

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.02.021

铅锌尾矿砂掺量对静态破碎剂 性能影响的实验研究*

刘文^{1,2}, 吴爱军^{1,2}, 王辉^{1,2}, 张龙^{1,2}

(1. 西南科技大学 环境与资源学院, 绵阳 621010; 2. 非煤矿山安全技术四川省高等学校重点实验室, 绵阳 621010)

摘要: 针对传统静态破碎剂存在“高温喷孔、材料膨胀性能利用率低及成本高”等问题, 提出以铅锌尾矿砂作为掺料进行静态破碎剂水化峰值温度、膨胀性能的影响研究。实验结果表明: 水化峰值温度分为初始温度发展(初始~45℃±5℃)、快速上升(45℃±5℃~峰值)和缓慢降温(峰值~结束)三个阶段; 掺料破碎剂膨胀性能与掺入量成反比, 掺量为20%和30%, 峰值温度分别下降14.82%、28.15%, 膨胀率下降13.08%、16.82%; 掺量30%是其重要临界点, 超过会引起膨胀性能的断崖式下跌。通过不同掺入比例的混凝土静爆实验发现: 掺料量对试件初始开裂时间影响明显, 对最终开裂效果影响不大。综合各实验参数, 确定20%~30%的掺量最优参数, 既保证了开裂效果, 又达到了抑制喷孔以及降低成本的目的。

关键词: 静态破碎剂; 铅锌尾矿砂; 峰值温度; 膨胀性能

中图分类号: TD872 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)02-0121-06

Experimental Study on Effect of Lead-Zinc Mine Tailing on Properties of Static Crushing Agent

LIU Wen^{1,2}, WU Ai-jun^{1,2}, WANG Hui^{1,2}, ZHANG Long^{1,2}

(1. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Resource, Ministry of Education, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: In order to solve the problems of traditional static crushing agent (SCA) such as blowout at high temperature, low expansion utilization and high cost, the influence of lead-zinc tailings as admixture on hydration peak temperature and expansion performance of static crusher was studied. The experimental results show that the peak temperature of hydration can be divided into three stages: initial temperature development (Initial Temperature ~45℃±5℃), rapid rise (45℃±5℃~Peak Temperature) and slow cooling (Peak Temperature~End). The expansion properties of SCA are inversely proportional to the amount of SCA dosage. When the dosage amount is 20% and 30%, the peak temperature decreases by 14.82% and 28.15%, and the expansion rate decreases by 13.08% and 16.82%, respectively. 30% is the critical point, which will lead to a cliff drop of expansion performance. Through the static explosion test of concrete with different proportion of admixture, it is found that the amount of admixture affects the initial cracking time significantly, but little effect on the final cracking effect. According to the experiment results, the optimum parameters of 20%~30% dosage are determined, which not only guarantees the cracking effect, but also achieves the purpose of restraining blowing out and reducing the cost.

Key words: static crushing agent; lead-zinc mine tailings; peak temperature; expansion performance

静态破碎剂主要矿物成分为 f-CaO (游离氧化钙), 是一种由无机化合物和有机化合物组成的膨胀性粉末, 与水混合后反应, 产生固体膨胀, 并产生大量热量^[1]。传统静态破碎剂在环境温度较高或钻孔孔径较大时, 浆体中的游离水受热迅速汽化膨胀, 在孔内积聚高压水蒸气, 当孔内正在水化 CaO、已经固结的 Ca(OH)₂ 晶体和周围孔壁无法对其约束时, 在短时间内, 孔内高压气体和周围药剂快速喷出, 导致爆破失败, 甚至人员伤害, 引发安全事故^[2-4]。

国内外学者为解决以上问题做了大量研究。影响静态破碎剂膨胀性能与导致喷孔的外部因素大致分为环境温度、水剂比、炮孔孔径三方面^[2,5-12]; 抑制喷孔的方案分为封孔器等外部手段, 与掺入各种加速剂、缓凝剂、辅助相以及改变 CaO 烧结过程等内部手段^[13-17]; 膨胀压在短时间内达到瓶颈之后, 在后续时间内也会缓慢增长^[18]。针对静态破碎剂喷孔机理和防喷方法的探索, 这些年都逐步在完善, 但并没有完全解决, 需要更进一步的研究。通过“添料减药”法, 探究了掺入铅锌尾矿砂对静态破碎剂水化峰值温度, 膨胀性能的影响, 并结合混凝土静爆

