

DOI:10.11918/201907034

静态破碎技术研究综述与建议

郑文忠^{1,2}, 李瑞森^{1,2}, 徐笠博^{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信部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090)

摘要: 静态破碎技术是将搅拌好的静态破碎剂填充在岩石或混凝土的孔内, 利用静态破碎剂膨胀产生的膨胀压力“静悄悄”地使岩石或混凝土松散酥碎的方法. 为促进静态破碎技术的发展及应用, 介绍静态破碎剂的主要膨胀性能及其测试方法, 分析孔直径、孔间距、孔排距、孔边距、孔深度对破碎效果的影响, 展示静态破碎拆除技术在建筑拆除、混凝土及岩石破碎等方面的应用. 结果表明: 由氧化钙、水泥、石膏和减水剂等组成的石灰系静态破碎剂在工程中应用最多; 静态破碎剂的体积膨胀主要来源于反应过程中固相体积和孔隙体积的增加; 膨胀压力随氧化钙掺量的增加而增大; 破碎首先发生在孔边与自由面距离最小处; 孔径越大、孔深越深, 破碎剂用量越多, 膨胀压力越大, 破碎效果越好, 但破碎剂用量过大易引起破碎剂从孔洞喷出; 在一定范围内, 破碎剂在孔附近某点处产生的应力与该点至孔边缘距离的平方呈反比, 适当缩减孔距能够取得更好的破碎效果.

关键词: 静态破碎技术; 静态破碎剂; 膨胀性能; 孔径; 孔深; 孔距; 破碎效果

中图分类号: TU751.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2021)05-0190-11

Review and analysis on research and application of static crushing technology

ZHENG Wenzhong^{1,2}, LI Ruisen^{1,2}, XU Libo^{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 the Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters of the Ministry of Industry and Information Technology (Harbin Institute of Technology), Harbin 150090, China)

Abstract: Static crushing technology is a method that the mixed static crushing agent is filled in the hole of rock or concrete and the pressure generated by the static crushing agent is utilized to make the rock or concrete loose and crisp “quietly”. For the development and application of the static crushing technology, this paper introduces the main expansion performance and test methods of static crushing agent, investigates the influence of hole diameter, hole spacing, hole row spacing, hole margin, and hole depth on crushing effect, and reviews the application of static crushing technology in building demolition and concrete and rock crushing. Results show that lime-based static crushing agent composed of calcium oxide, cement, gypsum, and water reducer is the most widely used in engineering. The volume expansion of the static crushing agent mainly originates from the increase of solid volume and pore volume in the reaction process. The expansion pressure increases with the increase of calcium oxide content. Static crushing occurs preferentially at the minimum distance between the hole edge and the free surface. The crushing effect can be improved with increasing hole diameter, hole depth, static crushing agent, and expansion pressure, while too much static crushing agent makes it easier to be ejected from the hole. Within a certain range, the stress generated by the crushing agent at a point near the hole is inversely proportional to the square of the distance from the point to the hole edge, so better crushing effect can be obtained by appropriately reducing the distance of the hole.

Keywords: static crushing technology; static crushing agent; expansion performance; hole diameter; hole depth; hole distance; crushing effect

中国城镇建筑面积逾 350 亿 m², 城镇人口近 8 亿. 预计 2021 年—2030 年中国城镇住房拆除率为

8.4%, 2031 年—2040 年城镇住房拆除率为 9.7%^[1]. 拆除城镇密集建筑, 不但要确保生命财产安全, 而且要控制噪声污染、粉尘污染、振动污染.

目前, 人工拆除与机械拆除, 管理粗放、技术水平不高、拆除效率低下、基础理论和核心研究成果不足. 爆破拆除粉尘、振动和噪音污染大. 因此, 研

收稿日期: 2019-07-03

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0806100)

作者简介: 郑文忠(1965—), 男, 教授, 博士生导师;

侯晓萌(1982—), 男, 副教授, 博士生导师

通信作者: 侯晓萌, houxiaomeng_hit@126.com

发绿色安全拆除技术,综合考虑建筑特点、拆除耗时、费用、环境影响等关键参数的拆除优化技术,形成城镇密集区建筑拆除决策系统是大势所趋。静态破碎技术是将搅拌好的静态破碎剂(static crushing agent,简称SCA)填充在岩石或混凝土的孔内,利用静态破碎剂产生的膨胀压力“静悄悄”地使岩石或混凝土松散酥碎的技术。静态破碎剂是一种由膨胀性物质、水硬性物质、外加剂和矿物掺合料等组成的具有高体积膨胀性的黑灰色或灰白色粉末。静态破碎技术具有安全、绿色、无噪声的特点,不受结构形式及建筑高度的限制,对周围居民影响小,是实现城镇密集区、边境区建筑拆除的有效方法之一。

静态破碎技术在混凝土、岩石安全破碎,建筑结构拆除等方面应用较广泛^[2]。具体如下:

1)静态破碎技术可应用于工作面小且无法进行爆破的区域。静态破碎过程中,不产生爆炸冲击波、飞石、振动,可以将岩石、煤矿充分破碎,有效避免煤矿瓦斯爆炸、煤尘爆炸等。因此,可应用于煤矿、矿山开采、隧道开挖、石材的切割成型、巨石破碎等。

2)应用静态破碎技术时采用适宜孔径、密集孔距,可使岩石切割面平整,保证珍贵矿物的完整性,因此,可应用于对环境有特殊要求的工程,如保护区内的矿山开采、珍贵矿物的保护性开采等。

3)应用静态破碎技术可消除粉尘、噪声污染,施工期不影响建筑正常使用功能,因此,可用于混凝土建筑物和构筑物的拆除。特别适合于密集城镇区域、国家边境区域的建筑物,及各种机座、车站月台、码头、大体积的混凝土构筑物等^[2]。

为推动静态破碎技术在工程中的应用,为后继研究与发展提供建议,本文从静态破碎剂研究、静态破碎工艺研究、存在问题、发展建议4个方面对静态破碎技术进行了详细评述,介绍了静态破碎剂的分类、膨胀机理、组分构成、性能的影响因素及测试方法;分析了膨胀力作用下混凝土的开裂机理;考察了钻孔工艺(孔形、孔深、孔径、孔排距、孔间距等)及导向措施对裂纹开展的影响规律;展示了静态破碎技术在工程中的应用;指出了静态破碎技术在应用过程中的喷孔问题和混凝土静态破碎研究的不足。

1 静态破碎剂研究

不同类型的静态破碎剂,性能、成分、应用时间、应用方法不同,具体分述如下。

1.1 静态破碎剂发展概况

1968年,日本技研兴业会社利用生石灰加水生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 时的体积膨胀产生压力、破碎混凝土,这一方法获发明专利,标志着静态破碎剂的诞

生^[2]。同时,日本学者也对静态破碎剂的成分进行了研究:通过添加延缓剂(如石膏)来降低 CaO 的溶解和反应速度,进而控制静态破碎剂的反应时间,提高其施工性能^[2]。20世纪70年代,中川等为提高静态破碎剂的性能,开始研究混合型或复合型静态破碎剂。1979年,小野田公司研发出“Bristar”静态破碎剂,即在含50% CaO 的 $\text{C}_3\text{S}-\text{CaO}-\text{CaSO}_4$ 系水泥熟料中用 C_3S 和 $\text{CaSO}_4-\text{C}_3\text{A}-\text{C}_4\text{AF}$ 包裹 CaO ,以此为标志,静态破碎剂开始商品化并被推广使用。1981年,日本建设省发布通告——关于利用膨胀压力的破碎工法研究,推动了日本静态破碎技术的发展^[2]。捷克学者对静态破碎技术进行了研究,并于1985年成功研发出“黏合剂与化学缓和剂的非爆炸混合物”。1986年,苏联研制出不同种类的静态破碎剂^[3]。中国于20世纪80年代开始研发静态破碎剂。1981年,中国建材院水泥科学研究所发现水泥熟料中没有参与合成矿物,而是以游离状态存在的 CaO 反应速度快、膨胀压力大,所以,将游离氧化钙(f-CaO)选作主要膨胀成分,研制成功静态破碎剂^[4]。

