

文章编号: 1000-7598-(2007) 09-1992-05

立井冻土掘进爆破技术的研究与应用

宗 琦¹, 傅菊根¹, 徐华生²

(1. 安徽理工大学 土木工程系, 淮南 232001; 2. 淮南矿业集团, 淮南 232001)

摘 要: 崩落爆破通常承担整个立井冻土掘进爆破 40 %~60 % 的破土量。宽孔距崩落爆破能够增加自由面的有效利用、增强自由面应力波的反射拉伸作用和消除或减小冻土中的应力降低区。在理论分析的基础上进行冻土爆破漏斗模型试验, 综合考虑爆破漏斗体积和爆破后两炮眼间最大凸量, 初步认为炮眼密集系数 $m=1.5$ 左右时较为合理。结合立井崩落炮眼成圈弧形布置和冻土所受夹制作用相对较大的特点, 建议应在此基础上适当降低立井冻土崩落爆破炮眼密集系数, 这在进一步的工程实践中得到了验证。

关 键 词: 立井冻土爆破; 炮眼密集系数; 模型试验; 工程应用

中图分类号: TD235

文献标识码: A

Study and application of frozen soil blasting technique in shaft

ZONG Qi¹, FU Ju-geng¹, XU Hua-sheng²

(1. Department of Civil Engineering, Anhui University of Science and Technology,
Huainan 232001, China.; 2. Huainan Mining Company, Huainan 232001, China)

Abstract: Breakout blasting often responds 40 %—60 % fracturing soil quantitative during the course of the whole frozen soil blasting tunneling in shaft. Wide pitch-row breakout blasting can increase the effective application of free face and consolidated reflection and tensile affection of free face stress wave and cancel or reduce the decreasing field in frozen soil. Theoretical analysis and model test of binocular explosive funnel have been presented to the most important parameter, dense coefficient of borehole in breakout blasting, and the volume of explosive funnel, v , and the maximal convex capacity, h , between two boreholes after blasting also has been thought synthetically. The authors think dense coefficient of borehole, $m=1.5$ is reasonable. Combined with the arc layout of breakout bore of vertical well and the feature of frozen soil with relative bigger restriction effect, the dense coefficient of borehole of breakout blasting in shaft suggested should be decreased rationally based on it, which was proved in further engineering practice.

Key words: frozen soil blasting in shaft; dense coefficient of boreholes; model test; engineering application

1 引 言

立井施工通过较厚不稳定表土层时大都采用冻结法。早期由于缺乏成功经验, 惧怕爆破造成冻结管断裂, 而采用浅眼爆破。随着施工经验的积累, 在冻结基岩段掘进已有成功采用深孔爆破的实例^[1]。借鉴冻结基岩爆破的成功经验, 在井筒全断面冻实时, 为提高掘进速度, 人们开始研究并试用爆破法破碎冻土^[2-4]。研究和实践表明, 由爆破引起冻结管断裂的概率几乎为 0, 冻结管断裂真正原因则是冻结壁的过度变形方面进行了大量的试验研究工作, 取得了一定的研究成果^[7,8]。然而, 对于承担大量破碎冻土任务的崩落爆破技术却尚无人研究, 为此笔

者提出增大炮眼间距、减少炮眼数目和降低炸药消耗的立井冻土崩落爆破技术, 并进行了理论分析、模型试验和现场工程实践。

崩落爆破时的重要参数是炮眼密集系数, 即指炮眼间距 E 和最小抵抗线 W 的比值, $m=E/W$ 。增大炮眼间距, 即增大炮眼密集系数, 传统的冻土爆破炮眼密集系数 $m=0.8\sim 1.0$ 。

2 增大炮眼密集系数原理

2.1 改变和增大自由面

在立井冻土崩落爆破时, 增大炮眼间距即增大炮眼密集系数, 能够增加冻土内的剪应力和拉应力。根据利文斯顿爆破漏斗理论, 在装药处于临界抵抗线以内时, 减少抵抗线, 爆破漏斗半径增大, 炮眼

