

DOI:10.11918/202002076

混凝土块体静态破碎试验研究

姜智盛^{1,2}, 郑文忠^{1,2}, 李瑞森^{1,2}, 侯晓萌^{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: 为探究静态破碎过程中孔径与约束程度对开裂时间和破碎效果的影响规律,开展了13个素混凝土试件的单孔静态破碎试验. 将试件内切圆内混凝土面积与破碎剂面积之比定义为约束比,并用其表示混凝土对破碎剂的约束程度. 使用破碎剂体积膨胀率表示试件的破碎效果. 试验结果表明:单孔下混凝土块体破碎后一般会产生3条或4条裂缝,3条裂缝的情况居多,裂缝发展稳定后,其分布形态有“人”字形、“T”字形和“十”字形3种;试件开裂后破碎剂体积膨胀率的时程曲线呈二次抛物线形式,前期发展较快,后期发展缓慢并逐渐趋于稳定;孔径和约束程度均会对破碎剂体积膨胀率产生较明显的影响,孔径增大,破碎剂体积膨胀率随之增大,破碎效果越好,约束比增大,破碎剂体积膨胀率随之降低,破碎效果减弱;当约束比较小时,孔径对开裂时间起主要影响,孔径越大,开裂时间越短,当约束比较大时,约束比对开裂时间起主要影响,约束比越大,开裂时间越长.

关键词: 静态破碎;孔径;约束比;体积膨胀率;破碎效果;开裂时间

中图分类号: TU751.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)06-0188-06

Experimental study on static crushing of concrete block

JIANG Zhisheng^{1,2}, ZHENG Wenzhong^{1,2}, LI Ruisen^{1,2}, HOU Xiaomeng^{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: To explore the influence of pore diameter and constraint degree on cracking time and crushing effect in static crushing process, static crushing tests of 13 plain concrete specimens were carried out. The ratio of concrete area in inscribed circle of test specimen to crushing agent area was defined as constraint ratio, which was used to express the constraint degree of concrete to crushing agent. Volume expansion rate of crushing agent was utilized to indicate the crushing effect of specimens. Results show that: 3 or 4 cracks appeared after the broken of the concrete blocks under a single hole, and 3 cracks were the commonest, when the cracks became stable, the distribution forms were in the shapes of “Y”, “T”, and “cross”; The time-history curve of the volume expansion rate of crushing agent after cracking was in the form of quadratic parabola, which developed rapidly in early stage, slowly in later stage, and gradually became stable; Both pore diameter and constraint degree had obvious effects on volume expansion rate of crushing agent, the larger the pore diameter was, the larger the volume expansion rate of crushing agent became, and the better the crushing effect was, as constraint ratio increased, volume expansion rate of crushing agent decreased, and crushing effect was weakened; When constraint ratio was small, pore diameter had major effects on cracking time, where the larger the pore diameter was, the shorter the cracking time became, when constraint ratio was large, constraint ratio had major effects on cracking time, where the larger the constraint ratio was, the longer the cracking time became.

Keywords: static crushing; pore diameter; constraint ratio; volume expansion rate; crushing effect; cracking time

静态破碎技术是将按一定水灰比搅拌好的静态破碎剂(static crushing agent,简称SCA)浆体灌入岩石或混凝土的钻孔中,利用静态破碎剂体积膨胀产生的环向膨胀压力,使岩石与混凝土这类抗拉强度

相对较低的脆性材料产生明显的裂缝扩展以实现破碎的技术. 静态破碎技术自问世以来,先后用于:1)混凝土构筑物安全拆除工程;2)基岩开挖工程;3)石材成型切割;4)孤石破碎;5)特殊区域的开采等方面^[1]. 其中,静态破碎技术在混凝土构筑物拆除中的应用较为广泛,与传统的爆破拆除、机械拆除和人工拆除手段相比,静态破碎技术具有安全、施工简单、无振动、无噪音、无粉尘、无有害气体等优点,

收稿日期: 2020-02-25
基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0806100)
作者简介: 姜智盛(1998—),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, hitwzzheng@163.com