1.2 静态破碎剂分类

按静态破碎剂使被破碎体开裂所需时间的不同,将其分为速效型静态破碎剂($<4\text{ h}$)、普通静态破碎剂($4\sim30\text{ h}$)、慢速型静态破碎剂($>30\text{ h}$)。

按静态破碎剂使用时环境温度的不同,将其分为春秋型静态破碎剂($10\sim30\text{ }^\circ\text{C}$)、夏季型静态破碎剂($25\sim40\text{ }^\circ\text{C}$)、冬季型静态破碎剂($-5\sim15\text{ }^\circ\text{C}$)。

按静态破碎剂膨胀源的不同,将其分为石灰系列、氧化镁系列和钙矾石系列。试验表明,石灰系熟料膨胀应力最高,广泛应用于静态破碎剂的制作;虽然氧化镁系列熟料固相体积增加率最大,但其反应速度慢,不宜直接作为静态破碎剂的膨胀源,一般配合石灰系静态破碎剂使用;钙矾石系熟料反应受环境温度影响小,膨胀性能最稳定,但固相体积增加率最小,主要应用于膨胀水泥或膨胀混凝土,很少直接用于制作静态破碎剂^[5-6]。

按静态破碎剂生产工艺的不同,将其分为复合型破碎剂和水泥膨胀破碎剂。制备前者时,将生石灰与水泥、石膏或与硫铝酸钙、赤泥等共同磨制而成,该种破碎剂需与缓凝剂配合使用,其易喷孔,膨胀力小。后者制备工艺则是“两磨一烧”,将石灰石、黏土、石膏和铁粉等磨成生料,经高温($1\,350\sim1\,450\text{ }^\circ\text{C}$)锻烧得熟料,再将熟料与石膏、缓凝剂、减水剂等共同粉磨而成,其质量稳定,膨胀速度快,膨胀力大,破碎效果好^[6]。

静态破碎剂按使用方式的不同可分为膏状静态破碎剂(普通型)和粉状静态破碎剂(药卷型)。膏状

静态破碎剂与水或专用溶液混匀后即可使用,混合后呈膏状.粉状静态破碎剂封存在透水性较好的药卷中,使用时将药卷放入水中浸泡几分钟,然后塞入孔中^[7].

1.3 静态破碎剂膨胀机理

静态破碎剂的膨胀机理主要有 3 种理论.

1.3.1 物质转移理论^[8]

在 CaO 与水的反应过程中,会同时发生两种方向相对的物质转移过程.一种是 CaO 分子与进入其内部的水分子发生反应,生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$;二是原充水空间被反应产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 填充.由于 CaO 内比表面积大,其与水反应速度比 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 转移到充水空间的速度快.因此,CaO 和水反应时, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 还未被转移便大量产生,使 CaO 周围的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 大量堆积,冲破原来的反应层,在宏观上的表现即为静态破碎剂的膨胀和开裂.

1.3.2 固相体积膨胀理论^[8-10]

静态破碎剂反应时会产生体积膨胀并释放热量. CaO 分子的体积为 $27.829 \times 10^{-30} \text{ m}^3$,相对分子质量为 56,密度为 3.35 g/cm^3 ; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的分子体积为 $54.477 \times 10^{-30} \text{ m}^3$,相对分子质量为 76,密度为 2.24 g/cm^3 ; H_2O 的相对分子质量为 18,密度为 1.0 g/cm^3 .若仅考虑固相体积变化,则反应后的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 比 CaO 体积增加近一倍.若考虑 H_2O 的体积,1 mol CaO 完全反应需要 1 mol H_2O ,即 16.62 cm^3 CaO 会和 18 cm^3 H_2O 完全反应.将反应所需水的体积看作 CaO 的孔隙体积,反推所得 CaO 孔隙率为 52.0%,CaO 的密度为 1.62 g/cm^3 ,当 CaO 的密度高于 1.62 g/cm^3 时,静态破碎剂与水反应体积发生膨胀.

1.3.3 孔隙体积增长理论^[8-12]

该理论认为随着 CaO 与水反应生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,分子体积增加.同时,由于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的晶体面光滑,难以与其他反应产物充分交织,在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体与其他反应产物之间存在空隙; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的“屏蔽作用”使其他反应产物难以扩散到 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的板状结构之间, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 板状结构之间也会存在空隙.因此, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体越多,空隙越多,反映到宏观即为孔隙体积的增加.所以,CaO 与水反应的体积膨胀由固相体积增加和孔隙体积的增加两种因素组成.

为证明这个理论,需引入两个假定:把粒子通过吸附游离水分子,在粒子表面形成的吸附水膜看作固相体积的增加;反应前后所有粒子为等大球形颗粒,且以最紧密的方式堆积在一起.基于最紧密堆积理论,等大球最紧密堆积的孔隙率为 25.95%.按照孔隙体积增长模型,1 mol CaO 水化生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$

后,整个“孔隙-固相”体系的体积将会增大 22.10 cm^3 ,其中固体物质的体积相对增大 98.5%,即 16.37 cm^3 ,占体系体积增大的 74.1%,而孔隙的体积增长占体系体积增长的 25.9%,即 5.73 cm^3 .本理论体积增长率高于固相体积膨胀理论,是对于固相体积膨胀理论的补充完善.

1.3.4 其他理论

马志钢等^[7]和谭毅^[5]认为,静态破碎剂和水最初生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 胶体,而体积增长是因为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 胶体逐渐形成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 结晶.邓敏等^[13]和 Chatterji^[14]则认为静态破碎剂体积膨胀的主要原因是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体的生长.

1.4 静态破碎剂组分构成

1.4.1 膨胀性物质

膨胀性物质是静态破碎剂发生体积膨胀、产生膨胀压力的主要来源.对膨胀性物质的要求是产生较大体积膨胀、来源广、无毒、安全、价格低,主要来源于高温煅烧石灰石(CaCO_3)得到的生石灰(CaO).影响 CaO 水化反应速度的主要原因是 CaO 与水的接触面积、煅烧温度和粉末尺寸.煅烧温度越高,CaO 晶格收缩越大,晶体结构越紧密,孔隙率越小,表观密度就越大,水化反应所需时间越长;而在较低温度下煅烧所得的 CaO 结构松散,与水接触的面积较大,水化反应较快. CaO 粉末尺寸越小,则越分散,与水混合越充分,水化反应越快^[3,15-16].

1.4.2 水硬性物质

通常使用的水硬性材料是水泥.水硬性物质主要有两方面作用:一是调节静态破碎剂结硬的速度;二是给静态破碎剂浆体提供强度.水硬性物质对静态破碎剂结硬速度的调节作用,使静态破碎剂体积膨胀和强度发展相匹配.同时,水硬性物质水化产生的强度组分对钻孔中静态破碎剂的竖向膨胀有一定约束作用,可抑制喷孔作用^[17-18].

