

脉冲冲击波有效作用距离影响因素模拟分析

隋义勇¹, 张永民², 李加强³, 曲永春⁴, 任桂山⁵

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西西安 710049;
3. 大庆油田创业集团萨南实业公司, 黑龙江大庆 163414; 4. 大庆油田公司测试技术服务分公司, 黑龙江大庆 163453;
5. 大庆油田采油工艺研究院, 天津 300280)

摘要:利用数值模拟方法, 分析储能、作业次数、弹性模量、地应力对重复脉冲冲击波有效作用效果的影响。结果表明:低储能时无法致裂储层, 以解堵为主, 高储能时可以使储层产生微裂缝提高渗透率; 随着作业次数的增加, 冲击波有效作用距离不断增加至最大值, 此后再增加作业次数, 有效作用距离基本不变; 地应力对有效作用距离影响比较明显, 随着地应力的增加, 有效作用距离呈对数规律减小; 在地应力较小、弹性模量较大时, 随着作业次数增加有效作用距离增大, 但试验表明作业次数增加会使储层软化, 减小弹性模量, 降低冲击波作业效果; 当地应力较大时, 弹性模量和作业次数对有效作用距离基本无影响, 因此重复强冲击波对弹性模量大、地应力小的储层解堵、增产、增注效果较好, 且存在一个合理的冲击波作业次数。实际应用时应根据储层参数选井, 优化冲击波作业参数。

关键词:脉冲冲击波; 岩石应力; 有效作用距离; 解堵; 数值模拟

中图分类号:TE 319 **文献标志码:**A

引用格式:隋义勇, 张永民, 李加强, 等. 脉冲冲击波有效作用距离影响因素模拟分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(5): 118-122.

SUI Yiyong, ZHANG Yongmin, LI Jiaqiang, et al. Numerical simulation study on parameters impacting effective influence distance of pulse shock waves for well stimulation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(5): 118-122.

Numerical simulation study on parameters impacting effective influence distance of pulse shock waves for well stimulation

SUI Yiyong¹, ZHANG Yongmin², LI Jiaqiang³, QU Yongchun⁴, REN Guishan⁵

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. School of Electric Engineering in Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. Sanan Industrial Company, Daqing Trlumph Group, Daqing 163414, China;
4. Logging and Testing Technology Service Company, Daqing Oilfield, Daqing 163453, China;
5. Research Institute of Oil Production Technology, Dagang Oilfield, Tianjin 300280, China)

Abstract: Numerical simulation was conducted to analyze the influence of energy storage, operation frequency, elastic modulus, and stress in rocks on effective repeated pulse shock waves for well stimulation. The simulation results show that, in the case with low energy storage, only plug removal can be achieved with no reservoir fracturing, while in the case with high energy storage, micro fractures can be generated that can induce reservoir fracturing and increase the formation permeability. With the increase of the number of operations, the effective influence distance of the shock wave can be increased continuously to a maximum value. After that, it remains constant. The rock stress has a great effect on the performance of the shock wave. With the increase of the rock stress, the effective distance of the shock wave decreases logarithmically, and when the rock stress is low and the elastic modulus is high, the effective distance increases as the number of operations increases.

收稿日期:2016-04-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51574271);中央高校基本科研业务费专项(15CX02007A)

作者简介:隋义勇(1975-),男,讲师,博士,研究方向为采油工程理论与技术。E-mail:suiyy@126.com。

When the rock stress is high, the operation frequency and elastic modulus have little effect on the effective distance. The repeated strong shock wave can enhance plugging removal and increase production or injection of wells for the reservoir with large elastic modulus and low rock stress. In practical applications, the operation frequency can be optimized based on specific reservoir conditions.

