

评价岩石脆性指标对滚刀破岩效率的影响

刘泉声^{1,2}, 刘建平¹, 时凯³, 潘玉丛¹, 黄兴¹, 刘学伟¹, 魏莱¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院 岩土与结构工程安全湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 碧桂园控股有限公司 营销中心, 广东 广州 528000)

摘要: 脆性是岩石重要的力学性质之一。岩石脆性与滚刀破岩效率密切相关, 但目前还没有统一的用于评价滚刀破岩效率的岩石脆性指标。总结现有的35种脆性指标, 将其分为基于强度、应变、应变能、硬度、莫尔包络线、特殊试验和其他等7种类型。为研究岩石脆性与滚刀破岩效率之间的关系, 通过滚刀贯入试验, 引入归一化比能概念, 提出表征岩石脆性的新指标, 重点研究基于强度和贯入试验的脆性指标与归一化比能之间的关系。试验结果表明: (1) 滚刀更难贯入高强度岩石; (2) 脆性指标 B_2 和 B_4 与归一化比能之间呈强烈的指数函数关系, 随着脆性的增高, 归一化比能降低, 滚刀破岩效率增高, 应优先选用脆性指标 B_2 来评价滚刀破岩效率, 其次是脆性指标 B_4 ; (3) 将单轴抗压强度约20 MPa定义为单轴抗压强度过渡值, 滚刀不适宜切削单轴抗压强度小于20 MPa的软岩。试验结果对评价滚刀破岩效率时岩石脆性指标的选取具有一定的指导意义。

关键词: 岩石力学; 脆性指标; 盘形滚刀; 贯入试验; 破岩效率

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2016)03-0498-13

Evaluation of rock brittleness indexes on rock fragmentation efficiency by disc cutter

LIU Quansheng^{1,2}, LIU Jianping¹, SHI Kai³, PAN Yucong¹, HUANG Xing¹, LIU Xuewei¹, WEI Lai¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Key Laboratory of Safety for Geotechnical and Structural Engineering of Hubei Province, School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 3. Marketing Center of Country Garden Holdings Company Limited, Guangzhou, Guangdong 528000, China)

Abstract: Brittleness is one of the most important mechanical properties of rock. The fragmentation efficiency of rock is closely related to the rock brittleness. No unified brittleness index of rock is confirmed in evaluating rock fragmentation efficiency by disc cutter. The existing 35 different brittleness indices were summarized and classified into seven categories with respect to strength, strain, strain energy, hardness, Mohr envelope, special tests, etc. In order to study the relations between the rock brittleness and the rock fragmentation efficiency by disc cutter, the normalized specific energy concept was introduced after carrying out the indentation tests with disc cutter, and a new index of rock brittleness was proposed. In addition, the relations between the normalized specific energy and brittleness indexes based on strength and indentation test were mainly studied. The results show that it

收稿日期: 2015-05-04; **修回日期:** 2015-07-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB046903, 2015CB058102); 湖北省自然科学基金重点项目(2011CDA119)

Supported by the National Key Basic Research and Development Program of China(973 Program)(Grants No. 2014CB046903 and 2015CB058102) and Key Program of Natural Science Foundation of Hubei Province(Grant No. 2011CDA119)

作者简介: 刘泉声(1962-), 男, 博士, 1983年毕业于山东矿业学院矿井建设专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事岩土与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: liuqs@whrsm.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0569

is more difficult to penetrate into the rock of high strength for disc cutter. The relationships between the normalized specific energy and brittleness indexes B_2 and B_4 were found to be exponential. With the increasing of brittleness indexes B_2 and B_4 , the normalized specific energy decreased but the rock fragmentation efficiency increased. Therefore, the brittleness index B_2 can be firstly used for evaluating the rock fragmentation efficiency, followed with the brittleness index B_4 . The uniaxial compressive strength of about 20 MPa can be defined as the transitional uniaxial compressive strength, and disc cutter may be not suitable for cutting the soft rock with uniaxial compressive strength less than 20 MPa.

Key words: rock mechanics; brittleness index; disc cutter; indentation test; rock fragmentation efficiency

1 引言

国民经济快速可持续发展迫切需要建设一大批重大生命线工程,如高速铁路、跨流域调水工程和深部矿产开采等,而深埋长大隧道是这些生命线工程的关键控制性工程。隧道掘进机(TBM)因其开挖快、优质、安全、经济、环保和劳动强度低等优点^[1],广泛应用于岩石隧道开挖。目前 TBM 工法已基本成为深埋长大隧道的标准施工方法。工程实践中准确预测特定地质条件下的 TBM 施工性能对于隧道施工方法选择、施工进度安排和成本估计至关重要。然而,影响 TBM 施工性能的因素众多,可以分为两大类:一是机器参数,包括单刀推力、刀盘转速、刀具直径、刀间距、刀尖宽度和滚刀岩石接触角等;二是岩体参数,包括岩石脆性、岩石单轴抗压强度、不连续面(弱面)间距以及不连续面(弱面)和隧道轴向之间的夹角等。其中,机器参数为可控参数,而岩体参数为不可控参数。对 TBM 施工中出现的不同岩体参数进行准确地评估和表征,选择合理的机器参数以实现安全高效掘进破岩一直是 TBM 研究领域的热点和前沿话题。

岩石脆性显著影响岩石的可切削性、可钻性和可掘性。可切削性主要用于评价割煤机的切削性能,可钻性主要用于评价钻机钻进的难易程度,可掘性则主要用于评价 TBM 的施工效率。I. Evans 和 C. D. Pomeroy^[2]研究发现,刀具冲击能与岩石脆性成反比。S. P. Singh^[3-4]指出,煤岩的可切削性和普氏强度指数与其脆性密切相关,且煤岩切削比能与其脆性成正比。R. M. Goktan^[5]研究发现,相比低脆性岩石,高脆性岩石破坏时比能更低。基于不同研究人员的原始试验数据,R. Altindag^[6-7]运用回归分析方法,研究 3 种不同脆性指标(B_2 , B_3 和 B_4)与岩石可钻性指数 DI 和比能 SE 之间的关系,发现可钻性指

数 DI 与脆性指标 B_2 之间无相关性,比能 SE 与脆性指标 B_2 , B_3 之间无相关性,但可钻性指数 DI 和比能 SE 与脆性指标 B_4 之间显著相关,因此可选用脆性指标 B_4 来分析岩石切削效率。S. Kahraman 和 R. Altindag^[8]基于收集的原始数据,研究断裂韧性 K_{IC} 与脆性指标 B_3 , B_3 之间的关系,发现脆性指标 B_3 可用于评估断裂韧性。

目前国内外关于岩石脆性对滚刀破岩效率影响的研究较少,还没有统一的用于评价滚刀破岩效率的脆性指标。由于影响滚刀破岩的因素众多,很难基于理论量化岩体参数(如单轴抗压强度、节理间距和岩石脆性等)对滚刀破岩效率的影响。目前,国外主要通过室内试验和数值模拟研究岩石脆性对滚刀破岩效率的影响。基于室内冲击试验和 TBM 施工性能分析,O. T. Blindheim 和 A. Bruland^[9]指出,滚刀切削高脆性岩石时,滚刀两侧形成的裂纹和岩片较多,而滚刀切削低脆性岩石,滚刀两侧形成的裂纹和岩片较少,随着岩石脆性的增高,滚刀破岩效率显著增高。该方法的缺点是需要采用专用设备来确定岩石脆性指标 B_{25} ,且这些设备仅在欧洲普遍使用。基于不同研究人员的原始试验数据,S. Kahraman^[10]运用回归分析方法,研究 3 种不同脆性指标(B_2 , B_3 和 B_4)和岩体可掘性之间的关系,发现 TBM 净掘进速度与脆性指数 B_2 , B_3 之间呈显著的指数关系。该方法的不足之处是未考虑其他岩体参数(如岩石单轴抗压强度和节理间距等)对 TBM 施工性能的影响。基于冲击贯入试验,S. Yagiz^[11-13]引入表征岩石脆性的新指标 B_{28} ,并研究其对 TBM 施工性能的影响,发现随着岩石脆性的增高,TBM 净掘进速度增大。该方法的不足之处也是未考虑其他岩体参数对 TBM 施工性能的影响。Q. M. Gong 和 J. Zhao^[14]运用 UDEC 软件模拟岩石脆性 B_2 对滚刀破岩的影响,研究发现随着岩石脆性的降低,滚刀下的压碎区减小,压碎区外主裂纹的数量和长度也减小,滚刀更

