

文章编号: 1000-7598 (2012) 增 1-0001-07

地下洞室围岩脆性破坏时的应力特征研究

王成虎¹, 宋成科¹, 刘立鹏²

(1. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085; 2. 中国水利水电科学研究院 岩土工程研究所, 北京 100048)

摘 要: 在高应力作用下, 岩爆、钻孔崩落、片帮都是地下空间硬脆围岩中常见的破坏现象, 这三类现象本质上均可归于完整岩体的脆性破坏, 它们分别反映了高应力作用下完整岩体不同的破坏程度。通过对前人关于岩爆判据、钻孔崩落判据和片帮应力强度比判据研究成果的类比分析可知, 这些脆性破坏现象在破坏时具备相同的应力背景条件。脆性破坏的应力条件可以用地下空间周边切向最大应力与岩石单轴抗压强度之比 ($\sigma_{\theta\max}/\sigma_{ci}$) 或者工程区最大主应力与岩石单轴抗压强度之比 (σ_1/σ_{ci}) 来描述, 两种指标本质上反映了相同的应力背景条件。对于 $\sigma_{\theta\max}/\sigma_{ci}$, $\sigma_{\theta\max}/\sigma_{ci}=0.4\pm 0.1$ 是发生脆性破坏的应力临界条件; 对于 σ_1/σ_{ci} , $\sigma_1/\sigma_{ci}=0.15\pm 0.05$ 是发生脆性破坏的应力临界条件。大量的工程实例和基于 Hoek-Brown 强度准则的力学分析也证明了这一背景条件的正确性。这里两种指标都取了一个范围, 主要是由于不同的岩体分级、岩性和工程地质条件会对指标的界定产生较为显著的影响。

关 键 词: 高应力; 脆性破坏; 岩爆; 钻孔崩落; 应力强度比

中图分类号: TU 456

文献标识码: A

Study of stress characteristics of brittle failures of rock around underground openings

WANG Cheng-hu¹, SONG Cheng-ke¹, LIU Li-peng²

(1. Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: Under high stresses, rock bursts, borehole breakouts and spalling are all common phenomena which occur around the underground openings. In substance, these three phenomena all belong to brittle failures of intact rock mass; but they reflect different failure extents of intact rock mass under the action of high stresses. After analyzing and comparing the stress-strength criteria for rock bursts, borehole breakouts and spalling put forward by other specialists, we find that these brittle failure phenomena share the same stress requirement. The stress requirements for brittle failures can be defined with the ratio of the maximum tangential stress around an underground opening to the uniaxial compressive strength ($\sigma_{\theta\max}/\sigma_{ci}$) or the ratio of the maximum principal stress to the uniaxial compressive strength (σ_1/σ_{ci}); actually, both indices reflect the same stress requirements. For $\sigma_{\theta\max}/\sigma_{ci}$, the ratio of 0.4 ± 0.1 should be the critical stress requirement, but for σ_1/σ_{ci} , the ratio of 0.15 ± 0.05 should be the critical stress requirement. Large amounts of engineering cases and the mechanical analysis based on the Hoek-Brown criterion also prove the validity of these two stress requirements. Here, the two stress requirements reflect a ratio range because the complicated rock mass ratings, lithology and geotechnical conditions shall have profound impacts on the stress requirement for brittle failures.

Key words: high stresses; brittle failure; rock burst; borehole breakouts; strength-stress ratio

1 引 言

高地应力作用是岩体地下工程需要重点考虑的影响因素之一^[1], 笔者在文献[1]中对高地应力的研究现状及具体判定标准进行了详尽地讨论。然而清

楚了高地应力的概念后, 工程设计人员更为关注的是高地应力作用下隧道围岩的变形破坏表现形式。在高地应力作用下, 隧道围岩的变形破坏分为两类, 一类是严重的脆性破坏或者岩爆, 另一类就是围岩大变形^[2], 如图 1 所示。

收稿日期: 2011-06-10

基金项目: 中央级科研院所基本科研业务专项资助项目 (No. ZDJ2009-5); 铁道部重大课题, 隧道围岩稳定性及其控制技术研究 (No. 2009G005-D)。
第一作者简介: 王成虎, 男, 1978 年生, 博士, 副研究员, 主要从事工程地质稳定性评价及地应力测量等方面的研究。E-mail: huchengwang@163.com