适用于城镇密集区域、重要交通干线、重要设施周围等特殊区域的拆除。

为将静态破碎技术高效地应用于土木工程的拆除,学者们对静态破碎技术进行了相应的研究.郑志涛等^[2]通过电阻应变测量法探究了孔径对破碎剂产生膨胀力的影响,指出随着孔径的增大,膨胀力也随之增大;Shang 等^[3]基于弹性理论和厚壁钢管理论的数学模型探究了孔径对破碎剂产生膨胀力的影响,也得出孔径越大,膨胀力越大的结论;Laefer 等^[4]通过电阻应变测量法探究了孔深对破碎剂产生膨胀力的影响,指出孔顶部的膨胀力几乎不发展,孔中部的膨胀力要略高于孔底部的膨胀力;唐烈先等^[5]完成了混凝土试块的单孔静态破碎试验并用 RFPA^{2D} 软件进行了模拟,发现混凝土试块主要按 3 条主裂缝的形式破坏,且不同混凝土试块的裂纹方向不完全相同;杨仁树等^[6]完成了含对称切槽预留孔的圆柱体砂浆试件的单孔静态破碎试验,采用高速摄像技术获得了裂纹扩展速度和加速度的变化规律,指出裂纹扩展的速度和加速度均呈先上升后下降的趋势;姜楠等^[7]完成了 40 mm 与 100 mm 两种孔径的静态破碎试验与有限元数值分析,发现大孔径孔与小孔径孔相比破碎剂水化反应的峰值温度更高、膨胀力更大、应力分布更广;破碎剂的水化反应为放热过程,无法及时导出的大量水化热会使破碎剂浆体中的水分迅速气化而产生较大的蒸汽压力,从而导致破碎剂从孔口喷出,武世亮等^[8]通过电阻应变测量法探究了孔径对喷孔的影响,发现孔径越大越有发生喷孔的可能。

明确孔径与约束程度对破碎效果和开裂时间的影响对提高破碎效率、降低破碎费用具有重要意义.因此本文从素混凝土单孔静态破碎试验入手,系统地探究了孔径与约束程度对破碎效果和开裂时间的影响规律,希望能为静态破碎技术的应用提供参考。

1 试验概况

静态破碎试验用 13 个素混凝土立方体试件的试件设计见表 1,试件的示意图见图 1. 利用 PVC 管在试件中成形静态破碎剂用孔. 混凝土标准立方体抗压强度的实测值为 47.7 MPa. 试验用静态破碎剂为施必达(大连)公司生产的 S-611 型无声爆破剂,通过电阻应变测量法(将破碎剂浆体灌入钢管中,通过测定钢管外表面的拉伸应变来获得破碎剂产生的环向膨胀压力)获得了破碎剂(水剂比为 0.3)的膨胀力时程曲线(试验用钢管为 45 号钢,钢管内径为 40 mm,钢管外径为 50.7 mm,钢管高度为 500 mm),见图 2. 通过测温铁盒试验获得了破碎剂

(水剂比为 0.3)水化反应的温度时程曲线,见图 3. 破碎剂的自由体积膨胀率为 315 %.

按水剂比 0.3 拌合破碎剂,灌入破碎剂浆体后(未采取封孔措施)每隔 12 h 观察现象并测量裂缝宽度. 当 12 h 间隔内裂缝宽度的增长率小于 5 % 时,认为裂缝发展已经稳定. 本次试验灌入破碎剂浆体的时间为 2019 年 9 月 21 日 18:00,试验期间白天的平均温度为 20 ℃,夜间的平均温度为 9 ℃.

表 1 试件设计				
Tab. 1 Specimen design			mm	
编号	试件上下面边长 B	试件高度 H	孔径 D	孔深 h
1	200	200	32	180
2	500	350	32	315
3	600	400	32	360
4	300	250	40	225
5	600	400	40	360
6	400	300	50	270
7	500	350	50	315
8	600	400	50	360
9	700	450	50	405
10	500	350	63	315
11	600	400	63	360
12	800	500	63	450
13	1 050	500	75	450