难贯入岩石, TBM 净掘进速度减小。该方法的不足之处是仅出于方便实用考虑而选择脆性指标 B_2 , 未比较其他脆性指标对滚刀破岩效率的影响, 且未采用岩石单轴抗压强度对每转进尺进行归一化以消除岩石单轴抗压强度对滚刀破岩的影响。

如前所述, 岩石脆性显著影响滚刀破岩过程中压碎区的形状和大小、裂纹的萌生与扩展、岩片的片起与剥落, 从而影响滚刀破岩效率, 因此开展岩石脆性对滚刀破岩效率影响的研究是很重要与必要的。目前国内还未见发表有关岩石脆性对滚刀破岩效率影响方面的文章, 因此, 本文是对这一研究空白的有益补充。本文首先对国内外提出的 35 种脆性指标进行归纳和分类, 随后通过滚刀贯入试验, 采用回归分析方法, 重点研究基于强度的脆性指标 (B_2, B_3, B_4) 和贯入试验的脆性指标 (B_{26}, B_{27}, B, K) 与滚刀破岩效率之间的关系。

2 岩石脆性

脆性是岩石重要的力学性质之一。遗憾的是, 目前国内外还没有被广泛接受的岩石脆性概念和测量方法。因研究目的和评价对象的不同, 不同研究人员对脆性的定义也各不相同。A. Morley 等^[15-16]将脆性定义为: 无延展性。V. H. Jesse^[17]将脆性定义为: 材料在极小或无塑性流变时就发生断裂或破坏的性质。L. Obert 和 W. I. Duvall^[18]将脆性定义为: 诸如铸铁和岩石等材料, 当应力达到或稍微超过材料屈服应力时试样就发生破坏的性质。J. G. Ramsey^[19]将脆性定义为: 当岩石内黏聚力被破坏后, 材料即发生脆性破坏。E. A. George^[20]将岩石脆性定义为: 当加载应力超过岩石材料的起裂应力后, 岩石材料在持续形变过程中不会明显出现永久性变形的性质。

目前国内外拟定的各种脆性指标多达 30 几种, 每种脆性指标都有其用途与价值。V. Hucka 和 B. Das^[21]总结 7 种类型(基于可恢复应变比、可恢复应变能比、强度比、莫尔包络线、普氏冲击试验细粒含量和岩石强度、斜向剪切角、宏观硬度和微观硬度)的脆性指标, 并指出高脆性岩石破坏时可以观察到以下现象: 低延展性、断裂失效、形成岩粉、高抗压/抗拉比、高弹性、大内摩擦角和压头侵入时形成裂纹。G. E. Andreev^[22]回顾 20 种不同的岩石脆性概念和计算公式。刘恩龙和沈珠江^[23]总结 10 种

材料脆性度量方法, 并提出一个可描述材料脆性变化的新脆性指标 B_{31} 。最近, 李庆辉等^[24]通过文献调研, 总结岩石脆性测试的 20 种不同方法, 包括基于强度、硬度和坚固性的评价方法, 并基于全应力-应变特征提出一个表征脆性的新指标 B_{34} 。周辉等^[25]总结现有的基于强度、应力-应变曲线、加卸载试验、硬度和矿物成分等共 20 种脆性指标, 分析每类指标的适用性和优缺点, 并提出一个基于岩石应力-应变曲线峰后特性的评价岩石脆性高低的新指标 B_{35} 。王宇等^[26]归纳总结基于压拉比、全应力-应变特征、硬度或坚固性的 28 种基本脆性测试方法, 并研究脆性岩石起裂应力水平与脆性指标之间的关系。

综合以上研究成果和进一步的文献调研, 全面总结现有国内外拟定的 35 种脆性指标, 将其分为基于强度、应变、应变能、硬度、莫尔包络线、特殊试验和其他 7 种类型(见表 1)。

3 滚刀贯入试验

目前室内主要通过全尺寸切割试验和压头贯入试验来研究滚刀破岩特征及破岩效率。全尺寸切割试验是目前室内研究滚刀破岩的最可靠方法, 但其需要大尺寸(1.0 m×1.0 m×0.6 m)试件, 且价格昂贵, 目前仅少数实验室配备该试验台(见图 1^[28]), 使得该试验的应用性受到很大限制。而压头贯入试验所需设备简单, 价格便宜, 因此使用非常广泛。但由于压头贯入试验仅能评估压头受到的法向力, 而不能评估压头受到的滚动力和侧向力, 加之压头贯入试验仅能实现贯入过程, 而不能实现滚动过程, 导致其与真实滚刀破岩过程存在较大差别, 因而其准确性不如全尺寸切割试验。由于试验设备的限制, 本文主要通过滚刀贯入试验研究岩石脆性对滚刀破岩效率的影响。

3.1 试件制备及其基本参数

由于影响滚刀破岩的因素众多, 要想研究岩石脆性对滚刀破岩效率的影响, 就需控制其他的岩体参数。众所周知, 水泥砂浆试件的均质性明显优于岩石试件, 试验结果的离散性也较小, 为分析脆性对滚刀破岩效率的影响, 试件采用 4 种不同配比的水泥砂浆浇筑, 水泥采用 32.5 普通硅酸盐水泥, 其质量配合比及基本力学参数如表 2 所示。综合考量试验装置限制和尺寸效应的影响后, 将试件尺寸定

