

DOI: 10.11779/CJGE201903018

岩石的损伤、黏结和摩擦特性研究

尤明庆

(河南理工大学能源科学与工程学院, 河南 焦作 454003)

摘要: 收集文献上多种完好及损伤后岩石的常规三轴压缩强度, 研究材料的损伤、黏结和摩擦特性及其对围压与强度之间关系的影响。围压增大使裂隙的摩擦承载能力增大, 若达到附近材料或其他弱面承载能力后则不再直接影响试样的强度; 材料局部损伤的影响随着围压增大降低, 试样承载的主应力差以指数形式趋于极限, 即最大剪应力等于材料的真实黏结力。大理岩塑性变形引起局部剪切屈服, 但真实黏结力没有降低; 加热 600℃ 足够长时间后造成使晶界完全开裂则引起真实黏结力降低。岩石剪切破坏时强度与围压的关系可用指数准则描述; 不过, 花岗岩在围压 20 MPa 之内可出现沿轴向劈裂破坏而强度随围压线性增加。

关键词: 岩石力学; 强度准则; 损伤; 塑性变形; 高温烘烤; 黏结; 摩擦

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)03-0554-07

作者简介: 尤明庆(1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩石力学方面的教学与研究工作。E-mail: youmq@hpu.edu.cn。

Properties of damage, cohesion and friction of rocks

YOU Ming-qing

(School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: The conventional triaxial compressive strengths of intact and damaged rocks are collected to study their properties of damage, cohesion and friction, and to reveal the influences of confining pressure on strength. The bearing capacity of a crack from friction increases with confining pressure, and the crack does not affect the strength of specimen when its bearing capacity achieves that of the materials or other cracks in neighborhood. The effect of localized damage on strength decreases with the increase of the confining pressure, and the difference of the principal stress is well fit to the exponential criterion. There is a limitation of the difference of the principal stress, or the maximum shear stress is equal to the genuine cohesion of rock materials. The genuine cohesion of marble is not influenced by the plastic deformation resulting from shear yield in the specimen, but it will decrease when the grain boundaries of the marble heated to 600℃ are separated. The exponential criterion can describe the effect of the confining pressure on the strength of rock specimen in shear failure. However, the granite specimen compressed within the confining pressure of 20 MPa fails splitting along the axial direction, and the strength increases linearly with the confining pressure.

Key words: rock mechanics; strength criterion; damage; plastic deformation; high temperature; cohesion; friction

0 引言

因桥梁、大坝、隧道等工程建设以及煤炭、石油等矿物开采, 过去百年对岩石力学性质开展了全面而深入的研究; 时至今日, 裂隙、围压对试样强度的影响机理以及相关因素仍是讨论的问题^[1-3]。

1773 年 Coulomb 提出土体破坏时剪切应力为

$$\tau_s = c + \sigma \tan \varphi, \quad (1)$$

式中 c 为黏结力, σ 为正应力, φ 为内摩擦角。19 世纪末 Mohr 将其运用于岩石。围压下轴向压缩的圆柱试样, 倾角 $\alpha = 45^\circ + \varphi/2$ 断面上剪应力与内摩擦的差值最大, 达到黏结力 c 时承载的轴向应力即强度为

$$\sigma_s = Q + K\sigma_3, \quad (2)$$

式中, σ_3 为围压; 材料参数 $K = \tan^2 \alpha$ 和 $Q = 2c \tan \alpha$ 可从试验结果拟合得到^[4]。

岩石内存在各种尺度的损伤, 材料本身并不能同时黏结和摩擦, Coulomb 准则只是对岩土强度的宏观描述, 其黏结力和内摩擦角并非材料的物理参数; 另一方面, 材料的黏结力随塑性变形而降低乃至丧失, 而摩擦力则与围压相关, 且可能因变形而增大; 材料破裂即丧失黏结力后可以摩擦承载。岩石矿物构成复杂, 内部裂隙、弱面的分布也有所差异, 引起试样强度离散性以及随围压变化的非线性^[5-6]。

收稿日期: 2018-03-05

已经提出 20 种以上的非线性强度准则作为式(2)的改进^[7-8], 涵盖多项式、幂函数、指数函数等各种数学类型。最著名的是广义 Hoek-Brown 准则

$$\frac{\sigma_s - \sigma_3}{\sigma_c} = \left(1 + m \frac{\sigma_3}{\sigma_c}\right)^n, \quad (3)$$

简记为 HB(σ_c , m , n), 式中: σ_c 为单轴压缩强度, m 和 n 为拟合参数而没有力学含义^[9]。该准则可以描述脆性岩石的强度特性, 但不能适用至延性阶段。

基于岩石黏结力和摩擦在同一点不能同时存在, YOU 提出指数强度准则^[10]

$$\sigma_s - \sigma_3 = Q_\infty - (Q_\infty - Q_0) \exp \left[-\frac{(K_0 - 1)\sigma_3}{Q_\infty - Q_0} \right], \quad (4)$$

