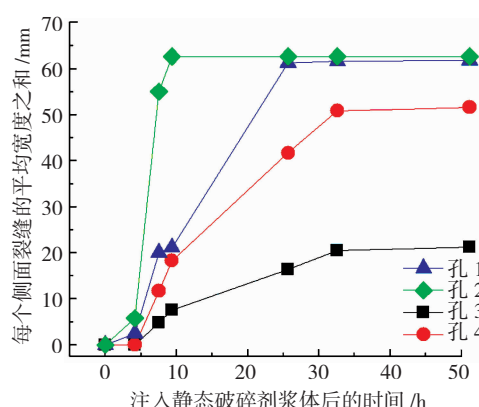
Fig. 12 Time history curves of crack width on each side of concrete columns after cutting off stirrups



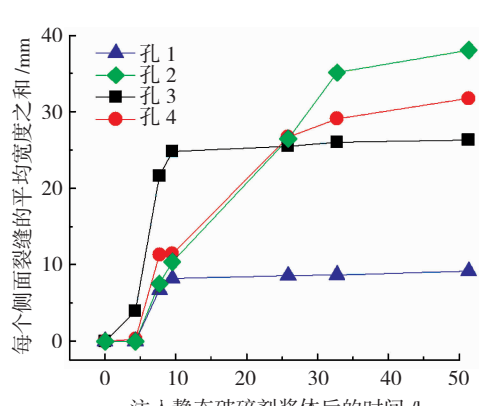
(a) C-20-S



(b) C-30-S



(c) C-40-S



(d) C-50-S

图 13 切断箍筋时混凝土柱顶面孔周裂缝的宽度时程曲线

Fig. 13 Time history curves of crack width around the top surface of concrete columns after cutting off stirrups

为考察混凝土强度对混凝土柱顶面和侧面破碎效果的影响,以注入破碎剂浆体 51.1 h 时,每个混凝土柱所有孔的孔周裂缝宽度之和代表混凝土柱顶面的破碎情况;以注入破碎剂浆体 51.1 h 时,每个混凝土柱 4 个侧面的裂缝平均宽度之和代表混凝土柱侧面的破碎情况;建立以混凝土标准立方体抗压强度为横轴,裂缝宽度之和为纵轴的关系曲线见图 14,侧面裂缝宽度均已扣除割缝初始宽度 4 mm。

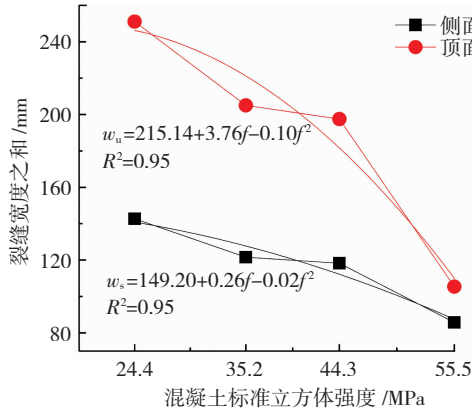


图 14 注入静态破碎剂浆体 51.1 h 时混凝土柱的裂缝宽度之和与混凝土强度关系曲线

Fig. 14 Relation curves between sum of crack width of concrete columns and concrete strength with static crushing agent slurry injected for 51.1 h

由图 8、14 结合可知,无论是否割断箍筋,顶面和侧面的缝宽与混凝土强度之间均呈负相关,且混凝土强度对顶面裂缝宽度的影响大于侧面。割断箍筋试件的混凝土强度由 24.4 MPa 升高到 55.5 MPa 时,试件侧面的裂缝宽度降低 39.9%,顶面的裂缝宽度降低 58.0%。

割断箍筋的混凝土柱,顶面裂缝宽度之和(w_u)及侧面裂缝宽度之和(w_s)与混凝土标准立方体抗压强度(f)之间的关系分别为:

