

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.06.006

静态破碎剂的配方优化设计与水化反应分析*

杜光钢^{①②} 董立哲^{①②} 李祥龙^{①②} 刘 磊^{①②}

① 昆明理工大学国土资源学院(云南昆明,650093)

② 云南省教育厅爆破新技术工程研究中心(云南昆明,650093)

[摘 要] 为探究各组分含量变化对静态破碎剂水化反应速率的影响,确定静态破碎剂各组分的最优配比,基于单因素多水平试验,运用正交试验对静态破碎剂进行配方优化。进行了静态破碎剂水化反应速率分析和混凝土破碎验证试验。试验结果表明:静态破碎剂各组分质量分数区间为氧化钙 70%~80%、P·O 42.5 水泥(水泥)8%~12%、硫酸钙(石膏)2%~4%、钠基膨润土 3%~7%;不足 100% 部分中,除 1% 减水剂外,由粉煤灰作为填充剂补充。确定静态破碎剂最优配方(质量分数)为氧化钙 73%、水泥 10%、石膏 5%、钠基膨润土 6%、减水剂 1%、粉煤灰 5%。配方优化后,自制静态破碎剂的混凝土破碎效果优于商用静态破碎剂。

[关键词] 静态破碎剂;配方优化;水化反应;反应速率;膨胀压

[分类号] TQ560.7

Formula Optimization and Hydration Reaction Analysis of the Static Crushing Agent

DU Guanggang^{①②}, DONG Lizhe^{①②}, LI Xianglong^{①②}, LIU Lei^{①②}

① Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology (Yunnan Kunming, 650093)

② New Blasting Technology Engineering Research Center, Yunnan Education Department (Yunnan Kunming, 650093)

[ABSTRACT] In order to explore the influence of content change of each component on the hydration reaction rate of the static crushing agent, and to determine the optimal proportion of each component of the static crushing agent, the formula of the static crushing agent was optimized by orthogonal experiment based on the single factor multi-level design tests. Hydration reaction rate analysis of static crushing agent and concrete crushing verification test were carried out. Test results show that the mass fraction range of each component of the static crushing agent is 70%-80% of calcium oxide, 8%-12% of P·O 42.5 cement (cement), 2%-4% of calcium sulfate (gypsum), 3%-7% of sodium bentonite, and the part less than 100% is supplemented by coal ash as filler except for 1% of water reducer. The optimum formula (mass fraction) of static crushing agent is calcium oxide 73%, cement 10%, gypsum 5%, sodium bentonite 6%, water reducer 1%, and coal ash 5%. After formula optimization, the concrete crushing outcomes of the static crushing agent is better than those of commercial static crushing agent.

[KEYWORDS] static cracking agent; formula optimization; hydration reaction; reaction rate; expansion pressure

引言

传统上以烈性炸药为主的爆破方式在施工时会产生大量飞石、振动噪音等不良影响^[1],对施工人员及附近居民产生重大安全隐患。因此,寻求安全环保的爆破施工方法已成为目前亟待解决的难题。作为工程爆破的一项重要补充,静态破碎技术因施

工无需审批、安全可靠等优点,在特殊施工环节或辅助爆破时发挥着不可替代的作用^[2-5]。

国内外学者对静态破碎剂破碎性能的影响因素进行了不同层次的研究。孙立新^[5]选用生石灰作为主要膨胀物质,设计L9(43)正交试验,优化了静态破碎剂的配方。Shi等^[6]研究了氧化钙的水化活性与煅烧温度之间的关系,结果表明,氧化钙活性随煅烧温度的升高而下降,氧化钙水化反应速率随着

* 收稿日期:2022-08-16

基金项目:国家自然科学基金(11862010);云南省教育厅科学研究基金(2020Y0088)