简记为 Exp(Q_0 , Q_∞ , K_0), 其 3 个拟合参数具有明确的力学含义: Q_0 为单轴压缩强度, Q_∞ 为主应力差的极限值, K_0 为围压 0 时强度随围压的增加速率, 相应的摩擦角 φ_0 可作为裂隙摩擦角的偏低估计^[11]。该准则能够准确描述粗面岩、砂岩、页岩、大理岩、白云岩以及石灰岩等剪切破坏的强度随围压变化^[7, 12], 但花岗岩因低围压下劈裂破坏而不能描述^[13], 相关机理本文将予以说明。

岩石由多种矿物颗粒构成, 具有不同的结构和各种损伤, 不仅体现为试验结果的离散, 也会引起围压对强度的不同影响。本文收集了多种完整及损伤后岩石的常规三轴压缩强度, 研究材料的损伤、黏结和摩擦特性以及强度准则。

1 岩石的损伤及表现

因计算、绘图的便利以及网络文献所提供的大量试验数据, 新形式的强度准则不断被提出。通常强度准则中参数增加, 则对试验数据的拟合精度提高; 已知的例外是含有单一参数即单轴压缩强度 σ_c 的正则抛物线准则:

$$\sigma_s = (\sqrt{\sigma_c} + \sqrt{\sigma_3})^2. \quad (5)$$

该准则对大理岩以及砂岩等颗粒性岩石的强度拟合与两参数的 Hoek-Brown 准则相当而优于 Coulomb 准则^[7, 14-15]。不过, 岩石内裂隙因围压增加而闭合承载, 对强度的影响程度降低; 拟合参数 σ_c 相当于岩石没有初始损伤的单轴强度。

1.1 砂岩的天然损伤

砂岩是近于球形的颗粒胶结而成, 胶结物的强度通常低于颗粒。裂隙、孔隙以及层理是影响砂岩强度的重要因素, 后者引起力学性质的各向异性。

来自平顶山和赵固的两个煤矿的砂岩加工为直径 50 mm、长 100 mm 的圆柱试样进行单轴和常规三轴

压缩。单轴压缩试验均重复 6 次。基于绝对偏差最小而不是偏差平方和最小^[8, 14], 以正则抛物线准则即公式(5)拟合强度与围压的关系(图1)。

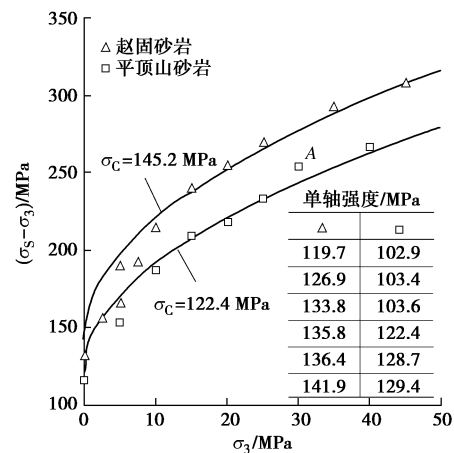


图1 砂岩强度的离散性特征和初始损伤

Fig. 1 Strength scattering and initial damage of sandstones

围压 $\sigma_3 < 10$ MPa 时赵固砂岩强度显著离散, 6 个单轴压缩强度在 119.7~141.9 MPa; 而 $\sigma_3 \geq 15$ MPa 后能够以正则抛物线准则准确描述, 相应的 $\sigma_c = 145.2$ MPa 略高于实际单轴强度的最大值, 可以看作该砂岩的理想强度。指数准则 Exp(132.6, 327.7, 10.7) 可描述围压 0~45 MPa 内强度变化, 将在后面具体讨论。

平顶山砂岩强度的拟合参数 $\sigma_c = 122.4$ MPa, 低于其最高值 129.4 MPa。不过, 若以该最高值作为 σ_c , 则正则抛物线准则正好通过围压 30 MPa 时强度 283.5 和 284.1 MPa (图1中A)。基于图1给出的单轴强度可将该砂岩分为两组, 其差别并不是局部的损伤而是整体的黏结特征不同, 并不会随围压的增加而消失。

低围压时锦屏砂岩的强度^[16]高于 Bunt 砂岩^[17], 但增加趋势最终相同, 且两者单轴压缩强度相同(图2)。这意味着两种砂岩整体黏结特征相同而内部初始损伤不同。图2中给出 $\sigma_c = 85$ MPa 的正则抛物线准则, 可以作为没有初始损伤试样的强度。图中以实心正方给出 3 个锦屏砂岩卸围压强度, 借以说明单轴强度偏低源于该试样有别于其他试样的损伤。

Fontainebleau 砂岩^[18]4 个试样的单轴强度仅为 8.5~12.2 MPa, 但 $\sigma_3 > 30$ MPa 之后其三轴强度与 Bunt 砂岩相当。砂岩内部裂隙之类的初始损伤因围压增加而承载能力增加, 其对试样强度的影响逐渐减小。图2的试验结果表明, 试样内的局部损伤是单轴强度偏低, 但也引起强度随围压增加的较高速率。