$$w_u = 215.14 + 3.76f - 0.10f^2 \quad (3)$$

曲线的拟合优度 $R^2 = 0.95$

$$w_s = 149.20 + 0.26f - 0.02f^2 \quad (4)$$

曲线的拟合优度 $R^2 = 0.95$

由式(3)和式(4)可知,随着混凝土强度的增加,顶面裂缝宽度之和与侧面裂缝宽度之和的降低幅度逐渐增加,与不割断箍筋混凝土柱裂缝宽度之和的变化趋势相反。

2.3 两种静态破碎方案的破碎效果比较

为比较两种破碎方案的效果,以混凝土标准立方体抗压强度为横轴,注入静态破碎剂浆体 51.1 h 后的裂缝宽度之和为纵轴,建立关系曲线见图 15。

由图 15 可知,割断箍筋能使混凝土柱的破碎效果提升 60% 以上。

以混凝土标准立方体抗压强度为横轴,以注入

静态破碎剂浆体 51.1 h 后,割断箍筋试件与不割断箍筋试件裂缝宽度和之间的差值为纵轴,建立关系曲线见图 16。

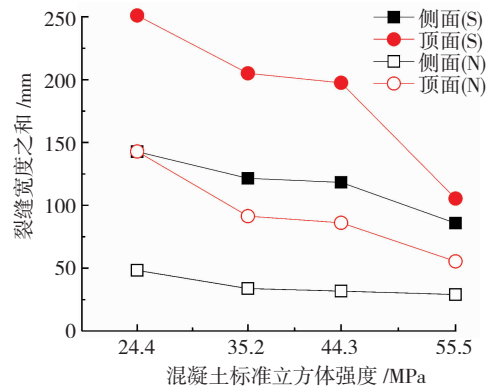


图 15 缝宽与混凝土强度关系曲线

Fig. 15 Relation curves between crack width and concrete strength

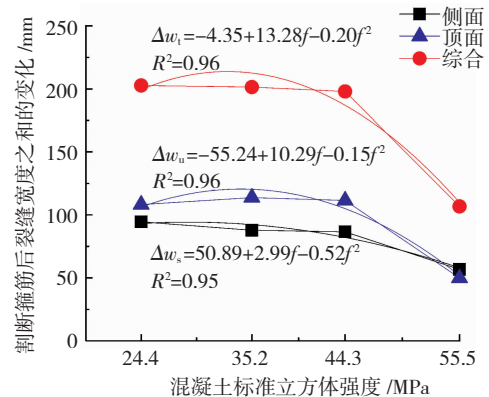


图 16 割断箍筋后裂缝宽度和的增量与混凝土强度关系曲线

Fig. 16 Relation curves between increment of sum of crack width and concrete strength after cutting off stirrups

经拟合得到割断箍筋后试件顶面裂缝宽度和增量(Δw_u)、侧面裂缝宽度和增量(Δw_s)及整体的裂缝宽度和增量(Δw_i)与混凝土标准立方体强度(f)的关系分别为:

$$\Delta w_u = -55.24 + 10.29f - 0.15f^2 \quad (5)$$

曲线的拟合优度 $R^2 = 0.96$

$$\Delta w_s = 50.89 + 2.99f - 0.52f^2 \quad (6)$$

曲线的拟合优度 $R^2 = 0.95$

$$\Delta w_i = -4.35 + 13.28f - 0.20f^2 \quad (7)$$

曲线的拟合优度 $R^2 = 0.96$

结合公式及图 16 可知,随着混凝土强度的提高,割断箍筋对破碎效果的提升程度随混凝土强度的提高而降低,且降低幅度逐渐增加。

3 结 论

1) 静态破碎效果会随着混凝土强度的提高而降低,柱顶面的破碎效果优于侧面。不割断箍筋的试件,随着混凝土强度的增加,破碎效果的降低幅度

逐渐增加;割断箍筋的试件,随着混凝土强度的增加,破碎效果的下降幅度逐渐减小。

2) 割断箍筋可以将静态破碎效果提升 60% 以上。但随混凝土强度的增加,割断箍筋对破碎效果的提升程度降低,且降低幅度逐渐增加。

3) 不割断箍筋的试件在静态破碎过程中无块体脱落,表面裂缝分布密集,试件内部酥碎,去除保护层并割断或剔除钢筋后,可以通过简单触碰将由裂缝分割形成的混凝土块体分离;割断箍筋的试件,在静态破碎过程中柱角部会有块体脱落,试件侧面除割缝外很少出现其余裂缝。