Keywords: pulse shock wave; rock stress; effective influence distance; plug removal; numerical simulation

脉冲冲击波技术是利用电脉冲装置中储存的有限能量以冲击波形式作用到储层有限可控区域,在作用区域形成极端的物理环境实现对储层有效作业的一种物理方法。重复脉冲法相比压裂、爆燃等一次性的大型措施,虽然能量小、有效作用距离有限,但具有无污染、工艺简单、成本低的特点,已在国内多个油田应用,并取得了较好的效果^[1-7]。该技术的研究目前主要侧重于设备研发^[6-10]、机制研究^[10-18]和效果评价^[1-7,13],仍停留在定性解释的水平,为了分析该技术的适应性以及定量解释各影响因素对作业效果的影响程度,笔者模拟不同储能、不同等效地应力、不同作业次数、不同地层弹性模量对砂岩层破裂半径、破裂面积及最大声强范围的影响,为该技术的选井选层以及优化作业参数提供理论依据。

1 重复脉冲强冲击波作用机制

一方面,当冲击波的幅值大于储层岩石的抗压强度时,冲击波可击碎岩石,甚至产生破碎区^[15-17];冲击波衰减形成的压缩应力波幅值大于储层岩石的抗张和抗剪强度,并持续一定时间,会使岩心内部产生一定量的微裂缝或贯通原有无效孔隙,从而实现孔隙度和渗透率的提高。另一方面,冲击波在含有饱和油、气、水的储层中传播时,在不同介质界面上产生剪切力,剥离附着在储层渗流通道壁上的有机和无机堵塞物,起到解堵作用^[19-22]。

2 数值模型的建立

数值模型长、宽均为 50 m,在模型正中设置井筒,套管外径 139 mm,套管壁厚 6.35 mm,套管密度 7.8 g/cm^3 ,管体抗拉强度 818 kN,弹性模量 210 GPa,泊松比 0.3;水泥环厚 45 mm,密度 2.0 g/cm^3 ,弹性模量 38 GPa,泊松比 0.22;砂岩力学参数概化后进行计算,密度 2.5 g/cm^3 ,泊松比 0.26,黏聚力 35 MPa,抗拉强度 10 MPa,内摩擦角 40° 。由于砂岩的非连续、非均质特性导致无法只用几个确定的强度参数表征整个岩体,因此将上述岩石力学参数作为砂岩强度的期望值,并将强度的随机特征引入数值模型中。引入随机特征后,数值模型中每个单元的强度各不相同。

其中黏聚力随机为 0 ~ 70 MPa,抗拉强度随机为 0 ~ 20 MPa,内摩擦角随机为 $10^\circ \sim 57^\circ$ 。

单次脉冲载荷采用三角波载荷代替,载荷幅值为 100 MPa,持续时间 0.3 ms,频率为 0.017 Hz,如图 1 所示。

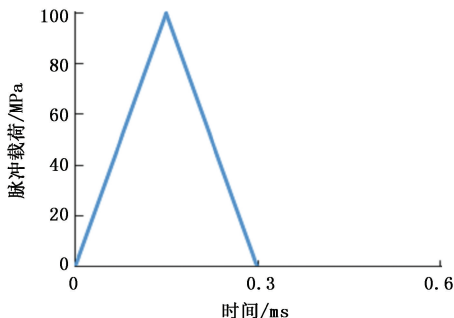


图1 脉冲载荷

Fig.1 Applied pulse load

脉冲施加过程中,脉冲波向井筒四周扩散,对周围的岩体产生一定的挤压作用,导致非均质的砂岩体出现剪切或拉伸破坏。数值模拟计算中,采用 Mohr-Coulomb 准则及最大拉应力准则分析电脉冲装置的储能、作业次数、弹性模量和地应力对有效作用距离的影响程度。

3 模拟结果分析

3.1 储能及作业次数对有效作用距离的影响

模拟分析 30 MPa 等效地应力和 5 GPa 弹性模量的储层中,4.5 kJ 储能条件下不同作业次数下的作业效果。由于 4.5 kJ 储能较小,随着时间的增加,速度波逐渐向外传播,但幅值逐渐减小,砂岩层并没有出现破裂,即使作业 300 次,砂岩层依然处于弹性状态。储能提高到 30 kJ,不同作业次数下井筒附近的砂岩层均出现了网状裂缝,且破裂范围随着作业次数的增加略有增加,如图 2 所示。