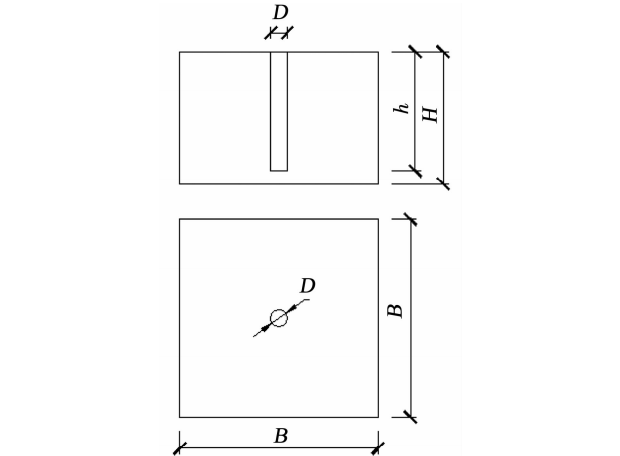


图 1 混凝土试件示意

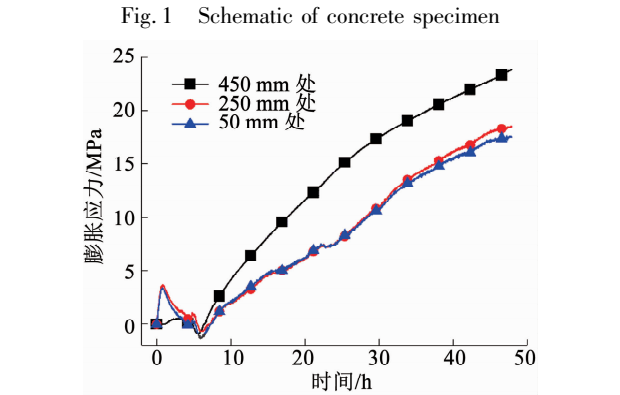


图 2 膨胀力时程曲线

Fig. 2 Time-history curves of expansion force

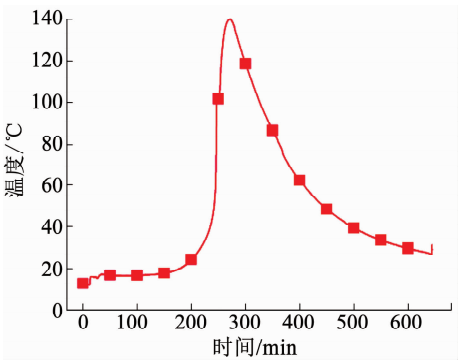


图 3 温度历程曲线
Fig. 3 Temperature-time curves

2 试验现象及分析

试件 1:预留孔灌入破碎剂浆体 72 h 时试件上表面出现裂缝,此时裂缝贯通整个试件且呈“人”字形.此后随着时间的推移,裂缝宽度逐渐增大,96 h 时发展稳定.试件 96 h 的破碎状态见图 4(a).

试件 2:预留孔灌入破碎剂浆体 72 h 时试件上表面出现微裂缝,此后随着时间的推移,裂缝宽度逐渐增大.96 h 时发展稳定,此时裂缝贯通整个试件且呈“十”字形.试件 96 h 的破碎状态见图 4(b).

试件 3:预留孔灌入破碎剂浆体 168 h 时试件上表面出现微裂缝,此后随着时间的推移,裂缝宽度逐渐增大.216 h 时发展稳定,此时裂缝贯通整个试件且呈“人”字形.试件 216 h 的破碎状态见图 4(c).

试件 4:预留孔灌入破碎剂浆体 48 h 时试件上表面出现裂缝,此时裂缝贯通整个试件且呈“人”字形.此后随着时间的推移,裂缝宽度逐渐增大,72 h 时发展稳定.试件 72 h 的破碎状态见图 4(d).

试件 5:预留孔灌入破碎剂浆体 72 h 时试件上表面出现微裂缝,此后随着时间的推移,裂缝宽度逐渐增大.108 h 时发展稳定,此时裂缝贯通整个试件且呈“人”字形.试件 108 h 的破碎状态见图 4(e).

试件 6:预留孔灌入破碎剂浆体 36 h 时试件上表面出现裂缝,此时裂缝贯通整个试件且呈“人”字形.此后随着时间的推移,裂缝宽度逐渐增大,72 h 时发展稳定.试件 72 h 的破碎状态见图 4(f).

试件 7:预留孔灌入破碎剂浆体 36 h 时试件上表面出现两条裂缝,其中一条主要裂缝将试件完全分割,另一条为与主要裂缝垂直的微裂缝.此后随着时间的推移,裂缝按主要裂缝的方向扩展,72 h 时发展稳定,全部裂缝呈“T”字形.试件 72 h 的破碎状态见图 4(g).

试件 8:预留孔灌入破碎剂浆体 36 h 时试件上表面出现裂缝,此时具有一条贯通试件的主裂缝与 3 条微裂缝.此后随着时间的推移,主裂缝宽度继续扩大其余 3 条裂缝也逐渐延长至试件边缘,84 h 时发展稳定,全部裂缝呈“十”字形.试件 84 h 的破碎状态见图 4(h).