第一作者:杜光钢(1996-),男,硕士研究生,主要从事工程爆破中静态破碎剂的研究。E-mail:2511544818@qq.com

通信作者:刘磊(1981-),男,博士,副教授,主要从事矿山开采、工程爆破、工业炸药方面的研究。E-mail:546027603@qq.com

环境温度的升高而加快。郑文忠等^[7]总结了目前在工程中应用最多的静态破碎剂,主要是氧化钙、水泥、石膏和减水剂等组成的石灰系静态破碎剂。李胜等^[8]认为水硬性材料水泥的水化产物可加固料浆胚体结构,提高静态破碎剂装孔后的稳定性,对抑制喷孔具有积极作用。李岩等^[9]对不同水剂比和不同拌和水温下的静态破碎剂浆体的温度和体积膨胀规律进行了研究。马冬冬等^[10]研究了环境温度、拌和水温变化对静态破碎剂性能的影响,结果表明:与拌和水温相比,环境温度对静态破碎剂性能的影响更大。Laefer 等^[11-12]研究了拌和水温对破碎剂性能的影响,结果显示:提高拌和水温能增大静态破碎剂产生的膨胀压和加快静态破碎剂的反应速率。张嘉勇等^[13-14]对静态破碎剂的水化温度进行了研究,分析了粉煤灰掺量与水灰比对水化温度的影响,并在保证静态破碎剂破碎能力的情况下,发现可通过向静态破碎剂中添加适量铁尾矿粉来调节水化反应,控制静态破碎剂在使用过程中的反应温度和放热量。罗明坤等^[15]通过膨胀压正交试验确定静态破碎剂的最佳组分配比,提出一种静态破碎剂胀裂破碎煤岩的方法。刘文等^[16]将静态破碎剂的水化升温过程分为初始温度发展、快速上升和缓慢降温 3 个阶段,并认为添加适量的铅锌尾矿砂对抑制静态破碎剂水化喷孔具有积极作用。

这些对静态破碎剂的研究工作在一定程度上推动了静态爆破理论的研究进程,但更多侧重于研究改变试验条件或添加其他辅助组分,以牺牲膨胀压为代价换取水化反应的稳定进行,而针对本身组分含量变化对静态破碎剂水化反应的影响却鲜有研究。本文中,通过研究不同组分含量变化对静态破碎剂水化反应的影响规律,确定静态破碎剂各组分的适量区间,利用正交试验优化组分配比并进行混凝土破碎试验,从而对静态破碎剂性能进行了优化。

1 试验设计

1.1 试验材料及装置

静态破碎剂主要由氧化钙、P·O 42.5 硅酸盐水泥(水泥)、硫酸钙(石膏)、钠基膨润土、粉煤灰、聚羧酸高效减水剂(减水剂)组成。所用装置主要包括:破碎机、KRX-17B 箱式炉、LT5001 电子天平、UT320A 探针式温度计、DH3818Y 静态应变测试仪、电热鼓风干燥箱。

1.2 试验方案及流程

试验用水为自来水。利用 KRX-17B 箱式炉烧

制氧化钙熟料:对方解石试样在 1 400 ℃ 高温煅烧并恒温 10 h,冷却后放入破碎机进行破碎。

基于单因素多水平设计了不同氧化钙含量、不同水泥含量、不同石膏含量、不同钠基膨润土含量对静态破碎剂水化反应的影响,初步确定静态破碎剂各组分含量的较优区间。然后,利用正交试验对静态破碎剂配方进行优化。最后,对混凝土(图 1)进行室内破碎试验,验证配比优化后静态破碎剂的破碎时效。



图 1 用于破碎的混凝土试件
Fig. 1 Concrete specimens for crushing

2 单因素试验结果与分析

分别研究静态破碎剂的主要组分氧化钙、水泥、石膏、钠基膨润土的 含量变化对静态破碎剂水化反应的影响。

2.1 氧化钙含量对水化反应速率的影响

设置氧化钙质量分数分别为 60%、65%、70%、75%、80%。其余组分质量分数分别为:水泥 10%、石膏 3%、钠基膨润土 5%、减水剂 1%;不足 100% 的部分用粉煤灰(填充剂)填充。测试水化反应的温度-时间曲线。进行 3 次重复试验并取平均值,结果如图 2 所示。

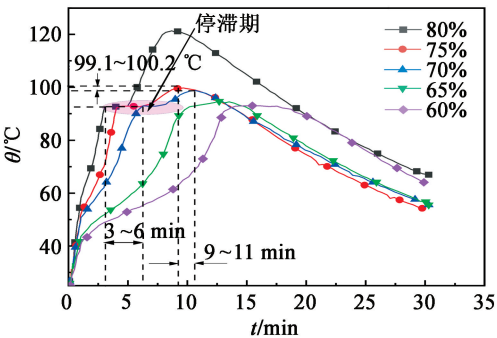


图 2 不同氧化钙含量时反应的温度-时间曲线
Fig. 2 Temperature-time curves in reaction of static cracking agent with different calcium oxide contents

由图 2 可知,当氧化钙质量分数分别为 60%、65%、70%、75%、80% 时,试样到达峰值温度用时分

别为 14、13、11、9、9 min。即随着氧化钙含量的增加,试样反应到达峰值温度所用时间逐渐缩短后不变,试样所能到达的峰值温度逐渐升高。氧化钙质量分数 80% 时,峰值温度较氧化钙质量分数 60% 时提高了 28.8 ℃,说明一定范围内氧化钙含量的提高,可以加快静态破碎剂的水化反应速率,水化反应释放的能量增加。配制的静态破碎剂中氧化钙含量过低时,破碎能力较弱;含量过高时,水化反应相对时间内释放的能量更多,更易发生喷孔现象,此时,胶凝剂等辅助剂含量相对减少,膨胀压反而降低^[17]。因此,认为静态破碎剂中氧化钙适宜的质量分数区间为 70%~80%。