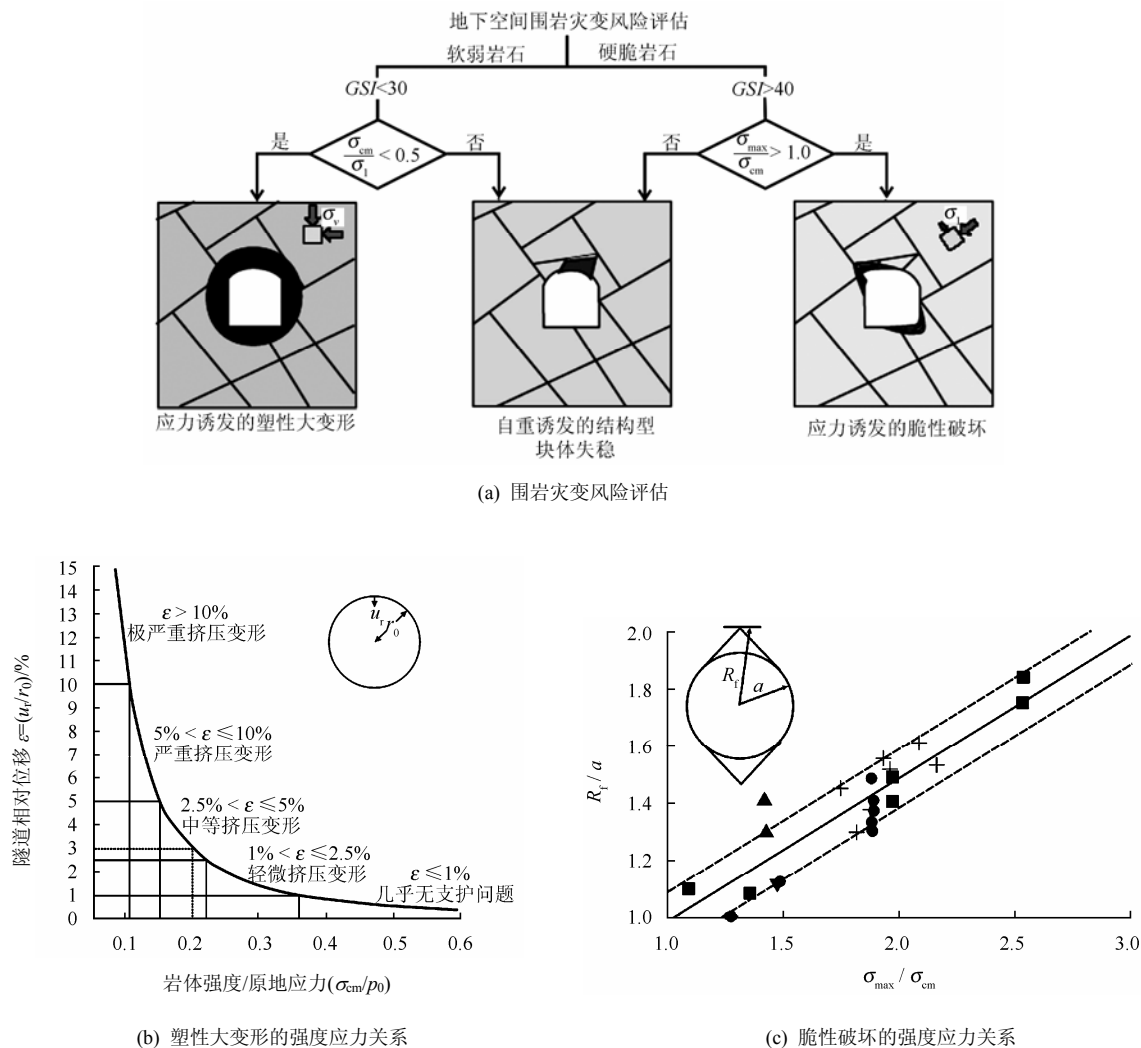


图 1 高应力作用下在地下空间开挖周边常见的两种破坏方式及其与强度应力的关系(据文献[2], 有修改)
Fig.1 Two common failure phenomena around one underground opening under the actions of high stresses and their relationships with the strength-stress ratio (Reference [2], modified)

国内学者对众多岩爆工程实例进行了详尽的研究, 如秦岭隧道^[3]、二郎山公路隧道^[4]、太平驿隧道^[5]等。国内研究的重点包括地下开挖面周边最大切向应力与围岩岩石单轴抗压强度的比值、实测最大主应力与围岩岩石单轴抗压强度的比值、围岩的弹性能量指数、围岩脆性系数以及围岩的完整性系数等。研究的侧重点于岩爆的预测和预防, 对岩爆发生的岩石力学机制和特征研究相对较少。而根据 Martin 等^[6]的研究可知, 实际上岩爆是地下空间围岩脆性破坏的一种特殊形式, 渐变式的脆性破坏在国内称之为片帮, 能够积累弹性应变能并且发生弹射的脆性破坏称之为岩爆。如图 1 所示, 脆性破坏均发生在围岩相对完整, 且岩体内蓄存的应力相对于岩体强度偏高的环境中。因此, 把众多岩爆、钻孔崩落和地下空间围岩片帮研究的实例进行对比分析研究, 或许能从另外一个侧面发现一些新的关