表 1 国内外脆性指标一览表
Table 1 Brittleness indexes home and abroad

类型	来源	年份	公式	变量含义
基于强度的脆性指标	A. W. Bishop ^[27]	1967	$B_1 = (\tau_p - \tau_r) / \tau_p$	τ_p 为峰值强度, τ_r 为残余强度
	V. Hucka 和 B. Das ^[21]	1974	$B_2 = \sigma_c / \sigma_t$	σ_c 为单轴抗压强度, σ_t 为抗拉强度
	V. Hucka 和 B. Das ^[21]	1974	$B_3 = (\sigma_c - \sigma_t) / (\sigma_c + \sigma_t)$	σ_c 为单轴抗压强度, σ_t 为抗拉强度
	R. Altindag ^[29]	2000	$B_4 = (\sigma_c \sigma_t) / 2$	σ_c 为单轴抗压强度, σ_t 为抗拉强度
	R. Altindag ^[30]	2008	$B_5 = \sqrt{(\sigma_c \sigma_t) / 2}$	σ_c 为单轴抗压强度, σ_t 为抗拉强度
基于应变的脆性指标	D. F. Coates 和 R. C. Parsons ^[31]	1966	$B_6 = \varepsilon_r / \varepsilon_t$	ε_r 为可恢复应变, ε_t 为试样破坏时的总应变
	E. A. George ^[20]	1995	$B_7 = \varepsilon_{ir}$	ε_{ir} 为试样破坏时不可恢复轴向应变
	G. E. Andreev ^[22]	1995	$B_8 = \varepsilon_p / \varepsilon_e$	ε_p 为峰后应变, ε_e 为弹性应变
	G. E. Andreev ^[22]	1995	$B_9 = \varepsilon_{ip} / \varepsilon_e$	ε_{ip} 为总不可恢复峰后应变, ε_e 为弹性应变
	V. Hajiabdolmajid 和 P. Kaiser ^[32]	2003	$B_{10} = (\varepsilon_r^p - \varepsilon_e^p) / \varepsilon_e^p$	ε_e^p 为黏聚力破坏时的塑性应变, ε_r^p 为摩擦强度达到最大值时的塑性应变
基于应变能的脆性指标	L. I. Baron ^[33]	1962	$B_{11} = W_r / W_t$	W_r 为可恢复应变能, W_t 为总应变能
	B. Das 和 V. Hucka ^[34]	1975	$B_{12} = W_{rs} / W_t$	W_{rs} 和 W_t 分别为破坏前可恢复应变能和总应变能
	A. Kidybinski ^[35]	1981	$B_{13} = W_{ir} / W_e$	W_{ir} 为峰前不可恢复应变能, W_e 为弹性应变能
	I. M. Batougina 等 ^[36]	1983	$B_{14} = M / (M + E)$	M 为回弹性能, E 为释放能
	S. G. A. Bergman 和 H. Still ^[37]	1983	$B_{15} = M / E$	M 为回弹性能, E 为释放能
	M. Aubertin 和 D. E. Gill ^[38]	1988	$B_{16} = A_2 / A_1$	A_2 为储存在试件中的弹性能, A_1 为应力-应变曲线下的总面积
	B. G. Tarasov ^[39]	2010	$B_{17} = (M - E) / M$	M 为回弹性能, E 为释放能
	B. G. Tarasov ^[39]	2010	$B_{18} = E / M$	M 为回弹性能, E 为释放能
基于硬度的脆性指标	H. Honda 和 Y. Sanada ^[40]	1956	$B_{19} = (H_\mu - H) / K$	H_μ 为微观硬度, H 为宏观硬度, K 为常数
	B. R. Lawn 和 D. B. Marshall ^[41]	1979	$B_{20} = H / K_{IC}$	H 为宏观硬度, K_{IC} 为断裂韧度
	J. B. Quinn 和 G. D. Quinn ^[42]	1997	$B_{21} = (HE) / K_{IC}$	H 为宏观硬度, K_{IC} 为断裂韧度, E 为弹性模量
基于莫尔包络线的脆性指标	V. Hucka 和 B. Das ^[21]	1974	$B_{22} = \sin \varphi (\sigma_\theta = 0)$	φ 为莫尔包络线上 $\sigma_\theta = 0$ 时对应的内摩擦角
	V. Hucka 和 B. Das ^[21]	1974	$B_{23} = \pi / 4 + \varphi / 2$	φ 为内摩擦角
基于特殊试验的脆性指标	M. M. Protodyakonov ^[43]	1963	$B_{24} = q \sigma_c$	q 为普氏冲击测试中获得小于 0.6 mm 的碎屑百分比
	O. T. Blindheim 和 A. Bruland ^[9]	1998	$B_{25} = S_{20}$	S_{20} 为直径小于 11.2 mm 的碎屑百分比
	H. Copur 等 ^[44]	2003	$B_{26} = P_{dec} / P_{inc}$	P_{dec} 和 P_{inc} 分别为平均贯入荷载降低和增加周期
	H. Copur 等 ^[44]	2003	$B_{27} = k / (k + m)$	k 和 m 分别为荷载增加和降低数据点数
	S. Yagiz ^[13]	2009	$B_{28} = F_{max} / h$	F_{max} 为贯入曲线上的最大贯入荷载, h 为最大贯入荷载对应的贯入度
其他脆性指标	Z. P. Bazant 和 M. T. Kazemi ^[45]	1990	$B_{29} = D / c_f$	D 为结构有效尺寸, c_f 为有效断裂过程区长度
	冯 谢和谢学斌 ^[46]	2000	$B_{30} = \alpha (\sigma_c \varepsilon_r) / (\sigma_t \varepsilon_b)$	ε_r 和 ε_b 分别为峰前、后应变; α 为调节参数, 一般取 0.1
	刘恩龙和沈珠江 ^[23]	2005	$B_{31} = 1 - \exp(M / E)$	M 为软化模量, E 为弹性模量
	R. Rickman 等 ^[47]	2008	$B_{32} = (\bar{E} + \bar{\nu}) / 2$	\bar{E} 和 $\bar{\nu}$ 分别为弹性模量和泊松比的归一值
	R. Rickman 等 ^[47]	2008	$B_{33} = (W_{qtz} + W_{carb}) / W_{total}$	W_{qtz} 为石英含量, W_{carb} 为碳酸盐岩含量, W_{total} 为总矿物含量
	李庆辉等 ^[24]	2012	$B_{34} = (\varepsilon_{BRIT} - \varepsilon_n) / (\varepsilon_m - \varepsilon_n) + \alpha CS_{BRIT} + \beta CS_{BRIT} + \eta$	公式右边第一项表示峰值应变指标, 第二、三项表示峰后曲线形态指标
	周 辉等 ^[25]	2014	$B_{35} = (\tau_p - \tau_r) / \tau_p (\lg k_{act(AC)}) / 10$	公式右边第一项表示峰后应力降的相对大小, 第二项表示峰后应力降的绝对速率



图1 室内全尺寸线性切割试验设备^[28]

Fig.1 Laboratory full scale linear cutting testing equipment^[28]

表2 水泥砂浆试件的基本力学参数

Table 2 Basic mechanical parameters of cement mortar samples

试件编号	水泥：细砂：水/(质量比)	抗压强度 σ_c /MPa	抗拉强度 σ_t /MPa	弹性模量 E /GPa	泊松比 ν
1 [#]	1.00 : 5.27 : 1.08	9.56	0.87	6.24	0.30
2 [#]	1.00 : 4.03 : 0.58	21.20	1.59	8.08	0.28
3 [#]	1.00 : 3.00 : 0.50	28.32	1.93	11.25	0.27
4 [#]	1.00 : 2.00 : 0.40	36.79	2.67	15.36	0.25

为 150 mm×150 mm×150 mm(长×宽×高)的立方体, 表面经打磨抛光处理, 使其平整度达到 0.1 mm 以内。为保证试验试件基本力学性质的一致性, 各组试件选用相应配合比的同批水泥砂浆。

3.2 贯入破坏系统

滚刀贯入试验的加载系统采用中国科学院武汉岩土力学研究所研制的 RMT - 301 电液伺服刚性试验机。由于本试验为垂直贯入试验, 仅涉及试验机的垂直加载功能, 试验控制采用垂直活塞的行程控制。利用 RMT - 301 系统基于 Windows 平台的可视化操作软件, 可实时跟踪记录载荷、垂直活塞行程的变化, 便于试验控制。试件两侧可用侧向千斤顶通过刚性承压板施加一定的侧限应力。

由于楔刃滚刀切削岩石时刀圈磨损较快, 破岩效率迅速降低, 更换刀具耗时较长, 不利于 TBM 高效破岩, 目前已基本不再使用。而常截面(CCS)滚刀刀圈磨损较慢, 破岩效率比较稳定, 更换刀具耗时也较短, 有利于 TBM 高效破岩, 得到广泛应用。因此试验模型滚刀采用常截面形式, 并由高强度钢加工而成。考虑到 RMT - 301 试验机的加载空

间, 并力求模型滚刀尺寸最大, 最终将试验所用滚刀直径定为 120 mm, 刀刃宽度定为 13 mm。将试验机常规岩石试验压头拆除, 装配自行设计的模型滚刀。试验装置如图 2 所示。



图2 试验装置

Fig.2 Test apparatus

3.3 试验步骤

(1) 试件安放: 将试件安放于 RMT - 301 试验机的加载平台上, 将滚刀中心和试件中心对齐, 以避免偏心加载。试验分为 2 组, 一组无侧限应力; 另一组为避免试件迅速破坏, 施加 0.1 MPa 的小侧限应力。

(2) 预加载: 启动 RMT - 301 试验机的控制系统, 输入试验控制参数后进行预加载, 使滚刀垂直向下走完空程后与试件上部接触。

(3) 正式加载及数据记录: 开始正式加载, 轴向采用位移控制方式, 加载速率为 0.005 mm/s, 加载时滚刀持续贯入直至试件破坏, RMT - 301 试验机自动跟踪记录荷载 - 贯入度曲线。

(4) 数据处理及结果分析: 结合滚刀贯入试验数据, 运用回归分析方法, 评价岩石脆性指标对滚刀破岩效率的影响。

4 试验结果及分析

4.1 滚刀贯入试验中的荷载 - 贯入度曲线特征

压头贯入试验的最大特征是存在跃进破碎现象, 即在一定贯入度范围内, 贯入荷载随贯入度的增大而增高, 当达到某一贯入度后, 贯入荷载急剧降低, 继续压入后贯入荷载重新增高, 达到另一贯入度后再次发生荷载跌落, 当压头持续贯入时将多次重复这一现象^[48]。贯入荷载减小与试件中裂纹的