2.2 水泥含量对水化反应速率的影响

分别配制水泥质量分数为 6%、8%、10%、12%、14% 的试样进行试验。其余组分质量分数分别为:氧化钙 75%、石膏 3%、钠基膨润土 5%、减水剂 1%;不足 100% 的部分用粉煤灰(填充剂)填充。测试反应的温度-时间曲线。进行 3 次重复试验并取平均值,结果如图 3 所示。

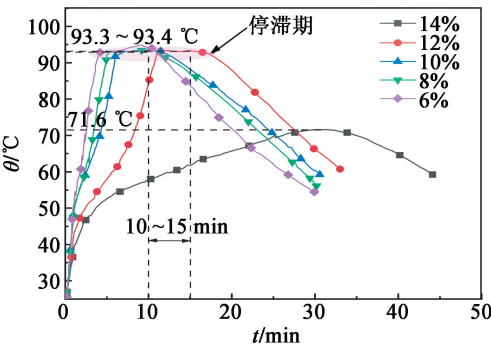


图 3 不同水泥含量时反应的温度-时间曲线
Fig. 3 Temperature-time curves in reaction of static cracking agent with different cement contents

由图 3 可知:水泥质量分数为 6%~10% 的试样的曲线具有很强的相似性,最终试样达到峰值温度用时基本在 10 min 左右;水泥质量分数增加到 12% 后,水化反应速率相对减缓;在质量分数达 14% 后,峰值温度较水泥质量分数为 12% 的试样急降 22 ℃ 左右。静态破碎剂的水化速率对温度很敏感,温度升高会大大提高水化反应速率,一定时间内所达到的膨胀压也会增大。当水泥质量分数在 6%~10% 时,短时间水化升温理想,有助于静态破碎剂膨胀压的释放;当水泥质量分数高于 10%,水泥对静态破碎剂试样的水化反应速率减缓作用过大。故认为静态破碎剂中水泥适宜的添加质量分数为 6%~10%。

2.3 石膏含量对水化反应速率的影响

石膏含量对静态破碎剂反应速率有明显的影

响。为了控制静态破碎剂水化反应速率,分别配制了石膏质量分数为 1%、2%、3%、4%、5% 的试样进行试验。其余组分质量分数分别为:氧化钙 75%、水泥 10%、钠基膨润土 5%、减水剂 1%;不足 100% 的部分用粉煤灰(填充剂)填充。测试反应的温度-时间曲线。进行 3 次重复试验并取平均值,结果如图 4 所示。

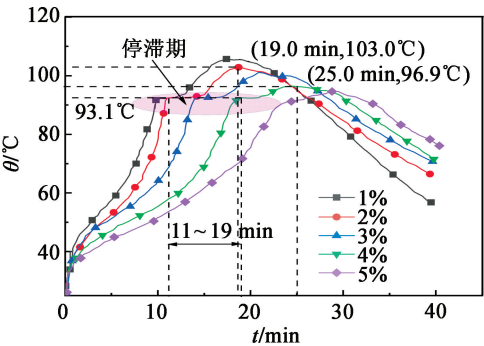


图 4 不同石膏含量时反应的温度-时间曲线
Fig. 4 Temperature-time curves in reaction of static cracking agent with different gypsum contents

由图 4 可知,试样的温度-时间曲线都存在停滞期。这是由于散发的热量用于蒸发水蒸气,导致温度暂时不再上升。当石膏质量分数从 1% 增加至 5%,试样水化反应到达峰值温度的时间逐渐延长,水化反应的峰值温度分别下降了 4.0、1.0、5.1、1.9 ℃。石膏含量的增加延缓了静态破碎剂的水化反应速率,降低了水化反应的峰值温度。根据吸附假说^[17],主要是由于吸附在氧化钙表面的官能团吸附比增大,从而延缓初期水化反应速率;但吸附官能团吸附比的过分增大,不利于静态破碎剂继续进行水化反应,膨胀压释放不集中,造成膨胀压损失严重。因此,认为静态破碎剂中石膏适宜的添加质量分数为 2%~4%。

2.4 钠基膨润土含量对水化反应速率的影响

钠基膨润土对静态破碎剂的膨胀性能有很明显的影响。配制了钠基膨润土质量分数为 1%、3%、5%、7%、9% 的试样进行试验。其余组分质量分数分别为:氧化钙 75%、水泥 10%、石膏 3%、减水剂 1%;不足 100% 的部分用粉煤灰(填充剂)填充。测试反应的温度-时间曲线。进行 3 次重复试验并取平均值,结果如图 5 所示。