于脆性破坏的统一认识。

2 岩爆及脆性破坏的判别指标分析

自从 1738 年世界上最早记录并报道岩爆发生在英国南史塔福煤田的莱比锡煤矿起, 岩爆研究工作就一直未停止过。根据各种不同行业内的工程实践, 国内外学者提出了很多岩爆判据和岩爆分级标准^[7], 而本文的主要目的是为研究岩爆和脆性破坏时的应力特征, 因此, 列出与岩爆有关的应力以及应力强度比方面的判据, 如表 1 所列。

由表 1 可以看出, 众多岩爆判据中均主要考虑两个指标, 一个是围岩岩石单轴抗压强度, 一个是地下空间围岩岩体内的应力。地下空间截面内最大切向应力实际上是最大主应力或者工程区地应力张量的一个函数, 最大切向应力和最大主应力从本质上来讲反映的是同一个指标。而最大切向应力能够

表 1 国内外关于岩爆的应力强度比判据的汇总^[7]
Table 1 Summary of different strength-stress ratios criteria for rock bursts^[7]

方法类别	评价指标	无破坏	轻微	中等	严重	极严重	备注
Hoek 方法	$F = \sigma_{\theta\max} / \sigma_{ci}$		0.34 少量片帮 (Ⅰ级)	0.42 严重片帮 (Ⅱ级)	0.56 需要重型支护 (Ⅲ级)	>0.70 严重岩爆 (Ⅳ级)	总结南非采矿围岩破坏观测结果
Turchaninov 方法	$F = (\sigma_{\theta\max} + \sigma_L) / \sigma_{ci}$	≤ 0.3 无岩爆	$0.3 < F \leq 0.5$ 可能岩爆	$0.5 < F \leq 0.8$ 肯定有岩爆	$F \geq 0.8$ 有严重岩爆		科拉半岛希宾地块的矿井建设经验
Russense 方法	$F = \sigma_{\theta\max} / \sigma_{ci}$	≤ 0.2 无岩爆	$0.2 < F \leq 0.3$ 弱岩爆	$0.30 < F \leq 0.55$ 中岩爆	$F \geq 0.55$ 强岩爆		
徐林生、王兰生	$F = \sigma_{\theta\max} / \sigma_{ci}$	< 0.3 无岩爆	$0.3 \leq F \leq 0.5$ 可能岩爆	$0.3 \leq F \leq 0.7$ 中等岩爆	$F > 0.8$ 强烈岩爆		二郎山隧道岩爆观测结果
陶振宇	$F = \sigma_{ci} / \sigma_1$	> 14.5 无岩爆	$5.5 \leq F \leq 14.5$ 低岩爆	$2.5 \leq F \leq 5.5$ 中等岩爆	$F < 2.5$ 高岩爆		基于 Barton, Russense, Turchaninov 等研究结果, 并结合国内研究经验
	$F = \sigma_1 / \sigma_{ci}$	< 0.069 无岩爆	$0.069 \leq F \leq 0.180$ 低岩爆	$0.18 \leq F \leq 0.40$ 中等岩爆	$F > 0.4$ 高岩爆		
姚宝魁、张承娟判据	$F = \sigma_1 / \sigma_{ci}$		$F > 0.15 \sim 0.20$, 发生岩爆				二滩、渔子溪和科拉半岛建设经验
谷明成等	$F = \sigma_{\theta\max} / \sigma_{ci}$	$F > 0.3$, 发生岩爆, 还需考虑其他条件, 如岩石脆性系数、弹性能力指数和岩体完整性系数等。					秦岭隧道岩爆观测结果

注: F 为岩爆或者脆性破坏发生指数; σ_{ci} 为岩石单轴抗压强度 (MPa); $\sigma_{\theta\max}$ 为地下空间截面内最大切向应力 (MPa); σ_1 为地应力张量中的最大主应力 (MPa); σ_L 为沿地下空间开挖方向的轴向应力 (MPa)。

反映地下空间在开挖后的二次应力场的分布情况, 或者说能够反映地下空间开挖后截面范围内的应力集中情况, 因此, 其与岩石单轴抗压强度的比值更能真实反映岩石破坏时的临界应力状态。地下空间截面内的最大切向应力可用式 (1) 估算, 当然也可以利用弹性岩石力学理论的柯西解进行计算。

$$\sigma_{\theta\max} = 3\sigma_1 - \sigma_3 \quad (1)$$

式中: σ_1 、 σ_3 为工程场区原地应力张量中的最大、最小主应力。

由式 (1) 可知, 地下空间截面内的最大切向应力一般会大于工程区的最大主应力, 因而表 1 中各位学者所提出的发生岩爆的临界应力强度比十分接近。

Christiansson 和 Martin^[8]在开展 Äspö 硬岩地下实验室的岩芯钻探工作时发现, 当工程场区的远场最大主应力与岩芯的单轴抗压强度之比在 0.13~0.15 时, 在岩芯上开始出现微小的破坏, 当达到 0.28 时, 出现非常严重的破坏, 在一些地段出现饼状岩芯现象, 具体的破坏现象描述见表 2 列。

