

岩石孔底断裂控制机理研究*

Fracture Control Mechanism at the Bottom of the Charged Holes in Rock

谭卓英 吴恒* 王思敬*** 张永双*** 张建国****

Tan Zhuoying Wu Heng Wang Sijing Zhang Yongshuang Zhang Janguo

(广西大学资源与环境学院 南宁市西乡塘路 10号 530004)

(College of Resources & Environment, Guangxi Univ.,

10 Xixiangtanglu, Nanning, Guangxi, 530004, China)

摘要 在保证垂直槽孔断裂成型并全面贯通的孔压下,对孔底水平截面 I-II型复合裂纹断裂机理及断裂与装药结构的关系等进行了分析,建立了断裂判据,初步确定了裂纹扩展的方向及预应力对断裂的贡献。其结果与工程实践相吻合。

关键词 切槽 预应力 孔压 装药长度

中图分类号 O 346.1

Abstract Under the premise of grooved-hole pressure which can completely split the section between the axes of vertical grooved-holes, analysis about fracture mechanism of I-II co-crackle on level section at the bottom of the holes and relationship between fracture function and charged structure are carried out. At the same time, fracture criterion is established, crackle extending direction and its contributions to fracture function from preset tensile stress are determined quantitatively and tentatively. The results of which agree with the engineering practice.

Key words grooved-hole, preset stress, hole-in-pressure, charged length

1 力学模型及参数设定

1.1 力学模型的提出

石材开采按开采荒料的顺序可分为一段法和两段法。它们之间的区别在于开采单元划分及工序不同而已,单元的开采机理是相同的。在此两类单元的开采中,都存在水平截面(图1)如何与基岩实现有效分离的问题。水平面的分离实际上是 I-II型复合裂纹断裂成型问题。不难理解,在水平面上产生断裂的深度取决于 S 方向炮孔的孔内压力所产生的推力和弯矩。而断裂深度为开采单元的规格所要求,且 S 方向炮孔的孔内压力受垂直断面成型质量的限制。孔内压力过大(大于 69 MPa)^[1]将破坏垂直断面的质量;过小,对水平断面的贡献不大,难以达到要求的断裂深度。而且,因为在水平方向缺乏导裂机制,断裂面的

走向很难控制。由此,提出如下的力学模型以改善水平断裂面的应力状态和实现导裂机制。做法是在垂直 W 方向的自由面、拟定水平断裂的高度上,沿 S 方向布置楔型切槽并通过楔型体预置压力。从而,在拟定断面前方域内预置一个恒定的拉应力场,其作用是弥补水平面上拉应力在 W 方向的衰减和在裂纹前端解除部分约束,实现导裂机制。

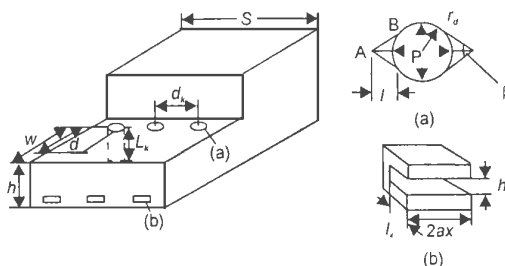


图 1 切槽 - 预应力模型

Fig. 1 Grooved-hole distribution and preset stress model
(a) 槽孔 Grooved hole; 预应力槽 Preset stress groove

1.2 基本假设

从完整基岩上分离岩石,视岩体为均质、连续且各同性材料;炮孔为厚壁圆筒,属平面应变问题;槽孔切槽为宏观裂纹。且因切槽尺度相对孔径很小,

1999-02-01收稿,1999-08-02修回。

* 广西科学技术厅重点技术攻关项目(9645022)及中国科学院资源与生态环境研究重点项目(ZK952-J1-416)支持。

** 广西大学土木建筑工程学院,南宁,530004(College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China)。

*** 中国科学院地质研究所,北京,100029(Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029, China)。

**** 中国长城铝业公司矿山公司张青岗矿,郑州,540041(Zhangqing gang Mine Mine Branch, Great Wall Aluminum Product Corporation of China, Zhengzhou, Henan, 540041, China)。

因此视做 I 型裂纹; 石材开采一般在地表或地表以下较浅处, 不考虑地层压力和地应力的影响; 开采单元具有 2~3 个自由面, 岩体有裂隙时充分利用裂隙断裂在成型上的分割作用和减压作用。开采单元仍然符合以上假设