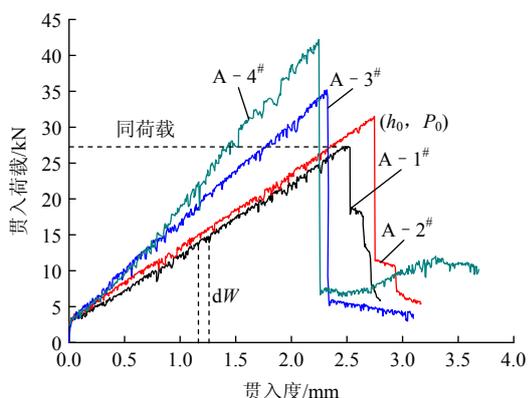
萌生与扩展有关，荷载的突然剧烈降低一般预示着主裂纹的生成，微裂纹在贯入荷载作用下逐渐闭合，试件又具有一定的承载能力，随着贯入度的持续增大，试件中生成更多的主裂纹并逐渐贯通交汇，如此反复，直至试件被压坏。滚刀贯入试验过程中的荷载 - 贯入度($P-h$)曲线和试件破坏形态分别如图 3, 4 所示。可以看出：在无侧限条件下，贯入荷载随贯入度的增大而增高，达到一定的贯入度后，试件沿近平行于滚刀长轴方向形成一条劈裂贯穿裂纹，贯入荷载急剧降低，导致试件突然破坏；在有侧限条件下，贯入荷载也先随贯入度的增大而增高，达



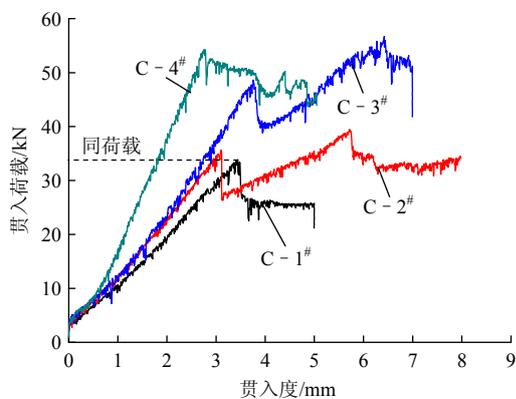
(b) 有侧限应力

图 4 试件破坏形态

Fig.4 Fragmentation form of samples



(a) 无侧限应力



(b) 有侧限应力

图 3 荷载 - 贯入度曲线

Fig.3 Load-penetration curves



(a) 无侧限应力

到一定的贯入度后，先沿平行于滚刀长轴方向形成一条劈裂贯穿裂纹，贯入荷载发生较大跌落，在侧限应力和贯入荷载的共同作用下，试件并未丧失承载能力，随着贯入度的继续增大，又沿垂直于滚刀长轴方向形成一条横向贯穿裂纹，荷载再次跌落直至试件破坏。

4.2 滚刀贯入试验结果

试验不同，选取的评价指标也不同。如图 3 所示，无侧限应力时，荷载随贯入度的增大按一定规律增高，达到某一临界值时突然大幅降低，试块已无承载能力。有侧限应力时， $P-h$ 曲线初期与无侧限应力时基本一致，当达到跃进破碎点后，虽然贯入荷载也发生突然跌落，但跌落值有限，随着贯入度的增大，贯入荷载再度上升达到另一跃进破碎点。一般认为第一次跃进破碎点前的贯入荷载与贯入度的 n 次方成正比^[49]，即有

$$P = Kh^n \tag{1}$$

式中： K 为抗侵入系数，取决于岩石的坚硬程度、刀具的形状和尺寸等，反映滚刀贯入岩石的难易程度； n 一般在 0.5~2.0 范围内。由图 3 可知， n 可近似取为 1.0，则有

$$K = \frac{P_0}{h_0} \tag{2}$$

式中： P_0 为第一次跃进破碎时的跃进荷载， h_0 为第一次跃进破碎时对应的贯入度(见图 3(a))。

滚刀贯入岩石所做的破碎功即是 $P-h$ 曲线与横坐标轴围成的面积(见图 3(a))，积分上限为第一次跃进破碎点对应的贯入度 h_0 ，即有

$$W = \int_0^{h_0} P(h) dh \approx \sum_{i=1}^n P_i \Delta h_i \tag{3}$$

式中： W 为破碎功， P_i 为第*i*加载步的法向力， Δh_i 为第*i*加载步的法向位移增量。

贯入试验中的绝大部分(70%~85%)能量主要用于形成压碎区^[50]，而裂纹扩展损伤区所消耗的能量小于15%，由于很难精确计算裂纹扩展损伤区的体积，加之压碎区和裂纹扩展损伤区单位体积的能量耗散也不相同，故仅考虑滚刀贯入水泥砂浆试件的体积(见图5)。将破碎单位体积岩石所需能量定义为比能^[51]，则有

$$SE = \frac{W}{V} \tag{4}$$

式中： SE 为比能， V 为滚刀贯入体积。

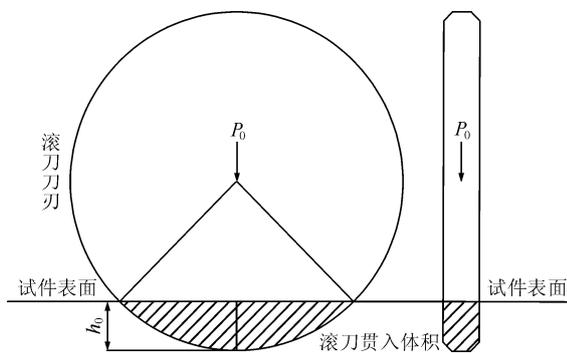


图5 滚刀贯入体积示意图
Fig.5 Disc cutter penetration volume

普遍认为岩石强度越高，脆性越显著。为仅考虑岩石脆性对滚刀破岩效率的影响，用单轴抗压强度对比能进行归一化，以消除岩石强度对滚刀破岩效率的影响，如下所示：

$$\overline{SE} = \frac{SE}{\sigma_c} \tag{5}$$

式中： \overline{SE} 为归一化比能， σ_c 为单轴抗压强度。

压头贯入试件时，试件中裂纹的萌生与扩展和试件脆性密切相关。因此，可用*P-h*曲线特征来表征试件的脆性性质。研究表明：岩石性质尤其是脆塑性对跃进破碎现象的幅度和次数有较大影响^[52]。从图3可以看出，*P-h*曲线并非平滑上升或下降，而是剧烈波动的。这是由于滚刀持续贯入试件时，试件内部不断有裂纹萌生并扩展，裂纹的每次萌生与扩展都相当于试件对滚刀的一次卸荷效应。贯入荷载随贯入度不断变化的现象是滚刀作用下试件逐渐破碎的直观反映，不同强度试件的贯入荷载起伏波动变化特征显著不同，因而可将其作为岩石脆性的评估依据。

将*P-h*曲线放大后，可观察到贯入荷载反复增

高和降低(见图6)。压头贯入低脆性岩石时，由于岩石内部微破裂频率较低，且更易发生塑性变形，因而贯入荷载增高周期较长，即贯入荷载增加数据点数较多。相反，压头贯入高脆性岩石时，由于岩石内部微破裂频率较高，且塑性变形较小，因而贯入荷载降低周期较长，即贯入荷载降低数据点数较多。因此，基于冲击贯入试验(见图7)，H. Copur等^[44]提出表征岩石脆性的2个新指标 B_{26} ， B_{27} ， B_{26} 表达式如下：

$$B_{26} = \frac{P_{dec}}{P_{inc}} \tag{6}$$

其中，

$$P_{dec} = \frac{1}{s} \sum_{t=1}^s P_{dec_t} \tag{7}$$

$$P_{inc} = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n P_{inc_p} \tag{8}$$

