

# 高压短脉冲作用下岩石击穿特性的实验研究

章志成<sup>1,2</sup>, 裴彦良<sup>3</sup>, 刘振<sup>1,2</sup>, 王揆洋<sup>3</sup>, 刘保华<sup>4</sup>, 闫克平<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学生物质化工教育部重点实验室, 杭州 310027;

2. 浙江大学化学工程与生物工程学系, 杭州 310027;

3. 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061; 4. 国家深海基地管理中心, 青岛 266061)

**摘要:** 为了开发脉冲等离子体钻机, 开展了高压短脉冲作用下岩石击穿的实验研究。以去离子水为工作介质, 将不同种类和不同厚度的岩石放置于尖板电极间, 通过加载不同大小的电压于岩石上, 考察了岩石的电击穿概率与平均电场强度的关系。实验结果发现: 7%空隙率的黄砂岩电击穿场强为 70 kV/cm; 0.8%空隙率的白大理岩电击穿场强为 160 kV/cm。岩石孔隙率的大小对电击穿场强影响显著, 孔隙率越大, 电击穿场强越小。岩石厚度对电击穿场强也有一定影响, 电击穿场强随厚度增加而减少。

**关键词:** 短脉冲; 电击穿; 岩石; 去离子水; 电击穿场强; 等离子体钻机

DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2012.07.027

文章编号: 1003-6520(2012)07-1719-07

## Experimental Research on Rock Breakdown Under Short High-voltage Pulse

ZHANG Zhicheng<sup>1,2</sup>, PEI Yanliang<sup>3</sup>, LIU Zhen<sup>1,2</sup>, WANG Kuiyang<sup>3</sup>, LIU Baohua<sup>4</sup>, YAN Keping<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Biomass Chemical Engineering of Ministry of Education,

Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Department of Chemical and Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China;

4. National Deep Sea Center, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** In order to develop an efficient plasma drill, we experimentally researched rock breakdown under short high-voltage pulses in deionized water. Rocks were placed between a needle high-voltage electrode and a plate grounded electrode. The relationship between breakdown probability and electrical strength was evaluated by applying various voltage levels to the rocks. The results show that the electrical breakdown strength of yellow sandstone with 7% porosity is 70 kV/cm, and for white marble with 0.8% porosity it is 160 kV/cm. The porosity has a great influence on the breakdown strength. Moreover, experimental results show that the breakdown strength drops with increasing thickness of the rock.

**Key words:** short pulse; electrical breakdown; rock; deionized water; electrical breakdown strength; plasma drill

## 0 引言

利用高压脉冲放电对岩石进行电破碎, 可以实现疏通管道、分选矿石、提高油田出油率等用途<sup>[1-6]</sup>。在多数应用实例中, 均采用在岩石表面发生液相放电, 利用放电产生的冲击波效应破碎岩石。然而, 这些方法存在破碎效率低, 电极烧蚀严重等问题<sup>[7-9]</sup>。还有一种方法是利用高压脉冲对岩石实现体击穿, 从而达到直接电粉碎岩石的目的, 该方法可行是因为在百 ns 级上升沿的短脉冲作用下, 岩石的电击穿场强小于水的电击穿场强<sup>[10-11]</sup>。基于该方法, 人们

提出了脉冲等离子体钻井的概念, 即利用重复频率的短脉冲实现快速岩石钻孔。近年来, 该技术发展快速并受到广泛关注<sup>[12-15]</sup>。

以去离子水为工作介质, 将高、低压电极放置于岩石表面, 施加高压短脉冲于岩石上, 岩石首先被电击穿, 内部形成细小等离子体通道并桥连高、低压电极。后续能量注入等离子体通道中并对其快速加热, 通道膨胀, 高温高压的等离子体通道对岩石产生应力破坏, 当强度超过岩石应力强度时, 岩石发生破碎, 破碎的岩石会被流动的水体带离电极表面, 完成一次岩石的微爆<sup>[12-15]</sup>。在多个脉冲的重复作用下, 可实现连续的快速钻井。相比较传统的机械钻井方法, 等离子体法破碎岩石具有以下优势: 破碎过程无有害的化学物质产生, 有效地保护了环境<sup>[12]</sup>; 不需要专门搭建钻井平台, 节省了投资费用<sup>[9]</sup>; 钻井速度

基金资助项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2007AA09Z321)。

Project Supported by National High-tech Research and Development Program of China(863 Program)(2007AA09Z321)。