表 2 给出的实际观测结果与表 1 中陶振宇和姚宝魁给出的岩爆是否发生的临界值较为吻合, 即当工程区远场应力最大主应力与单轴抗压强度的比值在 0.15 左右 (即 $\sigma_1 / \sigma_{ci} = 0.15 \pm 0.05$) 时, 围岩岩体开始破坏, 至于破坏的程度, 取决于岩体质量、岩性等其他工程地质环境。

大量研究表明, 钻孔崩落也是发生在地下开挖面周边的一种脆性破坏现象, 迄今为止, Martin 和其他的专家学者开展了大量的钻孔崩落的室内和现

场试验, 得到一些十分有价值的研究结论, 根据 Martin 的总结, 钻孔崩落现象出现时所需的钻孔截

表 2 岩芯上的可见损坏及其与工程区远场最大主应力与岩石单轴抗压强度之比的关系^[8]

Table 2 Visual observation of core damage and the corresponding ratio of the far-field maximum stress to the uniaxial compressive strength^[8]

σ_1 / σ_{ci}	肉眼观测结果
0.05~0.10	没有损坏。岩样线弹性变形。
0.13~0.15	微小破坏。岩芯上出现肉眼很难辨别的微裂纹。岩芯的应力-应变曲线为非线性曲线。无饼状岩芯现象, 岩芯呈明显的各向异性。
0.28	严重破坏。岩芯上出现肉眼轻易可辨的微裂纹。在隧洞洞壁附近取得的岩芯呈现严重的岩芯饼化现象, 而在距离开挖面较远处取得的岩芯也呈现出轻微的饼状岩芯证据。应力-应变曲线高度非线性, 岩芯高度各向异性。

面内最大切向应力与岩石单轴抗压强度之比随钻孔孔径的增大而降低, 当现场钻孔直径达到一特定值以后, 发生钻孔崩落所需的起始应力强度比开始趋于一个稳定值, 具体的数据如图 2 所示^[9]。本质上, 图 2 反映了随着钻孔直径增大, 岩样或者现场围岩的整体强度在降低的趋势, 进而反映在发生钻孔崩落的临界应力强度比的值逐渐降低。

Martin 等^[6]曾对大量的工程实例进行了分析研究, 通过这些基于广泛岩体质量条件和岩性的工程实例的研究, 得出当地下空间截面内最大切向边界应力与岩块实验室单轴抗压强度的比值超过 0.4 ± 0.1 时, 地下空间开挖面上会出现应力诱发的脆性破坏。

Harrison 和 Hudson 等^[10]曾对几个国家的实测

应力资料进行统计研究,发现实测原地应力的最大主应力、最小主应力和中间主应力两两之间的比值非常稳定,见表 3。

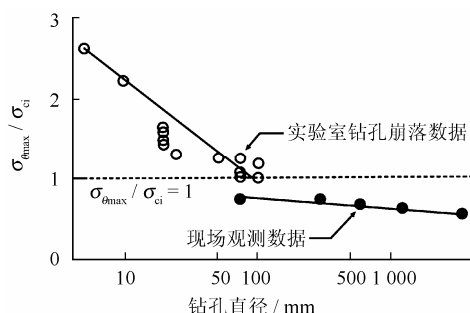


图 2 不同孔径下发生钻孔崩落时的计算最大切向应力与岩石单轴抗压强度比值

Fig.2 Ratio of the calculated tangential stress to σ_c at which breakouts initiate for various borehole diameters

表 3 主应力比值汇总分析

Table 3 Summary of principal stress mean ratios

	σ_1 / σ_2	σ_2 / σ_3	σ_1 / σ_3
澳大利亚	1.5	1.50	2.300
智利	1.6	1.60	2.600
芬兰	1.7	1.70	3.000
英国	1.6	1.40	2.400
平均值	1.6	1.55	2.575

利用表 3 给出的平均值再结合式(1)对陶振宇、姚宝魁和表 2 中的数据进行变换,即可得到陶振宇判据所对应的发生轻微岩爆或者脆性破坏的最大切向应力与岩石单轴抗压强度的比值为 0.179~0.468;而姚宝魁判据对应的应力强度比为 0.39~