式中： P_{dec} 为贯入荷载降低周期的平均值， P_{inc} 为贯入荷载增高周期的平均值； P_{dec_t} 为第*t*个贯入荷载

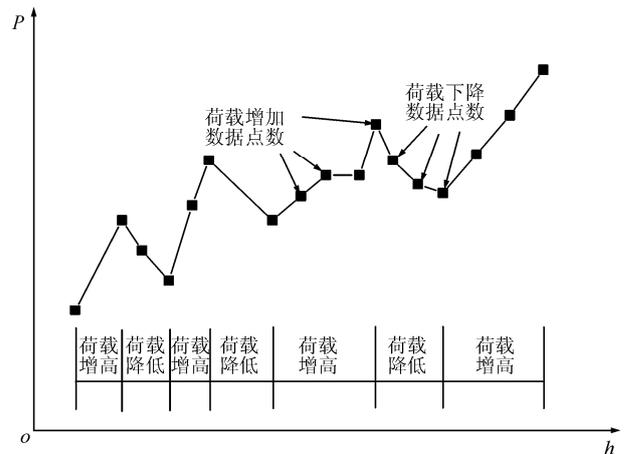


图6 *P-h*曲线波动图
Fig.6 Fluctuation of load-penetration curves

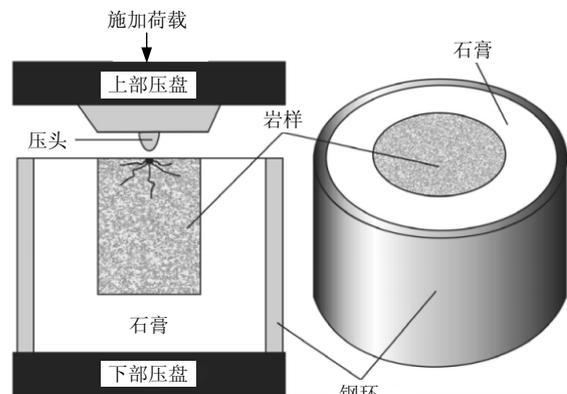


图7 冲击贯入试验装置^[13]
Fig.7 Punch penetration test apparatus^[13]

降低周期, $t = 1, 2, \dots, s$; $Pinc_p$ 为第 p 个贯入荷载增高周期, $p = 1, 2, \dots, n$ 。 B_{26} 越大, 岩石脆性越显著。 B_{27} 可表示为

$$B_{27} = \frac{k}{k+m} \tag{9}$$

式中: k 为贯入荷载增高数据点数, m 为贯入荷载降低数据点数。 B_{27} 越小, 岩石脆性越显著。

从图 6 可以看出, 不仅贯入荷载降低或增高周期和贯入荷载降低或增高数据点数不同, 相应的贯入荷载降低或增高值也不同, 因此, 可用贯入荷载降低累计值与贯入荷载增高累计值之比来表征岩石脆性:

$$B = \frac{P_{down}}{P_{up}} \tag{10}$$

式中: B 为岩石脆性指标, P_{down} 为贯入荷载降低累计值, P_{up} 为贯入荷载增高累计值。 B 越小, 岩石脆性越显著。

此外, 基于冲击贯入试验, S. Yagiz^[13]发现高脆性岩石因形成较大岩片, 其 $P-h$ 曲线荷载降较大, 波动较大, 而低脆性岩石因形成岩片较小, 其 $P-h$ 曲线荷载降较小, 波动较小, 因此, 可用 $P-h$ 曲线

的斜率(即 B_{28})来量化岩石脆性, 其表达式如下:

$$B_{28} = \frac{F_{max}}{h} \tag{11}$$

式中: F_{max} 为最大贯入荷载值。 B_{28} 越大, 岩石脆性越显著。

基于上述思路, 可认为滚刀贯入试验中的抗侵入系数 K 也可用于表征岩石脆性。 K 越大, 岩石脆性越高。 但应注意, 冲击贯入试验使用的贯入压头为尖端半径 3.175 mm、尖端角 120° 的锥形硬质合金压头, 而本试验中的贯入压头为刀刃宽度 13 mm、直径 120 mm 的高强度钢模型滚刀, 压头形状存在一定的区别。 由于压头形状显著影响压头下方试件中应力场的分布, 导致压头贯入试件过程中压碎区的形状与大小、裂纹的萌生与扩展、岩片的片起和剥落的不同, 进而影响整个压头贯入过程的效率。

为分析岩石强度对滚刀贯入的影响和岩石脆性对滚刀破岩效率的影响, 比较在无侧限应力和有侧限应力条件下各组试件加压至第 1 次跃进破碎和每组试件加压至与第 1 次跃进荷载相同时的滚刀贯入试验结果, 试验结果统计如表 3 所示。

表 3 滚刀贯入试验结果统计
Table 3 Statistical results of indentation test by disc cutter

条件	试件编号	贯入度 h_0/mm	跃进荷载 P_0/kN	破碎功 W/J	比能 $SE/(MJ \cdot m^{-3})$	归一化比能 $\overline{SE}/(MJ \cdot m^{-3} \cdot MPa^{-1})$	$K/(kN \cdot mm^{-1})$	B_2	B_3	B_4	B_{26}	B_{27}	B
无围压至第一次跃进破碎	A-1#	2.487	27.325	36.386	49.235	5.150	10.987	10.989	0.833	4.159	0.668	0.600	0.621
	A-2#	2.748	31.540	46.923	54.638	2.577	11.477	13.333	0.860	16.854	0.774	0.564	0.622
	A-3#	2.318	35.200	43.857	65.818	2.324	15.186	14.674	0.872	27.329	0.694	0.590	0.593
	A-4#	2.245	42.220	47.876	75.388	2.049	18.806	13.779	0.865	49.115	0.619	0.618	0.504
无围压同 1# P_0	B-1#	2.487	27.325	36.386	49.235	5.150	10.987	10.989	0.833	4.159	0.668	0.600	0.621
	B-2#	2.365	27.300	35.673	51.941	2.450	11.543	13.333	0.860	16.854	0.797	0.556	0.635
	B-3#	1.773	27.478	27.027	60.518	2.137	15.498	14.674	0.872	27.329	0.710	0.585	0.587
	B-4#	1.431	27.340	19.785	61.093	1.661	19.106	13.779	0.865	49.115	0.582	0.632	0.497
有围压至第一次跃进破碎	C-1#	3.439	33.840	59.654	49.698	5.198	9.840	10.989	0.833	4.159	0.812	0.552	0.690
	C-2#	3.106	35.616	56.912	55.186	2.603	11.467	13.333	0.860	16.854	0.737	0.576	0.653
	C-3#	3.757	48.594	87.867	64.241	2.268	12.934	14.674	0.872	27.329	0.813	0.551	0.705
	C-4#	2.752	54.257	70.484	81.879	2.226	19.715	13.779	0.865	49.115	0.653	0.605	0.573
有围压同 1# P_0	D-1#	3.439	33.840	59.654	49.698	5.198	9.840	10.989	0.833	4.159	0.812	0.552	0.690
	D-2#	2.959	33.852	51.891	54.090	2.551	11.440	13.333	0.860	16.854	0.733	0.577	0.644
	D-3#	2.745	33.904	46.565	54.290	1.917	12.351	14.674	0.872	27.329	0.839	0.544	0.714
	D-4#	1.817	33.856	29.738	64.238	1.746	18.633	13.779	0.865	49.115	0.636	0.611	0.570

注: A 表示无围压加压至第 1 次跃进破碎, B 表示无围压加压至第 1 次跃进荷载, C 表示有围压加压至第 1 次跃进破碎, D 表示有围压加压至第 1 次跃进荷载。

4.3 试验结果分析

(1) 岩石强度对滚刀贯入的影响

图 8 给出了在无侧限应力和有侧限应力条件下单轴抗压强度与跃进荷载之间的关系，可以看出：随着单轴抗压强度的增高，跃进荷载逐渐增高。图 9 给出了在相同贯入荷载条件下单轴抗压强度与贯入度之间的关系，可以看出：随着单轴抗压强度的增高，贯入度逐渐减小。上述结果均表明滚刀更难贯入高强度岩石。