快;选择性破碎有金属内含物的矿物,钻机也可用于贵金属的选矿<sup>[11,16-17]</sup>。

目前俄罗斯、欧共体、日本、美国等国家或地区已经相继投入该项技术的研发工作,并研发出一系列的样机<sup>[13-19]</sup>,其中,S J MacGregor 等人研发的钻机对硬岩的钻井速度达到 15 cm/min<sup>[19]</sup>。脉冲等离子体钻机也开始了商业化进程,2007-03 成立的 Badger Plasma Technology 开始专门开发和经营脉冲等离子体钻井技术<sup>[20]</sup>。目前开发出的样机大多采用 Marx 发生器作为钻机电源,单次脉冲能量在几百甚至上千 J,钻机工作的稳定性和能耗都存在较大问题<sup>[21-22]</sup>。相比较等离子体钻机的工业应用,等离子体破碎岩石的基础研究还比较薄弱。正如 Badger Plasma Technology 在 2009 年对工业样机 Demo2000 进行商业化测试所作出的评估那样,“该技术仍需要对等离子体破碎岩石的基础物理过程做进一步的研究”<sup>[20]</sup>。

浙江大学在国家 863 计划的资助下开展了脉冲等离子体钻机的技术研究。本文利用自制的高压短脉冲电源,在固定电压极性和电极形状下,通过考察不同种类、不同厚度岩石的电击穿概率,揭示了在高压短脉冲作用下,岩石的电击穿场强与岩石种类、厚度的相关性。

### 1 实验装置

图 1 给出了脉冲等离子体钻机破碎岩石的示意图。实验装置如图 2 所示,主要由充电电源、储能电容、火花开关、传输线变压器、负载组成。充电电源工作频率 1~50 Hz,电压 0~60 kV。储能电容为陶瓷电容器,电容值为 15 nF。开关为火花开关,其触发电路由触发电容、电感、电阻构成(如图 2 所示)<sup>[23-24]</sup>。实验中,火花开关工作在常压下。当充电完成之后,开关在触发电路作用下导通,高压脉冲经传输线变压器加载到负载电极上。传输线变压器由长度为 2 m 的同轴电缆 RG218 构成。调整传输线的级数可以调节加载在负载电极上的电压大小<sup>[25]</sup>。

实验中采用的电极装置为尖板电极,岩石放置在电极之间。高压极为不锈钢针状电极,实物和尺寸如图 3 所示。地电极为不锈钢圆盘,直径 10 cm。实验中使用去离子水作为绝缘介质(电导率 < 10 μS/cm)。进行实验的岩石分别是:黄砂岩、黑花岗岩(珍珠黑花岗岩)、白花岗岩(芝麻白花岗岩)、白大理岩(雅士白大理石)、黑大理岩(大黑晶大理岩),其主要物理特性如表 1 所示。

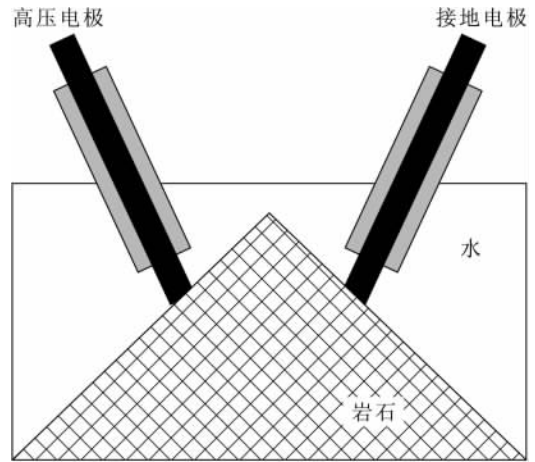


图 1 短脉冲作用下水中岩石电击穿示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rock breakdown in water under short pulsed voltage

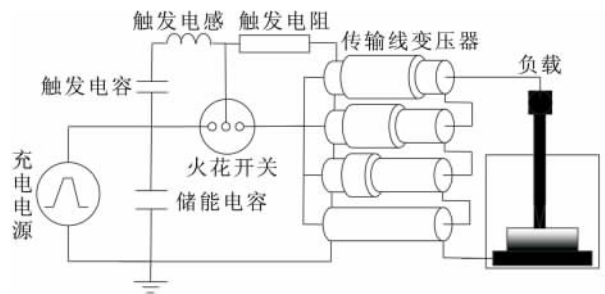


图 2 电击穿岩石实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of high voltage pulse breakage test