实验, 确定最优掺入量, 为现场施工提供依据。

1 温度和水化热的测量

1.1 惰性添加材料筛选

“掺料减药”法。在没有改变单位静态破碎剂的膨胀压力的情况下, 通过在静态破碎剂中添加便宜, 易得的材料来降低单位重量下静态破碎剂的比重, 从而减少静态破碎剂的用量, 降低成本。

本试验对天然砂、铅锌尾矿砂、磷矿砂三种材料进行预实验。实验结果表明在掺砂的静态破碎剂, 由于砂的饱和度太低, 同样的水灰比情况下, 会出现大量的水无法被吸收, 导致反应前期静态破碎剂的温度和压力上升极慢; 磷矿砂加水后流动性太差, 导致装药困难, 并且磷矿砂的主要成分是 P₂O₅ (五氧化二磷), 与冷水反应会生成偏磷酸, 对人体有害。铅锌尾矿砂掺水后流动性好, 其饱和度和静态破碎剂相似, 对注浆和前中期静态破碎剂温度和压力的上升有积极的影响。综合考虑, 决定采用铅锌尾矿砂作为掺入材料。如表 1 所示铅锌尾矿砂的主要成分为 Si、Fe、Mg 和 O, 占比达到 95%, 而作为破碎剂主要成分 Ca 的含量较低。

表 1 铅锌尾矿砂元素成分

Table 1 Elemental composition of lead-zinc tailings sand

| 元素 | Si | Fe | Mg | S | Mn | Ca | Al | Zn | Pb |
|------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 含量/% | 32.448 | 14.714 | 11.646 | 1.412 | 1.542 | 0.957 | 0.386 | 0.313 | 0.195 |
| 元素 | K | Ti | Na | Cl | Cu | Sr | P | O | 其它 |
| 含量/% | 0.124 | 0.042 | 0.037 | 0.040 | 0.032 | 0.017 | 0.009 | 35.891 | 0.159 |

实验采用的静态破碎剂由四川达州川优建材有限公司生产的 SCA-II 型巨力膨胀剂, 实验采用的铅锌尾矿砂的主要成分是氧化硅, 与天然砂近似, 元素如表 1 所示。将铅锌尾矿砂与静态破碎剂按照 4 种不同比例 (20%, 30%, 40%, 50%) 进行混合, 再分别将混合材料与水以 0.27 的水灰比进行制浆。

1.2 静态破碎剂混合物水化热影响实验研究

为减少环境温度对混合物峰值温度的影响, 将混合物浆体倒入不锈钢容器中, 加盖密封, 容器周围用防火棉进行隔热保温。在整个实验测试期间, 静态破碎剂混合物水化反应过程中产生的水化热通过插入不锈钢容器的热电偶进行测量, 温度的记录间

隔为 5 s。见图 1。

掺入铅锌尾矿砂的比例越低, 混合物达到的峰值温度就越高。从图 2 中可以看出, 静态破碎剂的整个反应过程可分为三个阶段: (1) 温度发展阶段 (初始温度 ~ 45°C ± 5°C)。在这一阶段, 由于浆体含有大量的水分, 静态破碎剂的水化反应在较低的温度下缓慢发展, 缓慢提升静态破碎剂浆体的温度直至浆体初步凝固。(2) 快速上升阶段 (45°C ± 5°C ~ 峰值温度)。当浆体初凝后, 由于固体内部散热比浆体散热能力差, 并且内部温度已经积蓄到一定程度, 导致静态破碎剂的水化反应的加速, 快速的水化反应又加快了静态破碎剂内部的温度增长, 二者相辅相成, 表现出静态破碎剂温度的急速上升。(3) 缓慢降温阶段 (峰值温度 ~ 结束)。静态破碎剂达到峰值温度后, 内部大部分氧化钙已经变为氢氧化钙, 水化放热反应几乎停滞, 导致温度不再上升, 开始缓慢的下降, 由于铅锌尾矿砂掺量的不同掺量,