0.52;表 2 中第 2 行对应的应力强度比为 0.338~0.39。由此可见,表 1 中除了 Russense 方法给出的脆性破坏的初始应力强度比不在 $\sigma_{\theta\max} / \sigma_{ci} = 0.4 \pm 0.1$ 所表示的范围内,其余表 1 和表 2 的内容均满足了 $\sigma_{\theta\max} / \sigma_{ci} = 0.4 \pm 0.1$ 的要求。

综合上述分析可知,本质上来说地下空间周边围岩中的岩爆和脆性破坏的发生具备相同的应力背景条件,发生脆性破坏、钻孔崩落和轻微岩爆所需的应力条件基本是相吻合的。如果用地下空间截面内的最大切向应力与实验室岩样单轴抗压强度之比来描述,那么该条件应该为 $\sigma_{\theta\max} / \sigma_{ci} = 0.4 \pm 0.1$;如果用工程区范围内实测最大主应力与实验室岩样单轴抗压强度之比来描述,那么该条件应该为 $\sigma_1 / \sigma_{ci} = 0.15 \pm 0.05$ 。

3 岩爆及脆性破坏的工程实例分析

前面利用大量的研究成果对岩爆或者脆性破坏发生时的应力环境条件进行了详细地分析论述,前人的研究成果都是基于特定的工程实例、室内和现场试验得到的一般性规律和经验准则,而这些结论对于其他工程的适用性如何仍然有待验证。下面结合国内外的岩爆和脆性破坏的工程实例对上述结论予以论证。

Martin^[6]分析圆形和类圆形地下空间脆性破坏深度时总结了大量工程实例中脆性破坏深度与最大主应力的关系,如表 4 所列(表中*为圆形隧道)。表中, R_f 为从圆形地下空间圆心到最大脆性破坏深度点的距离, a 为圆形地下空间的半径,如图 1 所示。

表 4 国外工程中脆性破坏深度与实测最大主应力的关系(据文献[7],有修改)

Table 4 Summary of case histories used to establish relationship between depth of failure and maximum principal stress (Reference [7], modified)

岩性	R_f/a	σ_1 / σ_3	σ_1 / MPa	σ_3 / MPa	σ_{ci} / MPa	σ_1 / σ_{ci}	$\sigma_{\theta\max}$	$\sigma_{\theta\max} / \sigma_{ci}$	来源
块状安山岩	1.3	1.92	30.64	15.3	100	0.29	72.828	0.730	GRC field notes (El Teniente 矿)
	1.5	2.07	29.84	14.8	100	0.31	77.108	0.773	
	1.4	2.03	34.23	14.7	100	0.30	74.823	0.750	
	1.5	2.10	31.26	16.3	100	0.34	86.390	0.865	
	1.5	2.03	33.02	15.4	100	0.31	78.386	0.785	
大块状石英	1.6	2.09	139.75	15.8	100	0.33	83.266	0.835	Ortlepp & Gay, 1984
	1.8	2.15	139.75	65.0	350	0.40	354.250	1.015	
	1.7	2.15	111.60	65.0	350	0.40	354.250	1.015	
	1.4	1.86	111.60	60.0	350	0.32	274.800	0.790	
	1.5	1.86	52.55	60.0	350	0.32	274.800	0.780	
层状石英岩*	1.4	3.39	52.55	15.5	250	0.21	142.135	0.570	Stacey & De Jongh, 1977
	1.3	3.39	58.96	15.5	250	0.21	142.135	0.570	
大块状花岗	1.5	5.36	58.96	11.0	220	0.27	165.880	0.750	Martin 等, 1994
	1.4	5.36	58.96	11.0	220	0.27	165.880	0.750	
	1.4	5.36	58.96	11.0	220	0.27	165.880	0.750	
	1.3	5.36	58.96	11.0	220	0.27	165.880	0.750	
	1.3	5.36	40.70	11.0	220	0.27	165.880	0.750	

笔者为了更好地验证第 1 节所述的规律, 也对表中的数据按照式 (1) 求得 $\sigma_{\theta\max}$, 并分别求得 σ_1/σ_{ci} 、 $\sigma_{\theta\max}/\sigma_{ci}$ 的比值。统计发现, 发生脆性破坏时, $\sigma_1/\sigma_{ci} \geq 0.15$, $\sigma_{\theta\max}/\sigma_{ci} \geq 0.40$ 。

张志强等^[11]对国内外的隧道岩爆案例进行过统计分析, 具体的工程案例如表 5 所示。据统计分析, 在发生岩爆的隧道工程实例中, 大多数案例的 σ_1/σ_{ci} 比值在 0.15~0.4 之间, 占整体发生率的