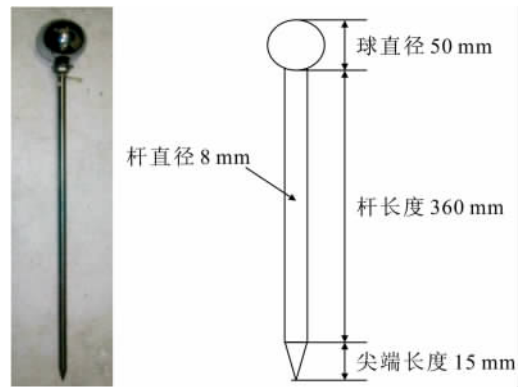


图 3 高压电极的实物图和结构尺寸

Fig. 3 Photo and structure parameters of the high voltage electrode

表 1 岩石试样主要的物理性质

Table 1 Main physical properties of the rock samples

岩石种类	体密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	空隙率/%	抗拉强度/MPa
黑花岗岩	2.81	0.6	3.4
白花岗岩	2.75	1.1	2.1
白大理岩	2.53	0.8	0.5
黑大理岩	2.45	3.5	0.8
黄砂岩	2.11	7	0.01

图 4 所示为岩石击穿过程中典型的电压和电流波形。以黑大理岩击穿为例, 当在 4 mm 厚的岩石上加峰值电压为 60 kV 的负高压脉冲时, 击穿后峰值电流大小为 11 kA。实验测定短脉冲电压上升时间约为 25 ns。

## 2 实验方法和结果

实验中保持储能电容大小不变, 火花开关工作电压为 33~35 kV。通过改变传输线变压器电缆的级数来调节加载在岩石上的电压大小。每种岩石重复电击穿实验 20 次, 若能够发生击穿的次数为  $N$ , 则岩石击穿概率  $\delta$  定义为

$$\delta = \frac{N}{20} \quad (1)$$

如果  $\delta=0$ , 表明岩石完全没有被击穿; 如果  $\delta=0.5$ , 表明岩石有 50% 的概率被击穿; 如果  $\delta=1$ , 则表明岩石施加电压时都将发生击穿。为了比较不同厚度和不同种类岩石的电击穿情况, 用脉冲电压幅值与岩石厚度的比值作为平均场强来衡量岩石中电场强度的大小, 即

$$E_{av} = \frac{U}{d} \quad (2)$$

式中,  $E_{av}$  为岩石中平均电场强度, kV/cm;  $U$  为脉冲电压的幅值, kV;  $d$  为岩石的厚度, cm。

图 5 为黑大理岩的击穿实验结果, 电压为 34 kV 时, 4 mm 岩石击穿概率为 40%, 而 6~10 mm 岩石均不能被击穿; 电压为 60 kV 时, 4 mm 岩石电击穿概率 >60%, 而 6 mm 岩石击穿概率为 25%, 8~10 mm 的岩石均不能被击穿; 电压为 90 kV 时, 4、6、8、10 mm 岩石击穿概率分别为 90%、75%、60%、55%; 电压为 120 kV 时, 6 mm 试样的击穿概率也达到了 88%; 8、10 mm 岩石击穿概率分别为 75%、68%。这些数据表明, 对同一厚度的岩石而言, 加载的电压越高, 击穿概率越大, 并且对于不同厚度的岩石, 都存在着一击穿阈值, 低于这个阈值电压, 岩石将不能被击穿。

图 6 是黑大理岩电击穿概率与电场强度的关系图。当电场强度 < 70 kV/cm 时, 岩石不发生电击穿; 当岩石中电场强度达到 200 kV/cm 时, 岩石的电击穿概率接近 90%。图 7 为白大理岩的击穿概率与电场强度之间的关系。当电场强度 < 60 kV/cm 时, 岩石不能发生击穿。当电场强度在 75~200 kV/cm 时, 岩石击穿概率在 20%~75% 之间。图 8 为白花岗岩的击穿概率与电场强度间关系, 当电场强度 < 50 kV/cm 时, 岩石不能发生电击穿; 当电场强度上