1.3 参数设计

1.3.1 槽孔参数

1.3.1.1 炮孔参数

爆破参数有孔半径 r_d , 孔间距 d_k , 孔内压力 p_{bb} , 最小抵抗线 w , 孔深 l_k 及台阶高度 h 根据陈益蔚、吴立及张志呈等人的研究^[2~4], 当孔径 $r_d = 20$ mm 时, 孔间距 d_k 为 300 mm~600 mm, 这里取 d_k 为 400 mm。最小抵抗线 w 和孔深 l_k 视开采岩石单元规格而定。边界中心到自由面的距离一般为 200 mm~400 mm。由此, 最小抵抗线 w 则为 w 方向的孔间距与边孔中心到自由界面的距离。这里, 取 w 为 750 mm, 孔深 l_k 为 1200 mm。台阶高度主要视预应力切槽作业的施工设备而定。手工开凿时, 取 $h = (l_k + 380)$ mm, 即 h 为 1580 mm。孔内压力与岩性有关。几种岩石的力学参数及孔压如表 1。

表 1 几种岩石的裂纹扩展压力^[5]

Table 1 Tensile strength and hole pressure when crackles develop

	K_{IC}	抗拉强度 Tensile strength	临界扩展压力 Critical expanding pressure
	(kgf/cm ^{1.5})	(kgf/cm ²)	(MPa)
花岗岩 Granite	60.4~65.9	4.39	39.0~58.5
山东大理岩 Shandong marble	65.7~68.0	7.51	66.8~100.2
钠化大理岩 Sodium-ionized marble	42.7~44.2	4.83	43.0~64.5
砂岩 Sandstone		1.79	15.8~23.7
灰岩 Limestone	46.3	6.1	54.2~81.3

1.3.1.2 切槽参数

切槽参数包括切槽张角 U , 切槽深度 l , 切槽尖端曲率半径 d 以及切槽宽度 b 和切槽方向 (图 1. a) 根据日本渡道明、陈益蔚、吴力及张志呈等人的研究^[1~4], 在 r_d 为 20 mm 时, U 取 600 较佳, l 取 (0.2~0.4) r_d 为宜。这里, 取 l 为 6 mm, d 为 1.3 mm, 切槽方向为预断面方向, 且沿孔深全长开辟切槽。

1.3.2 预应力槽结构参数

预应力槽结构包括楔型开口的高度 h_x , 宽度 $2a_x$, 切槽深度 l_x , 切槽张角 U_x (图 1. b)。

2 应力分布

2.1 无预应力槽时的应力分布

2.1.1 垂直断面上的孔间应力分布

考虑相邻槽孔的相互影响时, 孔间拉应力 (最大主应力) 分布如图 2^[5]。

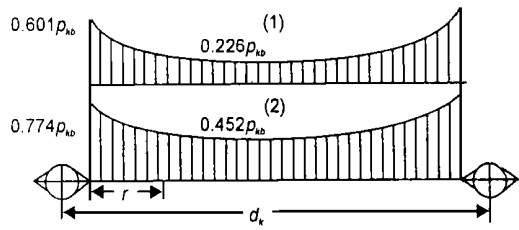


图 2 槽孔间拉应力的分布

Fig. 2 Tensile stress distribution between grooved holes (1) 不考虑相邻孔 Without adjacent hole; (2) 考虑相邻孔 With adjacent hole.

由此可见, 在槽孔间的拉应力分布是比较均匀的, 应力梯度较小。在切口尖端 $r = r_d$ 处的应力值是孔间中点应力最低点的 1.7 倍左右。均布的拉应力有利于孔内压力的控制, 可大大改善沿断裂面爆破能量的分布, 保证孔壁附近区域不发生破碎而形成光滑无裂纹的断面。

2.1.2 边孔到自由界面的应力分布

拉应力分布如图 3。切槽尖端与自由界面处拉应力比值约为 3.1。可见, 拉应力的衰减梯度较两孔间衰减快^[5]。

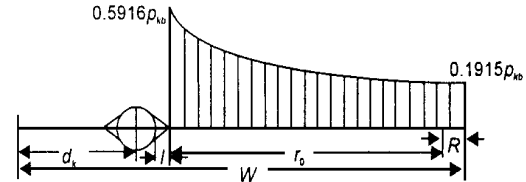


图 3 边孔到自由边界的应力分布^[5]