1.4.3 外加剂

常用外加剂有延缓剂、膨胀剂、减水剂等^[16].

延缓剂可以通过降低 CaO 的溶解度、减缓 CaO 与水反应的速度来调节静态破碎剂的反应速度,抑制喷孔现象.常用的延缓剂有石膏、醇类延缓剂、单糖、低聚糖等.

膨胀剂可以改善破碎剂膨胀性能,使静态破碎剂的膨胀作用更强.通常使用膨润土作为膨胀增力剂.膨润土具有吸湿性,可吸收大量水分,吸水后膨胀可达 20 倍.

减水剂有减少耗水量、降低水剂比和增加膨胀压力的作用. CaO 的理论水剂比为 0.32,按理论水剂比施工时,浆料流动性不好,施工困难,但水过多

会降低膨胀压力,所以,有必要加入减水剂.

1.4.4 矿物掺合料

常用的矿物掺合料是粉煤灰. 目前,粉煤灰通常作为填充物,起到降低成本、胶结破碎剂的作用.

1.5 静态破碎剂性能的影响因素

静态破碎剂的性能包含体积膨胀率、反应速度、膨胀力等. 其中膨胀力是评价静态破碎剂性能的主要指标. 对于膨胀力的要求已有标准,具体见表 1.

表 1 各龄期的膨胀压^[19]

Tab.1 Expansion pressure at different ages^[19]

型号	试验温度/℃	等级	膨胀压/MPa		
			8 h	24 h	48 h
SCA-I	35 ± 1	优等品	≥30.0	≥55.0	—
		合格品	≥23.0	≥48.0	—
SCA-II	25 ± 1	优等品	≥20.0	≥45.0	—
		合格品	≥16.0	≥38.0	—
SCA-III	10 ± 1	优等品	—	≥25.0	≥35.0
		合格品	—	≥15.0	≥25.0

注:表中静态破碎剂型号是根据使用温度范围区分的,使用温度在 25 ~ 40 ℃ 的为 SCA-I,使用温度在 10 ~ 30 ℃ 的为 SCA-II,使用温度在 -5 ~ 15 ℃ 的为 SCA-III.

1.5.1 外界因素

外界因素主要包括环境温度、拌合水温、水剂比等.

马冬冬等^[20]对静态破碎剂反应温度、体积膨胀等进行了试验研究,结果表明,静态破碎剂的温度时程曲线可分为 4 个阶段:温度快速上升、恒温、温度

再次上升和温度下降. 因反应热用来蒸发液态水,恒温阶段温度为 100 ℃ 左右. 水剂比越大,反应的峰值温度越低. 反应达到 100 ℃ 后,升温速率与水剂比呈负相关. 水剂比为 0.30 时破碎剂体积膨胀率最大. 当气温一定,拌合水温在 20,30,40 ℃ 变化时,随水温升高,静态破碎剂反应速度加快,但体积膨胀率并无明显变化. 当水温一定,环境温度在 6,10,13,16,19,22 ℃ 变化时,静态破碎剂体积膨胀率变化较大且在 16 ℃ 时达到峰值,但反应速率受影响很小.

Hinze 和 Brown^[21]发现相较拌合水温,环境温度和 水剂比对膨胀压力影响更大,且环境温度的影响最大. 当水剂比较低(30%),温度较高时(34 ℃),可产生较高的膨胀压力.

薛志翔^[22]通过试验发现,环境温度和 水剂比对破碎剂的体积膨胀率影响较大,当水剂比为 0.32,环境温度为 14 ℃ 时体积膨胀率达到最大值.

1.5.2 配合比

李鹏等^[17-18]分别研究了 CaO、水泥、石膏、膨胀土掺入量对膨胀压力的影响. 其影响程度大小为:生石灰 > 膨润土 > 水泥 > 石膏. 膨胀压力随 CaO 和膨润土的掺量增加而增大,随水泥掺入量增加先增大后减小.

孙立新^[8]发现静态破碎剂的膨胀压随钠基膨润土掺量的增加而增大.

将上述文献所确定的静态破碎剂最佳配合比列于表 2.

表 2 静态破碎剂最佳配合比

Tab.2 Optimal mixtures of static crushing agent

名称	配合比/%						
	氧化钙	水泥	石膏	膨润土	减水剂	粉煤灰	三聚磷酸钠
配方 1 ^[17]	75	9	3	10	1	2	—
配方 2 ^[8]	70	10	3	3	1	13	—
配方 3 ^[18]	75	8	3	5	0.4	8	0.6

注:表中配合比为质量分数.

Hinze 等^[23]发现当砂与破碎剂浆体质量比为 1:2 时,膨胀压力降低 14%,但添加砂可在降低 SCA 成本的同时更好地控制静态破碎剂的反应速度;添加高效减水剂能使 SCA 在相同流动性下膨胀压力增大 20%.

De silva 等^[24]为了拓展 SCA 在水利工程中的应用,利用增速剂(CaCl₂)、增黏剂(VEA)和高效减水剂(HRWR)对其进行改性,提高了 SCA 的抗冲刷性能和前期反应速度. 试验表明,当加入 2% 的 CaCl₂、0.1% VEA 和 2.5% 的 HRWR 时,SCA 的膨胀力发

展速率增加 44%,膨胀力发展开始时间缩减 52%,冲刷质量损失(搅拌 5 min 时测量)降低 79%,而流动性(搅拌 5 min 时测量)仅降低 12%.

1.6 静态破碎剂性能的测试方法

1.6.1 膨胀压力测试方法

电阻应变片测量法^[19,25]:采用内径 40 mm、壁厚 4 mm、长 500 mm 的 Q235 钢管,钢管底部用 4 mm 厚钢板焊接封闭. 在钢管外径贴好应变片,将钢管装入塑料袋后放入水槽中,之后拌好试样灌入钢管,用钢棍捣实,开始测量,并按照式(1)计算静态破碎剂

膨胀压力,如图 1 所示.

$$P = E_s (K^2 - 1) [\varepsilon_\theta / (2 - \nu)]. \tag{1}$$

式中: P 为膨胀压力,MPa; E_s 为钢管的弹性模量,GPa; ε_θ 为钢管的圆周方向应变变量; ν 为钢管的泊松比. $K = \gamma_\theta / \gamma_i$, γ_θ 为钢管的外径,mm; γ_i 为钢管的内径,mm.

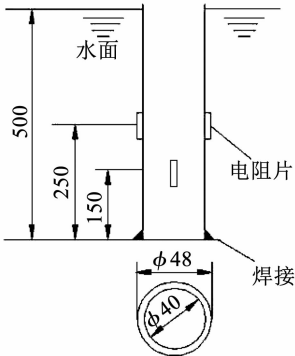


图 1 电阻应变片法示意^[19] (mm)

Fig. 1 Schematic of strain gauge method^[19] (mm)

戴星航等^[26]采用轴向输出法测量膨胀压力.利用压力传感器将膨胀压力转化为轴向压力的测量,测量装置如图 2 所示,并按照式(2)计算静态破碎剂的轴向膨胀压.

$$P_z = 10F_z / S. \tag{2}$$

式中: P_z 为轴向膨胀压,MPa; F_z 为轴向力,kN; S 为钢筒活塞横截面积,cm².