不同储能条件下作业次数对作用距离影响如图 3 所示。储能 4.5 kJ 作业时,应力波引起的应力状态不足以使岩石受到破坏,但弹性波在岩层中不同密度的介质中传播时,由于介质间的波阻抗差异将在介质界面上产生剪切力,这种剪切力不足以破坏岩石,但对岩石孔隙、裂隙、孔喉中的杂质和异物有

清洁作用,能够促进液相渗流,对储层起到解堵的作用,模拟条件下 100 次作业时达到最大解堵半径。

30 kJ 储能作业时,在径向上距井筒不同距离处,冲击波的性质、形状和对储层作用性质不同。随着与井筒距离增加,其在与储层岩石的作用中强度不断衰减。冲击波透过套管进入储层后,在近井地带,冲击波的峰值超过储层的抗压强度后使储层岩石产生塑性变形,消耗大部分能量,产生破碎区。在与储层岩石剧烈作用后,冲击波衰减为不再具有陡峭峰值的压缩应力波,波速也接近岩石中的声速,在压缩应力波作用下,储层岩石处于非弹性状态,可导致储层岩石破坏或残余变形岩石发生破裂,因而在作业次数较低时,随着作业次数的增加,有效作用半径不断增大,模拟条件下当作业次数达到 15 次时作用半径达到最大,作业效果以增产增注为主。随着传播距离的增加,冲击波进一步衰减,所以即使作业次数继续增加,有效作用半径增大趋势亦逐渐变缓。

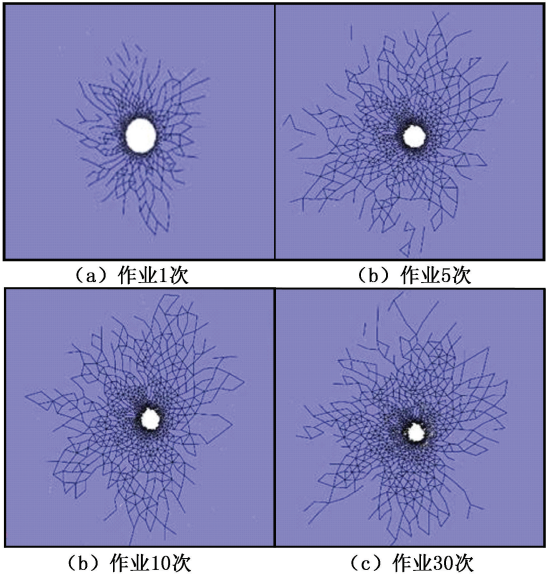


图 2 30 kJ 储能不同作业次数下破裂状态

Fig.2 Rupture state at 30 kJ energy storage with different operating times

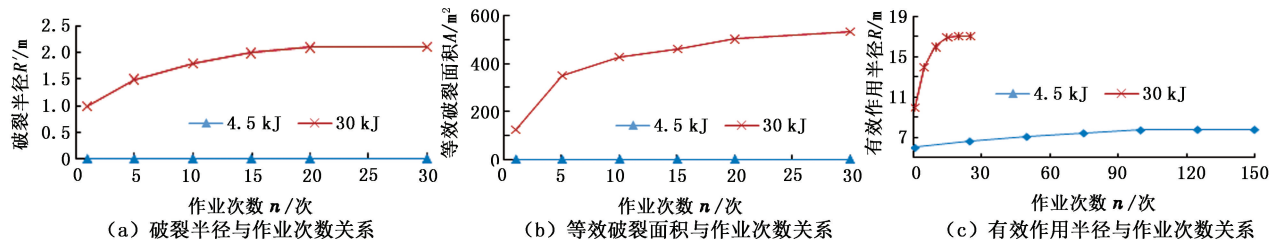


图 3 不同储能条件下作业次数对作用距离影响

Fig.3 Effect of operating times on acting distance under different energy storage

两种储能条件下,作业次数与有效作用半径的关系为

$$R_{4.5} = 5 \times 10^{-8} n^3 - 0.0001 n^2 + 0.0283 n + 5.9826,$$
$$R_{30} = -5 \times 10^{-5} n^4 - 0.0037 n^3 - 0.1094 n^2 + 1.5268 n + 8.5979.$$