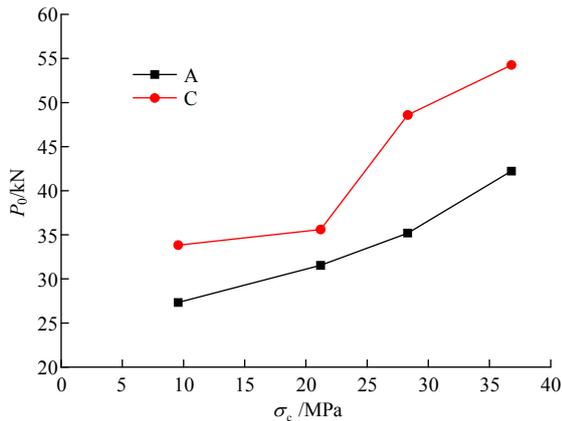


图 8 单轴抗压强度与跃进荷载关系

Fig.8 Relationships between uniaxial compressive strength and leap load

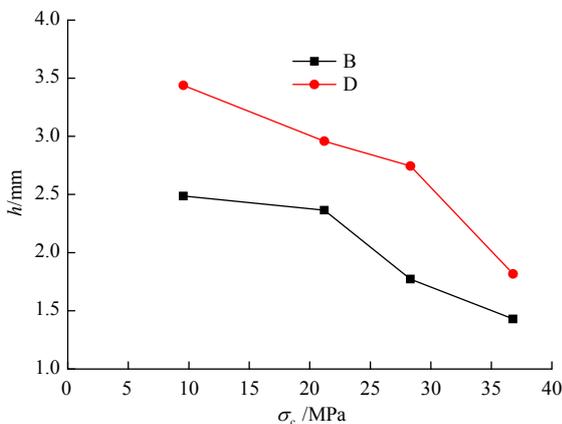


图 9 单轴抗压强度与贯入度关系

Fig.9 Relationships between uniaxial compressive strength and penetration

(2) 岩石脆性对滚刀破岩效率的影响

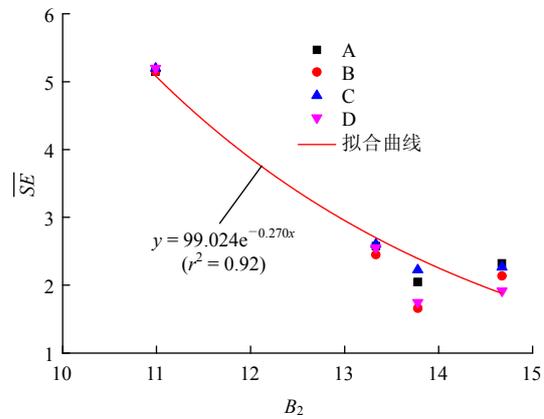
如前所述：由于影响滚刀破岩的因素众多，很难基于理论量化岩石脆性对滚刀破岩效率的影响。因此，采用回归分析方法，重点研究基于强度的脆性指标(B_2 , B_3 , B_4)和贯入试验的脆性指标(B_{26} , B_{27} , B , K)与滚刀破岩效率之间的关系。

由于脆性指标 B_2 和 B_3 之间显著相关，即

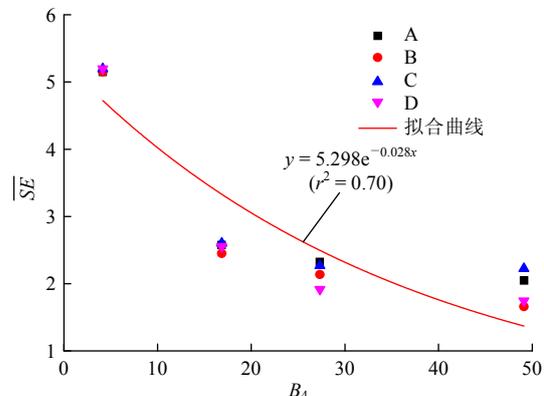
$$B_3 = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} = \frac{\frac{\sigma_c - 1}{\sigma_t} - 1}{\frac{\sigma_c - 1}{\sigma_t} + 1} = \frac{B_2 - 1}{B_2 + 1} \quad (12)$$

且计算脆性指标 B_2 较计算脆性指标 B_3 简单，故考虑脆性指标 B_2 对滚刀破岩效率的影响，不考虑脆性指标 B_3 对滚刀破岩效率的影响。

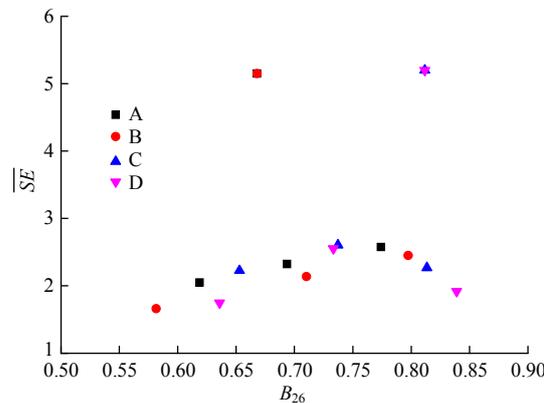
由于所加侧限应力较小，侧限应力对各脆性指标对应的归一化比能 \overline{SE} 影响较小，故此处不再区分有无侧限应力。下面运用回归分析方法，研究脆性指标 B_2 , B_4 , B_{26} , B_{27} , B 和 K 与归一化比能 \overline{SE} 之间的关系(见图 10)，确定最优拟合曲线及其决定系数以找到最适于评价滚刀破岩效率的脆性指标。



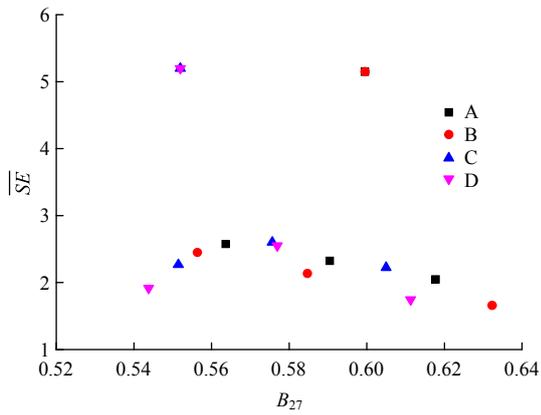
(a) B_2 与 \overline{SE} 关系



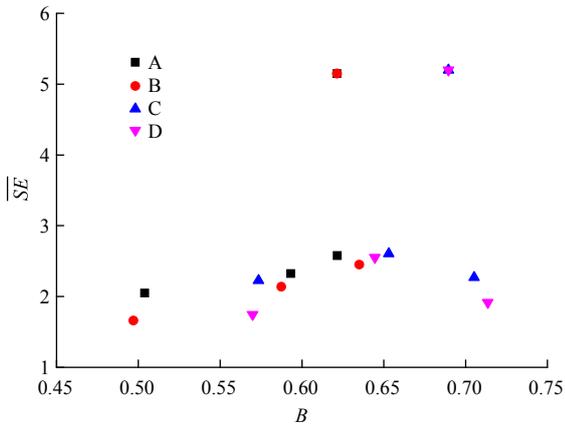
(b) B_4 与 \overline{SE} 关系



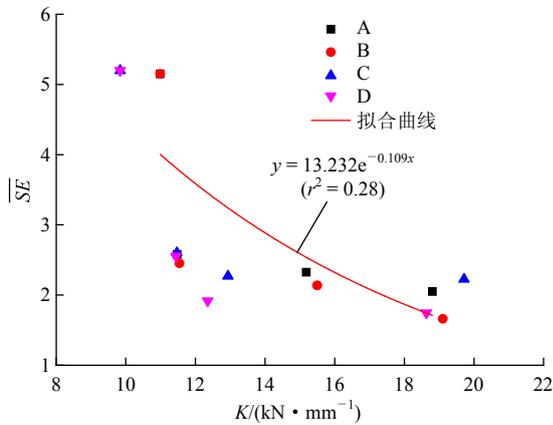
(c) B_{26} 与 \overline{SE} 关系



(d) B_{27} 与 \overline{SE} 关系



(e) B 与 \overline{SE} 关系



(f) K 与 \overline{SE} 关系图

图 10 脆性指标与 \overline{SE} 关系图

Fig.10 Relationships between brittleness indices and \overline{SE}

从图 10 可以看出：脆性指标 B_{26} ， B_{27} 和 B 与归一化比能 \overline{SE} 之间无任何相关性。脆性指标 K 和归一化比能 \overline{SE} 之间呈指数关系，但决定系数不高；脆性指标 B_2 ， B_4 和归一化比能 \overline{SE} 之间呈强烈的指数关系，其决定系数远远高于脆性指标 K 对应的决定系数。其中，脆性指标 K 与归一化比能 \overline{SE} 之间的关系如图 10(f) 所示，即

$$\overline{SE} = 13.232 \exp(-0.109K) \quad (r^2 = 0.28) \quad (13)$$

脆性指标 B_2 与归一化比能 \overline{SE} 之间的关系如图 10(a) 所示，即

$$\overline{SE} = 99.024 \exp(-0.270B_2) \quad (r^2 = 0.92) \quad (14)$$

脆性指标 B_4 与归一化比能 \overline{SE} 之间的关系如图 10(b) 所示，即

$$\overline{SE} = 5.298 \exp(-0.028B_4) \quad (r^2 = 0.70) \quad (15)$$

显然，应优选脆性指标 B_2 来评价滚刀破岩效率，其次是脆性指标 B_4 。试验结果表明：随岩石脆性的增高，归一化比能降低，滚刀破岩效率增高。虽然式(14)和(15)的决定系数都较高，但这并不能保证回归模型的可靠性，还需用 F 检验来验证回归模型的有效性。给定显著性水平 $\alpha = 0.05$ ，回归模型的 F 检验结果如表 4 所示。