收稿日期: 2020-01-07

作者简介: 刘文 (1993-), 男, 硕士研究生, 从事静态爆破应用研究, (E-mail) 864012671@qq.com。

通讯作者: 吴爱军 (1976-), 男, 副教授、硕导、博士, 从事安全科学与技术方面理论研究, (E-mail) 675851469@qq.com。

基金项目: 四川省教育厅重点项目 (项目编号: 16ZA0140)

导致五种掺量的静态破碎剂降温速度不一致。

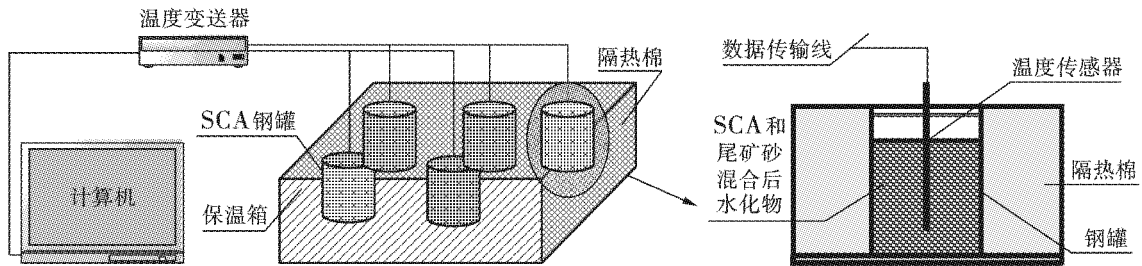


图1 水化峰值温度测试示意图
Fig. 1 Diagram of peak hydration temperature test

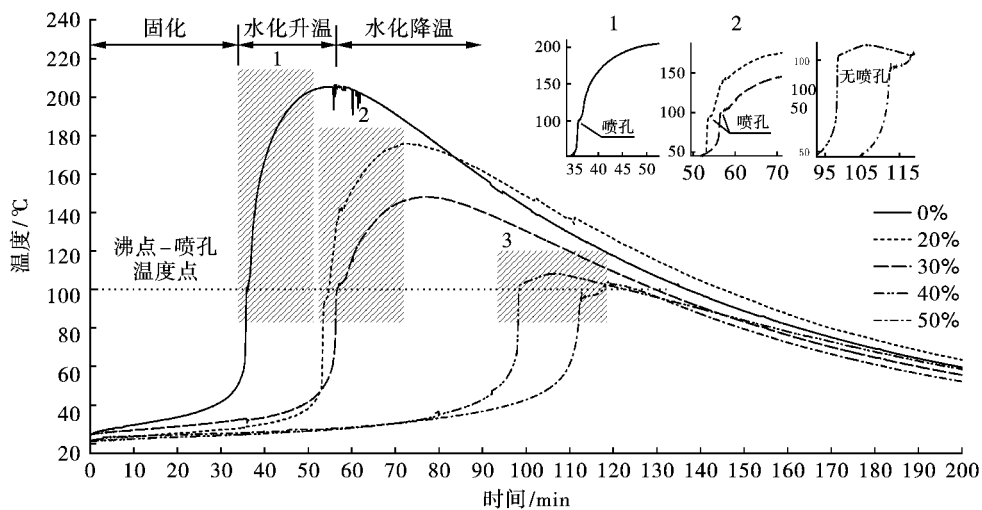


图2 不同掺量对静态破碎剂温度影响的变化曲线

Fig. 2 Effects of different incorporation amount on the temperature of static crushing agent

掺量从0%到50%,静态破碎剂在这三个阶段都保持了一致性,只是峰值温度和峰值温度到达的时间有明显的差别。

纯静态破碎剂在峰值时温度发生了剧烈的波动,推测是因为静态破碎剂内部发生的体积膨胀,导致粉体不断的运动,推动了内部热电偶位置的偏移,测得了不同位置的温度导致的。

纯静态破碎剂反应温度,前期迅速升高至100℃左右,出现喷孔,随着大部分高温水蒸气被喷出,静态破碎剂温度出现短暂的降低。静态破碎剂中的水蒸气释放以后,反应温度持续上升,达到206.4℃的峰值,随后迅速开始降低。在掺量为20%和30%时,静态破碎剂出现了同样的情况,原因在于温度在隔热棉包裹的环境下测试,当静态破碎剂进入第二阶段时,温度在内部极速集聚,隔热棉又导致无法快速的散热,游离水被汽化,以至于压力突然上升,导致喷孔,在开裂试验中,由于混凝土吸收了一部分热量,所以没有发生喷孔。当掺量比例提高到40%以上,水化热峰值下降到100℃~