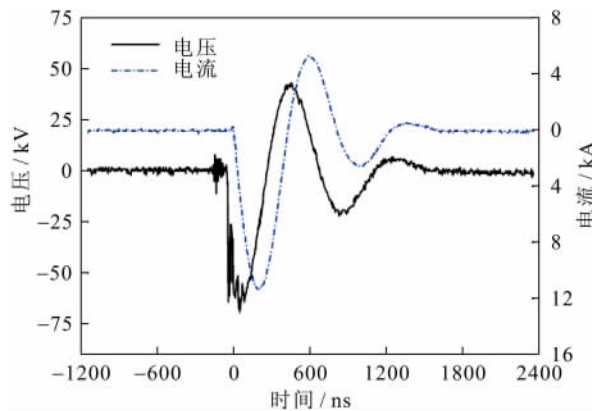


图 4 岩石击穿过程中典型的电压和电流波形

Fig. 4 Typical output voltage and current for rock breakdown

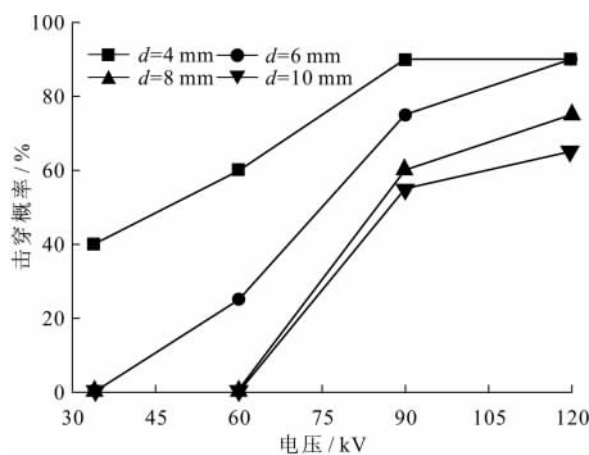


图 5 黑大理岩击穿实验结果

Fig. 5 Electrical breakdown possibility of black marble under different voltage levels

升到 200 kV/cm 时, 岩石的击穿概率为 80%。图 9 为黑花岗岩的电击穿概率与电场强度间的关系, 当电场强度 < 60 kV/cm 时, 岩石不能发生电击穿。图 10 为黄砂岩的电击穿概率与电场强度之间的关系, 当电场强度 < 35 kV/cm 时, 岩石不能发生电击穿; 当电场强度上升到 125 kV/cm 时, 岩石可以完全被击穿。比较来看, 黄砂岩是 5 种岩石中最容易发生电击穿的岩石。

从图 6~10 可以看出, 在短脉冲电压作用下, 岩石电击穿分散性很大, 主要原因之一就在于天然岩石本身结构的复杂度和分散性。但从统计平均来看, 岩石电击穿的概率均随着电场强度增加而增大, 不同种类岩石增加的幅度存在差别。

借鉴经典的气隙击穿理论, 采用 50% 击穿概率时岩石中平均电场强度来表征岩石的击穿场强。5 种岩石试样击穿场强如图 11 所示。从图 11 可以看出, 黄砂岩的电击穿场强最小, 为 50 kV/cm, 而白大

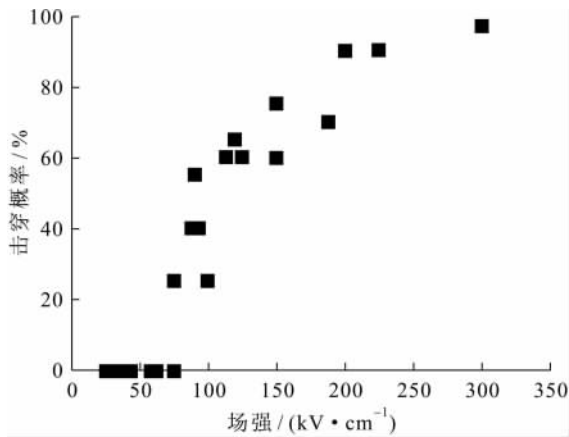


图6 黑大理岩电击穿概率与电场强度的关系  
Fig.6 Breakdown possibility of black marble under different electrical strength

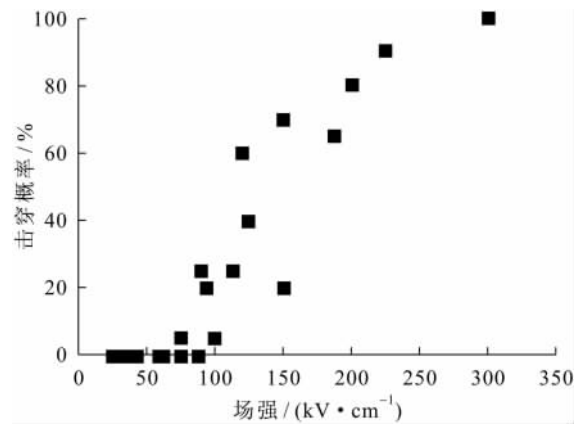


图9 黑花岗岩电击穿概率与电场强度的关系  
Fig.9 Breakdown possibility of black granite under different electrical strength