间冻土断裂面渐呈凸出状,新的自由面不再是一个平面,而是一个弯曲的凸面,即相当于可利用的自由面面积增大,为后继爆破创造了有利条件。

当爆破平面自由面时,应力波的传播和反射先在最小抵抗线方向产生裂隙。一旦裂隙形成,爆生气体泄溢,爆炸能量释放,抑制了炮眼周围其他方向裂隙的形成和发展。增大炮眼密集系数即增大眼距,使相邻炮眼间相互作用程度降低,爆后眼间留有一定的凸出,新自由面变成了弯曲面。如果炮眼密集系数选取合理,就可能使得此弯曲自由面上各点的抵抗线值近似相等。这样,后排炮眼装药爆后自由面各方向上所受的爆生气体推力相接近,应力波的作用强度和到达自由面的历时也几近相同。因此,在炮眼周围各个方向上的爆生裂隙都能得以充分发展。

2.2 增强自由面应力波反射作用

爆炸应力波在自由面会发生反射,使自由面附近处于拉伸状态,但能否导致该处冻土的拉伸破坏和抵抗线的大小有很大关系。相比之下,抵抗线较大时,虽然应力波也能发生反射,但因到达自由面历时长,应力波能量耗损多,对介质的反射拉伸破坏作用弱;反之,抵抗线较小时,压缩应力波到达自由面历时短,波的能量耗损减少,自由面上的反射拉伸作用强,自由面附近冻土的破坏程度就强,破坏范围增大。因此,适当增大眼距而减小最小抵抗线即增大炮眼密集系数,能够增强自由面上应力波的反射拉伸对冻土的破坏作用。

2.3 改善冻土中的应力状态

立井冻土掘进炮眼多以同心圆布置,同圈、同段起爆,由于相邻炮眼应力波的相互作用,易在炮眼周围的冻土中造成应力降低区和无拉应力区,产生爆破大块^[9]。对该理论的理解可以先从预裂爆破开始,预裂爆破就因采用较小的眼距而使眼间裂缝先于其他方向形成,并释放应力,形成了介质中的应力降低区和无拉应力区,从而抑制了炮眼周围其他方向裂隙的形成和发展,此时裂缝两旁的介质体一般是比较完整的。随着抵抗线减小,眼距增大,则炮眼周围冻土中径向裂隙的成长便趋于均匀,继续增加炮眼间距到一定数值,亦即刚好能使眼间部分的冻土完全破碎,这时的眼间应力叠加效应已降低到最低限度,此时的破碎数量和破碎质量也达到了该抵抗线下的最佳值。

3 炮眼密集系数理论优化

3.1 最优抵抗线

为获得最大的破碎体积,最小抵抗线 W 应取最

优值 W_0 ,然后在最优抵抗线下确定合理的炮眼密集系数。

单个炮眼装药爆后形成的漏斗体积 V 为

$$V = rWL_b \quad (1)$$

式中: W 为最小抵抗线; L_b 为炮眼深度; r 为爆破漏斗半径。

以 n 表示爆破作用指数,根据其物理意义 $n = r/W$,又据单个药包爆破漏斗的几何关系可知, $W = R \cos \beta / 2$,这里 R 为爆破作用半径,对于松动爆破,其值就等于装药的临界抵抗线 $W_c^{[10]}$,即 $R = W_c$; β 是爆破漏斗角, $\cos \beta / 2 = 1 / \sqrt{1+n}$ 。因此有:

$$W = \frac{W_c}{\sqrt{1+n}} \quad (2)$$

$$r = \frac{nW_c}{\sqrt{1+n}} \quad (3)$$

把式(2)和式(3)代入式(1)中,得

$$V = W_c^2 L_b \frac{n}{1+n} \quad (4)$$

由此可见,当 L_b 一定时, V 是爆破作用指数 n 的函数,并存在有使漏斗体积最大的 n 值。按求函数极值的方法,令 $\frac{dV}{dn} = W_c^2 L_b \frac{(1+n)(1-n)}{(1+n)^2} = 0$,得 $n=1$,即 $r=W$,故有:

$$W_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} W_c \quad (5)$$

3.2 最佳炮孔密集系数

笔者认为,为防止爆破能量过早逸失,提高爆破能量的有效利用率,炮眼连线方向裂隙扩展时间 t_E 应和裂隙扩展到自由面的时间 t_w 相等,即

$$t_E = \frac{E}{2V_c} \sim \frac{E}{V_c} = t_w = \frac{W_0}{V_c} \quad (6)$$

式中: V_c 为爆生裂隙的平均扩展速度。

由此,求得相邻炮眼间距为

$$E = (1.0 \sim 2.0) W_0 \quad (7)$$

因此,比较合理的炮孔密集系数为

$$m = E/W_0 = 1.0 \sim 2.0 \quad (8)$$

4 崩落爆破模型试验

4.1 模型材料和相似炸药

影响爆破作用的因素很多,但归纳起来主要有3个方面,即炮眼布置参数、介质的抗爆特性和炸药爆炸性能。试验所选用的模型和炸药应在此3个方面力求与原型保持相似。几何相似是模型试验的

最基本要求,一般来说容易满足。根据量纲分析原理可得到后两方面的相似条件为

$$\pi_1 = \frac{\rho_m C_p}{\rho_0 D}, \pi_2 = \frac{S_t}{\rho_0 D^2}, \pi_3 = \frac{Q}{\rho_0 W^3} \quad (9)$$

式中: ρ_m 为冻土密度; C_p 为冻土纵波波速; $\rho_m C_p$ 为冻土的波阻抗; ρ_0 为炸药密度; D 为炸药爆速; $\rho_0 D$ 为炸药的波阻抗; S_t 为冻土抗拉强度; Q 为装药量。

上述相似条件的物理意义为: π_1 为冻土的波阻抗与炸药的波阻抗相匹配(对应成比例); π_2 为冻土的强度与炸药的爆轰压力对应成比例; π_3 为在装药密度一定的情况下,装药量和几何尺寸的三次方对应成比例。

模型试验的原型冻土为不稳定表土层中常见的冻结砂土,冻结温度 $T = -10 \sim -12^\circ\text{C}$, 伞形钻架钻眼炮眼直径 $d_b = 55 \text{ mm}$, 原型炸药为岩石乳化炸药。

模型材料为原型砂土,其物理力学性质见表 1。

表 1 冻结砂土的物理力学性质

Table 1 Physico-mechanical properties of frozen soil

冻结温度/ $^\circ\text{C}$	含水率/%	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	弹性模量/ GPa	泊松比	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	纵波速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	横波速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
-12	16	2.05	24.34	0.144	8.16	0.675	3 530	2 278

模型规格 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。试验时砂土按要求冻实,并达 -12°C 。

取几何相似比 $C_L = 1:10$, 孔径 $d_b = 6 \text{ mm}$, 稍有差别。但试验结果证明,在炮孔长径比较大($L_b/d_b > 10$)时,对试验结果影响较小。根据相似准则要求,相似炸药和原型炸药间应满足 $C_p C_D = 1$ 。因岩石乳化炸药(炸药密度为 1.1 g/cm^3 , 爆速为 $4 000 \text{ m/s}$)难以满足小直径下稳定爆轰和传爆的要求,故以起爆药 DDNP 为相似炸药,并特制成小雷管,装药量为 0.3 g , 炸药密度为 1.0 g/cm^3 , 爆速为 $4 200 \sim 4 500 \text{ m/s}$, 满足要求。

试验研究的技术路线为:先由单孔爆破漏斗试验确定该条件下的最优抵抗线 W_0 ,再以其为双孔爆破漏斗试验时的最小抵抗线,只改变眼距进行双孔

爆破漏斗试验,以确定合理的炮眼密集系数 m 。

4.2 单孔爆破漏斗试验

试验眼深 $L_b = 65 \text{ mm}$ 装药量不变,改变抵抗线大小。为防止外界温度对试验结果的影响,试验在冬季的深夜或凌晨进行,并尽可能缩短作业时间。

把按要求冻好的冻结砂土试块从冷冻柜里取出,在振捣面正面钻眼,掏去炮眼内的碎屑,将特制小雷管装至眼底后用湿砂土作为炮泥进行填塞。由于温差,炮泥将很快被冻实并与模型冻结在一起。爆破后量测爆破漏斗参数,见表 2。表中 V 为漏斗体积, q 为炸药单耗。为区分单孔漏斗和双孔漏斗试验,分别在试验编号中加入“D”和“S”。据表 2 绘出爆破漏斗的特征曲线,如图 1。