110℃,由于第二阶段的温度间隔变小,游离水没有被快速汽化,静态破碎剂不再出现喷孔。见图3。

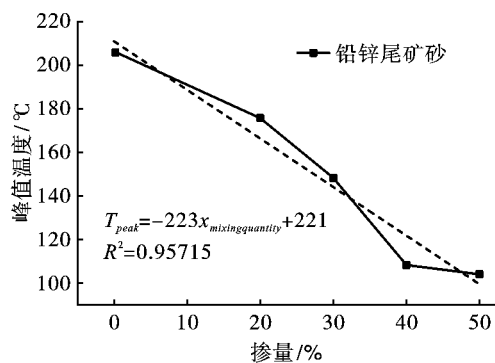


图3 掺量与水化峰值温度的线性关系

Fig. 3 Linear relationship between incorporation amount and peak temperature

从图2和图3可以看出掺入比例对水化热峰值温度和达到峰值温度的时间影响明显,当掺入比例在20%、30%时,比例每增加10%,水化热峰值温度就下降20℃左右。当掺量为40%,水化热峰值温度

相较于30%的混合物,出现了明显的下降,下降超过40℃。掺量达到50%之后,水化峰值温度相对于40%,几乎不再出现较大的变化。

铅锌尾矿砂掺入比例控制在20%或者30%,混合物所能达到的水化峰值温度出现了接近20℃的下降,但是达到峰值的时间只推迟了3~4 min。当掺入比例达到40%之后,水化峰值温度达到的时间出现了较为明显的变化,相较于30%的掺量,时间推后接近30 min。

掺入铅锌尾矿砂的比例越高,静态破碎剂的峰值温度就越低。由于铅锌尾矿砂的饱和度不如静态破碎剂,掺量从30%添加到40%时,由于掺入材料比例的增加,混合物水灰比超过合理的零界点,同样的水灰比使得静态破碎剂混合物饱和之后,存在多余的水分。前期静态破碎剂混合物水化反应释放的热量大部分用来加热多余的水分,使得其达到50℃的时间大大延长,导致水化反应峰值温度到达的时间较掺量为30%时,有了明显的推迟。混合物达到100℃,水蒸气携带着部分热量被释放,混合物的峰值温度被控制在100℃~110℃,然后开始降温。

1.3 静态破碎剂混合物水化膨胀体积的影响规律研究

在相同水灰比(0.27),自由膨胀的条件下,不同掺量的静态破碎剂膨胀体积变化如表2所示。

表2 掺量对膨胀体积的影响
Table 2 The influence of incorporation amount on expansion volume

| 比例/% | 初始高度/cm | 膨胀高度/cm | 膨胀率 | 下降比例/% |
|------|---------|---------|------|--------|
| 0 | 2.7 | 10.7 | 3.96 | 0 |
| 20 | 2.7 | 9.3 | 3.44 | 13.08 |
| 30 | 2.7 | 8.9 | 3.30 | 16.82 |
| 40 | 2.7 | 7.8 | 2.89 | 27.10 |
| 50 | 2.7 | 6.7 | 2.48 | 37.38 |

在室温环境下,静态破碎剂浆体凝固试件随着掺量比例的增加,需要时间越来越长。并且浆体的膨胀体积越来越小,掺入比例从20%增加到30%时,膨胀体积仅下降3.74%,突破30%的界限,掺量越高膨胀体积就下降的越多。说明,掺量对膨胀体积的影响明显,但是30%是一个较好的掺入比例。

