裂隙岩体爆破最小抵抗线探讨

中国地质大学 何思为 陈庆寿 张拔川 张杰坤

提要 以岩体中结构面(裂隙)特性作为岩石破裂的控制变量,运用弹性力学求解问题的方法,建立了最小抵抗线计算模型,具有一定的理论和实际应用价值。

一、前 言

最小抵抗线的研究一直为爆破界 所 重 视。多年 来,人们在矿山岩石开采实践活动的基础上,建立过 一些有关最小抵抗线计算的经验、半经验公式。它们 的共同点是未把结构面作为岩石破碎的控制变量,而 矿山采场中爆后碎块绝大部分都为结构面切割而成是 一客观事实。因此,按这些公式求出的最小抵抗线很 难不偏离实际。天然岩体最大特征就是含有结构面。 结构面在强度上正好是薄弱环节,它是导致岩体破裂 的矛盾的主要方面。抓住结构面作为控制变量建立抵 抗线求解公式,我们深信按此求出的抵抗线,与实际 抵抗线的偏差应更小一些,这一工作无论在理论和应 用上都应是十分有意义的。

二、问题简化

岩石爆破过程十分复杂,要把该过程的每阶段都 摸清,目前是非常困难的。从实际应用出发,依据爆 炸与应力波传播的特点,我们可以忽略某些环节使问 题得以简化,从而求出问题的解答。简化是否合理, 衡量的标准就是视其结果是否可为实践所验证。

1. 抵抗线主要与应力波作用有关

应力波作用引起岩石初始破裂,爆生气体在此基础上进一步扩展并使岩体整体抛掷,这是爆破界人所 共知的基本观点。在双组结构面模型的动光弹试验中,在应力波为主要作用的时间内(t<160 µs),初始 裂纹扩展(应力花移动,见图1)长度已为孔径的 20倍。可以说,当岩体结构、孔径一定的条件下,应 力波参数决定了初始破裂长度。如果初始破裂相对于 抵抗线过长,将会使随后的部分气体作无用功,如果 初始破裂相对于抵抗线过小,岩石难以充分破碎。抵 抗线大小取决于初始破裂,而初始破裂长短又取决于 应力波。故把应力波作用作为抵抗线计算的应力边 界。

2. 应力波传播过程

(1) 结构面在应力波传播过程中的作用。理论



图 1 破裂扩展(应力花移动)的动光弹照片 (t=1300 µs)

上,应力波传播到结构面,将发生透射和反射。若结 构面闭合,其厚度小于波长,反射波作用就可忽略不 计了。在双组结构面爆破试验的动光弹测试中也证实 了这一结论。如图2所示,应力波条纹除了在最小抵



图 2 结构面及自由面反射作用强弱的动光弹照片 (t=40 µs)

抗线方向上受自由面反射拉伸波作用发生变化外,其 它三方向上应力波条纹与均质体中应力波条纹几乎完 全一样,这有力地证明了结构面反射作用 微 弱 的 结 论。实际上,若把每一条结构面的反射,透射量大小 都考虑进去,大大地增加了问题的复杂性,同时也没 必要这样做,因不断的反射使应力波受一定程度的 "滞留",而裂隙(结构面)的存在将使岩体整体刚 度减小,导致波速降低。在应力边界条件中,也把介 质中的波速考虑进去了。于是,结构面对应力波传播 的直接作用没有必要考虑了。

(2)传播时间过程的简化。爆轰波进入裂隙岩体转为冲击波、应力波,对于距爆孔一定距离的某点 P,如果裂隙越多,应力波到达P点所需时间;越 长,波速则越低,裂隙对应力波的宏观作用就以波速 表征了,以速度代时间,这样就可避开时间进行抵抗 线求解。

3. 结构面在破裂发展过程中的作用

岩石某点的初始破裂取决于两方面:(1)应力 波随距离变化不断衰减后在该点的应力大小;(2) 该点的始终不变的强度。结构面强度低,破裂沿结构 面呈优势破坏。结构面上的强度指标即为抵抗线计算 的依据。

4. 自由面上虚孔与爆孔共同作用

假设在自由面上与爆孔距离最短的一点正好是一 虚孔中心, 虚孔尺寸与实孔相同。实孔为压缩波源, 虚孔为反射拉伸波源。两者初始作用时间相差 Δt。应 力波波速远大于破裂传递速度,在 Δt 时段 内,一般 破裂是未发生的。如图 2 所示,孔径 3mm、最小抵抗 线 6cm、Δt<30μs 就开始产生反射拉伸波。因此,我 们从断裂发生的角度认为实孔的压缩波和虚孔产生的 拉伸波是同时作用在被爆岩体中。这一基本观点建立 在"孔间破裂首先从孔壁开始"的破裂机理的基础之 上。