表 2 单孔爆破漏斗参数

Table 2 Parameters of haplopore explosive funnel

参数	试验序号											
	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12
$q / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1.28	1.19	0.94	1.03	0.90	0.86	0.81	0.78	0.93	0.92	1.16	/
W / mm	40	45	50	50	54	55	58	60	64	65	70	75
V / cm^3	234	253	320	292	335	350	370	385	324	325	258	/

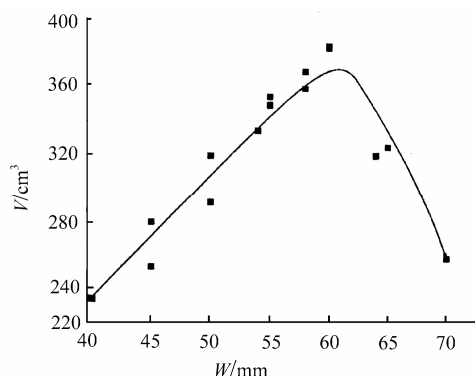


图 1 W 与 V 的关系曲线

Fig.1 Relation curve between W and V

由试验结果可知,在此试验条件下,装药的临界抵抗线 $W_c = 75 \text{ mm}$ 左右,最优抵抗线 $W_0 = 60 \text{ mm}$ 左右,爆破漏斗的最大体积为 $V_0 = 385 \text{ cm}^3$, 体积最大时的最佳的炸药单耗 $q_0 = 0.78 \text{ kg/m}^3$ 。

4.3 双孔爆破漏斗试验

双孔爆破漏斗试验主要目的在于寻求最佳的炮眼密集系数 m 值。试验条件不变,固定眼深、固定药量、固定最小抵抗线,仅改变两炮眼间距。炮眼深度 $L_b = 65 \text{ mm}$, 装药量 $Q_b = 0.3 \text{ g}$, 以单孔试验时的最优抵抗线为此次双孔漏斗试验的最小抵抗线,即取 $W = 60 \text{ mm}$ 。

实测爆破效果如表 3。为能更清楚地反映出各参数间的关系,分别作出如图 2、图 3 所示的炮眼 m V 及 $m-h$ (孔间最大凸量) 间的关系曲线。

由图 2 可以看出, $m = 2.0$ 左右时,爆破体积最大 $V_{\max} = 1\,120\text{ cm}^3$, 对应的炸药单耗 $q = 0.54\text{ kg/m}^3$ 。当 $m < 2.0$ 时,随着 m 值的增大,爆破破碎冻土漏斗体积增大。 m 值较小时,增加的速率较慢;

m 值较大时,增加的速率加快。当 $m > 2.0$ 时,随着 m 值的增大,破碎体积减小,而且下降的速率很快。

而从图 3 可明显看出,当 $m < 2.0$ 时,曲线缓慢上升,速率较低,即随 m 值增大,两炮眼间最大凸量 h 增加较慢;但当 $m > 2.0$ 以后,曲线变陡,上升速率加快,即随 m 值增大,两炮眼间最大凸量 h 增加较快。

表 3 双孔爆破漏斗试验结果
Table 3 Test results of binocular explosive funnel

参数	试验序号												
	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	S-8	S-9	S-10	S-11	S-12	S-13
W/mm	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
E/mm	54	60	72	78	90	90	108	108	120	120	132	150	168
m	0.9	1.0	1.2	1.3	1.5	1.5	1.8	1.8	2.0	2.0	2.2	2.5	2.8
h/mm	0	1	2	3	3	4	5	4	6	8	12	18	28
V/cm^3	780	800	840	860	900	880	990	1\,010	1\,080	1\,120	1\,040	850	720
$q/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	0.77	0.75	0.71	0.70	0.67	0.68	0.61	0.59	0.56	0.54	0.58	0.71	0.83