80.8%; 而在 0.2~0.3 之间出现的频率最高, 占整体发生率的 46.2%。文献[11]指出, 确定发生岩爆的最小临界值 $\sigma_1/\sigma_{ci} = 0.15$ 是比较恰当的。为了更好地揭示脆性破坏或者岩爆的应力背景条件, 笔者对文献[11]中的工程案例依据式 (1) 进行变换计算, 并求得 $\sigma_{\theta\max}/\sigma_{ci}$ 的值, 计算发现, 所有岩爆工程实例均满足前面所述的 $\sigma_{\theta\max}/\sigma_{ci} \geq 0.4 \pm 0.1$ 的应力条件。

表 5 国内外隧道工程发生岩爆的统计 (据文献[11], 有修改)
Table 5 Summary of tunnel rock burst cases all over the world (Reference [11], modified)

隧道名称	埋深/m	地质条件	σ_{ci} /MPa	σ_3 /MPa	σ_1 /MPa	$\sigma_{\theta\max}$ /MPa	$\sigma_{\theta\max}/\sigma_{ci}$	σ_1/σ_{ci}
挪威赫古拉公路隧道	最大 700	前寒武纪片麻岩	100~250	18.9	25.0	56.1	0.224~0.561	0.100~0.250
挪威兰峡湾公路隧道	200~1 500	片麻岩、花岗片麻岩、片麻闪长岩	60~200	9.0	34.0	93.0	0.465~1.550	0.170~0.567
挪威西玛水电站地下厂房	700	花岗岩、花岗片麻岩	180	19.5	48.8	126.9	0.700	0.270
瑞典 Headrace 隧道	300	石英岩	200	8.0	28.0	76.0	0.380	0.140
南非金矿	1 437~2 404	石英岩	214	37.0	65.0	158.0	0.740	0.304
美国 Galena 金矿	1 200	石英岩	175	52.0	52.0	104.0	0.590	0.300
南非 Hoist 地下洞室	1 450	石英岩	198~230	39.0	44.3	93.9	0.410~0.470	0.190~0.220
挪威 Eikesdal 公路隧道	800	片麻岩 (坚硬)	200	21.2	30.6	70.6	0.353	0.153
日本关越公路隧道	75~1 050	石英闪长岩、页岩	236	16.2	89.0	250.8	1.060	0.380
瑞典捷克坦水工隧道	400	花岗岩	180	50.0	125.0	325.0	1.800	0.690
日本新清水隧道	1 000	石英闪长岩	183	27.0	89.0	240.0	1.310	0.490
中国关村坝铁路隧道	1 000	硅质灰岩	120	26.0	35.0	79.0	0.660	0.290
中国渔子溪引水隧道地下厂房	200~650	中粒和中细粒花岗闪长岩	70	11.5	30.0	78.5	1.120	0.430
		花岗岩	160	11.5	45.0	123.5	0.770	0.280
中国天生桥引水隧道	400	灰岩、白云岩、砂岩	115	15.1	31.2	78.5	0.680	0.270
中国锦屏水电站地质探洞	559~575	中粗晶大理岩、花斑状大理岩	133	15.1	25.6	61.7	0.460	0.190
中国锦屏二级水电站洞	2 000	大理岩	115	38.0	71.0	175.0	1.520	0.620
中国二滩工程	770	正长岩、玄武岩	165	20.8	32.5	76.7	0.460	0.200
中国太平峰水工隧洞	>300	花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩	195	10.2	30.7	81.9	0.420	0.160
前苏联 X 矿山	1 740	磷霞岩	180	37.0	50.5	114.5	0.630	0.280
前苏联基洛夫矿	>700	花岗岩	200	19.0	50.5	132.5	0.662	0.252
美国 CADA 矿	2 400	石英岩	190	64.4	66.0	133.6	0.700	0.350
美国 CAD B 矿	1 900	石英岩	190	52.0	53.8	109.4	0.575	0.285
美国 CAD C 矿	1 200	石英岩	189	31.6	39.1	85.7	0.455	0.210
美国加利纳矿	1 700	石英岩	180	45.7	49.6	103.1	0.570	0.270

综合表 4 和表 5 的结果, 岩爆工程实例和脆性破坏的工程实例均揭示了极为相似的应力背景条件, 而 σ_1/σ_{ci} 和 $\sigma_{\theta\max}/\sigma_{ci}$ 揭示的发生破坏时的临界应力条件实际是相同的, 只不过前者只考虑了工程区远场最大主应力, 而后者考虑了地下空间开挖后的应力的调整变化, 即在地下空间开挖后围岩中的应力集中现象。