Fig. 3 Tensile stress distribution between fringe hole and its free boundary

2.1.3 水平断裂面上的拉应力分布

注意到石材开采中, 为减少约束阻力形成多个自由面, 炮孔起爆顺序往往是沿 W 向超前, S 向滞后。延迟间隔为毫秒级。因爆炸反应的时间一般在 10^{-6} s ~ 10^{-7} s 内完成, 应力波在岩石中的传播速度为 5000 m/s 左右 (花岗岩中为 5200 m/s), 应力波从单元体一端传到另一端不足 1 ms。可见, 采用间隔起爆时, 可不考虑 W 向炮孔影响而把分割单元视为有 4 个自由面。如图 4。实际上, 不同的工作平台、单元规格、开采顺序及装药结构会产生不同的动力条件。当采用导爆索水耦合装药时, 孔内压力的合力作用于孔深的中间位置 c , 此时, 将可能剪切平移出岩块而不倾倒。采用 2# 岩石炸药不耦合装药时, 装药长度不到孔深的 1/3, 此时作用力 F 下移到 c_1 点。当采用低能炸药最大装药长度时, F 将上移到 c_2 点。设 F 作用点到 A_1B_1 基线的距离为 x , 则块石单元在 F 作用下剪切并移位:

$$F = 2n(r_d + l)l_k p_{bb} - \epsilon_r s_1,$$

式中: ϵ_r ——岩石材料的抗拉强度; s_1 ——沿 S 向的断裂面积, $s_1 = Sl_k - 2n(r_d + l)l_k$; n ——沿 S 向的炮孔数量。

现假想 AA_1 面分离, 则可将开采单元简化为一厚宽悬臂梁 如图 4. b A_1B_1 面上 A_1 点的弯矩为:

$$M_y = FX. \quad (1)$$

沿 A_1B_1 面上的拉应力:

$$\sigma_y = M_y / I,$$

式中: I ——矩形截面梁的惯性矩 $I = W^2 S / 12$

因此,

$$\sigma_y = 6 \{ 2n(r_d + l) \sum_{k=1}^n p_{kb} - \sigma_c [Sk - 2n(r_d + l)lk] \} X / W^2 S. \quad (2)$$

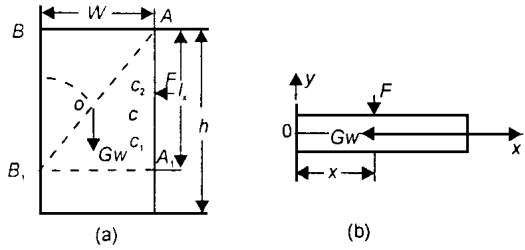


图 4 水平断裂面形成机理示意图

Fig. 4 Shaping mechanism on a level section

下面, 以一个开采单元进行分析, 取 $n = 3$, 并将 1. 3 中的参数代入 (1)、(2), 则:

$$M = (5.616p_{kb} - 7.728\sigma_c)x,$$

$$\sigma_y = 2(0.14976p_{kb} - 0.20608\sigma_c)xy \cdot 10^{-3},$$

$$\sigma_{y,y=w/2} = 2(0.14976p_{kb} - 0.20608\sigma_c)x,$$

其中: $\sigma_{y,y=w/2}$ 的计算值见表 2

按照摩尔 - 库仑定理, 水平断裂面发生剪切破坏的剪力:

$$Q = (C + \sigma_y \mu)S = CS + \sigma_y S \mu,$$

式中: C ——岩石材料的内聚力 (kgf/cm^2); μ ——岩石材料的内摩擦系数; G ——剪切岩石的重量 (kg).

沿水平面发生剪切的条件为: $F \geq Q$.

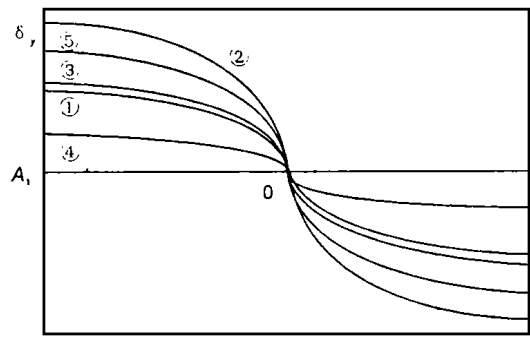


图 5 σ_y 在 A_1B_1 面上的分布

Fig. 5 Stress distribution (σ_y) along section A_1B_1

- ① 花岗岩 Granite $\sigma_y = 2.0950xy$; ② 山东大理石 Shandong marble $\sigma_y = 3.5889xy$; ③ 钠化大理石 Sodium-ionized marble $\sigma_y = 2.3104xy$;
- ④ 砂岩 Sandstone $\sigma_y = 0.8481xy$; ⑤ 灰岩 Limestone $\sigma_y = 2.9116xy$