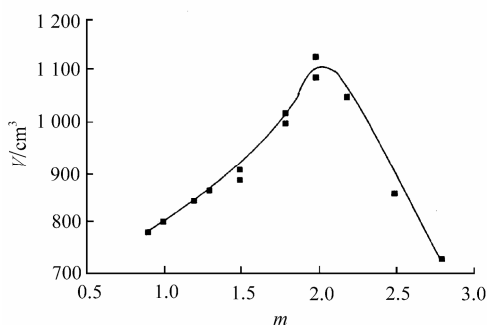


图 2 m 与 V 的关系曲线

Fig.2 Relation curve between m and V

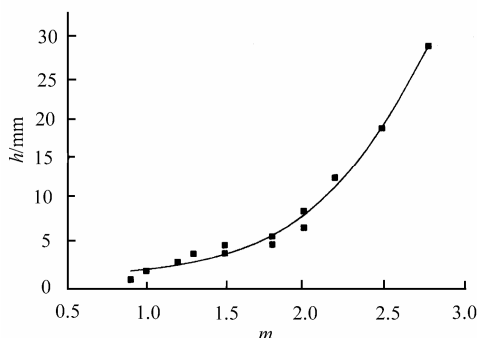


图 3 m 与 h 的关系曲线

Fig.3 Relation curve between m and h

当 m 值较小时,两炮眼装药间的爆破相互作用较强,随 m 值增大,其爆炸应力波和爆生裂隙的相互作用减弱,眼间留下的冻土埂即凸出量 h 值增大。当 m 值大到一定值后,可认为两炮眼间的爆破几乎没有相互作用,此时两炮眼装药将各自形成单独的爆破漏斗。

因此,综合考虑爆破漏斗体积和爆破后两炮眼间最大凸量,在炮眼密集系数 $m = 1.5 \sim 2.2$ 时,既能获得较大的爆破破碎体积,又能保证眼间最大凸

量较小,这在多排炮孔微差爆破时是较为合理的,这也验证了前面的理论分析,即冻土崩落爆破时,爆后炮眼间留有适量的土埂有利于提高爆破效率,改善破碎效果。 $m = 1.5 \sim 2.2$,与前面理论分析的结果 $m = 1.0 \sim 2.0$ 基本相符。

5 工程应用

淮南矿业集团丁集煤矿风井表土段采用冻结法施工,冻结深度为 558 m。施工至 468 m 时井筒冻实,实测井帮温度在 $-18 \sim -20^\circ\text{C}$,尚有 90 m 冻结段,其中有约 42 ~ 46 m 的冻结砂土、25 ~ 30 m 的砾石层、20 m 的风化基岩以及少量的冻结黏土。此段井筒掘进直径为 11.5 m。经研究论证,决定采用钻爆法破土,伞形钻架配备重型导轨式凿岩机钻眼,B25 十字形钎头的钎杆长度为 4.5 m、直径为 55 mm 的岩石乳化炸药为 $\phi 35\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 200\text{ g}$,孔内为非电毫秒雷管,延迟 25 ms;孔外为电雷管,并联网路,地面动力电源起爆。因最内圈冻结管已停用,井帮距第 2 圈冻结管 3.2 m,满足《煤矿安全规程》安全距离的要求^[11]。

根据模型试验结果,并考虑实际立井冻结表土段施工中崩落炮眼成圈弧形布置,爆破时冻土所受夹制作用相对较大,内外排间炮眼也不可能完全布置成三角形,因此,冻土崩落爆破炮眼密集系数的选取应在上面的基础上适当降低。

经试爆调整后冻结砂土段的爆破参数见表 4,实际的炸药单耗为 0.83 kg/m^3 。因伞钻无法靠近井帮作业,周边眼仍基本按崩落眼布置,但钻眼时稍向外斜,爆后配用风镐刷帮。

表 4 井筒爆破参数
Table 4 Blasting parameters of shaft

炮 眼 名 称	眼数 /个	眼深 /m	圈径 /m	眼距 /mm	<i>m</i>	单孔装药 /卷	单孔药量 /kg	装药量 /kg	起爆 顺序
掏槽眼	6	3.0	1.8	940	/	12	2.4	14.4	I
掏槽眼	12	3.0	3.4	880	1.10	12	2.4	28.8	II
崩落眼	15	2.8	5.2	1 080	1.35	10	2.0	30.0	III
崩落眼	18	2.8	7.0	1 210	1.34	10	2.0	36.0	IV
崩落眼	23	2.8	8.8	1 200	1.33	10	2.0	46.0	V
周边眼	30	2.8	10.6	1 100	1.23	10	2.0	60.0	VI
合 计	104	/	/	/	/	/	/	215.2	/