2 静态破碎剂混合物膨胀性能研究

2.1 实验设计

混合物的膨胀压力,通过钢管测压法进行测量,将电阻应变片贴于相应位置,为防止水化热对应变

片产生影响,将已装药的钢管用自封袋装好,置于水槽中。圆周方向应变的记录间隔为30 s。见图4。

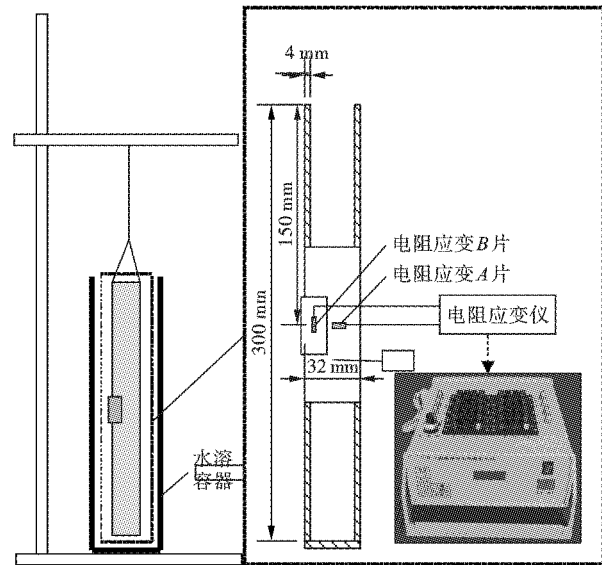


图4 膨胀压力测试示意图

Fig. 4 Diagram of expansion pressure test

根据国家规范《JC-506-2008》第A.7.4条规定,采用其所给出的方法进行静态破碎剂膨胀压力的计算,计算公式如下

$$P = E_s \varepsilon_\theta \frac{K^2 - 1}{2 - \nu} \quad (1)$$

式中: P 为膨胀压力; E_s 为钢管的弹性系数; K 为钢管的系数; (r_θ/r_i) , r_θ 为钢管外径, r_i 为钢管内径; ε_θ 为钢管的圆周方向应变变量; ν 为泊松比,0.3。

2.2 膨胀压变化规律

膨胀压力是评判静态破碎剂性能的又一重要标准。膨胀压力测试在水浴温度20℃条件下进行,环境温度对静态破碎剂膨胀压影响极大,水浴温度低于钢管内部的温度,静态破碎剂水化热与水浴热交换频繁。由于掺量越大,水化反应放热越少,热交换导致钢管内部的温度散热快,静态破碎剂温度上升慢,两者相互影响,导致了前期静态破碎剂膨胀压力上升极慢。测试时间持续66个小时,膨胀压力峰值分别为85.74 MPa、67 MPa、49.59 MPa、36.81 MPa、17.84 MPa。

从图5、图6可以推断掺量从20%增加至30%,膨胀压力下降比例应该10%左右,超过30%之后,膨胀压应该出现大幅度的降低。事实并非如此,从图6可以看出,四种掺量的静态破碎剂在曲线上大致呈现出等差数列的形态,下降比例分别为21.86%、42.16%、57.07%、79.19%。20%到30%,膨胀压力下降了20.3%,远超过了膨胀率下

降比率,原因在于水域条件下,静态破碎剂水化反应产生的热量被水域吸收,使得钢管内的静态破碎剂一直保持在20℃左右,压制了水化热对静态破碎剂水化反应的促进作用,延缓了静态破碎剂的膨胀速度,从而降低了静态破碎剂的短期内的膨胀压力。

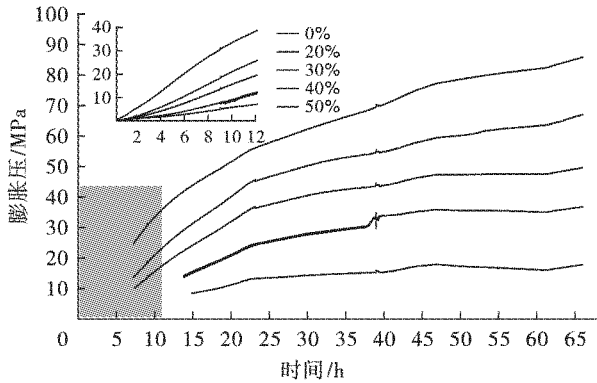


图5 不同掺量对膨胀压力的影响
Fig. 5 Effects of different incorporation amount on expansion pressure

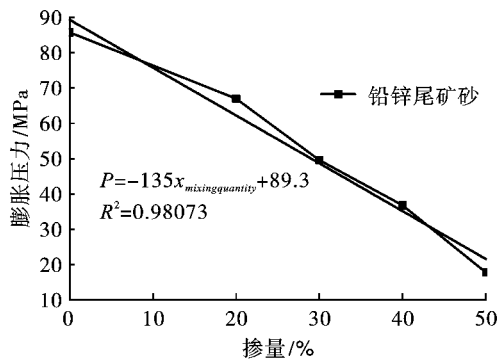


图6 掺量和膨胀压力的线性关系
Fig. 6 Linear relationship between incorporation amount and expansion pressure