从表 2 知, 在既定炮孔压力 (保证垂直断裂面不破坏) 下, 作用的外动力 F 小于剪断岩石所要求的内力 Q , 即不能发生纯剪断。但实际情况是炮孔孔壁存在许多微裂纹, 而孔底最为脆弱, 在弯矩作用下容易产生拉应力破坏, 裂纹一旦起裂, 便会在剪切、弯矩及压气楔入作用下迅速扩展。图 4 中的中性轴将向压应力一侧移动, 压应力区不断减少, 直到出现全拉应力区最后沿 A_1B_1 面断裂贯通。

2. 1. 4 孔底开裂的临界装药长度

水平截面 A_1B_1 承受剪力 F 弯矩 M 及自重 G_w , 处于剪、拉、压的复杂应力状态。注意到岩石是一种内含微裂隙的脆性材料, 利用 Griffith 准则:

$$f_{xy}^2 = 4\sigma_c(\sigma_y - \sigma_y),$$

式中: f_{xy} ——截面 A_1B_1 上的剪应力, $f_{xy} = F/SW$, 在孔内压力、开采规格一定时, f_{xy} 即确定; σ_c ——岩石单轴抗拉强度 (取负值)。

表 2 几种岩石的弯矩及剪力

Table 2 Force parameters on level section at the bottom of a grooved-hole

岩石 Rock	内摩擦系数 Coefficient of friction-within	内聚力 Cohesion C (MPa)	容重 Weight per unit volume V (g/cm^3)	$\sigma_{y,max} \times 2x$ (kgf/cm)	Mx ($10^6 \text{kgf} \cdot \text{cm}$)	F (10^6kgf)	$(CS + Mgw)$ (10^6kgf)
花岗岩 Granite	1.8	40	2.6	49.36~78.56	1.85~2.95	1.85~2.95	5.77
山东大理岩 Shandong marble	1.2	30	2.7	84.56~134.58	3.17~5.05	3.17~5.05	4.13
钠化大理岩 Sod- ium-ionized marble	1.2	27	3.6	54.44~86.64	2.04~3.25	2.04~3.25	3.87
砂岩 Sandstone	1.2	12	2.2	19.97~31.80	0.75~1.19	0.75~1.19	2.62
灰岩 Limestone	1.2	30	2.6	68.60~109.18	2.57~4.09	2.57~4.09	4.05

由此,可确定岩石拉伸断裂破坏时的临界压力 σ_y ,并确定孔底沿 A_1B_1 截面的临界装药长度 $2x$ 。其计算值见表3

表3 孔底开裂临界装药长度 $2x$ (* 孔压取上限值)

Table 3 Critical charged length ($2x$) when crackles develop at the bottom of a hole

岩石 Rock	σ_y 表达式 σ_y expression	f_{xy} (kgf/cm ²)	σ_t (kgf/cm ²)	X (cm)	$2x$ (cm)
花岗岩 Granite	2.0950xy	491.7	43.9	17.0	34.0
山东大理岩 Shandong marble	3.5889xy	841.7	75.1	17.0	34.0
钠化大理岩 Sodium-ion- ized marble	2.3104xy	541.7	48.3	17.0	34.0
砂岩 Sandstone	0.8481xy	198.3	17.9	16.7	33.8
灰岩 Limestone	2.9116xy	681.7	61.0	16.9	33.8

从表3可看出,在装药长度为34cm左右时,若孔内压力能保证垂直断面开裂和贯通,则也能保证孔底沿水平断面 A_1B_1 开裂。采用 \mathcal{A} 岩石等炸药时,装药长度取值为 $(1/3 \sim 1/2)$ 孔深。可见,理论的装药长度和实际的装药长度是吻合的。分析可知,增大装药长度,将导致 F 上移,使作用在水平截面上的弯矩增大,拉应力增大。因此,在保证爆炸能不变的情况下,采用线性装药会改善岩石断裂成型的效果。在采用导爆索水耦合装药时,装药长度为孔深全长,在截面上作用的弯矩最大,拉应力也最大。此时,沿水平截面断裂的可能性也最大。这就是非裂隙岩体采用导爆索水耦合破岩效果好的原因。