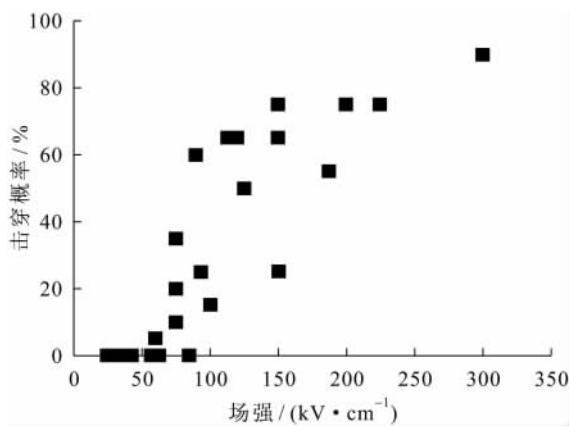


图7 白大理岩电击穿概率与电场强度的关系  
Fig.7 Breakdown possibility of white marble under different electrical strength

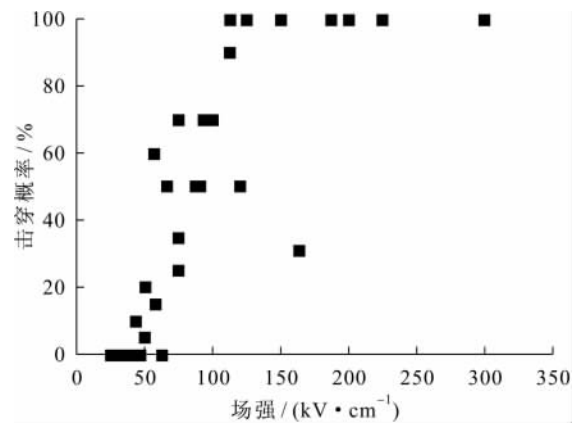


图10 黄砂岩电击穿概率与电场强度的关系  
Fig.10 Breakdown possibility of yellow sandstone under different electrical strength

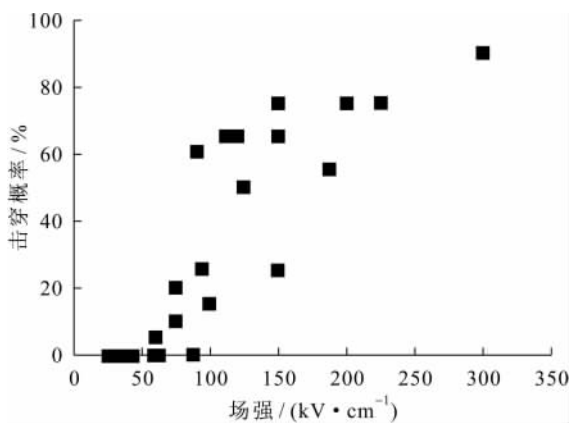


图8 白花岗岩电击穿概率与电场强度的关系  
Fig.8 Breakdown possibility of white granite under different electrical strength

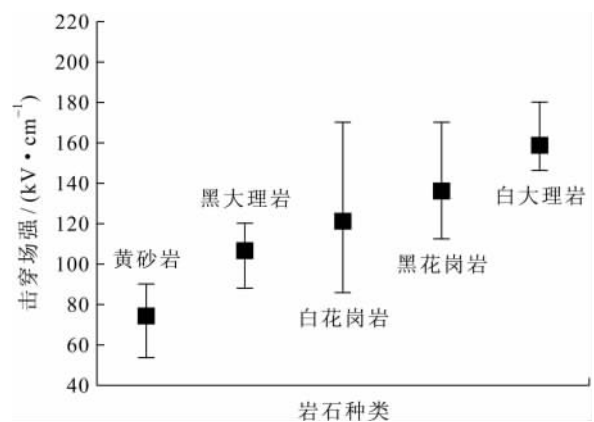


图11 岩石50%击穿概率时对应的平均场强  
Fig.11 Electrical breakdown strength of 50% breakdown probability for different kinds of rocks