钠基膨润土含量变化对静态破碎剂水化反应峰值温度的影响不大(3 ℃ 左右)。观察图 5 发现,当钠基膨润土质量分数分别为 1%、3%、5%、7%、9% 时,试样到达 92.9 ℃ (停滞期) 的时间分别为 4、8、10、10、12 min,静态破碎剂水化反应速率减缓。当

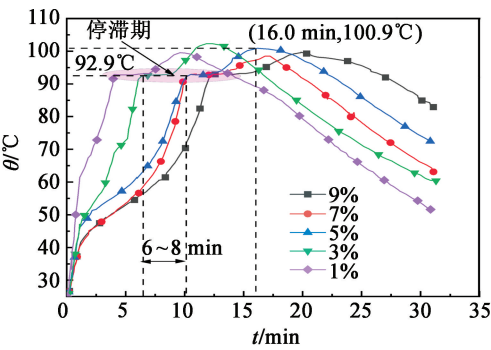


图5 不同钠基膨润土含量时反应的温度-时间曲线

Fig.5 Temperature-time curves in reaction of static cracking agent with different sodium bentonite contents

钠基膨润土质量分数为1%,水化升温较快,水化反应不易控制;当质量分数为9%时,辅助组分含量过高,水化升温减缓。钠基膨润土作为静态破碎剂的增力剂,具有较好的可塑性和黏结性。适当地添加钠基膨润土能很好地增强静态破碎剂的膨胀性能。结合试验结果认为,静态破碎剂中钠基膨润土适宜的质量分数为3%~7%。

3 正交试验设计及结果

3.1 正交试验设计

根据查阅的文献[9-11,18]以及单因素试验结果,先设定静态破碎剂各组分含量的大概区间。设计膨胀压正交试验^[19],研究氧化钙、水泥、石膏、钠基膨润土4种组分的不同含量水平对静态破碎剂水化反应的影响,确定静态破碎剂的最优配比。采用电阻应变测量法测量静态破碎剂水化过程中产生的膨胀压。

表1中,数据后面括号内的为因素编号。按表1中的比例配制500 g静态破碎剂;用烧杯称取140

g的水,将静态破碎剂的样品和水依次倒入烧杯中搅拌均匀;然后,将静态破碎剂浆体倒入测试钢管;同时,电脑上测试界面清零并点击采集按钮,即开始测量静态破碎剂水化反应应变,计算静态破碎剂的膨胀压。

膨胀压测定能够全面地反映静态破碎剂在水化过程中膨胀压的增长历程,定量分析静态破碎剂的性能。而混凝土破碎试验可以更直观地表现出静态破碎剂的破碎能力,从而定性地分析静态破碎剂的破碎效果。制作若干C30、C40、C50等级的300 mm×300 mm×300 mm混凝土立方体(图1)。制作时,用PVC管分别预留1个或2个直径40 mm、深210 mm的孔;塑形后,拔出PVC管,标准条件养护28 d。混凝土的抗压强度高、抗拉强度低,一般混凝土的抗拉强度只有抗压强度的1/17~1/8^[20],在1.5~4.0 MPa之间。按照最优组分配比、水灰比0.28、拌和水温25℃调制静态破碎剂浆体;搅拌均匀后,注入混凝土试块孔内,并开始计时;检验静态破碎剂的破碎效果,研究混凝土破碎过程中的裂缝发展规律。

3.2 正交试验结果

静态破碎剂发生水化反应最后的膨胀压测试结果如表2所示。测试过程中,最小膨胀压都能达到90.77 MPa,远大于混凝土1.5~4.0 MPa的抗拉强度,因此,可维持混凝土试块的后续破碎。

膨胀压的大小直接反映出静态破碎剂性能的优劣。综合表1、表2认为,静态破碎剂最优组分质量分数为:氧化钙73%、水泥10%、石膏5%、钠基膨润土6%、减水剂1%、粉煤灰(填充剂)5%。

综合分析拌和物的温度-时间曲线与静态破碎剂膨胀压测试结果,水化反应峰值温度较峰值膨胀压更为提前,且水化反应温度的增幅、降幅均比膨胀压的增幅、降幅明显,说明在一定时间范围内静态破

表1 正交试验中各组分质量分数							%
Tab.1 Mass fraction of each component in orthogonal test							
编号	w(氧化钙)	w(水泥)	w(石膏)	w(钠基膨润土)	w(粉煤灰)	w(减水剂)	合计
1 [#]	71(1)	9(1)	3(1)	4(1)	12	1	100
2 [#]	71(1)	10(2)	5(3)	5(2)	8	1	100
3 [#]	71(1)	11(3)	4(2)	6(3)	7	1	100
4 [#]	73(2)	9(1)	5(3)	6(3)	6	1	100
5 [#]	73(2)	10(2)	4(2)	4(1)	8	1	100
6 [#]	73(2)	11(3)	3(1)	5(2)	7	1	100
7 [#]	75(3)	9(1)	4(2)	5(2)	6	1	100
8 [#]	75(3)	10(2)	3(1)	6(3)	5	1	100
9 [#]	75(3)	11(3)	5(3)	4(1)	4	1	100