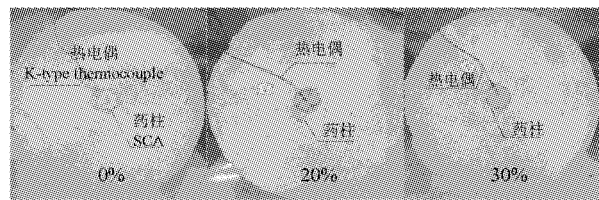
3 掺料静态破碎剂的静爆实验研究

开裂试件规格为直径 ϕ 40 cm,高度 h 为30 cm的圆柱体,孔径为40 mm,孔深250 mm,炮孔体积占试件体积的0.83%。由之前的实验结果可知,掺量为40%和50%时,膨胀压上升的时间太长,并且膨胀压力下较大,不利于实际应用。故此次开裂实验只采用0%、20%和30%三种掺量。见图7。

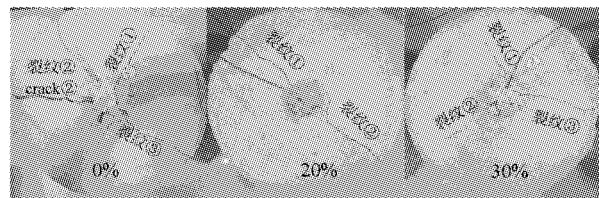
装药8 h后,掺量为20%的试件首先开裂;9 h后,掺量为0%的试件开裂;13 h后,掺量30%的才开裂。实验结束后,经过对每一个破碎体进行称量发现:装药20%试件重量比其余两个试件轻4 kg,该试件最先开裂可能是因为强度较其他两块试件低,更容易破碎。

从实验结果来看,在掺入一定比例的铅锌尾矿

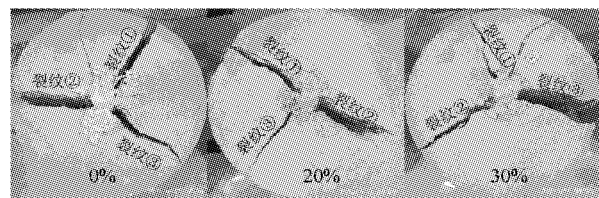
砂后,会影响试件开裂的时间,掺量越多,时间越长,这是由于静态破碎剂药量减少,其膨胀力随之降低的缘故。试件从装药到彻底开裂,出现的裂纹大小,数量都近乎相同。这是由于试件的抗拉强度较小,当静态破碎剂的膨胀压力达到试件抗拉强度的峰值时,试件开始出现裂纹。随着膨胀压的增加,裂纹慢慢扩大,直到炮孔成为自由面,此时,静态破碎剂对试件的膨胀力近乎消失,裂缝不再增加和扩大。



(a) 初始装药
(a) Initial loading SCA



(1) 装药9 h后 (2) 装药8 h后 (3) 装药13 h后
(1) 9 hours later (2) 8 hours later (3) 13 hours later
(b) 初始开裂
(b) Beginning to crack



(c) 完全开裂(装药22 h后)
(c) Complete cracking(22 hours later)

图7 试件开裂实验

Fig. 7 Cracking test of specimens

由上分析可以证明之前的推理是合理的。目前,静态破碎剂无须发挥其全部潜能就能完成破碎目标,掺入铅锌尾矿砂可以替换部分未产生作用的潜在膨胀压力,从而降低成本。

4 结论

在相同水灰比和环境温度条件下,通过掺入不同比例的铅锌尾矿砂,分析了掺入量对静态破碎剂水化峰值温度,膨胀性能,破碎性能的影响,得到以下结论:

(1) 掺入铅锌尾矿砂后,有效降低峰值温度,减小喷孔风险;减少静态破碎剂的损耗,能有效降低静

态破碎剂的施工成本。

(2) 掺入量与静态破碎剂的性能成反比。并且30%为重要临界点,超过后性能急剧下降。

(3) 在不影响破碎效果的前提下,综合各种实验参数,确定了最优掺入比例为20%~30%,为现场施工提供了指导。

参考文献 (References)