理岩的电击穿场强最大,为 160 kV/cm。

图12给出了白大理岩电击穿后的2种典型形态,图12(a)为高低压电极间岩石发生了直接的穿

孔,图12(b)为岩石在电击穿后断裂为2块。实验发现,在较低的电场强度下,多数岩石破碎后的形态为前者;在较高的电场强度下,多数岩石破碎后的形态

为后者。无论哪种破碎形态, 在主断裂面均有等离子体烧蚀的痕迹。

### 3 讨论

实验中施加在岩石上的电场是极不均匀场, 电场强度与电压和岩石厚度的改变呈非线性关系。在考察不同种类岩石电击穿特性时, 这种非线性变化没有予以考虑。但是在脉冲等离子体钻机钻头电极结构设计时, 电极间距设计必须考虑这一问题。图 13 中实线部分(折线)反映了岩石 50% 击穿概率时击穿场强与岩石厚度之间关系的实验结果。以白花岗岩为例, 在岩石的电击穿概率为 50% 时, 4、6、8、10 mm 厚岩石对应的电击穿场强分别为 170、128、100、85 kV/cm。岩石的平均电击穿场强随厚度的增加而减小。其他几个种类的岩石也有类似的规律。

图 13 中虚线部分反映的是在电极上加一定大小的电压, 电场强度随电极间距的变化情况。当电极上加的电压为 40 kV 时, 在 4 mm 电极间距情况下, 电场强度为 100 kV/cm, 该电场强度下只有黄砂岩才能击穿, 其他种类岩石在 4 mm 厚度下电击穿场强均  $> 100$  kV/cm; 当电极间距为 6 mm 时, 电场强度为 67 kV/cm, 该电场强度下也只有黄砂岩才能击穿; 当电极间距为 8 mm 时, 电场强度下降到 50 kV/cm, 该电压等级下任何岩石都不能有效击穿了。如果电源提供的电压为 80 kV, 在电极间距为 4 mm 时, 电场强度为 200 kV/cm, 该电场强度下岩石试样均可以发生电击穿; 当电极间距增加到 6 mm 时, 这时白大理岩不能发生有效击穿; 当电极间距增加到 8 mm 时, 只有黄砂岩才能发生有效击穿。

由此可见, 在电源电压一定的情况下, 不同种类的岩石应设计不同的电极间距才能实现有效的电击穿, 图 13 可以作为电极间距选择的初步依据。结合实验结果来看, 如果放电电极的间距  $< 10$  mm, 电源提供的电压为 120 kV, 则所有的岩石试样均可以发生击穿。

天然的岩石是有较多缺陷的多晶材料, 具有较多的孔隙和裂隙<sup>[26]</sup>。这些缺陷对岩石的电击穿场强主要有 2 个影响, 一是孔隙和裂隙影响了岩石的力学强度, 二是孔隙和裂隙改变了电场在岩石中分布, 缺陷存在的地方场强发生了畸变。从实验结果来看, 岩石在短脉冲下的击穿场强跟岩石的孔隙率有很大的相关性。在 5 种测试的岩石中, 黄砂岩的空隙率最大, 其电击穿场强也最小; 黑花岗岩和白大理岩的孔隙率最小, 其电击穿场强也最大。虽然黑花