4 基于 Hoek-Brown 准则的脆性破坏力学机制讨论

结合前人研究结论和工程实例的综合分析得到了发生脆性破坏时的应力条件的一般规律, 而任何

岩体中的破坏都应该满足岩体强度理论, 而 Hoek-Brown 强度准则在分析硬岩破坏时具备十分明显的优势, 同时 Hoek-Brown 强度准则在世界范围内得到了广泛的应用和认可, 为了引述方便, 下面简单介绍一下 2002 版的 Hoek-Brown 强度准则^[12]。

在 Hoek-Brown 强度准则 2002 年的版本中, 广义强度准则的形式没有发生改变, 如式 (2) 所示, 但与岩体质量有关的 m_b 、 s 、 α 有了很大的变化, 见式(2)~(6)。

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha \quad (2)$$

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (3)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (5)$$

式中： σ'_1 、 σ'_3 为岩体破坏时的最大、最小有效主应力（压应力为正）（MPa）； m_i 、 s 为经验参数， m_i 反映岩石的软硬程度，其取值范围在 0.000 000 1~25 之间； m_b 为材料常数 m_i 的折减值； s 反映岩体破碎程度，取值范围在 0~1 之间，完整岩体 s 取 1； GSI 为地质体强度指标； D 的取值范围为 0~1，取决于外界因素对原位岩体的扰动程度，如爆破、岩体开挖、岩体卸荷等行为。

地下空间围岩的破坏一般是从开挖面的边界开始的，然后逐步向岩体内部延伸，在开挖面边界处， σ'_3 接近等于 0，可以近似看作 0，如果 $\sigma'_3 = 0$ ，那么式 (2) 就变形为式 (6)。将式 (4)、(5) 代入式 (6)，并作图，如图 3 所示。

$$\sigma'_1 = \sigma_{ci} s^\alpha \quad (6)$$

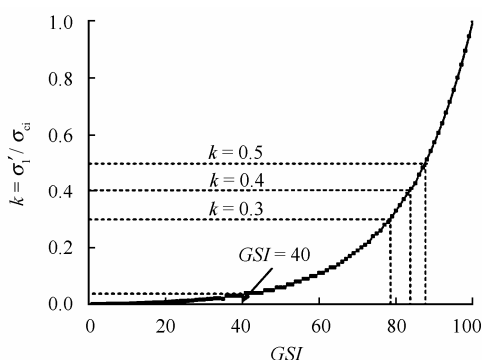


图 3 地下空间开挖面边界处破坏发生时应力条件与岩体分级的关系

Fig.3 The relationship between GSI and the stress conditions when the failure initiates from the boundary of underground opening

由图 3 可知，在完整岩石发生破坏时，最大有效应力与岩石单轴抗压强度之比约为 0.3~0.5。在 Hoek-Brown 强度准则中，对于完整岩石， $s = 1$ ，根据式 (6)，最大有效主应力 σ'_1 接近于 σ_{ci} 时，岩体才开始破坏。然而，Read 和 Martin^[13] 在加拿大 AECL 地下实验室完整花岗岩体中的现场开挖试验显示，即使 $GSI \approx 100$ ，估算的 s 也只有约 0.25，那么 $\sigma'_1 \approx 0.5 \sigma_{ci}$ （在完整岩石中，取 $\alpha = 0.5$ ），而这一结果与南非地下采矿中取得的经验相类似，即 $s \approx 0.20$ ，岩石开始破坏时， $\sigma'_1 \approx 0.4 \sigma_{ci}$ 。Martin 在文献 [6]

中指出，这可能与现场岩体破坏和实验室单轴试验不同的加载路径有关，在实验室测试单轴抗压强度时是通过单向加载使得岩样发生破坏，而在地下空间开挖时是由于开挖卸载而导致地下空间围岩发生破坏。实际上，广泛开展的室内和现场钻孔崩落试验就有效回答了这个问题，如图 2 所示，在实验室内开展钻孔崩落试验，也是通过双向加载来实现的，而现场开展钻孔崩落等试验，则是通过开挖卸载实现的，仔细观察图 2，就会发现对于室内试验当钻孔孔径不断增大， $\sigma_{\theta \max} / \sigma_{ci}$ 值越来越接近于 1，而现场试验的 $\sigma_{\theta \max} / \sigma_{ci}$ 值则越来越接近于 0.5，这一规律也说明 Hoek-Brown 准则在预测围岩脆性破坏时具备很高的准确性，同时在分析地下空间围岩脆性破坏时，不能简单地把 σ'_3 设为 0，因为围岩破坏是一个动态过程，在开挖过程中，围岩中的应力不断调整，围岩内部的裂纹也随之发展，进而岩体强度也不断劣化，随后在宏观上体现出围岩岩体的宏观破坏。