基于上述,我们可以开始拟建版抗线计算模型。

三、抵抗线计算模型

我们研究的对象是被爆岩体。由于虚孔的假设使 我们研究的问题为"两级"对称问题。如图3所示。 第一级对称是相对虚、实孔而言(是由虚孔和实孔同 时存在而产生)。其应力状态亦在该图中示出。第二 级对称即爆孔周围应力状态的轴对称(相对于 < 轴)。 象其它对称性一样,这种对称性应属被爆系统本身所 固有的。根据分析,我们可以预计到抵抗线 !! 的函 数形式为: $W = f(P, \alpha, c, \varphi, a)$ 式中: P一孔璧上的冲击波压力 (kg/cm²),

 $(P = \frac{1}{8} \rho \cdot D^2 \cdot \frac{2 \rho_1 c_1}{\rho_0 D + \rho_1 c_1} , \rho_0 为炸药密 度,$

D为爆轰波传播速度, Pi 为介质密度, ci 为应力波



图 3 裂隙岩体爆破虚、只孔共同作用的物理模型示 意图 1一实孔;2一压缩波区;3一拉仲波区;4一自由面;

5一虚孔;6一结构面 注:抵抗线W为压缩波破裂区和拉伸波破裂区:之叠加

在介质中的波速)。

α一两组结构面与自由面的交角(*)。相当于主结构面与自由面夹角。

c 一结构面凝聚力,是结构面强度指标之一 (kg/cm²)。

φ一结构面内摩擦角(°),也是结构面强度指标 之一。C、φ的变化具有一致性。

a 一孔径的 $\frac{1}{2}$ (半径),单位为 cm。

兹求解如下。

1. 应力函数φ的确定

在压波区,爆孔周围的应力状态是对称于通过*z* 轴的任一平面的,为轴对称应力。因此可设:

$$\varphi = \varphi(r)$$

令 x 方向, y 方向体力为零,则
 $\sigma_r = \frac{1}{r} \frac{d\varphi}{dr} \quad \sigma_s = \frac{J^2 \varphi}{r} \quad \tau_{rs} = \tau_s$

由相容方程
$$\left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{d}{dr}\right)^2 \varphi = 0$$
 左边展开,

r = 0

得

$$\frac{d^{4\varphi}}{dr^{2}} + \frac{2}{r} \frac{d^{3}\varphi}{dr^{3}} - \frac{1}{r^{2}} \frac{d^{2}\varphi}{dr^{2}} + \frac{1}{r^{3}} \frac{d\varphi}{dr} = 0$$

为了求解这一常微分方程,引用变换式 $r = e^{t}$ 得

$$\frac{d^2\varphi}{dr^2} = \frac{1}{r^2} \left(\frac{d^2\varphi}{dt^2} - \frac{d\varphi}{dt} \right)$$
$$\frac{d^2\varphi}{dr^3} = \frac{1}{r^2} \left(\frac{d^2\varphi}{dt^2} - \frac{d\varphi}{dt} \right)$$
$$\frac{d^3\varphi}{dr^3} = \frac{1}{r_3} \left(\frac{d^3\varphi}{dt^3} - 3 \frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2 \frac{d\varphi}{dt} \right).$$

$$\frac{d^4\varphi}{dr^4} = \frac{1}{r^4} \left(\frac{d^4\varphi}{dt^4} - 6\frac{d^3\varphi}{dt^3} + 11\frac{d^2\varphi}{dt^2} - 6\frac{d\varphi}{dt} \right)$$

整理后得: $\frac{d^4\varphi}{dt^4} - 4 \frac{d^3\varphi}{dt^3} + 4 \frac{d^2\varphi}{dt^2} = 0$ 这一常系数常 微分方程的特征方程 $\lambda^4 - 4 \lambda^3 + 4 \lambda^2 = 0$ 有两 对 重 根 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$ 以及 $\lambda_3 = \lambda_4 = 2$,该方程通解为:

$$\varphi = At + Bte^{2t} + Ce^{2t} + D$$

t=lnr. 故通解的形式为

$$\varphi = A \ln r + B r^2 \ln r + C r^2 + D \qquad (1)$$

这就是要确定的应力函数。

2. 应力分量

(1)应力分量的通解形式:将(1)式分别代
1 40 #0

人
$$\sigma_r = \frac{1}{r} \frac{d\varphi}{dr}$$
, $\sigma_{\theta} = \frac{d^2\varphi}{dr^2}$, $\tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = 0$ 得

$$\sigma_{r} = A/r^{2} + B(1+2\ln r) + 2C$$

$$\sigma_{\theta} = -A/r^{2} + B(3+2\ln r) + 2C$$

$$\tau_{r,\theta} = \tau_{\theta,\tau} = 0$$
(2)