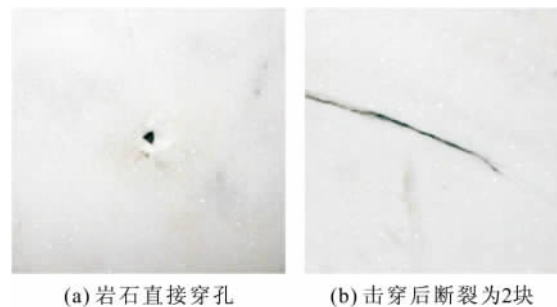


图 12 高压短脉冲作用下典型的白大理岩破碎形态

Fig. 12 Typical photos of white marbles after electrical breakdown

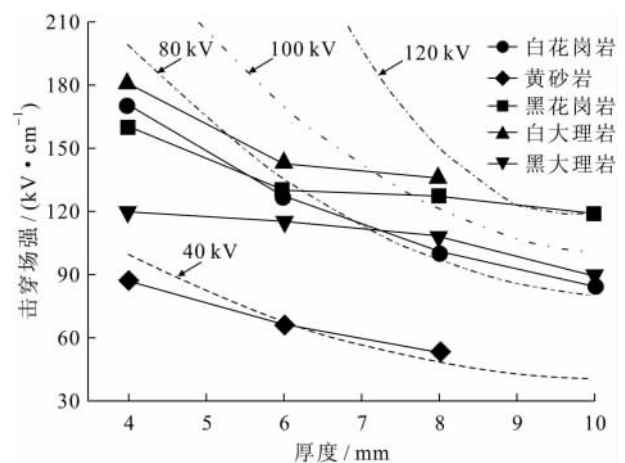


图 13 50% 击穿概率时岩石的电击穿场强与厚度的关系

Fig. 13 Relationship between thickness of rock and the electrical strength

岗岩的孔隙率要略小于白大理岩, 但击穿场强却比白大理岩小, 说明岩石电击穿场强的大小跟其力学强度等性质也有一定的关联。

### 4 结论

利用尖板电极, 通过高压短脉冲下水中岩石的电击穿实验, 得到以下结论:

1) 岩石的种类不同, 电击穿场强差别很大。在 5 种测试的岩石试样中, 黄砂岩的电击穿场强最小, 50% 击穿概率时平均电场强度为 75 kV/cm, 白大理岩的电击穿场强最大, 50% 击穿概率时平均电场强度为 160 kV/cm。

2) 岩石的电击穿场强随厚度的大小也会变化, 岩石的平均电击穿场强随厚度增加而减小。若岩石厚度  $< 10$  mm, 则只要高低压电极间的电压为 120 kV, 就可以对大部分岩石实现有效的破碎。