试件 9:预留孔灌入破碎剂浆体 60 h 时试件上

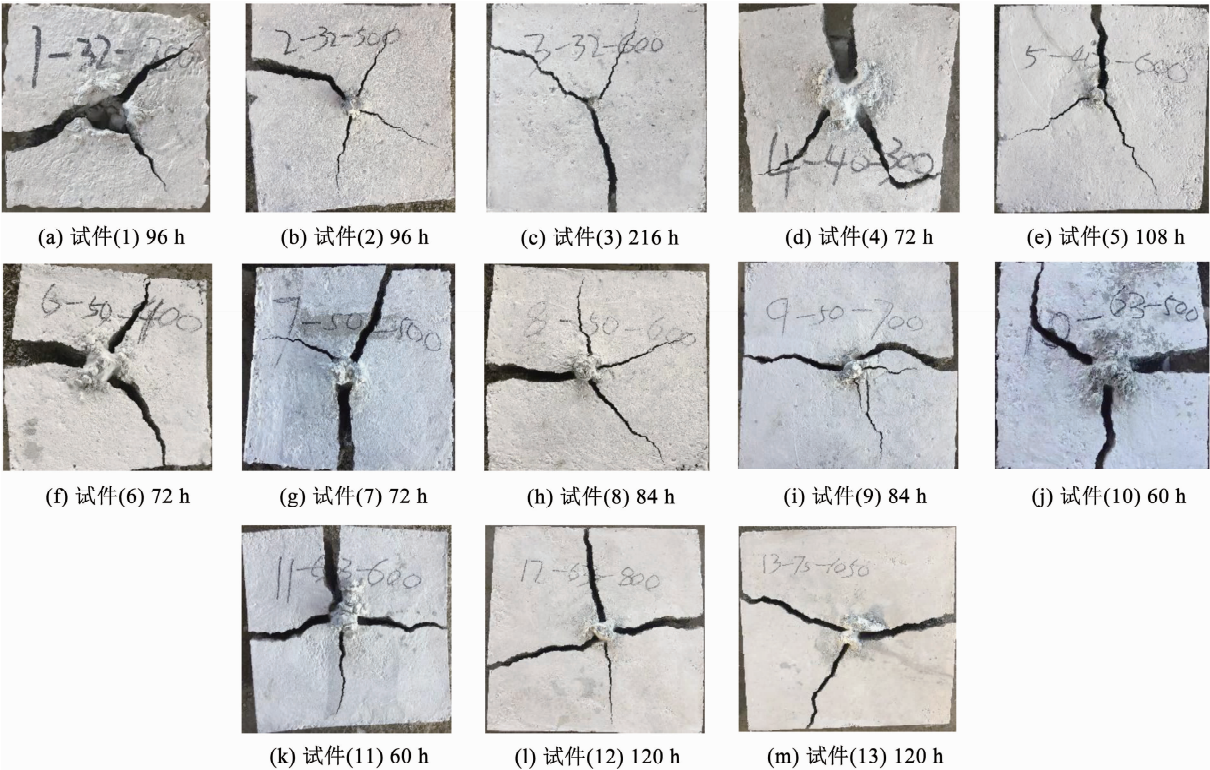


图 4 试件破碎状态
Fig. 4 Fracture modes of specimens

表面出现两条裂缝,其中一条主要裂缝将试件完全分割,另一条为与主要裂缝垂直的微裂缝.此后随着时间的推移,裂缝按主要裂缝的方向扩展,84 h 时发展稳定,全部裂缝呈“T”字形.试件 84 h 的破碎状态见图 4(i).

试件 10:预留孔灌入破碎剂浆体 24 h 时试件上表面出现裂缝,此时裂缝贯通整个试件且呈“人”字形.此后随着时间的推移,裂缝宽度逐渐增大,60 h 时发展稳定,试件 60 h 的破碎状态见图 4(j).

试件 11:预留孔灌入破碎剂浆体 36 h 时试件上表面出现裂缝,此时裂缝贯通整个试件且呈“十”字形.此后随着时间的推移,裂缝宽度逐渐增大,60 h 时发展稳定,试件 60 h 的破碎状态见图 4(k).

试件 12:预留孔灌入破碎剂浆体 72 h 时试件上表面出现裂缝,此时裂缝贯通整个试件且呈“十”字形.此后随着时间的推移,裂缝宽度逐渐增大,120 h 时发展稳定.试件 120 h 的破碎状态见图 4(l).