表 2 正交试验结果
Tab.2 Results of orthogonal test

编号	因素				膨胀压/ MPa
1 [#]	1	1	1	1	92.57
2 [#]	1	2	3	2	90.77
3 [#]	1	3	2	3	95.68
4 [#]	2	1	3	3	108.31
5 [#]	2	2	2	1	107.20
6 [#]	2	3	1	2	102.73
7 [#]	3	1	2	2	98.81
8 [#]	3	2	1	3	105.61
9 [#]	3	3	3	1	103.98
K ₁	279.02	299.69	300.91	303.75	
K ₂	318.24	303.58	301.69	292.31	
K ₃	308.40	302.39	303.06	309.60	
$\overline{K_1}$	93.01	99.90	100.30	101.25	
$\overline{K_2}$	106.08	101.19	100.56	97.44	
$\overline{K_3}$	102.80	100.80	101.02	103.20	
R	13.07	1.29	0.72	5.76	

碎剂的水化反应快慢与膨胀压的增减存在一定的时间间隔,水化反应峰值温度与峰值膨胀压的产生并不同时发生。

3.3 现场试验验证

为了验证静态破碎剂最优配比对混凝土的破碎效果,分别选用相同孔径与孔数、不同强度的混凝土以及相同强度与孔径、不同孔数的混凝土进行试验

验证^[21-22],破碎效果如图 6 所示。

在对不同强度的混凝土破碎过程中,C30、C40、C50 混凝土试块在装药完成后经历 15.20、17.43、20.53 h 后首次出现裂缝;在经过 48 h 破碎时间后,试块裂缝多呈 T 型和 Y 型,C30 试块裂缝宽度为 45.85 mm,C40 试块裂缝宽度为 42.72 mm,C50 试块为 34.12 mm。伴随混凝土强度的增加,混凝土的抗拉强度也在增大,静态破碎剂在破碎混凝土试块首次出现裂缝与完全破碎所用的时间也越久。双孔 35 mm 的混凝土试块在装药完成后经历 12.96 h 后首次出现裂缝;裂缝大概沿最小抵抗线方向向混凝土试块自由面发育,基本呈一字型,且在主裂缝周围又产生了多条裂缝。单孔 35 mm 的混凝土试块首次出现裂缝时间在装药后 17.46 h。双孔 35 mm 试块首次出现裂缝的时间较单孔 35 mm 试块提前了 4.50 h;双孔 35 mm 混凝土试件的两个孔连线构成了试件的弱面,裂缝以此为主要发育方向。实际工程中可通过设计钻孔的分布来控制裂缝的走向。

分析自制静态破碎剂与某商用静态破碎剂对 C40 孔径 35 mm 的混凝土试块的破碎过程(图 7)发现:

- 1)0~12 h,混凝土表面没有裂缝发育迹象。
- 2)钻孔内装有自制静态破碎剂的混凝土试块在装药完成后 17.43 h 首次出现裂缝;钻孔内装有商用静态破碎剂的混凝土试块在装药完成后 20.78 h 首次出现裂缝。
- 3)在装药 48 h 之后,钻孔内装有自制静态破碎