3) 岩石的电击穿场强与其空隙率和力学性质有关。其中空隙率的影响最为显著, 空隙率越大, 其电击穿场强越小。

## 参考文献 References

- [1] Bluhm H. Pulsed power system[M]. Berlin, Germany: Springer, 2006.
- [2] 白希光,孙光祖. 脉冲放电技术及在清井上的应用[J]. 油气田地面工程, 1996, 15(3): 8-10.  
BAI Xiguang, SUN Guangzu. Application of impulse discharging on clean-out of wells[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 1996, 15(3): 8-10.
- [3] 孙鹤鸿,孙广生,严萍,等. 大功率电脉冲采油技术原理与应用[J]. 钻采工艺, 2002, 25(5): 53-55.  
SUN Yaohong, SUN Guangsheng, YAN Ping, et al. High-power electrical impulse oil recovery technology and its application[J]. Drilling and Production Technology, 2002, 25(5): 53-55.
- [4] 韩波,王新新,郭志刚,等. 脉冲大电流放电技术在疏通油井上的应用[J]. 电工电能新技术, 1998, 17(1):36-40.  
HAN Bo, WANG Xinxin, GUO Zhigang, et al. Application of impulse discharge with high current technology on oil well plug releasing[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 1998, 17(1): 36-40.
- [5] Baltahanov A M, Ivanov E N, 曹玉泉. 电水脉冲法清洗管中的水垢和沉积物[J]. 国外油田工程, 1997, 13(11): 42-44.  
Baltahanov A M, Ivanov E N, CAO Yuquan. Electrical discharge method of cleaning scale and sediment in the tube[J]. Foreign Oilfield Engineering, 1997, 13(11): 42-44.
- [6] Bluhm H, Frey W, straner R, et al. Application of pulsed HV discharge to material fragmentation and recycling [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(5): 625-636.
- [7] Hamelin M, Kitzinger F, Pronko S, et al. Hard rock fragmentation with pulsed power[C] // Proceedings of the 9th IEEE Pulsed Power Conference. Albuquerque, NM, USA; IEEE, 1993: 21-23.
- [8] Hofmann J, Weise T H. Pulsed power technologies for commercial material reduction and crushing application[C]//Proceedings of the 11th IEEE Pulsed Power Conference. Baltimore, Maryland, USA; IEEE, 1997: 203-207.
- [9] Rim G R, Cho C H, Lee H S, et al. An electrical-blast system for rock fragmentation [C] // Proceedings of the 12th IEEE Pulsed Power Conference. Monterey, CA, USA; IEEE, 1999: 165-168.
- [10] Lisitsyn I V, Inoue H, Katsuki S, et al. Drilling and demolition of rocks by pulsed power[C] // Proceedings of the 12th IEEE Pulsed Power Conference. Monterey, CA, USA; IEEE, 1999: 169-172.
- [11] Boev S, Vajor V, Uemura K, et al. Electropulse technology of material destruction and boring[C]//Proceedings of the 11th IEEE Pulsed Power Conference. Baltimore, Maryland, USA; IEEE, 1997: 220-225.
- [12] Usov A F, Tsukerman V A. Prospective of electric impulse processes for the study of the structure and processing of mineral raw materials[C]//Proceedings of the 21th International Mineral Processing Congress. Rome. Italy; Elsevier, 2000: C2/8-C2/15.
- [13] Andres U, Jirestig J, Timoshkin I, et al. Liberation of minerals by high voltage electrical pulses[J]. Powder Technology, 1999, 104(1): 37-49.
- [14] Andres U. Development and prospects of mineral liberation by electrical pulses[J]. International Journal of Mineral Processing, 2010, 97(4): 31-38.
- [15] Lisitsyn I V, Inoue H, Akiyama H, et al. Breakdown and destruction of heterogeneous solid dielectrics by high voltage pulses[J]. Journal of Applied Physics, 1998, 84(11): 6262-6266.
- [16] Eric W, Fengnian S, Emmy M. Mineral liberation by high voltage pulses and conventional comminution with same specific energy levels[J]. Minerals Engineering, 2012, 27/28: 28-36.
- [17] Chanturiya V A, Bunin I Z, Ryazant M V, et al. Theory and application of high-power nanosecond pulses to processing of mineral complexes[J]. Mineral Processing and Metallurgy Review, 2011, 32(2): 105-136.
- [18] Inoue H, Lisitsyn I V, Nishizawa I, et al. Drilling of hard rocks by pulsed power[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2000, 16(3):19-25.
- [19] Timoshkin I V, Machkiersie J W, MacGregor S J. Plasma channel miniature hole drilling technology[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004, 32(5): 2055-2061.
- [20] Badger Explorer ASA. Badger explorer concluded testing on plasma channel drilling technology[R/OL]. [2008-06-19] http://www.rigzone.com/news/article.asp.
- [21] Biela J, Marxgut C, Kolar J W, et al. Solid state modulator for plasma channel drilling [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(4): 1093-1099.
- [22] Kovalchuk B M, Kharlov A V, Kiselev V N, et al. High-voltage pulsed generator for dynamic fragmentation of rocks[J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(10): 103506.
- [23] Winands G J, Liu Z, Yan K, et al. Novel spark-gap switch design for pulsed power applications [C] // IEE Pulsed Power Symposium 2005. Basingstoke, Hampshire, UK; IEE, 2005: 1-6.
- [24] Liu Z, Yan K, Winands G J. Multiple-gap spark gap switch [J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(7): 073501.
- [25] Yan K, Heesch E J, Pemen A J, et al. A 10 kW high-voltage pulse generator for corona plasma generation [J]. Review of Scientific Science, 2001, 72(5): 2443-2447.
- [26] 付志亮,肖福坤,刘元雪,等. 岩石力学实验教程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.  
FU Zhiliang, XIAO Fukun, LIU Yuanxue, et al. Experiment course on rock mechanics[M]. Beijing, China: Chemical Industry Press, 2011.

章志成

1983—,男,博士生

研究方向为脉冲功率技术在资源与环境领域应用

E-mail: qiushizj@163.com

ZHANG Zhicheng  
Ph. D. candidate



裴彦良  
1977—,男,博士,高工  
研究方向为海洋地球物理  
电话:(0532)88967483  
E-mail: peiyanliang@fio. org. cn

PEI Yanliang  
Ph. D.  
Senior engineer



刘保华  
1960—,男,博士,研究员、博导  
研究方向为海洋地球物理  
电话:(0532)88963627  
E-mail: bhliu@fio. org. cn

LIU Baohua  
Ph. D. , Professor



刘 振  
1978—,男,博士,副教授  
研究方向为脉冲功率技术  
电话:(0571)88273897  
E-mail: zliu@zju. edu. cn

LIU Zhen  
Ph. D. ,  
Associate professor



闫克平  
1962—,男,博士,教授,博导  
研究方向为应用低温等离子体,电除尘和脉  
冲功率技术  
电话:(0571)88220340  
E-mail: kyan@zju. edu. cn

YAN Keping  
Ph. D. ,Professor



王揆洋  
1949—,男,研究员  
研究方向为海洋地球物理  
电话:(0532)88961063  
E-mail: wangkuiyang@yahoo. com. cn

WANG Kuiyang  
Professor

收稿日期 2012-05-15 修回日期 2012-06-24 编辑 左文霞