表 4 F 检验结果

Table 4 Results of F -test

公式编号	F 检验结果	
	列表值	计算值
(14)	4.6	126.61
(15)	4.6	33.50

从表 4 可以看出，计算 F 值显著大于列表 F 值，故可认为在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 条件下，回归模型有效。

普遍认为滚刀破岩是岩石张拉破坏与剪切破坏的综合结果。剪切破岩能耗普遍高于张拉破岩能耗。从表 3 和图 10 可以发现，1#水泥砂浆试件的归一化比能异常高，约为 2#水泥砂浆试件的 2 倍，这可能是由于滚刀贯入低强度岩石时，剪切破坏占据主要作用。随着岩石强度的增高，滚刀破岩模式又逐渐转变为以张拉破坏为主的拉剪破坏模式。从图 8 可以看出，当单轴抗压强度低于 20 MPa 时，跃进荷载较为接近；当单轴抗压强度高于 20 MPa 时，跃进荷载迅速增高。从图 9 可以看出，当单轴抗压强度低于 20 MPa 时，贯入度较为接近；当单轴抗压强度高于 20 MPa 时，贯入度迅速减小。从图 10 可以看出，当单轴抗压强度低于 20 MPa 时，归一化比能异常高；当单轴抗压强度高于 20 MPa 时，归一化比能较低。因此，可将单轴抗压强度约 20 MPa 定义为单轴抗压强度过渡值。以上结果均说明滚刀不适宜切削单轴抗压强度低于 20 MPa 的软岩，这与目前普遍认为“滚刀最适宜切削单轴抗压强度为 30~150 MPa 的中硬岩和硬岩”^[53]的观点是一致的。实际工程中，主要采用刮刀切削软岩。需指出：当

选定 TBM 类型后,在实际掘进过程中不可避免会遇到一些软弱地层,为减小 TBM 能量耗损、优化出碴、延长刀具寿命和避免机器损坏,TBM 司机通常会降低刀盘推力和刀盘转速^[54],以较低速度通过该段软弱地层。

需要说明的是,上述试验试件均采用水泥砂浆制备,其强度普遍较低,试验结果仅适用于单轴抗压强度低于 40 MPa 的情况。此外,由于水泥砂浆试件和真实试件在矿物成分、颗粒大小与胶结方式、孔隙率以及各向异性等方面均存在一定区别,故水泥砂浆试件呈现出的脆性与真实试件的脆性肯定存在一定区别,将来可采用真实试件对此进行进一步验证。但不可否认的是,试验结果表明随着岩石脆性的增高,滚刀破岩效率增高,这与目前的普遍观点是一致的,应优先选用脆性指标 B_2 来评价滚刀破岩效率,其次是脆性指标 B_4 。这是第一次通过滚刀贯入试验来揭示这一结论,这有助于选取合适的岩石脆性指标来评价滚刀破岩效率。同时,本文仅对试验试件施加 0.1 MPa 的小侧限应力,以后还需对不同侧限应力条件下岩石脆性对滚刀破岩效率的影响进行深入研究。此外,目前普遍认为“滚刀最适宜切削单轴抗压强度为 30~150 MPa 的中硬岩和硬岩”的观点主要是根据 TBM 施工现场的大量施工经验总结而来,对于滚刀不适宜切削的岩石单轴抗压强度下限值,至今未见报道,本文根据试验结果提出的 20 MPa 下限值是对这一问题的大胆猜测,由于试验数据有限,今后还需收集更多的数据对这一问题进行更加深入的研究。

5 结 论

脆性是岩石重要的力学性质之一,本文首先对国内外不同学者拟定的脆性指标进行归纳和分类,随后通过滚刀贯入试验,采用回归分析方法,重点研究基于强度和贯入试验的脆性指标对滚刀破岩效率的影响,得出以下结论:

(1) 目前国内外用于评价岩石脆性的指标多达三十几种,因研究目的与对象的不同,每个脆性指标都有其各自的用途与价值,而用于评价滚刀破岩效率的脆性指标还没有统一。

(2) 为评价岩石脆性对滚刀破岩效率的影响,通过滚刀贯入试验,引入归一化比能概念,提出用归一化比能来评价岩石脆性指标对滚刀破岩效率影

响的新方法。

(3) 基于滚刀贯入试验的 $P-h$ 曲线特征,提出用贯入荷载降低累计值与贯入荷载增高累计值之比来表征岩石脆性的新指标 B 。

(4) 基于滚刀贯入试验结果,研究发现滚刀更难贯入高强度岩石;脆性指标 B_2 和 B_4 与归一化比能 \overline{SE} 之间呈强烈的指数函数关系,随着岩石脆性的增高,归一化比能降低,滚刀破岩效率增高。应优先选用脆性指标 B_2 来评价滚刀破岩效率,其次是脆性指标 B_4 。

(5) 将单轴抗压强度约 20 MPa 定义为单轴抗压强度过渡值。当单轴抗压强度低于 20 MPa 时,跃进荷载较为接近,贯入度较为接近,归一化比能异常高;当单轴抗压强度高于 20 MPa 时,跃进荷载迅速增高,贯入度迅速减小,归一化比能较低。说明滚刀不适宜切削单轴抗压强度小于 20 MPa 的软岩。

本文试验结果对滚刀破岩效率评价时岩石脆性指标的选取具有一定的指导意义。

参考文献(References):

- [1] 钱七虎,李朝甫.隧道掘进机在中国地下工程中应用现状及前景展望[J].地下空间,2002,22(1):1-11.(QIAN Qihu, LI Chaopu. The present and prospect of application of tunneler in China's underground engineering[J]. Underground Space, 2002, 22(1): 1-11.(in Chinese))
- [2] EVANS I, POMEROY C D. The strength, fracture and workability of coal[M]. London: Pergamon Press, 1966: 276-278.
- [3] SINGH S P. Brittleness and the mechanical winning of coal[J]. Mining Science and Technology, 1986, 3(3): 173-180.
- [4] SINGH S P. Criterion for the assessment of the cuttability of coal[M]. Amsterdam: Elsevier, 1987: 225-239.
- [5] GOKTAN R M. Brittleness and micro-scale rock cutting efficiency[J]. Mining Science and Technology, 1991, 13(3): 237-241.
- [6] ALTINDAG R. The evaluation of rock brittleness concept on rotary blast hole drills[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2002, 102(1): 61-66.
- [7] ALTINDAG R. Correlation of specific energy with rock brittleness concepts on rock cutting[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003, 103(3): 163-171.
- [8] KAHRAMAN S, ALTINDAG R. A brittleness index to estimate fracture toughness[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(2): 343-348.