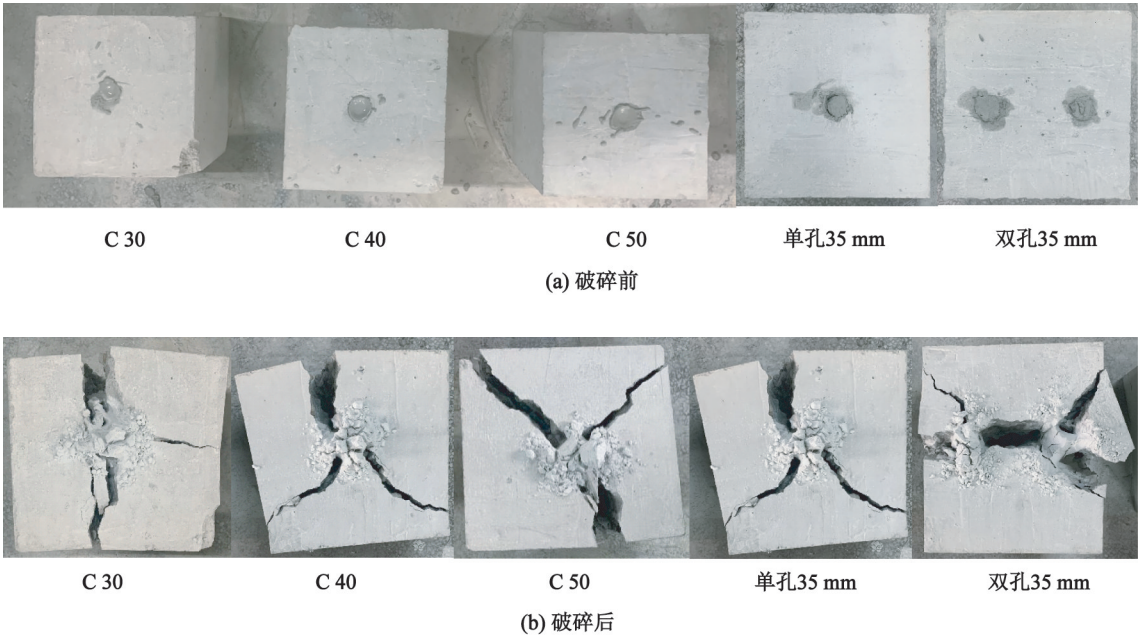


图 6 不同混凝土破碎前、后的效果
Fig.6 Outcomes of different concrete specimens before and after crushing

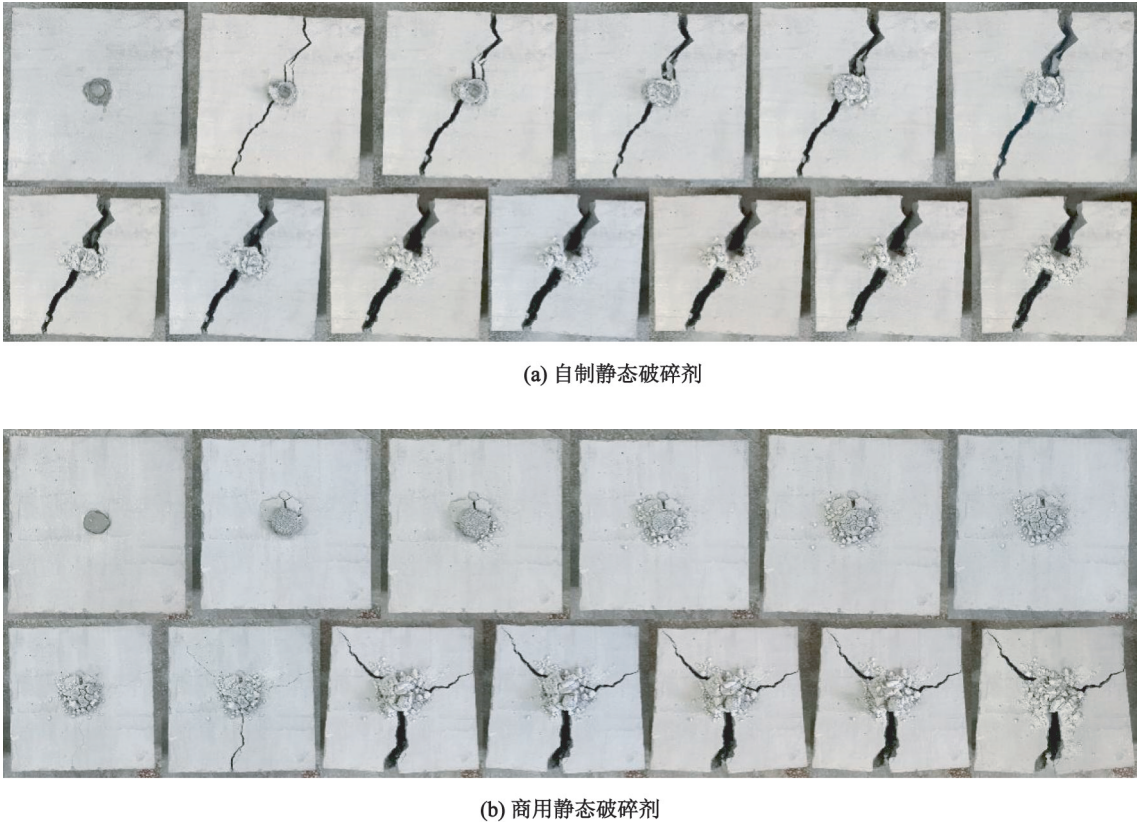


图 7 不同静态破碎剂装药破碎混凝土试块的开裂过程
Fig. 7 Cracking process of concrete specimens crushed by different static crushing agents