试件 13:预留孔灌入破碎剂浆体 72 h 时试件上表面出现裂缝,此时裂缝贯通整个试件且呈“人”字形.此后随着时间的推移,裂缝宽度逐渐增大,120 h 时发展稳定.试件 120 h 的破碎状态见图 4(m).

分析 13 个试件的破碎状态可发现:单孔下混凝土块体破碎后一般会产生 3 条或 4 条裂缝,其中产生 3 条裂缝的情况居多,破碎后产生的裂缝均贯通整个块体,裂缝发展稳定后,其分布形态主要为“人”字形、“T”字形和“十”字形 3 种. “人”字形裂缝:随着孔壁所受的膨胀力逐渐增大,沿混凝土块体的最小抵抗线方向首先形成第一条裂缝,随后破碎剂继续膨胀,第二条和第三条裂缝相继形成,裂缝按“人”字形延伸并扩展,其中第二条和第三条裂缝的宽度要明显小于第一条裂缝的宽度,试件 1、3、4、5、6、10、13 的裂缝分布形态为“人”字形. “T”字形裂缝:随着孔壁所受的膨胀力逐渐增大,混凝土块体的薄弱区域首先会形成一条将试件完全分割的主要裂缝和与主要裂缝垂直的次要微裂缝,裂缝沿“T”字形延伸并扩展,其中次要裂缝的宽度明显小于主要裂缝的宽度,试件 7、9 的裂缝分布形态为“T”字形. “十”字形裂缝:随着孔壁所受的膨胀力逐渐增大,沿混凝土块体的最小抵抗线方向首先形成第一条裂缝,随后破碎剂继续膨胀,第二条、第三条和第四条裂缝相继形成,裂缝沿“十”字形延伸并扩展,其中第二条、第三条和第四条裂缝的宽度要明显小于第一条裂缝的宽度,试件 2、8、11、12 的裂缝分布形态为“十”字形.

3 试验结果分析

3.1 孔径和约束程度对破碎效果的影响

混凝土块体的破碎是由破碎剂的体积膨胀所引

起的,破碎剂的体积膨胀越大,引起的破碎效果将会越明显,文中以破碎剂的体积膨胀率表示混凝土块体的破碎效果.假设混凝土块体破碎后,孔的形状仍近似为圆形,根据式(1)、(2)计算可得破碎剂在混凝土块体中的体积膨胀率.

$$r' = \frac{C + \omega}{2\pi}, \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{r'^2 - r^2}{r^2}. \quad (2)$$

式中: r' 为破碎后孔半径, C 为预留孔周长, ω 为孔周裂缝总宽度, r 为预留孔半径, α 为静态破碎剂的体积膨胀率.

钢管混凝土中,通常使用套箍系数^[9]来体现钢管对混凝土的约束作用,套箍系数越大,约束程度越好,钢管混凝土的承载力越高.套箍系数为

$$\theta = \frac{A_s f}{A_c f_c}, \quad (3)$$

式中: θ 为钢管混凝土的套箍系数, A_s 为钢管混凝土外部钢管的截面面积, f 为钢材的抗拉强度, A_c 为钢管内混凝土的截面面积, f_c 为混凝土的抗压强度.

静态破碎过程中,可将孔中的破碎剂看作弹性圆柱体,孔周围的混凝土视为对破碎剂的约束,便可使用钢管混凝土中的套箍系数来表示外围混凝土对破碎剂的约束程度.因 4 个角部的混凝土对破碎剂的约束程度较小,不考虑 4 个角部的混凝土对破碎剂的约束作用,取试件内切圆内的混凝土作为对破碎剂起主要约束作用的区域,示意图见图 5.因本次试验混凝土试件的强度相同、静态破碎剂的种类和水剂比相同,混凝土的强度与静态破碎剂的强度便可视为常数项不作考虑,外围混凝土对破碎剂的约束程度可根据式(4)计算.文中以约束比表示外围混凝土对破碎剂的约束程度.

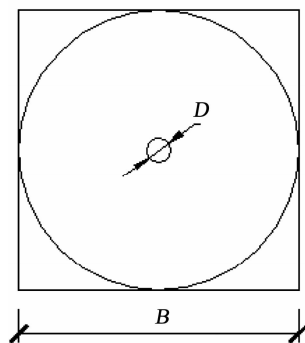


图 5 约束比计算示意

Fig. 5 Schematic of constraint ratio calculation

$$\lambda = \frac{\frac{\pi}{4}(B^2 - D^2)}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{B^2 - D^2}{D^2}, \quad (4)$$

式中: λ 为外围混凝土对破碎剂的约束比, B 为试件上下表面边长, D 为孔径.