(2)式即为应力分量的通解形式。其常数 A、B 和 C,则由下列边界条件得出。

(2) 边界条件

根据位移单值条件, B=0, 于是(2)式变为:

$$\sigma_{r} = A/r^{2} + 2C$$

$$\sigma_{\theta} = -A/r^{2} + 2C$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = 0$$

$$(3)$$

由图 3 示出,爆孔周边上冲击波压力(径向压力) σ_r = - P, 而 σ_i 的大小为:

$$\sigma_{\theta} = \int_{0}^{2\pi} \frac{P \cdot \frac{d}{2} \cdot d_{\theta}}{\pi d} \left(1 + (2 - \mu) \cos \theta + \frac{\sin \theta \cdot \cos \theta}{1 - \cos \theta} \right) = \frac{P}{2\pi} \theta \Big|_{0}^{2\pi} = P.$$

 σ_{a} 当r=1 的点上 $\sigma_{a}=0$ 。因压缩波与拉伸波 共 同 作 用使这一个面变成了"中性"面。因此应力边界条件 可以表示为: $(\sigma_{a}), r_{a}=P$ $(\sigma_{a}), r_{a}=0$,将这二式 代 入 (3) 式得:

$$A = \frac{l^2 a^2 P}{a^2 - l^2} \qquad 2 C = \frac{P a^2}{a^2 - l^2}$$

式中 a-孔半径(cm); l-孔到"中性面"(即两 孔中点)的距离,它是抵抗线 W 的一半,(m)。

(3) 任一点的应力

分别将2C和A代入(3)式得:

$$\sigma_{r} = \frac{Pa^{2}(r^{2} + l^{2})}{r^{2}(a^{2} - l^{2})}$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{Pa^{2}(r^{2} - l^{2})}{r^{2}(a^{2} - l^{2})}$$

$$(4)$$

注意,如图3所示, θ变化是从横轴 x 的正向开

始, $(\sigma_{\theta})_{r-1} = 0$ 也局限在 $\theta = 90^{\circ}$ 的点上。 所以我们 讨论的 r 是在 $\theta = 90^{\circ}$ 的各点。且在 $\theta = 90^{\circ}$ 的 各 点 上, $\sigma_{r} = \sigma_{1}, \sigma_{\theta} = \sigma_{3}$ 。

3. 破裂判据

虽然岩石中结构面破裂状态是处在高温高压下, 由于过程的瞬时性,我们认为属于脆性断裂。因而应 用摩尔理论作为判据,即

$$\tau_a = \sigma_a \cdot \mathrm{tg}\varphi + C \tag{5}$$

-----与最大主应力轴线夹角为α的结构面上剪 应力; σ.----与τ.同为结构面上应力分量,是法向 应力; C和φ分别是结构面上的凝聚力和内摩擦角。

$$\sigma_{\alpha} = Pa^{2} \left\{ \frac{r^{2} + l^{2} \cos 2\alpha}{r^{2} (a^{2} - l^{2})} \right\}$$

$$\tau_{\alpha} = Pa^{2} \left\{ \frac{l^{2} \sin 2\alpha}{r^{2} (a^{2} - l^{2})} \right\}$$
(6)

4. 抵抗线的最终确定

将(6)式代人(5)式,并将r=1代入(6) 式,得最大破裂长度为:

$$l^{2} = a^{2} \left\{ \frac{P(\operatorname{tg}\varphi(1 + \cos 2\alpha) - \sin 2\alpha) + C}{C} \right\}$$

$$\overrightarrow{\mathbf{g}} \quad l = a \cdot \sqrt{\frac{P(\operatorname{tg}\varphi(1 + \cos 2\alpha) - \sin 2\alpha) + C}{C}}$$
(7)

在拉伸被区,岩石在应力波作用下破裂范围也应是 1,所以抵抗线(W)为:

$$W = 2 l = 2 \alpha \sqrt{\frac{P(tg\varphi(1 + \cos 2\alpha) - \sin 2\alpha) + C}{C}}$$
(8)