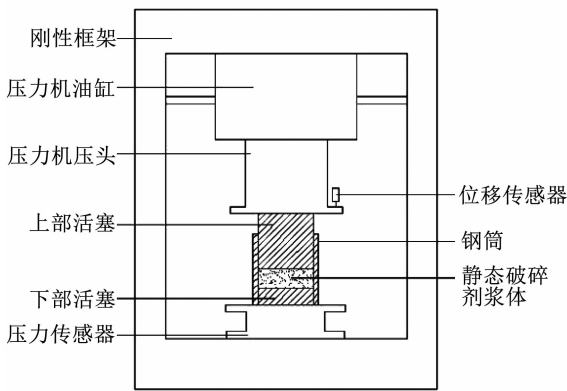


图 2 轴向输出法示意^[26]

Fig. 2 Schematic of axial-output method^[26]

同时将 S_L 定义为轴向输出系数,即轴向膨胀压与径向膨胀压的比值,并假设静态破碎剂内任意一点的环向应力和径向应力相等,则经理论推导得 $S_L = 2\mu_j$, μ_j 为静态破碎剂泊松比.试验表明,当孔径 ≥ 150 mm 时,轴向输出系数 S_L 接近于 1.

李鹏等^[17]采用压力环测试系统测量膨胀压力.约束破碎剂径向膨胀,利用压力环测试系统直接读出轴向压力,并依据公式计算,如图 3 所示.

$$P = F / S. \tag{3}$$

式中: P 为膨胀压力,MPa; F 为测力环所得压力,N; S 为孔截面面积,mm².

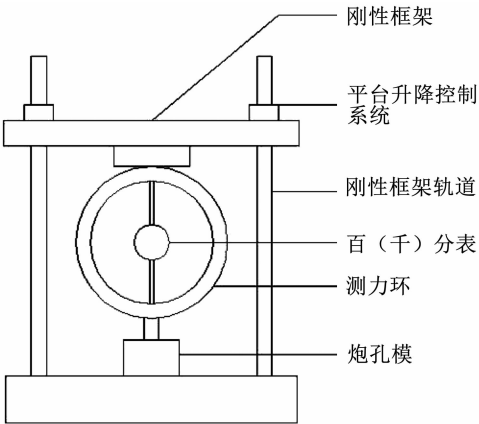


图 3 压力环测试系统示意^[17]

Fig. 3 Schematic of pressure ring test system^[17]

孙立新^[8]采用液压式平衡测压仪测量膨胀压力.依据力的平衡,在保持指针不动的条件下,记录液压数值,将液压乘以物料缸和油缸的面积比 2.25 即能求得破碎剂膨胀压力,如图 4 所示.

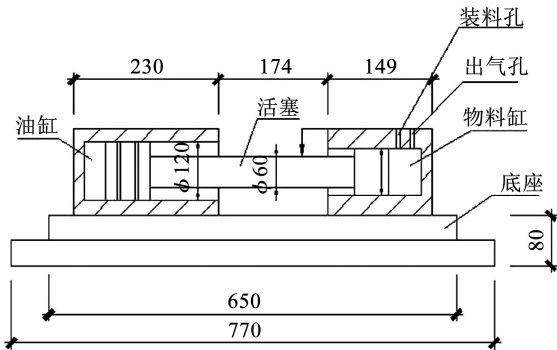


图 4 液压式平衡测压仪示意^[8] (mm)

Fig. 4 Schematic of hydraulic balance manometer^[8] (mm)

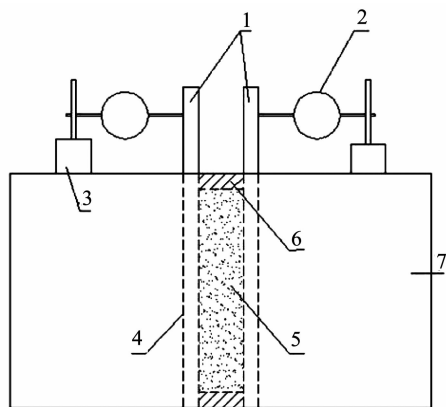
郑文忠等^[27]利用环向应变测量膨胀压力,利用千分表测量插入孔的金属片的位移,即可由式(4)换算得到环向应变:

$$\varepsilon = (\Delta_1 + \Delta_2) / D. \tag{4}$$

式中: ε 为孔环向应变, Δ_1 为第一金属片位移, Δ_2 为第二金属片位移, D 为孔直径.之后将环向应变 ε 与材料的弹性模量 E 相乘,即可得到环向应力,如图 5 所示.

1.6.2 反应速度测试方法

静态破碎剂主要成分 CaO 与水的反应是放热反应,可以通过测量反应过程中的温度变化间接得到静态破碎剂反应速度与时间的关系.周宇华等^[3,22,28]测量了静态破碎剂的反应速度.将药剂倒入尺寸为 200 mm × 200 mm × 150 mm 的铁盒,并插入温度计探头开始测温,记录温度的变化过程.



1—金属片;2—千分表;3—千分表底座;4—炮孔;5—静态破碎剂;6—塞子;7—钢筋混凝土试件

图5 环向应变测量装置^[27]

Fig. 5 Circumferential strain measuring device^[27]

1.6.3 体积膨胀测试方法

现阶段方法均测量体积膨胀终值,一般通过记录容器中静态破碎剂反应前后的高度(反应前后需将药剂整平),将体积比转化为高度比,从而得出体积膨胀率。具体公式为^[22]

$$\beta_1 = h_2/h_1. \quad (5)$$

式中: β_1 为体积膨胀率; h_1 为反应前静态破碎剂的高度,mm; h_2 为反应后静态破碎剂的高度,mm。尚缺乏体积膨胀的实时测量方法。

2 静态破碎工艺研究

2.1 静态破碎施工程序

2.1.1 建筑工程

建筑工程中静态破碎施工程序一般为:破碎结构调研与设计→钻孔→选择并搅拌破碎剂→充填灌注→养护→清理^[29-31]。

1)破碎设计。主要包含药量计算、钻孔设计,其中钻孔设计包含孔深、孔径、孔间距、孔排距、孔边距等内容。钻孔设计需要遵循的原则有:尽可能多地创造自由面,自由面越多破碎速度越快,且至少保证有两个自由面;多钻垂直孔,少钻水平孔;一次钻多孔,多孔同时灌浆。

2)搅拌破碎剂、充填灌注。以不同水剂比将破碎剂和清洁水在容器中搅拌成均匀的流动性浆体,并将其灌注入孔中。有逐排灌注和隔排灌注等方式,灌注之前应清孔。同时,对于干燥且吸水性强的孔壁,为避免其大量吸收破碎剂中的水分,影响破碎效果,应对其进行润湿处理或搅拌破碎剂时适量加水。对于非垂直孔,可泵送灌孔,并迅速封堵;或控制用水量使浆体呈塑性,将破碎剂搓条塞孔并捣实;或用袋子分装浆体,将袋子和浆体一起送入孔内。

3)养护。10℃以下时用草袋等覆盖保温。在负

温下施工时,除覆盖保温外,为使反应能正常进行,应将电热丝插入孔中通电加热,或用温水搅拌并在破碎剂中加入1%~2%的盐。裂缝出现后,在孔上喷热水,可加速裂纹的生长。