为综合分析时间、孔径和约束比对破碎剂体积膨胀率的影响, 基于 13 个试件试验结果, 以破碎剂体积膨胀率作为因变量, 预留孔灌入破碎剂浆体后的时间、孔径和约束比作为自变量进行拟合, 得到破碎剂体积膨胀率与预留孔灌入破碎剂浆体后的时间、孔径和约束比的数学关系式(5). 破碎剂体积膨胀率与破碎剂浆体灌入后的时间和约束比^{1.15}/孔径^{0.01}呈二元二次函数关系, 曲面拟合优度 $R^2 = 0.863$, 曲面见图 6.

$$\alpha = 20.939 + 3.549t - 0.444 \frac{\lambda^{1.15}}{D^{0.01}} - 0.0196t^2 - 0.0000666 \frac{\lambda^{2.3}}{D^{0.02}} + 0.00304t \frac{\lambda^{1.15}}{D^{0.01}}, \quad (5)$$

式中 t 为预留孔灌入破碎剂浆体后的时间.

开裂后所有试件中的破碎剂体积膨胀率随时间均呈二次抛物线的形式发展, 前期发展较快, 后期发展缓慢并逐渐趋于稳定. 孔径增大, 破碎剂体积膨胀率随之增大, 破碎效果越好. 约束比增大, 破碎剂体积膨胀率随之降低, 破碎效果减弱.

基于试件 3、5、8、11 试验结果, 分析最小抵抗线长度(孔中心至试件边缘的最短距离)相同(300 mm)、孔径不同时破碎剂最终体积膨胀率和试件总裂缝宽度(所有裂缝宽度之和, 其中一条裂缝的宽度为两个端部和中部 3 个位置裂缝宽度的平均值)的变化规律, 见图 7、8. 最小抵抗线长度相同时, 孔径对破碎剂最终体积膨胀率和试件总裂缝宽度的影响趋势相同, 随着孔径增大, 破碎剂最终体积膨胀率和试件总裂缝宽度均随之增大. 孔径由 32 mm 增大至 40 mm, 破碎剂的体积用量提高 162 860 mm³, 破碎剂最终体积膨胀率提高 2.62 %, 试件总裂缝宽度增大 9.79 mm. 孔径由 50 mm 增大至 63 mm, 破碎剂的

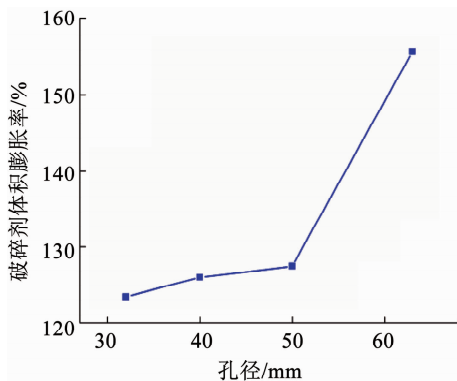


图 7 不同孔径的最终体积膨胀率

Fig. 7 Final volume expansion rate under different pore diameters

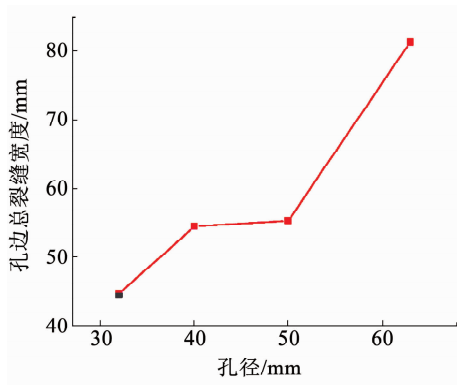


图 8 不同孔径的总裂缝宽度

Fig. 8 Total crack width under different pore diameters

体积用量提高 415 350 mm³, 破碎剂最终体积膨胀率提高 28.20 %, 试件总裂缝宽度增大 26.01 mm. 孔径越大对破碎剂最终体积膨胀率和试件总裂缝宽度的提升越明显.

3.2 孔径和约束程度对开裂时间的影响

为综合分析孔径与约束比对开裂时间的影响, 基于 13 个试件试验结果, 以试件的开裂时间作为因变量, 孔径和约束比作为自变量进行拟合, 得到开裂时间与孔径和约束比的数学关系式(6). 开裂时间与孔径和约束比呈二元二次函数关系, 曲面拟合优度 $R^2 = 0.960$, 曲面见图 9.

$$T = 138.76 - 1.47D - 1.11\lambda - 0.0014D^2 + 0.0027\lambda^2 + 0.012D\lambda, \quad (6)$$

式中 T 为试件的开裂时间.