2.1.5 断裂判据

在爆炸压力作用下,孔底沿 A_1B_1 截面起裂后,只要保证有足够的能量就能使裂纹扩展。但裂纹扩展的能量必须有效地保持在使裂纹不发生分支以内。否则,有损断面及石材质量。在图4中,随着裂纹的产生和扩展, O 点将右移,压应力区将不断减少,拉应力区不断增大。由于裂纹在扩展过程中,除受拉应力作用外,还有剪力及压气的楔入作用;因此,水平截面上的断裂属I-II型复合裂纹。且是半边裂纹的平面应变问题。因此,裂纹尖端附近的应力分量为:

$$\sigma_{yy} = \frac{k_{IC}}{2c_r} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{k_{IIC}}{2c_r} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}, \quad (3)$$

式中: k_{IC} ——I型半边裂纹的应力强度因子。此处为动载应力强度因子, K_{IIC} 为:

$$k_{IC} = Y \sigma_a \sqrt{c_a},$$

式中: Y ——孔底I型裂纹的形状及尺寸等的修正系数; K_{IIC} ——II型半边裂纹的动载应力强度因子, K_{IIC} 为:

$$K_{IIC} = \frac{3(l - 2\nu) / [2(l - \nu) - \nu^2] K_{IC}}{2c_r},$$

式中: ν ——岩石材料的泊松系数。

在裂纹扩展面 x 轴上, $\theta = 0$,式(3)为:

$$\sigma_{yy, \theta=0} = K_{IC} / \sqrt{2c_r},$$

同理可得:

$$\begin{cases} \sigma_{yy, \theta=0} = K_{IC} / \sqrt{2c_r}, \\ \sigma_{yy, \theta=0} = K_{IIC} / \sqrt{2c_r}, \\ \sigma_{xz} = \sigma_{yx} = 0, \sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}), \end{cases}$$

裂纹尖端的主应力为:

$$\begin{cases} \sigma_{1,2} = \sigma_{yy} \pm \sigma_{yy} = (K_{IC} + K_{IIC}) / \sqrt{2c_r}, \\ \sigma_3 = \sigma_{zz} = 2\nu\sigma_{yy} = 2\nu K_{IC} / \sqrt{2c_r}, \end{cases}$$

对于韧性较大的岩石,采用VON Mises屈服条件,即

$$\frac{\sigma_{yy}^2}{(\sigma_s/1 - 2\nu)^2} + \frac{\sigma_{xy}^2}{(\sigma_s/3)^2} = 1,$$

则长轴为 $2\sigma_s/(1 - 2\nu)$,短轴为 $2\sigma_s/3$ 的椭圆代表了韧性岩体在孔压作用下裂纹扩展的包络图。当 σ_{xx}, σ_{yy} 位于包络线内时,裂纹不会发生扩展。当位于包络线上时,裂纹处于临界扩展状态。而当 σ_{xx}, σ_{yy} 位于包络线外时,裂纹扩展。其中,有2种特殊情况:(1)拉伸断裂。当 $\sigma_{xy} = 0, \sigma_{yy} > \sigma_s/(1 - 2\nu)$ 时,裂纹扩展,且与 σ_{xy} 无关。对于花岗岩,可计算其临界起裂长度为0.46mm。(2)剪断。当 $\sigma_{xy} = 0, \sigma_{xx} > \sigma_s/3$ 时,裂纹扩展,且与 σ_{yy} 无关。对于花岗岩,计算得其临界起裂长度为0.58mm。从取样所得的微观分析知,炮孔壁上所存裂纹尺度远大于临界起裂长度,一般可达几个毫米至数厘米。因此,对于韧性较大的岩石,宜采用低剪应力断裂。