4)二次破碎。当经过上述施工程序(即一次破碎)后,被破碎体并未达到预期的破碎效果。则可在一次破碎所钻孔内部继续钻孔,灌注SCA进行破碎,称之为二次破碎。

2.1.2 岩土工程

岩土工程的静态破碎施工程序与建筑工程类似,一般为:被破碎体调研→破碎设计→成孔→拌药→填药→养护→清理^[16]。

破碎设计之前,应了解地质构造、岩质、走向、地下水条件、岩石抗压强度和抗拉强度等。破碎设计时,应顺着岩石纹理钻孔,且大块破碎时被破碎体周边的钻孔孔距应适当减小,保证破碎体周边先破坏。岩土工程中还包括最小抵抗线的设计。抵抗线指孔边与各自自由面的距离,最小抵抗线 W 则是孔边与各自自由面距离的最小值。通常破碎软质岩石(饱和单轴抗压强度小于30 MPa)时 W 取40~60 cm,破碎中硬质岩石(饱和单轴抗压强度为30~60 MPa)时 W 取30~40 cm。

2.2 孔径、孔深、孔距对静态破碎的影响

2.2.1 孔径

姜楠等^[32]分别用直径40、100 mm的钢管完成不同孔径下膨胀压力试验,结果表明,孔径越大,产生的膨胀压力越大。

许兰保等^[33]完成了不同钢管直径(32、38、48、58、72 mm)下膨胀压力试验。结果表明:其他条件不变时,孔径变化对反应速率影响不大。试验中58和72 mm的钢管发生了喷孔,说明孔径越大,喷孔现象越易发生。

冯彧雷^[16]指出:孔径选择应该兼顾破碎效果和钻孔成本。对一般岩石而言,孔径不宜小于20 mm,不宜大于50 mm,一般选用32或42 mm。而破碎钢筋混凝土时,孔径一般为35~50 mm。

Gambatese^[34]对小孔径(3.18、4.76、6.35 mm)中SCA的破碎效果进行了研究,结果表明:当孔深与孔径之比在6~12,孔距与孔径之比在4~10时,即使孔径为3.18 mm,静态破碎剂仍可胀裂混凝土。

2.2.2 孔深

破碎岩石时,实际孔深受破碎面高度和被破碎体约束程度的影响。当破碎面为节理面或断裂面等易裂面时,应适当减少实际孔深,即 $L=0.9H$ (L 为实际孔深, H 为设计深度)。当破裂面处无节理面等易裂面时,为保证破碎效果,则应适当加大孔深,一

般比设计深度大 5%^[16].

石材开采时,孔深越大则破碎效果越好,但受钻孔设备能力、施工难易程度、运输和加工设备对体积的限制、成本因素等影响,孔深不易过大,实际应用时一般控制在 1.5~1.8 m^[35].

Huyn 等^[36]提出“70% 深度准则”以确定孔深. 即拟破碎深度为 h 时,应钻孔深为 70% h .

2.2.3 孔间距

周宇华^[3]使用 C30、C40、C50 的混凝土分别制作了 300 和 400 mm 孔间距的试件,对其进行静态破碎试验. 发现试件破裂过程分为 3 个阶段:裂缝起裂、裂缝稳定扩展和裂缝失稳扩展. 孔距为 400 mm 时,在每个孔的周围产生 3 条裂缝,且 3 条裂缝方向随机,但最小抵抗线方向裂缝开展最深;而孔距为 300 mm 时,两孔间出现一条裂缝,其他裂缝随机分布. 但试验并未找出双孔和单孔影响的临界点.

唐烈先等^[37]通过双孔和 3 孔混凝土试验,并结合 RFPA^{2D} 软件进行模拟,发现静态破碎过程中的破坏总是优先发生在抵抗线最小处. 静态破碎剂的破碎能力范围大于最小抵抗线时,裂缝优先沿着最小抵抗线方向开展;最小抵抗线超出静态破碎剂破碎能力范围时,裂缝开展与单孔混凝土的情况类似.

当孔间距越小时,作用于两个孔之间的力就越大,切割效果越好,速度越快. 若要充分发挥破碎剂能力,降低成本,应依据孔径将孔间距控制在一个相对合理的范围内,详见表 3^[35].

表 3 孔间距与孔径的配合范围^[35]

Tab. 3 Matching range of hole spacing and hole diameter^[35]

孔径/mm	孔间距/mm
30	200~250
35	250~300
40	300~350
45	350~400

刘继峰等^[38]根据已有的施工经验^[39-41],总结了钻孔参数,如表 4 所示.

表 4 破碎设计参数^[38]

Tab. 4 Crushing design parameters^[38]

被破碎物	孔径/mm	孔距/mm	孔深	抵抗线/mm	用量/(kg·m ⁻³)
软质岩	35~50	400~600	H	400~600	8~10
中硬质岩	35~65	300~600	1.05 H	300~500	10~15
岩石切割	30~40	200~400	H	1 000~2 000	5~15
素混凝土	35~50	400~600	0.8 H	300~400	8~10
钢筋混凝土	35~50	150~300	H	200~300	15~25

Arshadnejad 等^[42]利用量纲分析和数值模拟方法,提出确定孔距的经验模型,该经验模型采用膨胀压力、岩石抗拉强度、孔径、岩石弹性模量、静态破碎剂注入时长以及岩石的断裂韧性来确定孔间距. 公式具体形式为

$$S = [-0.285 (P/\sigma_t)^2 + 3.5(P/\sigma_t) - 7.2] \cdot t^{2.7} E^{0.82} d^2 / K_{IC}.$$

(6)

式中: S 为孔距, m; P 为膨胀压力, MPa; σ_t 为岩石轴心抗拉强度, MPa; t 为静态破碎剂注入时长, h; E 为岩石弹性模量, GPa; d 为孔径, m; K_{IC} 为岩石断裂韧性, MPa·m^{1/2}.

2.3 静态破碎中的裂纹

2.3.1 开裂机理

静态破碎剂的应力产生如图 6 所示,装在孔中的静态破碎剂体积膨胀,由于孔壁的限制,这种膨胀压力转化为拉应力^[16]. 通常脆性材料抗拉强度远小于其抗压强度,当膨胀压力在微元体上产生的切向拉应力 σ_θ 大于材料的极限抗拉强度时,微元体在垂直于拉应力 σ_θ 的方向开裂. 开裂之后,在裂缝处出现应力集中,使与裂缝相邻的单元有更高的概率开裂. 此过程反复出现,裂缝不断发展. 但孔周围混凝土单元抗拉强度具有随机性,裂缝出现位置也呈现随机性.

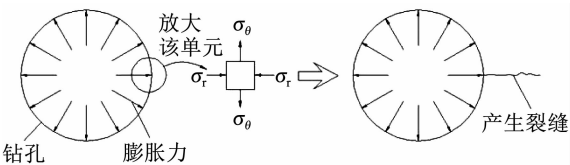


图 6 孔壁处应力状态^[16,28]

Fig. 6 Stress state at the wall of blasthole^[16,28]

姜楠等^[32]结合弹性力学中的厚壁圆筒理论得到静态破碎剂在被破碎体中产生的应力分布模型:

$$\sigma_r = -a^2 P / r^2, \sigma_\theta = a^2 P / r^2.$$

(7)

式中: σ_r 为径向应力, MPa; σ_θ 为切向应力, MPa; P 为膨胀力, MPa; a 为孔径, mm; r 为被破碎材料内某点与破碎剂中心的距离, mm. 该公式认为在无限介质中被破碎材料外径 $b \rightarrow \infty$, 且仅在弹性范围内适用. 同时, Natanzi 等^[43]也认为破碎剂在混凝土孔附近某点处产生的应力与该点至孔边缘距离的平方呈反比.