当约束比较小时, 孔径对开裂时间起主要影响, 孔径增大, 开裂时间提前. 当约束比较大时, 约束比对开裂时间起主要影响, 约束比增大, 开裂时间延后.

基于试件 3、5、8、11 试验结果, 分析最小抵抗线长度(孔中心至试件边缘的最短距离)相同(300 mm)、孔径不同时开裂时间的变化规律, 见图 10. 最小抵抗线长度相同, 孔径在 32 至 63 mm 变化时, 孔径增大会缩短试件的开裂时间. 孔径为 32 mm 时, 预留孔灌入破碎剂浆体 168 h 发现开裂;

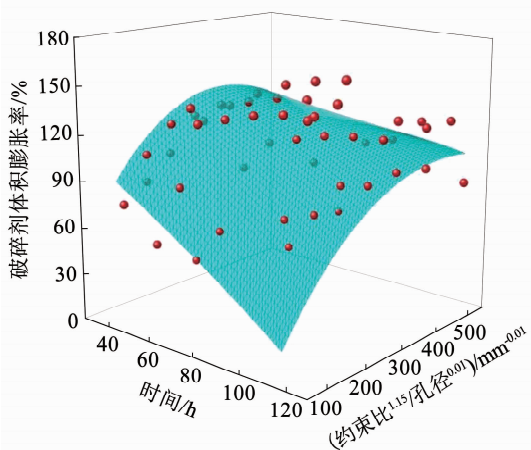


图 6 破碎剂体积膨胀率时程曲线

Fig. 6 Time-history curve of volume expansion rate of crushing agent

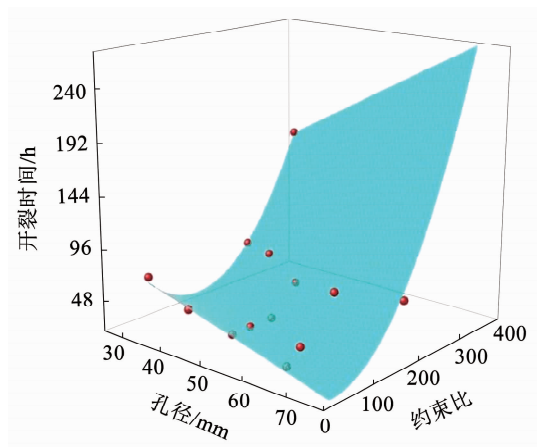


图9 约束比和孔径对开裂时间的影响

Fig. 9 Effect of constraint ratio and pore diameter on cracking time

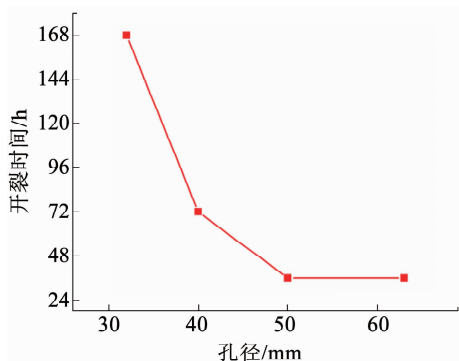


图10 不同孔径的开裂时间

Fig. 10 Cracking time under different pore diameters

孔径为40 mm时,预留孔灌入破碎剂浆体72 h发现开裂;孔径为50与63 mm时,预留孔灌入破碎剂浆体36 h发现开裂。但当孔径继续增大时,开裂时间不会明显缩短,分析原因为:破碎剂的水化反应产生能使混凝土块体破碎的膨胀力需要一定的时间。

基于试件6、7、8、9试验结果,分析孔径相同(50 mm)、约束比不同时开裂时间的变化规律,见图11。孔径不变,随着约束比增大,开裂时间随之延长。孔径为50 mm,约束比为63、99和143时,预留孔灌入破碎剂浆体36 h发现开裂,约束比增大到195,预留孔灌入破碎剂浆体60 h发现开裂。若约束比继续增大,开裂时间继续延长,甚至出现无法开裂的可能。