- [1] 武汉建材学院静态爆破科研组. 有关静态爆破剂几个问题的研究[J]. 工业建筑, 1983, 3(1): 11-15.
- [1] Wuhan Building Materials College Atatic Blasting Research Group. Study on several problems of static blasting agent[J]. Industrial Construction, 1983, 3(1): 11-15. (in Chinese)
- [2] 汪智勇, 陈旭峰, 游宝坤. 静态破碎剂膨胀及应用原理[J]. 膨胀剂与膨胀混凝土, 2017, 53(4): 1-5, 9.
- [2] WANG Zhi-yong, CHEN Xu-feng, YOU Bao-kun. Expansion and application principle of static crushing agent[J]. Expansive Agents & Expansive Concrete, 2017, 53(4): 1-5, 9. (in Chinese)
- [3] 王正祥, 宋男哲, 马惠莉. 可控静态破碎剂的研究[J]. 化学世界, 1987, 1(5): 29-32.
- [3] WANG Zheng-xiang, SONG Nan-zhe, MA Hui-li. Study on controllable static crushing agent[J]. Chemical World, 1987, 1(5): 29-32. (in Chinese)
- [4] 管伯伦. 静态破碎剂的基本作用原理[J]. 云南冶金, 1988(3): 19-21, 30.
- [4] GUNA Bo-lun. The basic principle of static crushing agent[J]. Yunnan Metallurgy, 1988(3): 19-21, 30. (in Chinese)
- [5] SILVA VD, RANJITH P, PERERA M, et al. The effect of saturation conditions on fracture performance of different soundless cracking demolition agents(scdas) in geological reservoir rock formations. [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, 62: 157-170.
- [6] 周字华. 孔距对混凝土块体静态破碎效果的影响研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
- [6] ZHOU Zi-hua. Experimental research for round hole space of soundless cracking parameters for concrete structure [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [7] HARADA Tetsuo, SOEDA Koichi, IDEMITSU Takashi. Characteristics of expansive pressure of an expansive demolition agent and the development of new pressure transducers[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 1993(478): 91-100.
- [8] 葛进进, 徐颖, 郑志涛. 水剂比对静态破碎效果影响的试验研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(2): 175-176.
- [8] GE Jin-jin, XU Ying, ZHENG Zhi-tao. Experimental research on influences of water agent ratio on static cracking effect[J]. Coal Technology, 2017, 36(2): 175-176. (in Chinese)
- [9] 副田孝一. 生石灰的水和膨胀を利用した静的破碎剂の開発およびその応用に関する研究[D]. 九州工业大学, 1994.
- [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.
- [10] MA Dong-dong, MA Qin-yong, YUAN Pu. Test and analysis on air temperature and water temperature for expansion performance of static cracking agent[J]. Blasting, 2014, 31(4): 124-128. (in Chinese)
- [11] 姜楠, 徐全军, 龙源. 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): 467-472.
- [11] JIANG Nan, XU Quan-jun, LONG Yuan. Expansive pressure characteristic and borehole parameter analysis on large scale borehole soundless cracking[J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(4): 467-472. (in Chinese)
- [12] 温尊礼, 徐全军, 姜楠, 等. 新型大孔径静态破碎技术的试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(5): 72-74.
- [12] WEN Zun-li, XU Quan-jun, JIANG Nan, et al. Experimental study on a new technology of static blasting in large diameter borehole[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(5): 72-74. (in Chinese)
- [13] 汪智勇, 陈旭峰. 辅助相对静态破碎剂性能的影响[J]. 膨胀剂与膨胀混凝土, 2017, 52(3): 10-15.
- [13] WANG Zhi-yong, CHEN Xu-feng. Influence of supplementary phases on the performance of static demolition agent[J]. Expansive Agents & Amp Expansive Concrete, 2017, 52(3): 10-15. (in Chinese)
- [14] 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.
- [14] LUO Ming-kun, LI Sheng, LI Zong-jie, FAN Chao-jun, et al. Composition and performance of static cracking agent in coal and rock fracturing[J]. Engineering Blasting, 2017, 23(3): 5-9. (in Chinese)
- [15] 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.
- [15] ZHANG Jia-yong, CUI Xiao, XU Shen, et al. Study on effect of iron tailing powders on reaction temperature of static cracking agent[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018(2): 121-124. (in Chinese)