冯彧雷^[16]在式(7)的基础上结合第二强度理论,给出了被破碎材料的孔壁开裂条件:

$$\sigma_t = (1 + \nu) P_r \geq R_t B.$$

(8)

式中: P_r 为膨胀压力, MPa; ν 为材料的泊松比; R_t 为被破碎材料抗拉强度, MPa; B 为开裂系数, 用来表征材料的内部缺陷.

王建鹏^[44]对有双边裂缝的单孔断裂模型进行分析,发现在一定的范围内,随初始裂纹长度的增加,裂纹开展单位长度时所需膨胀力增大.即对应某一膨胀力,随着静态破碎剂体积的扩张和被破碎体裂纹的扩展,膨胀压力逐渐被释放,当开裂一定距离之后,膨胀压力被释放完毕,裂纹停止扩展,而要使裂纹继续扩展,则需增加膨胀压力.这就造成破碎一定体积的物体时,所需膨胀压力远大于被破碎体开裂强度.

2.3.2 裂纹开展及控制

前苏联建材研究所为改善破碎效果,控制开裂方向,开发出一种楔形孔钻孔工艺^[2].杨仁树等^[45]

观察了楔形孔在破碎剂作用下的裂纹开展.发现在裂纹扩展过程中,裂纹开展的速度和加速度基本上先增加后减小.裂纹扩展加速度要比裂纹扩展速度更早达到最大值.

唐烈先等^[46]发现在4个方向上具有相等抵抗线的方形单孔混凝土试件在膨胀力作用下以3条主裂纹的形式破坏.但在钻孔中放入强度较高的薄板(如钢板)时,混凝土试件以两条主裂纹的形式破坏,且主裂纹方向与薄板方向一致.而放入强度较低的薄板(如木板)时,无裂纹导向作用,且会降低破碎效果^[47],如图7所示.

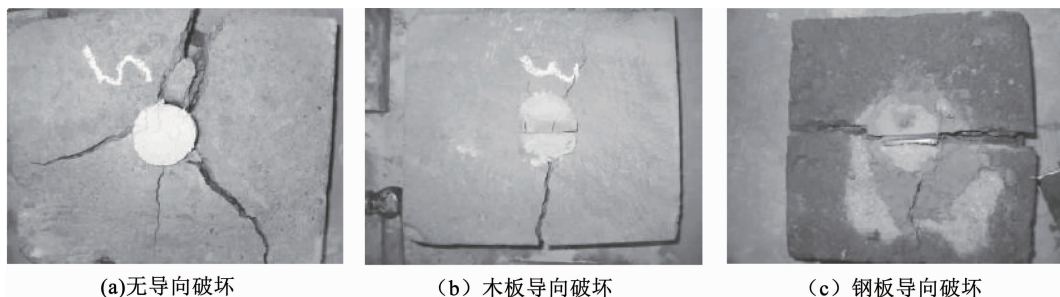


图7 方形单孔混凝土试块破坏形式^[47]

Fig. 7 Failure modes of square single-hole concrete test block^[47]

2.4 静态破碎拆除工程案例

静态破碎技术应用越来越多.以下静态破碎拆除工程案例展示了静态破碎工程的应用范围和应用优势.

由于日本山地多、人口密集,人均建筑用地少,在人口密集区无法使用炸药开山,静态破碎技术主要应用于破碎岩石,增加建筑用地.此外,日本应用静态破碎技术破碎了地上、地下混凝土及水下混凝土,都达到了预期工程目标.南非、沙特阿拉伯及巴西等国家也采用静态破碎技术进行了大理石和花岗岩等石材开采^[6].

1999年,美国卡内基音乐厅主厅下要建造一个可容纳600人的礼堂,整个工程需要开挖4 600 m³的岩石,场地临近地铁和主要水渠.由于音乐厅有百年以上的历史,同时开挖工程也不能影响音乐厅日常排练,需减小施工中的振动与噪音.最终确定了小范围爆破、机械挖掘及静态破碎相结合的方法,取得了良好的施工效果^[48].

安徽马钢动力厂在不影响生产的前提下利用静态破碎技术拆除了3号电动风机的基础^[30].山东省的翟镇井田用静态破碎技术穿透了煤矿开采中3~5 m的岩石断层,与采用爆破方法相比节省1 320万元^[49].

2006年,北京市在综合治理河段时,采用机械与静态破碎相结合的方式在规定工期内拆除了部分

护城河挡墙.拆除完成后,所保留的部分原挡墙的使用功能不受影响,与新建挡墙形成了可靠连接^[38].

2016年的上海浦东国际机场T1航站楼改造工程,在不影响航站楼正常使用的前提下,通过实施静态破碎技术完成了原有连廊层的钢筋混凝土梁和楼板结构的拆除工作,有效控制了拆除过程中的粉尘、噪声等,且整个结构的变形也在允许范围内^[50].

3 静态破碎拆除技术现存问题

3.1 喷孔问题

由于静态破碎反应是放热反应,实际应用该方法时,反应是在空间狭小且导热性较差的孔中进行.随着破碎剂的水化,短时间内产生的大量水化热无法及时通过周围介质导出,致使静态破碎剂浆体中的水分迅速气化,产生较大的蒸汽压力.当产生的蒸汽压力大于破碎剂浆体和孔壁之间的黏结力时,发生破碎剂从孔口喷出的现象.巴惠鹏等^[51]通过试验和理论分析得出,孔径越大,越容易发生喷孔.

针对这一问题,一般从内部和外部两个方面解决:1)内部.由于喷孔是因为静态破碎剂反应放热致使蒸汽压力骤然增大而引起的,可在静态破碎剂中掺入一定量的延缓剂,通过延缓反应放热的速度来缓解蒸汽压力,从而达到防止其喷孔的目的.2)外部.现在工程应用中常用石块、塞子等对孔进

行封堵,在一定程度上能起到抑制喷孔的作用。

解北京等^[52]针对破碎剂反应时温度快速升高的问题,制作出一种防喷孔装置,如图 8 所示,即通过向一端开口的钢管中注入水,利用水和钢质材料传导大量水化热达到防喷孔的目的。试验结果表明:不使用防喷孔装置时,破碎剂反应过程中温度迅速升高,发生喷孔;使用防喷孔装置时,破碎剂温升速度显著降低,但最终达到的膨胀力无显著变化,喷孔现象也没有出现。

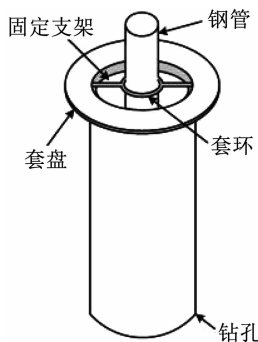


图 8 防喷孔装置^[52]

Fig. 8 Anti-punching device^[52]

3.2 静态破碎剂计算模型

在静态破碎剂性能方面,对于静态破碎剂模量、强度和温度等关键指标随时间发展的研究不足,对于静态破碎剂反应过程中体积膨胀和膨胀力发展之间的关系认知仍不清晰。

对静态破碎剂膨胀性能及破碎效果缺乏统一的定量标准,为理论计算和破碎剂的优化比选带来了困难。在静态破碎过程中,发现孔内静态破碎剂或结硬成为弹性柱体,或维持粉末状态,对产生这种区别的原因认识仍欠缺。