- [9] BLINDHEIM O T, BRULAND A. Boreability testing[C]// Norwegian TBM Tunnelling 30 Years of Experience with TBMs in Norwegian Tunnelling: Norwegian Soil and Rock Engineering Association. [S. l.]: [s. n.], 1998: 29 - 34.
- [10] KAHRAMAN S. Correlation of TBM and drilling machine performances with rock brittleness[J]. *Engineering Geology*, 2002, 65(4): 269 - 283.
- [11] YAGIZ S. Development of rock fracture and brittleness indices to quantify the effects of rock mass features and toughness in the CSM model basic penetration for hard rock tunneling machines[Ph. D. Thesis][D]. Golden: Colorado School of Mines, 2002.
- [12] YAGIZ S. A model for the prediction of tunnel boring machine performance[C]// Proceedings of the 10th IAEG Conference on Engineering Geology for Tomorrow's Cities. Nothingam: [s. n.], 2006: 383 - 393.
- [13] YAGIZ S. Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, 24(1): 66 - 74.
- [14] GONG Q M, ZHAO J. Influence of rock brittleness on TBM penetration rate in Singapore granite[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, 22(3): 317 - 324.
- [15] MORLEY A. Strength of materials[M]. London: Longman Green, 1944: 71 - 72.
- [16] HETENYI M. Handbook of experimental stress analysis[M]. New York: John Wiley, 1966: 23 - 25.
- [17] JESSE V H. Glossary of geology and related sciences[M]. Washington D. C: American Geological Institute, 1960: 99 - 102.
- [18] OBERT L, DUVALL W I. Rock mechanics and the design of structures in rock[M]. New York: John Wiley, 1967: 78 - 82.
- [19] RAMSAY J G. Folding and fracturing of rocks[M]. London: McGrawHill, 1967: 44 - 47.
- [20] GEORGE E A. Brittle failure of rock material-test results and constitutive models[M]. [S. l.]: A. A. Balkema, 1995: 123 - 128.
- [21] HUCKA V, DAS B. Brittleness determination of rocks by different methods[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1974, 11(10): 389 - 392.
- [22] ANDREEV G E. Brittle failure of rock materials: test results and constitutive models[M]. Netherlands: A. A. Balkema, 1995: 446.
- [23] 刘恩龙, 沈珠江. 岩土材料的脆性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(19): 3 449 - 3 453.(LIU Enlong, SHEN Zhujiang. Study on brittleness of geomaterials[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(19): 3 449 - 3 453.(in Chinese))
- [24] 李庆辉, 陈勉, 金衍, 等. 页岩脆性的室内评价方法及改进[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(8): 1 680 - 1 685.(LI Qinghui, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Indoor evaluation method for shale brittleness and improvement[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(8): 1 680 - 1 685.(in Chinese))
- [25] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 基于应力-应变曲线的岩石脆性特征定量评价方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(6): 1 114 - 1 122.(ZHOU Hui, MENG Fanzhen, ZHANG Chuanqing, et al. Quantitative evaluation of rock brittleness based on stress-strain curve[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(6): 1 114 - 1 122. (in Chinese))
- [26] 王宇, 李晓, 武艳芳, 等. 脆性岩石起裂应力水平与脆性指标关系探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(2): 264 - 275.(WANG Yu, LI Xiao, WU Yanfang, et al. Research on relationship between crack initiation stress level and brittleness indices for brittle rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(2): 264 - 275.(in Chinese))
- [27] BISHOP A W. Progressive failure with special reference to the mechanism causing it[C]// Proceedings of the Geotechnical Conference. Oslo: [s. n.], 1967: 142 - 150.
- [28] ROSTAMI J, OZDEMIR L. A new model for performance prediction of hard rock TBMs[C]// Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference. [S. l.]: [s. n.], 1993: 793 - 809.
- [29] ALTINDAG R. The role of rock brittleness on the analysis of percussive drilling performance[C]// Proceedings of the 5th Turkish National Rock Mechanics Symposium. Isparta: [s. n.], 2000: 105 - 112.
- [30] ALTINDAG R. Relationships between brittleness and specific energy in excavation mechanics[C]// Proceedings of the 9th Regional Rock Mechanics Symposium. Izmir: [s. n.], 2008: 437 - 451.
- [31] COATES D F, PARSONS R C. Experimental criteria for classification of rock substances[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1966, 3(3): 181 - 189.
- [32] HAJIABDOLMAJID V, KAISER P. Brittleness of rock and stability assessment in hard rock tunneling[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2003, 18(1): 35 - 48.
- [33] BARON L I. Determination of properties of rocks[M]. Moscow: Gozgotekhizdat, 1962: 231 - 233.
- [34] DAS B, HUCKA V. Laboratory investigation of penetration properties of the complete coal series[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1975, 12(7): 213 - 217.

- [35] KIDYBINSKI A. Bursting liability indices of coal[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18(4): 295 - 304.
- [36] BATOUGINA I M, PETOUKHOV I M, VINOKUR B S, et al. Methodological instructions for rockburst prophylaxis accounting the deposit geodynamics[M]. Leningrad: VNIMI, 1983: 132 - 135.
- [37] BERGMAN S G A, STILL H. Rockburst problems in a 2.6 million m³ underground crude oil storage in granite[C]// Proceedings of the Fifth Congress ISRM. [S. l.]: [s. n.], 1983: 302 - 309.
- [38] AUBERTIN M, Gill D E. Use méthodologie d'évaluation du potentiel de coups de terrain dans les mines d'Abitibi[C]// Proceedings Colloque sur le Controle de Terrain(AMMQ). [S. l.]: [s. n.], 1988: 47 - 77.
- [39] TARASOV B G. Superbrittleness of rocks at high confining pressure[C]// Proceedings of the Fifth International Seminar on Deep and High Stress Mining. Santiago: [s. n.], 2010: 119 - 133.
- [40] HONDA H, SANADA Y. Hardness of coal[J]. Fuel, 1956, 35(4): 451 - 461.
- [41] LAWN B R, MARSHALL D B. Hardness, toughness and brittleness: an indentation analysis[J]. Journal of American Ceramic Society, 1979, 62(7/8): 347 - 350.
- [42] QUINN J B, QUINN G D. Indentation brittleness of ceramics: a fresh approach[J]. Journal of Materials Science, 1997, 32(16): 4 331 - 4 346.
- [43] PROTODYAKONOV M M. Mechanical properties and drillability of rocks[C]// Proceedings of the 5th Symposium on Rock Mechanics. Twin Cities, USA: University of Minnesota Press, 1963: 103 - 118.
- [44] COPUR H, BILGIN N, TUNCDEMIR H, et al. A set of indices based on indentation test for assessment of rock cutting performance and rock properties[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003, 103(9): 589 - 600.
- [45] BAZANT Z P, KAZEMI M T. Determination of fracture energy, process zone length and brittleness number from size effect, with application to rock and concrete[J]. International Journal of Fracture, 1990, 44(2): 111 - 131.
- [46] 冯涛, 谢学斌. 岩石脆性及描述岩爆倾向的脆性系数[J]. 矿冶工程, 2000, 20(4): 18 - 20.(FENG Tao, XIE Xuebin. Brittleness of rocks brittleness indexes for describing rock burst proneness[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2000, 20(4): 18 - 20.(in Chinese))
- [47] RICKMAN R, MULLEN M, PETRE E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: all shale plays are not clones of the Barnett shale[R]. SPE 115258, 2008: 1 - 11.
- [48] 纪昌明, 张照煌, 叶定海. 盘形滚刀刀间距对岩石跃进破碎参数的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2008, 16(2): 255 - 263.(JI Changming, ZHANG Zhaohuang, YE Dinghai. The influence of the disk cutter space on rock's jump break coefficients[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2008, 16(2): 255 - 263.(in Chinese))
- [49] 徐小荷, 余静. 岩石破碎学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984: 266 - 268.(XU Xiaohe, YU Jing. Rock fragmentation[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984: 266 - 268.(in Chinese))
- [50] MISHNAEVSKY JR L L. Physical mechanisms of hard rock fragmentation under mechanical loading: a review[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1995, 32(8): 763 - 766.
- [51] TEALE R. The concept of specific energy in rock drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1965, 2(1): 57 - 73.
- [52] DOLLINGER G L. Choosing cutters for the best boreability[J]. Compressed Air Magazine, 1977, 82(9): 15 - 19.
- [53] 何发亮, 谷明成, 王石春. TBM 施工隧道围岩分级方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1 350 - 1 354.(HE Faliang, GU Mingcheng, WANG Shichun. Study on surrounding rockmass classification of tunnel cut by TBM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1 350 - 1 354.(in Chinese))
- [54] BARTON N R. TBM tunnelling in jointed and faulted rock[M]. Boca Raton: CRC Press, 2000: 139 - 142.