剂的混凝土试块所产生的裂缝呈一字型;钻孔内装有商用静态破碎剂的混凝土试块所产生的裂缝呈 Y 字型。

4) 钻孔内装有自制静态破碎剂的混凝土试块在 48 h 之后的最大裂缝宽度为 42.72 mm,从装药完成至开裂 48 h,平均每小时裂缝宽度增加约 0.89 mm;钻孔内装有商用静态破碎剂的混凝土试块在 48 h 之后的最大裂缝宽度为 33.96 mm,从装药完成至开裂 48 h,平均每小时裂缝宽度增加约 0.71 mm。

对比分析认为,自制静态破碎剂不仅能有效破碎目标破碎体,而且较市场上一些商用的静态破碎剂效果更为理想。根据最优配比制得的静态破碎剂能够很好地满足一些特殊工程领域的破碎要求,可在一些实际工程中对目标破碎体直接破碎或者起到辅助破碎的效果。

4 结论

1) 氧化钙、水泥、石膏、钠基膨润土的含量变化对静态破碎剂的水化反应都存在影响。其中,占比最大的氧化钙影响最大。在一定区间范围内,氧化

钙的含量与静态破碎剂水化反应的速率呈正相关;而其他组分的含量与静态破碎剂水化反应速率呈负相关。

2) 通过设计单因素、多水平试验,分析不同组分含量的静态破碎剂水化反应的温度-时间曲线,确定静态破碎剂各组分质量分数较优区间为:氧化钙 70%~80%、水泥 8%~12%、石膏 2%~4%、钠基膨润土 3%~7%。

3) 通过设计正交试验,确定静态破碎剂最优质量分数为:氧化钙 73%、水泥 10%、石膏 5%、钠基膨润土 6%、减水剂 1%、粉煤灰(填充剂) 5%。利用优化配方配制了静态破碎剂,进行室内混凝土的破碎试验,破碎效果较商用静态破碎剂效果更好。

参 考 文 献

[1] 汪旭光,于亚伦. 21 世纪的拆除爆破技术[J]. 工程爆破, 2000, 6(1): 32-35.
WANG X G, YU Y L. Demolition blasting technology faced with the 21 century [J]. Engineering Blasting, 2000, 6(1): 32-35.
[2] 马芹永,袁璞,卢小雨. 静态破碎技术在桥梁临时支

- 撑拆除中的应用[J]. 施工技术, 2013, 42(增刊): 337-340.
- MA Q Y, YUAN P, LU X Y. Application of soundless cracking technology in demolishing bridge temporary support [J]. Construction Technology, 2013, 42(Suppl.): 337-340.
- [3] 李元杰, 刘鹏, 樊文明. 静态破碎技术在拆除工程中的应用[J]. 山西建筑, 2010, 36(31): 155-156.
- LI Y J, LIU P, FAN W M. Application of static breakage technology in demolition engineering [J]. Shanxi Architecture, 2010, 36(31): 155-156.
- [4] 谭毅. 静态破碎剂在回采工作面端头悬顶处理中的应用与研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- TAN Y. Application and research of the soundless cracking agent in mining working face end hanging roof [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
- [5] 孙立新. 静态破碎剂的研制及应用[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005.
- SUN L X. Study on the static cracking agent and its application [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005.
- [6] SHI H S, ZHAO Y J, LI W W. Effects of temperature on the hydration characteristics of free lime [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(5): 789-793.
- [7] 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): 190-200.
- ZHENG W Z, LI R S, XU L B, et al. Review and analysis on research and application of static crushing technology [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(5): 190-200.
- [8] 李胜, 李宗杰, 罗明坤. 煤岩静态破碎剂合理组分及配比实验研究[J]. 爆破, 2018, 35(1): 137-141, 153.
- LI S, LI Z J, LUO M K. Experimental study on reasonable composition and proportion of coal and rock static cracking agent [J]. Blasting, 2018, 35(1): 137-141, 153.
- [9] 李岩, 马芹永. 静态破碎剂反应温度变化规律的试验与分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(6): 1289-1292, 1309.
- LI Y, MA Q Y. Test and analysis on reaction temperature variation of static cracking agent [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(6): 1289-1292, 1309.
- [10] 马冬冬, 马芹永, 袁璞. 气温和水温对静态破碎剂膨胀性能影响的试验分析[J]. 爆破, 2014, 31(4): 124-128.
- MA D D, MA Q Y, YUAN P. Test and analysis on air temperature and water temperature for expansion performance of static cracking agent [J]. Blasting, 2014, 31(4): 124-128.
- [11] LAEFER D F, AMBROZEVITCH-COOPER N, HUYNH M P, et al. Expansive fracture agent behaviour for concrete cracking [J]. Magazine of Concrete Research, 2010, 62(6): 443-452.
- [12] HUYNH M, LAEFER D F. Expansive cements and soundless chemical demolition agents: state of technology review [C]//11th Conference on Science and Technology. Ho Chi Minh City, VN, 2009.
- [13] 张嘉勇, 关联合, 张新双, 等. 水灰比和粉煤灰对静态破碎剂反应温度影响研究[J]. 矿产综合利用, 2020(1): 173-176, 106.
- ZHANG J Y, GUAN L H, ZHANG X S, et al. Effect of water-cement ratio and fly ash on reaction temperature of static expansive agent [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(1): 173-176, 106.
- [14] 张嘉勇, 崔啸, 许慎, 等. 铁尾矿粉对静态破碎剂反应温度影响研究[J]. 矿产综合利用, 2018(2): 121-124.
- ZHANG J Y, CUI X, XU S, et al. Study on effect of iron tailings powders on reaction temperature of static cracking agent [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018(2): 121-124.
- [15] 罗明坤, 李胜, 李宗杰, 等. 煤岩致裂中的静态破碎剂组分及其性能[J]. 工程爆破, 2017, 23(3): 5-9.
- LUO M K, LI S, LI Z J, et al. Composition and performance of static cracking agent in coal and rock fracturing [J]. Engineering Blasting, 2017, 23(3): 5-9.
- [16] 刘文, 吴爱军, 王辉, 等. 铅锌尾矿砂掺量对静态破碎剂性能影响的实验研究[J]. 爆破, 2020, 37(2): 121-126, 140.
- LIU W, WU A J, WANG H, et al. Experimental study on effect of lead-zinc mine tailing on properties of static crushing agent [J]. Blasting, 2020, 37(2): 121-126, 140.
- [17] 汪智勇. 静态破碎剂的组成对其性能的影响研究[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2008.
- WANG Z Y. Study on the influence of composition of static demolition agent on its properties [D]. Beijing: China Building Materials Academy, 2008.
- [18] 黄文铮, 郑力鹏. HSCA 高效无声破碎剂在古建筑修复工程中的应用[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(5): 3588-3591.
- HUANG W Z, ZHENG L P. The application of HSCA soundless cracking agent in ancient whitecture rehabilitation [J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(5): 3588-3591.