3.3 计算方法与适用性

现阶段静态破碎技术的钻孔设计以经验为主,尚无相应的理论计算公式。对孔周边应力场的分析以弹性理论为主,在混凝土开裂后并不适用,无成型理论判断裂缝的走向及延伸范围。

孔径、孔深、孔间距、孔边距、孔端距等关键因素对破碎效果的影响以定性规律为主,缺少量化表达。

在静态破碎工艺方面,现阶段的研究多以石材和素混凝土为主,缺乏钢筋混凝土结构构件静态破碎试验与破碎规律。素混凝土相对钢筋混凝土偏于各向同性,所得出的规律并不一定适用于钢筋混凝土,而实际工程中钢筋混凝土应用较多。

4 结论与建议

4.1 结 论

1)静态破碎剂是由膨胀性物质、水硬性物质、

外加剂和矿物掺合料等组成的具有高体积膨胀性的黑灰色或灰白色粉末。静态破碎剂的体积膨胀主要由固相体积增加和孔隙体积增加两部分组成。水泥膨胀破碎剂的稳定性及膨胀力优于混配型静态破碎剂。

2)静态破碎剂的膨胀力及反应速度受组分构成、配合比等内部因素和环境温度、拌合水温等外部因素影响较大。组分构成对膨胀力影响的大小程度为:CaO > 膨润土 > 水泥 > 石膏,随环境温度升高,静态破碎剂反应速度明显加快。

3)目前对静态破碎剂膨胀力的测量有电阻应变片法、轴向输出法、压力环测试法等,破碎剂的反应速度及体积膨胀测量可以分别通过热电偶及钢尺进行,但仍无测量静态破碎剂强度和模量的方法。

4)孔径破碎剂反应速率的影响较小,对膨胀压力影响较大,孔径越大膨胀压力越大,但喷孔现象发生概率也随之增加;孔深对膨胀力的影响尚未明确,为保证破碎效果,孔深不易过小,一般应在 30 cm 以上;孔间距越小,两孔间的裂缝越容易连通,形成的切割面越平整。

5)破碎参数(孔径、孔深、孔间距等)对膨胀力及破碎效果的影响尚无明确的定量关系,现阶段钻孔设计一般应用总结得来的经验数值。

6)由于静态破碎技术安全、绿色、灵活,对作业面要求小,即可利用小孔进行精细作业,又可通过大孔进行快速拆除,还能与任何一种其他的拆除方式相结合,在混凝土、岩石安全破碎、建筑结构拆除等方面具有广阔的应用前景。

4.2 建 议

1)优选高效混凝土静态破碎剂,提出静态破碎剂的膨胀量化指标、膨胀发展时变模型、强度发展的时变模型和模量发展时变模型,提出静态破碎剂膨胀应力、反应速度的控制方法。

2)研究不同反应速度及膨胀力的破碎剂对混凝土结构构件破碎效果的影响规律,完善静态破碎钻孔设计理论,最终建立以破碎效果为目标函数,以孔径、孔深、孔边距、孔排距、混凝土强度、钢筋配置、构件破碎单元尺寸等为自变量的数学表达。形成以破碎效果为目标函数,以各关键参数为自变量的混凝土静态破碎决策系统。

3)开展混凝土构件静态破碎试验,研究关键参数对破碎过程的影响规律,优化混凝土结构构件切割工艺与钢筋拆除方法,研发混凝土结构静态无噪声拆除技术。

4)中国煤矿多属于井工煤矿,随着开采深度不断增加,煤层条件复杂,无法采用机械开采和爆破开

采时,静态破碎开采是解决方法.然而,煤层及岩石力学特征、破碎特征与混凝土明显不同,混凝土静态破碎技术不能满足煤矿开采需求,因此,需研发基于静态破碎的煤矿开采技术.

参考文献

- [1] 黄禹,刘洪玉,徐跃进.我国城镇住房拆除率及其影响因素研究[J].中国房地产,2016(21):51
HUANG Yu, LIU Hongyu, XU Yuejin. Study of China's urban housing demolition rate and its influencing factor[J]. China Real Estate, 2016(21): 51. DOI: 10.13562/j.china.real.estate.2016.21.007
- [2] 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):1
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): 1
- [3] 周宇华.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
ZHOU Zihua. Experimental research for round hole space of soundless cracking parameters for concrete structure[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2016
- [4] 王延生,张桂清,江云安,等.高效无声破碎剂[J].中国建筑材料科学研究院学报,1990,2(3):55
WANG Yansheng, ZHANG Guiqing, JIANG Yunan, et al. High soundless cracking agent[J]. Journal of China Building Materials Academy, 1990, 2(3): 55
- [5] 谭毅.静态破碎剂的应用技术研究[J].山西煤炭,2012,32(5):65
TAN Yi. Application technology of static cracking agents[J]. Shanxi Coal, 2012, 32(5): 65. DOI:10.3969/j.issn.1672-5050.2012.05.022
- [6] 游宝坤.静态爆破技术:无声破碎剂及其应用[M].北京:中国建材工业出版社,2008:9
YOU Baokun. Static blasting technology: Silent crushing agent and its application[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2008: 9
- [7] 马志钢,王瑾.试论静态破碎剂及其性能改进[J].煤矿爆破,2002(1):4
MA Zhigang, WANG Jin. Discussion on static demolition agent and its performance improvement[J]. Coal Mine Blasting, 2002(1): 4
- [8] 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 Lixin. Study on the static cracking agent and its application[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005
- [9] 王玉杰.静态破碎技术及机理研究[D].武汉:武汉理工大学,2009
WANG Yujie. Research on mechanism and technology of non-explosive demolition[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009
- [10] 郭瑞平,杨永琦.静态破碎剂膨胀机理及可控性的研究[J].煤炭学报,1994,19(5):478
GUO Ruiping, YANG Yongqi. Study on the expansion mechanism and controllability of static cracking agent[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(5): 478
- [11] 刘江宁.膨胀水泥石的孔结构和限制条件对其影响[J].膨胀剂与膨胀混凝土,2008(2):11
LIU Jiangning. The influence of pore structure and restrictive conditions on expansive cement stone[J]. Expansive Agents & Expansive Concrete, 2008(2): 11
- [12] 施惠生,赵玉静,沙丹丹.游离氧化钙对水泥浆体体积膨胀的影响机制[J].水泥,2000(4):1
SHI Huisheng, ZHAO Yujing, SHA Dandan. Effect mechanism of free calcium oxide on volume expansion of cement paste[J]. Cement, 2000(4): 1. DOI:10.13739/j.cnki.cn11-1899/tq.2000.04.001
- [13] DENG Min, HONG Dongwen, LAN Xianghui, et al. Mechanism of expansion in hardened cement pastes with hard-burnt free lime[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(2): 440. DOI:10.1016/0008-8846(95)00030-5
- [14] CHATTERJI S. Mechanism of expansion of concrete due to the presence of dead-burnt CaO and MgO[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(1): 51. DOI:10.1016/0008-8846(94)00111-B
- [15] 栾瑞宣,傅菊根,鲁力.静态破碎剂破碎机理研究[J].四川建材,2012,38(6):189
LUAN Ruixuan, FU Jugen, LU Li. Study on the mechanism of static crushing agent[J]. Sichuan Building Materials, 2012, 38(6): 189
- [16] 冯或雷.静态破碎剂的膨胀压力测试试验与应用[D].淮南:安徽理工大学,2010
FENG Yulei. Experimental research and apply on the soundless cracking agent[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2010
- [17] 李鹏,聂光华.静态破碎剂的研制试验[J].湖北民族学院学报(自然科学版),2012(2):159
LI Peng, NIE Guanghua. Study on the static cracking agent[J]. Journal of Hubei University for Nationalities (Natural Science Edition), 2012(2): 159
- [18] 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
LI Sheng, LI Zongjie, LUO Mingkun. Experimental study on reasonable composition and proportion of coal and rock static cracking agent[J]. Blasting, 2018, 35(1): 137
- [19] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.无声破碎剂:JC 506—2008[S].北京:中国建材工业出版社,2008
National Development and Reform Commission. Soundless cracking agent: JC 506—2008[S]. Beijing: China Building Materials Press, 2008
- [20] 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
MA Dongdong, MA Qinyong, YUAN Pu. Test and analysis on air temperature and water temperature for expansion performance of static cracking agent[J]. Blasting, 2014, 31(4): 124. DOI:10.3963/j.issn.1001-487X.2014.04.028
- [21] HINZE J, BROWN J. Properties of soundless chemical demolitionagents[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 1994, 120(4): 81. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9364(1994)120:4(816)
- [22] 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
- [23] HINZE J, NELSON A. Enhancing performance of soundless chemical demolitionagents[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 1996, 122(2): 193. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9364(1996)122:2(193)
- [24] DE SILVA V R S, RANJITH P G, PERERA M S A, et al. A modified, hydrophobic soundless cracking demolition agent for non-explosive demolition and fracturing applications[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 119: 1. DOI:10.1016/j.psep.2018.07.010
- [25] 赵杰成.静态破碎剂膨胀压力变化规律测定与分析[J].煤矿现代化,2015(3):53
ZHAO Jiecheng. Determination and analysis of the change law of static crusher expansion pressure[J]. Coal Mine Modernization, 2015(3): 53. DOI:10.13606/j.cnki.37-1205/td.2015.03.024
- [26] 戴星航,张凤鹏,邱兆国,等.静态破碎剂的轴向膨胀力学性能实验研究[J].东北大学学报(自然科学版),2016,37(2):248
DAI Xinghang, ZHANG Fengpeng, QIU Zhaoquo, et al. Experimental study on axial swelling mechanical properties of static cracking agent[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(2): 248. DOI:10.3969/j.issn.1005-3026.2016.02.021