对于脆性岩石,采用最大正应变理论或Griffith准则。由于裂纹在扩展过程中裂纹的前缘区域会出现小范围的塑性区和应力松弛区,塑性区半径达 10^{-1} mm级。因此,可以认为,即使是脆性岩石,也是韧性与塑性共存的。这样,在裂纹尖端Griffith准则更切实际

$$\sigma_{xy}^2 = 4\sigma_s(\sigma_t - \sigma_{yy}),$$

这说明, σ_{xy}, σ_{yy} 间遵循抛物线的关系。可见,对于脆性岩石,采用低应力剪断为宜。

2.1.6 裂纹扩展方向——裂纹开裂角

对于I-II型复合裂纹,其应变能密度因子 S_y 为:

$$S_y = a_{11}K_{IC}^2 + 2a_{12}K_{IC}K_{IIC} + a_{22}K_{IIC}^2,$$

式中: a_{ij} ——反映裂纹尖端附近弹性应变能密度场的系数。其表达式如下:

$$\begin{cases} a_{11} = (1 + \cos\theta)(1 - \cos\theta) / 16cG, \\ a_{12} = [2\cos\theta - (k - 1)] \sin\theta / 16cG, \\ a_{22} = [(1 + k)(1 - \cos\theta) + \\ (1 + \cos\theta)(3\cos\theta - 1)] / 16cG, \end{cases}$$

式中: k — 系数; $K = 3 - 4$; G — 岩石材料的剪切弹性模量

因梁的对称性,即使随着裂纹的扩展,中性轴移动,在断面上合力为 0,直接利用上述方程对裂纹扩展方向不能求解,这里,分别对 I II 型裂纹的扩展角进行求解,然后作出估计。

对于 I 型裂纹:

$$S_y = Y^2 e^2 a (1 + \cos\theta_1) (3 - 4\nu - \cos\theta_1) / 16,$$

按照 S 理论,有

$$\frac{\partial S_y}{\partial \theta_1} = 0, \text{ 则 } \theta_1 = 0, \theta_{11} = \arccos(1 - 2\nu),$$

在弹性范围内,对于坚硬岩石,此时,

$$\frac{\partial S_y}{\partial \theta_1} > 0, \theta_{11} = \arccos(1 - 2\nu), \text{ 当 } S_y \rightarrow S_{\min} = S_c,$$

裂纹开始扩展。

$$S_c = Y^2 e^2 a (1 - 2\nu)^2 / 4G, \quad (4)$$

此时,裂纹的方向为裂纹前缘与 x 轴成 $\theta_{11} = \arccos(1 - 2\nu)$ 的角度。

对于 II 型裂纹:

$$S_y = a_{22} K_{II}^2 = Y_1^2 f_2 a [4(1 - \nu)(1 - \cos\theta_{II}) + (1 + \cos\theta_{II})(3\cos\theta_{II} - 1)],$$

式中: Y_1 — 孔底 II 型裂纹的形状及尺寸修正系数,同理,根据 S 理论得:

$$\theta_{II} = \arccos[(1 - 2\nu) / 3], \quad (5)$$

$$S_c = S_{\min} = Y_1^2 f_2 a (1 - \nu - \nu^2) / 6G,$$

此时,裂纹的扩展方向为 $\theta_{II} = \arccos[(1 - 2\nu) / 3]$

这说明:

1) 裂纹的发展方向与岩石的泊松系数密切相关。岩石越软,泊松效应越大,越易沿着原来的裂纹方向扩展。岩石越坚脆,裂纹越易改变方向,偏离拟定断面破裂。

2) 与裂纹所处的状态有关。当裂纹尖端处于塑性状态时,泊松系数增大,裂纹沿原来方向扩展;当处于弹塑性或弹性状态时,则偏离原来的方向扩展。由式 (4)、(5) 知,只有当 $\nu = 0.5$ 时, $\theta_1, \theta_{II} = 0$, 即只有在 $\nu = 0.5$ 的软岩或裂纹尖端处于完全塑性状态时,才会沿着原来的裂纹方向扩展。对于其它岩石或其它状态,裂纹将改变方向,离开拟定断面。所以,对于 I II 型复合裂纹的扩展方向应位于 θ_1, θ_{II} 之间。以普通花岗岩为例,在弹性范围内 ($\nu = 0.25$), $\theta_1 = 60^\circ, \theta_{II} = 80^\circ$, 若岩石在此范围内发生断裂,裂纹扩展的方向将在 $60^\circ \sim 80^\circ$ 之间。在致密花岗岩中 ($\nu = 0.18$), $\theta_1 = 50.2^\circ, \theta_{II} = 77.7^\circ$, 其扩展方向在 $50.2^\circ \sim 77.7^\circ$ 之间。