[4] 张文平. 一种高精度延期件的研究[J]. 爆破器材, 2018, 47(3): 51-54, 64.
ZHANG W P. Research on a delay element with high precision[J]. Explosive Materials, 2018, 47(3): 51-54, 64.

[5] 李便花, 郝雁军, 潘会平, 等. 某型电点火具静电敏感度发火研究[J]. 新技术新工艺, 2021(5): 42-45.
LI B H, HAO Y J, PAN H P, et al. Research on electrostatic sensitivity ignition of an electric igniter [J]. New Technology & New Process, 2021(5): 42-45.

[6] 王凯民, 温玉全. 军用火工品设计技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
WANG K M, WEN Y Q. Design of initiators and pyrotechnics for weapon systems [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.

[7] 段进军. 点火具燃烧特性的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.

[8] 王凯民, 张学舜. 火工品工程设计与试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
WANG K M, ZHANG X S. Engineering design and test technology of initiators & pyrotechnics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.

[9] 陈思文, 刘平, 李贤连, 等. 某延期点火管无火焰输出原因分析与改进[J]. 火工品, 2019(5): 23-24.
CHEN S W, LIU P, LI X L, et al. Analysis and improvement of some delay igniter without flame output [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2019(5): 23-24.

[10] 王海军. 25 ms 等间隔毫秒延期电雷管研究和应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.

[11] 史明东, 屈军利, 袁梦笛, 等. 导引头抗高过载技术及其研究进展[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(7): 85-89.
SHI M D, QU J L, YUAN M D, et al. Anti-high overload technology and research progress of missile-borne seeker [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(7): 85-89.

[12] 陈瑞民. 电火工品防静电研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.

[13] 邵炜华, 杨一帆, 刘继鹏. 某高过载干扰弹头结构强度仿真分析方法研究[J]. 火控雷达技术, 2019, 48(4): 82-86.
TAI W H, YANG Y F, LIU J P. Research on structure strength simulation analysis methods of a jamming warhead under high acceleration conditions [J]. Fire Control Radar Technology, 2019, 48(4): 82-86.

(上接第 38 页)

[19] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9): 52-55.
LIU R J, ZHANG Y W, WEN C W, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment [J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9): 52-55.

[20] 唐烈先, 唐春安, 唐世斌, 等. 静态破碎的物理与数值试验[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4): 437-441.
TANG L X, TANG C A, TANG S B, et al. Physical experiment and numerical simulation on effect of soundless cracking agent[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4): 437-441.

[21] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
China Academy of Building Research. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.

[22] 马芹永. 混凝土结构基本原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.