- [27] 郑文忠, 侯晓萌, 李瑞森, 等. 一种静态破碎过程中通孔环向应变的测量装置: CN108775855A[P]. 2018-11-09
ZHENG Wenzhong, HOU Xiaomeng, LI Ruisen, et al. A measuring device for through-hole circumferential strain in static crushing process: CN108775855A[P]. 2018-11-09
- [28] 于永锋. 压力作用下的混凝土静态破裂试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017
YU Yongfeng. Experimental study on static fracture of concrete under pressure[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2017
- [29] 刘星然. 静态爆破技术在工程建设中的应用[J]. 四川水泥, 2015(1): 243
LIU Xingran. Application of static blasting technology in engineering construction[J]. Sichuan Cement, 2015(1): 243. DOI:10.3969/j.issn.1007-6344.2015.01.236
- [30] 罗新伟. 静态爆破在拆除工程中的应用[J]. 四川水泥, 2016(9): 191
LUO Xinwei. Application of static blasting in demolition engineering[J]. Sichuan Cement, 2016(9): 191. DOI:10.3969/j.issn.1007-6344.2016.09.181
- [31] 张爱莉, 姚刚. 静态爆破的设计及应用[J]. 建筑技术, 2002, 33(6): 420
ZHANG Aili, YAO Gang. Design and application of static demolition[J]. Architecture Technology, 2002, 33(6): 420. DOI:10.3969/j.issn.1000-4726.2002.06.006
- [32] 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): 467
JIANG Nan, XU Qianjun, 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): 467
- [33] 许兰保, 倪红娟. 静态破碎剂的性能试验研究[J]. 四川建材, 2013(5): 82
XU Lanbao, NI Hongjuan. Experimental study on performance of static breaker[J]. Sichuan Building Materials, 2013(5): 82. DOI:10.3969/j.issn.1672-4011.2013.05.041
- [34] GAMBATESE J A. Controlled concrete demolition using expansive cracking agents[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2003, 129: 98
- [35] 徐东平. 静态破碎技术的发展及应用[J]. 现代矿业, 2012, 27(5): 105
XU Dongping. Development and application of static crushing technology[J]. Modern Mining, 2012, 27(5): 105
- [36] HUYNH M P, LAEFER D F. 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
- [37] 唐烈先, 唐春安, 唐世斌. 混凝土静态破碎的物理试验与数值试验[J]. 混凝土, 2005(8): 3
TANG Liexian, TANG Chunan, TANG Shibin. Physical experiment and numerical tests of soundless cracking on concrete[J]. Concrete, 2005(8): 3. DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2005.08.001
- [38] 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
- [39] 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. DOI:10.3969/j.issn.1009-6825.2004.05.044
- [40] 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, LV Aidong. The application of HSCA soundless smashing agent in pump station rehabilitation[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 2002, 29(2): 143. DOI:10.13524/j.2095-008x.2002.02.067
- [41] 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. DOI:10.14122/j.cnki.hskj.1998.01.048
- [42] 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 & Materials, 2011, 18(5): 509. DOI:10.1007/s12613-011-0470-5
- [43] 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
- [44] 王建鹏. 静态破碎剂破岩机理研究[J]. 中国矿业, 2008, 17(11): 90
WANG Jianpeng. Research on broken rock mechanism of static state dose[J]. China Mining Magazine, 2008, 17(11): 90. DOI:10.3969/j.issn.1004-4051.2008.11.026
- [45] 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): 7
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): 7. DOI:10.3969/j.issn.1006-7051.2010.03.002
- [46] 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
TANG Liexian, TANG Chunan, TANG Shibin, et al. Physical experiment and numerical simulation on effect of soundless cracking agent[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4): 437. DOI:10.3321/j.issn:1000-4548.2005.04.015
- [47] 唐烈先, 唐春安, 胡军. 混凝土静态破碎主裂纹导向技术的试验研究[J]. 混凝土, 2013(11): 11
TANG Liexian, TANG Chunan, HU Jun. Tests and research about the oriented technic to main crack in soundless cracking on concrete[J]. Concrete, 2013(11): 11. DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2013.11.003
- [48] NATANZI A S, LAEFER D F. Using chemicals as demolition agents near historic structures [C]// Proceedings of the 9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions. Mexico City: [s. n.], 2014
- [49] 桂良玉. 静态破碎技术在综采过断层中的应用[J]. 中国矿业, 2010, 19(1): 85
GUI Liangyu. Application research of the static cracking technique is used to through faultage in synthesis exploitation[J]. China Mining Magazine, 2010, 19(1): 85. DOI:10.3969/j.issn.1004-4051.2010.01.026
- [50] 季立群. 静态破碎施工在既有建筑结构拆除中的应用[J]. 建筑施工, 2016, 38(5): 562
JI Liqun. Application of static crushing construction to demolishing of existing building structure[J]. Building Construction, 2016, 38(5): 562. DOI:10.14144/j.cnki.jzsg.2016.05.016
- [51] 巴惠鹏, 刘清荣. 静态爆破剂若干问题的研究[J]. 武汉理工大学学报, 1988(2): 61
BA Huipeng, LIU Qingrong. The research of several problems of soundless-crack-agent[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 1988(2): 61
- [52] 解北京, 严正, 赵泽明. 基于物理降温静态爆破防喷孔实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(1): 150
XIE Beijing, YAN Zheng, ZHAO Zeming. Experimental study on anti-spraying hole of static blasting based on physical cooling[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(1): 150. DOI:10.11731/j.issn.1673-193x.2018.01.024