5 结 语

通过前面的论述可知，岩爆、钻孔崩落、片帮均可归于硬岩的脆性破坏现象，它们分别反映了高地应力作用下完整岩体不同的破坏程度，而在破坏时具备相同的应力背景条件。通过对前人广泛的研究成果和工程实例的综合分析可知，脆性破坏的应力条件可以用地下空间周边切向最大应力与岩石单轴抗压强度之比（ $\sigma_{\theta \max} / \sigma_{ci}$ ）或者工程区最大主应力与岩石单轴抗压强度之比（ σ'_1 / σ_{ci} ）来描述，两种指标本质上反映了相同的应力条件，对于 $\sigma_{\theta \max} / \sigma_{ci}$ ， $\sigma_{\theta \max} / \sigma_{ci} = 0.4 \pm 0.1$ 是发生脆性破坏的应力临界条件；对于 σ'_1 / σ_{ci} ， $\sigma'_1 / \sigma_{ci} = 0.15 \pm 0.05$ 是发生脆性破坏的应力临界条件，这里两种指标都取了一个范围，主要是由于不同的岩体分级、岩性和工程地质条件会对指标的界定产生较为显著的影响。

近年来，岩体强度破坏已成为一个重要研究热点，而且岩体强度也把岩爆研究中的岩体完整性和单轴抗压强度统一到了—个指标，并且考虑了众多的岩体分级因素，因此，从岩体强度指标的角度来看待应力强度比对围岩脆性破坏的影响或许也会有新的发现，或许是下一步研究工作需要考虑的重点。

参 考 文 献

- [1] 王成虎, 郭啟良, 丁立丰, 等. 工程区高地应力判据研究及实例分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2359—2364.
WANG Cheng-hu, GUO Qi-liang, DING Li-feng, et al.

- High in-situ stress criteria for engineering area and a case analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(8): 2359—2364.
- [2] MARTIN C D, KAISER P K, CHRISTIANSSON R. Stress, instability and design of underground excavations[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40: 1243—1256.
- [3] 谷明成, 何发亮, 陈成宗. 秦岭隧道岩爆的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1324—1329.
- GU Ming-cheng, HE Fa-liang, CHEN Cheng-zong. Study of rockburst in Qingling tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(9): 1324—1329.
- [4] 徐林生, 王兰生. 岩土二郎山公路隧道岩爆发生规律与岩爆预测研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 569—572.
- XU Lin-sheng, WANG Lan-sheng. Study of the laws of rockburst and its forecasting in the tunnel of Erlang Mountain road[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(5): 569—572.
- [5] 周德培, 洪开荣. 太平驿隧洞岩爆特征及防治措施[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(2): 171—178.
- ZHOU De-pei, HONG Kai-rong. The rockburst features of Taipingyi tunnel and the prevention methods[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1995, 14(2): 171—178.
- [6] MARTIN C D, KAISER P K, MCCREATH D R. Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1999, 36(1): 136—151.
- [7] 张镜剑, 傅冰骏, 李仲奎, 等. 应变型岩爆五因素综合判据及其分级[J]. 岩石力学与工程动态, 2011, 88(1): 27—37.
- ZHANG Jing-jian, FU Bing-jun, LI Zhong-kui, et al. Criterion and classification for strain mode rockbursts based on five-factor comprehensive method[J]. **News Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 88 (1): 27—37.
- [8] CHRISTIANSSON R, MARTIN C D. Quantifying in-situ stress and its role in repository design[C]//The 6th North America Rock Mechanics Symposium (NARMS). Houston, Texas: American Rock Mechanics Association, 2004.
- [9] MARTIN C D, MARTINO J B, DZIK E J. Comparison of borehole breakouts from laboratory and field tests[C]//SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering Conference. Delft, Netherlands: Society of Petroleum Engineers Inc., 1994.
- [10] HARRISON J P, HUDSON J A, CARTER J N C. Is there a relation between the in-situ principal stress magnitudes in rock masses?[C]//Proceedings of 1st Canadian-US Rock Mechanics Symposium. Vancouver, Canada: Taylor & Francis, 2007.
- [11] 张志强, 关宝树, 翁汉民. 岩爆发生条件的基本分析[J]. 铁道学报, 1999, 20(4): 82—85.
- ZHANG Zhi-qiang, GUAN Bao-shu, WENG Han-min. Basic analysis of rock bursting occurrence condition[J]. **Journal of the China Railway Society**, 1999, 20(4): 82—85.
- [12] HOEK E. Estimates of rock mass strength and deformation modulus[EB/OL]. [http:// www. rocsience. com / education / hoeks_corner.](http://www.rocksience.com/education/hoek_corner/), 2004-04-07.
- [13] READ R S, MARTIN C D. Technical summary of AECL's mine-by experiment, Phase 1: Excavation response[R]. Manitoba: Atomic Energy of Canada Limited, 1996.