此时,裂纹将朝前朝上拉剪,形成偏离 A_1B_1 的断面。这是岩石在低应力状态下发生脆性断裂的情形。

3) 与裂纹前缘区域的约束状况有关。当约束大时,能量密度高,裂纹前缘区域处于三向拉应力状态,进入完全塑性,泊松系数增大,裂纹偏离原位和分支的情况减少;当约束减少,如岩石表面或自由边界附近,将处于低应力状态。此时,裂纹处于弹性或弹塑性状态,岩石发生低应力脆断,裂纹出现改向和分支。

4) 与原始裂纹或人工裂纹的起始方向有关。就切槽断裂而言,即使在爆炸高压应力下,裂纹前缘仍然处于完全塑性状态,如果切槽方向有偏离,断裂面将沿裂纹尖端点切线方向朝应变能密度因子最小的方向扩展,偏离拟定的断裂面方向。由此可见,切槽方位在槽孔破岩中具有十分重要的地位。

3 预应力切槽时的应力分布

从以上的分析可知,由于裂纹前方的约束减少,断裂将偏离拟定截面扩展,影响岩石成型的质量。如果设法改善裂纹前缘域内的应力或在裂纹分支之前实现切槽与裂纹对接,这一状态将得到改善。

假设在裂纹扩展的前方开一预应力切槽(图 1),在切口侧面施加适当的应力 p_x ,则预应力切槽正前方 ($\theta = 0$) 的应力场为:

$$\begin{cases} \epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = K_{IC}' / \sqrt{2c(w - l_x - r)}, \\ \epsilon_{xy} = \epsilon_{xz} = \epsilon_{yz} = 0, \\ \epsilon_{zz} = \nu(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}), \end{cases}$$

式中: K_{IC}' — 预应力切槽的应力强度因子。由下式确定:

$$K_{IC}' = 2Y' p_x \sqrt{l_x / c} \left(\frac{dk}{cl_x} \operatorname{tg} \frac{l_x}{dk} \right)^{0.5} \sin^{-1}(c/l_x),$$

式中: Y' — 周期性 I 型半边表面裂纹的应力强度因子修正系数。当切槽间距远大于槽口尺寸时,可不计切槽的相互影响。 C — 预应力切槽上的施力长度。当沿全长施力时, $c = a_x$, 则

$$K_{IC}' = Y' p_x \sqrt{c l_x} \left(\frac{dk}{cl_x} \operatorname{tg} \frac{cl_x}{dk} \right)^{0.5},$$

则

$$\epsilon_y = \frac{2(1.9968 p_{kb} - 2.7477 \epsilon_1) x y 10^{-3} + K_{IC}' / \sqrt{2c(w - l_x - r)}}{2c(w - l_x - r)}. \quad (6)$$

根据试验和分析计算,式中参数确定如下:当采用 # 岩石炸药时, $2x$ 取 1/3 孔深即 40 cm。预应力槽深度为 5 cm。槽深太浅,对应力状态的改变及导裂的贡献不大,且易破损边壁。槽深太大,施工困难且易产生分离断裂。切槽预应力 p_x 可取槽底裂纹处于临界起裂时的应力值,即 $K'_{IC} > K_{IC}$ 。由此

$$p_x \geq K_{IC} / \left(dk \operatorname{tg} \left(\frac{cl_x}{dk} \right) \right) = 0.75 K_{IC},$$

将参数代入式 (6), 得出裂纹前缘线上的拉应力分布 (图 6), 计算值如表 4

表 4 预应力时几种岩石中沿裂纹前缘的拉应力值 (MPa)

Table 4 Calculated tensile stress value in several representative rocks under the preset stress

$r(\times r_d)$	花岗岩 Granite	山东大理石 Shandong marble	钠化大理 岩 Sodium- ionized marble	砂岩 Sandstone	灰岩 Lim estone
0	153.3	262.3	168.9	62.0	212.8
2	136.5	233.3	150.4	55.2	189.5
4	119.8	204.6	131.9	48.5	166.2
6	103.0	175.9	113.4	41.7	142.9
8	86.2	147.2	95.0	43.9	119.6
10	69.5	118.5	76.6	28.1	96.3
12	52.7	89.8	58.1	21.4	73.1
14	36.0	63.1	39.6	14.6	49.8
16	19.3	32.4	21.2	7.8	26.5
18.25	0.5	0.5	0.3	0.2	0.3
20	-18.4	-31.5	-20.5	-7.5	25.9
22	-35.1	-60.2	-39.0	-14.3	-49.1
24	-51.8	-88.9	-57.4	-21.0	-72.4
26	-68.5	-117.5	-75.9	-27.8	-95.6
28	-85.1	-146.1	-94.2	-34.5	-118.3
30	-101.7	-174.6	-112.6	-41.2	-142.0
32	-118.1	-202.9	-130.8	-47.9	-165.0
34	-136.2	-233.0	-150.2	-55.1	-189.3