式中, $R_{4.5}$ 为 4.5 kJ 储能时有效作用半径,m; R_{30} 为 30 kJ 储能时有效作用半径,m; n 为作业次数。

3.2 地应力对有效作用距离的影响

地应力不仅反映储层的深度,也是影响致裂效果的敏感因素。为了分析不同储能不同深度储层中(即不同地应力)的作用效果,取不同等效地应力进行模拟分析,作业次数均取 50 次,其他参数不变。作业 50 次后,有效作用距离随着地应力的变化如图 4 所示。随着地应力增加有效作用距离快速下降,当地应力较大时,作业次数对有效作用距离影响很小。

有效作用半径与作业次数和地应力之间的关系为

$$R = 45.5228 e^{0.0057 n} - 0.1873 \ln p - 45.608.$$

式中, R 为有效作用半径,m; p 为地应力,MPa。

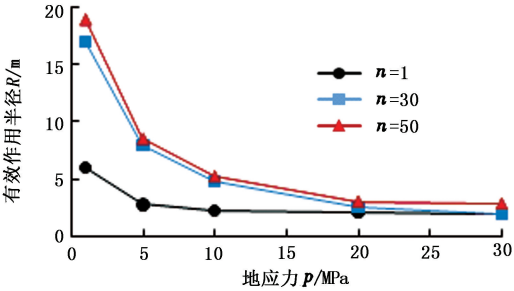


图 4 地应力与有效作用距离关系

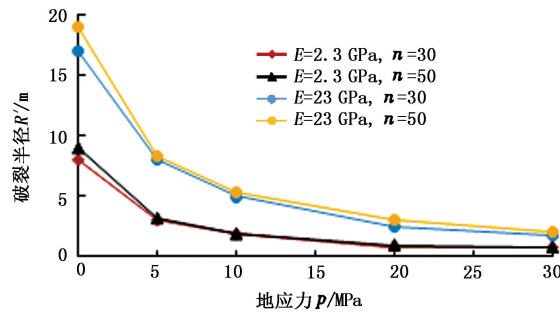
Fig.4 Relationship between ground stress and effective range

3.3 弹性模量对有效作用距离的影响

考虑到声强场是一个弹性场,只跟弹性模量、泊松比、密度有关,跟地应力无关。实际计算时不考虑地应力进行最大声强场分析。1、30、50 次作业下,弹性模量分别为 2.3 和 23 GPa 下,以最大声强场超过 1 kW/m² 的区域为有效作用区域,不同弹性模量下岩石破裂半径及破裂面积与地应力的关系如图 5 所示。由图 5 可得,随着作业次数的增加,有效作用范围逐渐增大,但增大趋势逐渐变缓;随着弹性模量

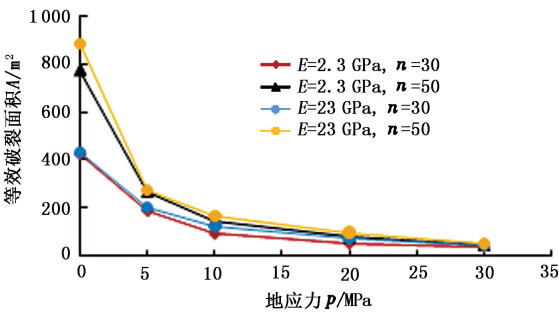
的增加,有效作用范围迅速增大;相比作业次数,弹性模量的增加对有效作用范围的影响更为明显。弹性模量越大,储层刚性越大,因而相同地应力下、相同作业次数下的破裂半径及破裂面积越大。作业次数较少时,弹性模量对破裂范围的影响较大;作业次数增加后,冲击波对储层的岩石力学参数产生影响,如表 1 所示。

随着作业次数增加,弹性模型变小,使弹性模量



(a) 不同弹模下破裂半径随地应力的变化

对破裂范围的影响减小。一方面作业次数增加会增大破裂面积,另一方面作业次数增加会减小弹性模量及破裂面积,应优化合理的作业次数取得最佳破裂效果。油水井实际生产时,弹性模量并非一成不变,而是随着含水饱和度和围压、孔隙压力等参数变化,所以从弹性模量的对致裂效果影响角度考虑,上述参数应成为冲击波作业选井的必要条件。