(8) 式表明: W 是压缩波和拉伸波共同作用 使 岩 石破裂的范围。

5. 公式讨论

(1) 在 P,C、 φ、 α 不变的条件下,α 越小,即 两组结构面与最大主应力轴夹角越小,则 W 越大, 但这种情况不利于岩石爆碎,且会使排距减小。

(2)α=0,表征三种情况: α没有结构面的均质体; δ结构面杂乱无章排列切割为碎裂体的岩体; σ也可以是两组结构面相互垂直且性质相同的岩体。此时(8)式变为;

$$l = 2 a \sqrt{\frac{2 P \cdot t_{g} \varphi + C}{C}} \qquad (9)$$

四、实际资料验证

现将我国几大铁矿矿山抵抗线设计资料与理论值 比较。因这些矿山未考虑结构面为控制变量,但在相 同孔径条件下 W 值却很相近。我们假定岩石破裂沿 结构面发生,根据有关资料,我们取结构面 $C = 50 \text{ kg}/\text{ cm}^2$, $\varphi = 30^\circ$,按按油炸药计算(因各矿山都用铵油 炸药),代入公式(9),比较理论值与实际值的误差。如表1所示(注,铁矿矿山的结构面多为铁质胶结,其强度比较相近)。

矿名	孔径	实际抵 抗 线	理 论 抵抗线	误差
	(cm)	(m)	(m)	(%)
东鞍山铁矿	25	6.5	5.742	- 13
南山铁矿	25	5.5	5.742	+ 4.2
齐大山铁矿	25	6	5.742	~ 4.4
峨口铁矿	25	5.5	5.742	- 4.2
大姑山铁矿	31	7	7.12	+ 1.6
兰山铁矿	20	4.5-5	4.5936	-3.4
朱家包包铁矿	20	4.5-5	4.5936	- 3.4
水丁铁矿	31	7	7.12	+1.6

表 1 W*与W*出较

注:炸药密度 1kg/cm³; 爆轰波速 3600m/s; c=50kg; φ=30°;铁矿密度 3.2t/m³;波速 2500m/s

各矿山实际抵抗线是经无数次试验和生产的平均 值,我们用抵抗线计算公式的特殊情况(9)式进行 理论计算,除东鞍山铁矿外,其它矿山的 W_{*} 与 W_# 误差在 5 %内,这充分说明我们建的公式是站得住脚 的,是可为实践检验的。

五、结 论

科学总是在不断发展,把结构面特性作为控制变 量求解抵抗线计算公式,这是一种新的尝试,文中不 足之处,望专家,同行们给予指正。

主要参考文献

- 1. J. 普基拉(芬兰)主编:露天凿岩爆破手册:冶金工业 出版社, 1980.
- 张奇·应力波在节理处的传递过程,岩土工程,1986
 (6),p99-105.
- 3. 孙广忠著,岩体结构力学,科学出版社,1989.
- Thompson S. D. Correcting the Burden for Heave Blasting. Mining Engineering, 1985(37), p 253-255.
- Worsey. P. N, QingShou Chen. The Effect of Rock Strength on Perimeter Blasting and the Blastability of Massive Rock. 12 th Annual SEE Conferenceon Explosive and Blast Tech. —Mini Research Symp. 1986.

Discussion on the Minimum Resistance Line in Explosion of Fissured Rock Body

He Siwei, Chen Qingshou, Zhang Bachuan and Zhang Shukun

China University of Geosciences (Beijing)

Abstract The minimum resistance line calculation model is established by selecting the properties of structural face (fissure) in rock body as the controlling variable for rock breaking and using elastic mechanics to solve the problems. This model has a certain theoretical and applicable value.

(上接第60页)

●10月8日,中国钻探代表团参观了 Oberpfalz 的 KTB 先导孔 (Pilot Hole) 钻探现场,学到了很多 科学深孔钻探方面的新知识。

●10月13日。KTB要求我方为他们研制5.5 in 绳索取心钻具配套的大口径射流式SSC-140液动锤 2套、6 in×94 mm (OD×1D)孕镶金刚石取心钻头 4只。这些定货已于1990年初交付,以备KTB钻进 结晶岩试用。分别由长春地院、探矿工程研究所供货。

●已故著名地质学家李春昱先生生前曾致函刘广

志,表示支持在我国开展科学深钻的前期工作,揭示 深部地质奥秘,丰富地质科学,为国际岩石圈计划作 出中国应有的贡献。

●地矿部副总工程师李廷栋先生曾致函刘广志, 指出科学深钻不仅对地质科学的发展起促进作用,还 可以带动多学科的进步,并对国防科学也有重要意义。 (待续)

"中国大陆科学深钻先行研究"项目组钻探分组 张 伟 辑 地矿部高咨中心 刘广志 校