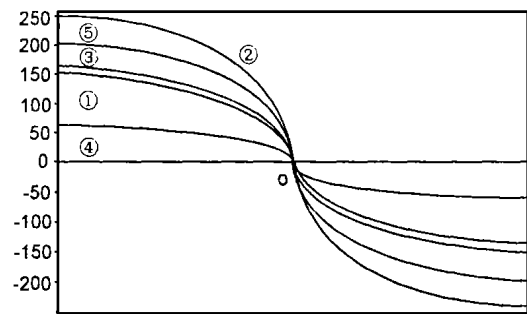


图 6 水平截面在预应力下的拉应力分布

Fig. 6 Tensile stress distribution under the preset stress

- ① 花岗岩 Granite $\sigma_y = 2.0950xy$; ② 山东大理石 Shandong marble $\sigma_y = 3.5889xy$; ③ 钠化大理石 Sodium-ionized marble $\sigma_y = 2.3104xy$; ④ 砂岩 Sandstone $\sigma_y = 0.8481xy$; ⑤ 灰岩 Limestone $\sigma_y = 2.9116xy$

从表 4 及图 6 可知, 采用预应力后, 拉应力系数值增大, 中性轴向压应力一侧移动。这将有利于裂纹

朝拟定断面扩展, 从而改善岩石成型的质量。然而, 当 p_x 仅在槽口开裂的临界值域时, 这种影响对应力场的改变是很小的, 仅在 1 MPa 级内。因此, 预应力槽的作用主要在导裂机制上。从前面的分析可知, 裂纹扩展过程中其尖端的约束及应力状态在变, 裂纹方向会发生改变和分支, 若此刻裂纹能和切槽贯通, 裂纹将朝切槽方向扩展, 改善岩石断裂成型的质量。

4 结语

确定了孔底裂纹开裂的临界装药长度, 结果与实际吻合, 为炮孔结构及装药参数的设计提供了理论依据; 初步确定了裂纹的扩展角及其影响因素与相互关系; 采用预应力切槽的作用主要在导裂机制上, 对应力场量的改变上贡献不大。裂纹断裂所需孔内临界压力是比较低的, 仅为几个 MPa 级。但断裂前进入塑性状态所需压力是很高的。解析了裂纹在低应力状态下扩展的原因; 岩石成型时, 只要裂纹尖端进入塑性状态, 其成型质量的好坏主要取决于裂纹的起裂方向; 预应力切槽可使其得到改善。

参考文献

- 1 Dally J W, Fournery W L. Proceedings 18th US Symposium on Rock Mechanics. 1977, 2A (6): 1-7.
- 2 陈益蔚. 切槽炮孔爆破参数的确定. 金属矿山, 1991, (12): 26-31.
- 3 吴立. 切槽孔爆破开采石材的几个问题. 非金属矿, 1990, (4): 10-12.
- 4 张志星. 切槽爆破参数的研究与生产实践. 岩土工程学报, 1996, (2): 104-108.
- 5 谭卓英, 王思敬, 吴恒等. 岩石槽孔断裂机理及参数估计. 岩石力学与工程学报, 1999, 18 (5): 1-5.

(责任编辑: 黎贞崇)

中国第一把“石刀”

据科技日报 1999 年 10 月 25 日报道: 经过 1 年多的努力, 中国科学家在安徽繁昌发现了一批距今大约 200 多万年的石制品, 经专家鉴定后认为, 这不仅是中国境内迄今发现的第一把“石刀”, 也是已知欧亚大陆上最古老的文化遗物, 从而把人类在中国境内生活的历史向前延伸了 30 多万年。

1998 年, 中科院古脊椎动物与古人类研究所金昌柱博士率队对安徽繁昌孙村镇的人字洞先后进行了 3 次发掘, 发现了数十件石制品和几件加工痕迹清晰的打击骨器。

专家指出, “人字洞”石制品的发现, 为寻找早期人类、揭示亚洲人类起源之谜提供了可能。据悉, 中国科学家正抓紧研究, 以进一步确定人字洞石制品的准确年代。