(b) 不同弹模下破裂面积随地应力的变化

图 5 弹性模量与有效作用距离关系

Fig. 5 Relationship between elastic modulus and effective range

表 1 冲击波对储层力学参数影响

Table 1 Effect of shock wave on mechanical parameters of reservoir

作业次数	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比
0 次	51.8	2.92	5.28	0.26
5 次	35.3	1.81	3.59	0.30

4 结 论

- (1)冲击波作用下的致裂范围与储能、地应力条件、作业次数及岩石弹性模量密切相关,影响程度由大到小依次为储能、作业次数、地应力、弹性模量。
- (2)储能越大,重复脉冲有效作用距离越大,作业效果越好;地应力越大,致裂范围越小;作业次数越多,致裂范围越大;砂岩层弹性模量越大,致裂范围越大。
- (3)作业次数增加对作业效果有正反两方面影响。一方面会提高作业效果,但是另一方面会使储层软化降低作业效果,对于冲击波作业存在一个合理的作业次数。
- (4)随着地应力减小和弹性模量增加,有效作用距离增大,因而重复脉冲技术对地应力小和弹性模量大的储层作用效果好。含水饱和度、围压、孔隙压力等参数会影响弹性模量,因而冲击波作业选井时也应考虑上述参数。

参考文献:

[1] 王志云. 冲击波解堵与应用[J]. 大庆石油地质与开

发,2003,22(1):40-41.
WANG Zhiyun. Broken down and application of shock wave[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2003,22(1):40-41.
[2] 周家驹,郭志华,全宏,等. 冲击波解堵技术的作用机理及技术特点[J]. 钻采工艺,2002,25(4):101-102.
ZHOU Jiaju, GUO Zhihua, QUAN Hong, et al. Mechanism and characteristics of shock wave plug-removing measure[J]. Drilling & Production Technology, 2002,25(4):101-102.
[3] 何易. 物理法采油中振动频率与地质条件的关系研究[J]. 石油机械,2003,31(9):9-11.
HE Yi. Relationship between vibration frequency and geologic condition in oil production by physical methods[J]. China Petroleum Machinery, 2003,31(9):9-11.
[4] 王先荣,袁艳勤,杜海涛. 冲击波解堵技术在中、低渗透油藏中的应用[J]. 海洋石油,2005,25(2):68-71.
WANG Xianrong, YUAN Yanqin, DU Haitao. Application of shock wave plug-removing measure in low-mid permeability reservoir[J]. Offshore Oil, 2005,25(2):68-71.
[5] 张晓明,刘斌,沈田丹,等. 电爆震解堵技术在低渗透油田的应用评价[J]. 钻采工艺,2010,33(6):68-70.
ZHANG Xiaoming, LIU Bin, SHEN Tiandan, et al. Application of the electric detonation broken down technology in low-permeability oil field[J]. Drilling & Production Technology, 2010,33(6):68-70.
[6] 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 & Production Technology*, 2002, 25(5): 53-55.
- [7] 杨永超, 陈定柱, 王延海. 井下低频电脉冲采油技术的应用[J]. *油气井测试*, 2001, 10(1/2): 60-62.
YANG Yongchao, CHEN Dingzhu, WANG Yanhai. Application of the low-frequency electrical pulse oil production technology in the downhole [J]. *Well Testing*, 2001, 10(1/2): 60-62.
- [8] 孙鹞鸿, 孙广生, 严萍, 等. 高压电脉冲采油技术发展[J]. *高电压技术*, 2002, 28(1): 41-42.
SUN Yaohong, SUN Guangsheng, YAN Ping, et al. The development of the electric pulse oil-mining technology [J]. *High Voltage Engineering*, 2002, 28(1): 41-42.
- [9] 陈雪莲, 乔文孝. 相控线阵声波辐射器阵元个数对充液井孔中各种模式波的影响[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2006, 30(3): 46-49.
CHEN Xuelian, QIAO Wenxiao. Effects of element number of linear phased array acoustic transmitter on waves of various modes in fluid-filled borehole [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2006, 30(3): 46-49.
- [10] KOVALCHUK B M, KHARLOV A V, VIZIR V A, et al. High-voltage pulsed generator for dynamic fragmentation of rocks [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81: 103506.
- [11] 周来江, 张玉君, 崔志文, 等. 井外爆炸点源激发井孔声波场[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(1): 299-304.
ZHOU Laijiang, ZHANG Yujun, CUI Zhiwen, et al. Borehole acoustic field excited by an external explosive source in elastic formation [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, 41(1): 299-304.
- [12] 张亚萍, 阎向宏. 充液井孔内电脉冲仪声场的有限元模拟[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2003, 27(5): 125-128.
ZHANG Yaping, YAN Xianghong. Simulation of acoustic field of electric impulse equipment in well bore filling liquid with finite element method [J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 2003, 27(5): 125-128.
- [13] 王江, 王恒贵, 汪海龙. 振动采油机理及影响因素研究[J]. *钻采工艺*, 2007, 30(4): 49-50.
WANG Jiang, WANG Henggui, WANG Hailong. Study on vibrated oil recovery mechanism and influence factors [J]. *Drilling & Production Technology*, 2007, 30(4): 49-50.
- [14] 赵荣生, 赵巍. 物理法采油技术研究与应用[J]. *钻采工艺*, 2008, 31(B08): 60-62.
ZHAO Rongsheng, ZHAO Wei. Research and application of physical production technology [J]. *Drilling & Production Technology*, 2008, 31(B08): 60-62.
- [15] 石道涵, 王栋林, 刘书炳. 电脉冲解堵技术增产机理分析及应用[J]. *石油钻采工艺*, 2002, 24(3): 73-74.
SHI Daohan, WANG Donglin, LIU Shubing. Analysis and application the mechanism of plug removal with electric plus [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2002, 24(3): 73-74.
- [16] 于波, 陶德硕, 吕远, 等. 物理法采油新技术发展综述[J]. *中国西部科技*, 2009, 8(35): 11-12.
YU Bo, TAO Deshuo, LÜ Yuan, et al. Review of the new technology development of physical oil production [J]. *Science and Technology of West China*, 2009, 8(35): 11-12.
- [17] 李恒乐, 秦勇, 张永民, 等. 重复脉冲强冲击波对肥煤孔隙结构影响的实验研究[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(4): 915-921.
LI Hengle, QIN Yong, ZHANG Yongmin, et al. Experimental study on the effect of strong repetitive pulse shockwave on the pore structure of fat coal [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(4): 915-921.
- [18] 陆小兵, 王守虎, 隋蕾, 等. 电脉冲解堵增注机理分析及应用[J]. *天然气与石油*, 2011, 29(6): 61-62.
LU Xiaobing, WANG Shouhu, SUI Lei, et al. Analysis and application of electronic pulse de-plugging and injection-adding mechanism [J]. *Oil and Gas Field Development*, 2011, 29(6): 61-62.
- [19] 郑茂盛, 明方飞, 朱秀红, 等. 振动对岩石及地层渗透率的影响[J]. *石油学报*, 2008, 29(6): 875-879.
ZHENG Maosheng, MING Fangfei, ZHU Xiuhong, et al. Effect of vibration on permeability of rock and stratum [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(6): 875-879.
- [20] ANDRES U. Development and prospects of mineral liberation by electrical pulses [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2010, 97(1/2/3/4): 31-38.
- [21] CHANTURIVA V A, BUNIN I Z, RYAZANTSEVA M V, et al. Theory and applications of pigh-power nanosecond pulses to processing of mineral complexes [J]. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*, 2011, 32(2): 105-136.
- [22] WANG E, SHI F, MANLAPIG E. Mineral liberation by high voltage pulses and conventional comminution with same specific energy levels [J]. *Minerals Engineering*, 2012, (27/28): 28-36.