参考文献

- [1] NATANZI A S, LAEFER D F, CONNOLLY L. Cold and moderate ambient temperatures effects on expansive pressure development in soundless chemical demolition agents[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 110: 117. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.016
- [2] ARSHADNEJAD S, GOSHTASBI K, AGHAZADEH J. A model to determine hole spacing in the rock fracture process by non-explosive expansion material[J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2011, 18(5): 509. DOI: 10.1007/s12613-011-0470-5
- [3] GAMBATESE J A. Controlled concrete demolition using expansive cracking agents[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2003, 129: 98. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:1(98)
- [4] 郑文忠,李瑞森,徐笠博,等. 静态破碎技术研究综述与建议[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2021, 53(5): 190
ZHENG Wenzhong, LI Ruisen, XU Libo, et al. Review and analysis on research and application of static crushing technology[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2021, 53(5): 190. DOI: 10.11918/201907034
- [5] DE SILVA R V S, PATHEGAMA GAMAGE R, ANNE PERERA M S A. An alternative to conventional rock fragmentation methods using SCDA: a review[J]. *Energies*, 2016, 9(11): 958. DOI: 10.3390/en9110958
- [6] TANG Shibin, HUANG Runqiu, WANG Shanyong, et al. Study of the fracture process in heterogeneous materials around boreholes filled with expansion cement[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2017, 112: 1. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2017.03.002
- [7] 崔年生,张大宁,郭连军,等. 混凝土静态破碎效果实验研究[J]. *工程爆破*, 2018, 24(3): 14
CUI Niansheng, ZHANG Daning, GUO Lianjun, et al. Experimental study on static cracking effect of concrete[J]. *Engineering Blasting*, 2018, 24(3): 14. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2018.03.003
- [8] 刘纪峰,陈阵,卢长海,等. 静态破碎剂在北京北护城河挡墙拆除中的应用[J]. *建筑技术*, 2006, 37(6): 460
LIU Jifeng, CHEN Zhen, LU Changhai, et al. Soundless cracking agent used in dismantling of retaining wall of Beijing north moat[J]. *Architecture Technology*, 2006, 37(6): 460. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4726.2006.06.022
- [9] 王仁. 无声破碎剂的设计与施工[J]. *山西建筑*, 2004, 30(5): 66
WANG Ren. Design and construction of soundless cracking agent[J]. *Shanxi Architecture*, 2004, 30(5): 66
- [10] 宋万琦,郝成春,吕爱东. HSCA 无声破碎剂在抽水站改造工程中的应用[J]. *黑龙江水专学报*, 2002, 29(2): 143
SONG Wanqi, HAO Chengchun, LÜ Aidong. Application of HSCA silent crushing agent in pumping station reconstruction project[J]. *Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College*, 2002, 29(2): 143
- [11] 姜文远,郭生贤,闫晓升. 无声破碎剂在水利工程施工中的应用[J]. *黑龙江水利科技*, 1998(1): 110
JIANG Wenyuan, GUO Shengxian, YAN Xiaosheng. Application of silent crushing agent in hydraulic engineering construction[J]. *Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy*, 1998(1): 110
- [12] HUYNH M P, LAEFER D. Expansive cements and soundless chemical demolition agents: state-of-technology review [C]// *Proceedings of the 11th Conference on Science and Technology*. Ho Chi Minh City: [s. n.], 2009
- [13] 李瑞森,郑文忠,姜智盛,等. 对混凝土剪力墙静态破碎效果的试验研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2021, 53(10): 23
LI Ruisen, ZHENG Wenzhong, JIANG Zhisheng, et al. Experimental study on static crushing effect of concrete shear walls[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2021, 53(10): 23. DOI: 10.11918/202102071
- [14] 徐笠博. 静态破碎剂比选及混凝土构件静态破碎试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019
XU Libo. Comparison and selection of static crushing agents and static crushing test of concrete components[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019
- [15] 无声破碎剂: JC 506—2008[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2008
Soundless cracking agent: JC 506—2008[S]. Beijing: China Building Materials Press, 2008
- [16] 李瑞森,郑文忠,徐笠博,等. 静态破碎剂对钢管径向膨胀压力试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(10): 19
LI Ruisen, ZHENG Wenzhong, XU Libo, et al. Experimental study on radial expansion compressive stress of steel tube with static crushing agent[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(10): 19. DOI: 10.11918/202002077
- [17] 薛志翔. 钢筋混凝土静态破裂试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017
XUE Zhixiang. Experimental study on reinforced concrete using static tracking agent[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2017

(编辑 赵丽莹)