为避免钻眼内水冻结压缩药卷降低其起爆感度,设计采用药卷外套 PVC 塑料管的装药方式,塑料管外径为 45 mm,壁厚为 2.0 mm,药卷直径为 35 mm。装药时先用黄泥将塑料管的一端封实,然后在管内连续装药,起爆药包置于眼口第 2 个药卷处,即采用正向装药结构,最后以黄泥封堵管口。管两端封填长度为 200 mm,这样可以使炸药与水隔开。由于塑料套管有一定的强度,即便水结冰使塑料套管产生小量变形,但由于塑料管内径向尚有一定的空间,也不会使塑料管内的炸药受压而变形或密度增大,保证乳化炸药的正常起爆和传爆。

由于采取了防止炸药拒爆的有效措施和非电起爆系统,在掘进爆破中,没有出现拒爆现象。采用直眼掏槽和大孔距崩落爆破技术以及合理的延迟时间间隔,并调整、优化了爆破参数,取得了良好的爆破效果,炮眼利用率达到 80 % 以上,爆破块度均匀,上抛量少,凿井设备无损;炮眼数目和爆破材料消耗较普通崩落爆破减少 15 % ~ 20 %;冻结管和冻结壁保持完好,既保证了施工安全,又提高了掘进速度。验证表明,一个段高(2.5 m)循环的时间缩短了 1 倍以上。

参 考 文 献

- [1] 邓光辉, 钱会军, 王鹏越. 井冻结基岩段的深孔爆破技术探讨[J]. 江苏煤炭, 2002,(3):15—16.
DONG Guang-hui, QIAN Hui-jun, WANG Peng-yue. Study on deep-hole blasting in frozen rock in shaft[J]. *Jiangsu Coal*, 2002,(3):15—16.
- [2] 张馨. 表土冻结段施工钻爆设计与实践[J]. 焦作工学院学报, 1996, 15(6):15—19.
ZHANG Xin. Drill and blasting design and practice of surface soil frozen segment construction[J]. *Journal of Jiaozuo Institute of Industry*, 1996,15(6):15—19.
- [3] 张甫之, 崔建井. 立井冻结段爆破施工安全技术[J]. 煤炭工程, 2003, 22(2):61—63.
ZHANG Pu-zhi, CUI Jian-jing. Safety technique of blasting construction in vertical well frozen segment [J]. *Coal Engineering*, 2003,22(2):61—63.
- [4] 韩光利, 杨满春. 冻结段爆破技术研究[A]. 中国建井技术五十年[C]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999.
- [5] 姜玉松, 刘彭. 冻结地层爆破施工的技术与安全[J]. 东北煤炭技术, 1998, (5): 35—37.
JIANG Yu-song, LIU Peng. Technique and safety of blasting construction in frozen stratum [J]. *Northeast Coal Technique*, 1998,(5):35—37.
- [6] 杨维好, 黄家会. 冻结管受力分析与试验研究[J]. 冰川冻土, 1999, 21 (1): 33—38.
YANG Wei-hao, HUANG Jia-hui. Theoretical analyses and experimental research on stresses in freezing pipes[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999,21(1):33—38.
- [7] 宗琦, 马芹永. 冻土光面爆破参数模型试验研究[J]. 冰川冻土, 1998, 20 (1): 60—63.
ZONG Qi, MA Qin-yong. Experimental study on parameters of frozen soil smooth blasting[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 20(1):60—63.
- [8] 宗琦, 马芹永, 王从平. 立井冻土爆破的理论与实践[J]. 冰川冻土, 2002, 24 (2): 192—197.
ZONG Qi, MA Qin-yong. Theory and practice of frozen soil blasting in shaft [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002,22(2):192—197.
- [9] 宗琦. 大块区成因及范围的应力波理论分析[J]. 爆破, 1992, 9(2): 10—12.
ZONG Qi. Analysis about the technical and range of large block essential to stress wave theory[J]. *Blasting*, 1992, 9(2): 10—12.
- [10] 王文龙. 钻眼爆破[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1989.
- [11] 《煤矿安全规程》编写组. 《煤矿安全规程》[M]. 北京: 中国法制出版社, 2005.