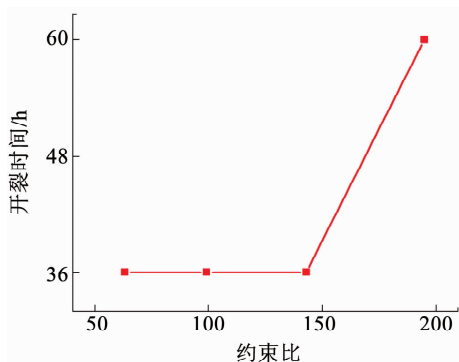


图11 不同约束比的开裂时间

Fig. 11 Cracking time under different constraint ratio

图11前3个约束比下的开裂时间几乎一样,后一个约束比下的开裂时间突增,分析原因为:约束比为63、99和143时,预留孔灌入破碎剂浆体36 h发现开裂,开裂时间在24 h至36 h之间。当约束比较小时,约束比的增大对开裂时间的延长影响不明显,当约束比较大时,约束比的增大会对开裂时间的延长影响较为明显。

4 结 论

1)静态破碎是一个持续过程,破碎剂的体积膨胀会使孔壁所受的环向膨胀压力逐渐增大。当混凝土所受的拉应力大于抗拉强度时,混凝土中出现裂缝,并且产生的裂缝均会近乎贯通整个试件。试件开裂后,破碎剂体积膨胀率随时间呈二次抛物线的形式发展,前期发展较快,后期发展缓慢并逐渐趋于稳定。

2)单孔下混凝土块体破碎后一般产生3条或4条裂缝,产生3条裂缝的情况居多。裂缝发展稳定后,其分布形态为“人”字形、“T”字形和“十”字形。

3)孔径和约束比均对破碎剂体积膨胀率有明显影响:孔径增大,破碎剂体积膨胀率随之增大,破碎效果越好;约束比增大,破碎剂体积膨胀率随之减小,破碎效果减弱。最小抵抗线长度相同时,孔径越大对破碎效果的提升越明显。

4)当约束比较小时,孔径对开裂时间起主要影响,孔径越大,开裂时间越短。当约束比较大时,约束比对开裂时间起主要影响,约束比越大,开裂时间越长。

参考文献

- [1]刘清荣,巴惠鹏,陈宝心,等.静态破碎剂研究现状与展望——献给静态破碎剂问世十周年[J].爆破,1990(1):2
LIU Qingrong, BA Huipeng, CHEN Baoxin, et al. Status and prospect of static crushing agent research: dedicated to the 10th anniversary of static crushing agent[J]. Blasting, 1990(1):2
- [2]郑志涛,徐颖,倪红娟.钻孔直径对静态破碎剂致裂性能影响试验分析[J].科学技术与工程,2016,16(2):10
ZHENG Zhitao, XU Ying, NI Hongjuan. Test and analysis of hole diameter effect on cracking performance of static cracking agent[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(2):10
- [3]SHANG J, ZHAO Z, ALIYU M M. Stresses induced by a demolition agent in non-explosive rock fracturing[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 107: 179
- [4]LAEFER D F, NATANZI A S, ZOLANVARI S M I. Impact of thermal transfer on hydration heat of a Soundless Chemical Demolition Agent[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187: 353
- [5]唐烈先,唐春安,唐世斌.静态破碎的物理与数值试验[J].岩土工程学报,2005,27(4):440
TANG Liexian, TANG Chunan, TANG Shibin. Physical experiment and numerical simulation on effect of soundless cracking agent[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4):440
- [6]杨仁树,孙中辉,佟强,等.静态破碎剂膨胀作用下试件裂纹扩展试验研究[J].工程爆破,2010,16(3):11
YANG Renshu, SUN Zhonghui, TONG Qiang, et al. Experiment of crack propagation in test specimen under expansive action of static cracking agent[J]. Engineering Blasting, 2010, 16(3):11
- [7]姜楠,徐全军,龙源,等.大孔径静态破碎膨胀压力特性及布孔参数分析[J].爆炸与冲击,2015,35(4):471
JIANG Nan, XU Quanjun, LONG Yuan, et al. Expansive pressure characteristic and borehole parameter analysis on large scale borehole soundless cracking[J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(4):471
- [8]武世亮,翟成,向贤伟,等.钻孔内静态破碎剂喷孔实验研究[J].煤炭技术,2015,34(9):144
WU Shiliang, ZHAI Cheng, XIANG Xianwei, et al. Experimental study on jet orifice of static cracking agent in drilling hole[J]. Coal Technology, 2015, 34(9):144
- [9]钢管混凝土结构技术规范:GB 50936—2014[S].北京:中国建筑工业出版社,2014

(编辑 赵丽莹)