图2中给出指数准则对锦屏砂岩强度的拟合曲线; 另两种砂岩同样可以指数准则描述, 只是具有不同的单轴强度和初始围压影响系数。

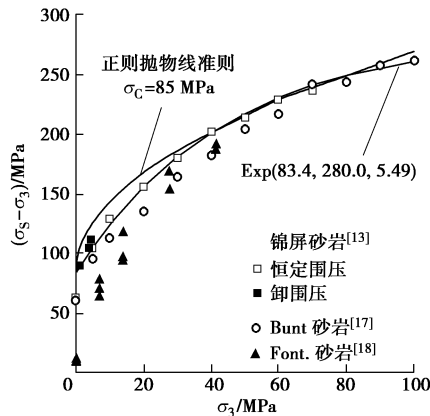


图2 围压对砂岩强度的影响及真正黏结力与极限主应力差

Fig. 2 Effects of confining pressure on strength of sandstones and maximum stress difference from genuine cohesion

1.2 大理岩的人工损伤

将直径 50 mm、长 100 mm 的南阳大理岩试样在围压 40 MPa 预压至延性变形阶段，主应力差保持在 145 MPa 左右，随塑性变形增加并不降低；完全卸载后得到损伤试样，其超声波速度以及单轴再压缩的强度和杨氏模量都随塑性变形增大而降低^[19]。图 3 给出部分损伤试样不同围压再压缩的强度。

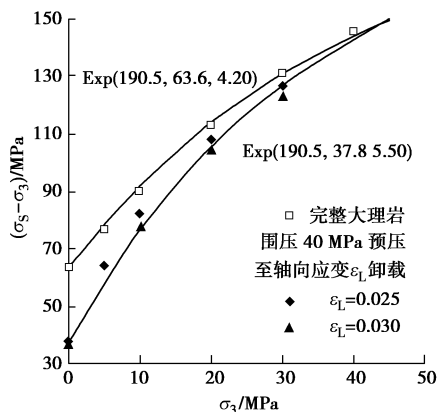


图3 完整及围压下压缩损伤的南阳大理岩常规三轴强度^[19]

Fig. 3 Strengths of intact and compress-damaged specimens of Nanyang marble under various confining pressures^[19]

围压下轴向压缩的塑性变形确实引起岩石材料的损伤，局部黏结力丧失而转化为摩擦承载，但整体黏结特征没有变化，并不影响其极限承载能力。这与图 2 中 3 种砂岩之间的强度随围压的变化机理完全类似。岩石高位压下的延性变形特征将与软钢类似，材料屈服将由最大剪应力控制；而主应力差的缓慢增加源于试验机压头的端部摩擦以及试样横截面增加^[2]。

图 4 是 Wombeyan 大理岩的试验数据。完整试样 ▲ 来自 5 个大理岩块^[20]，因而强度表现出明显的离散性，基于平均值拟合的指数准则已在图中给出，平均拟合偏差为 1.5 MPa，其给出的极限主应力差为 163.5

MPa，即该大理岩的真正黏结力为 81.8 MPa。这只是一个平均值：不同岩块的真正黏结力是不同的。

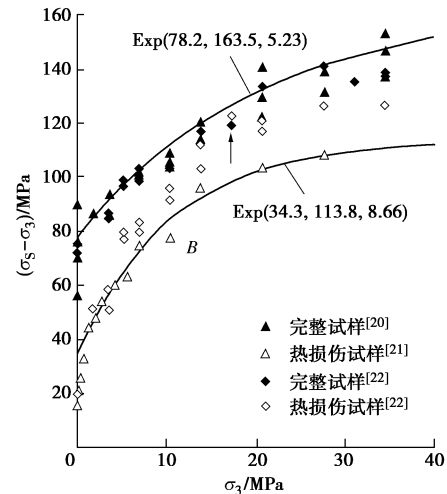


图4 完整及热损伤大理岩的常规三轴强度

Fig. 4 Strengths of intact and heat-damaged specimens of Wombeyan marble under various confining pressures

文献[21]对同名大理岩的试样加温至 600℃ 保持恒定，待晶粒破裂产生的“pinging”声消失后停止加温。观察表明晶粒界面已充分开裂，可以手指剥离而裂面大致平整。不计围压较低的 4 个数据，对围压 1.4 MPa 以上的 10 个数据进行指数准则拟合，平均拟合偏差为 1.9 MPa； Q_0 为 113.8 MPa，即真正黏结力为 56.9 MPa；烘烤使之降低了 25 MPa；拟合参数 $Q_0 = 34.3$ MPa 远高于实际强度 15.9 MPa，表明试样并非剪切破坏。

文献[22]对大理岩试样加温至 600℃（用时 80 min）随即在空气中冷却，晶粒界面似没有完全开裂，在高围压时部分热损伤试样与完整试样强度相当（如图 4 中箭头附近区域），而与文[21]损伤试样强度在高围压时差异显著，但单轴以及围压 3.5 MPa 之内差别不大。这表明局部损伤控制了单轴及低围压的试样强度，而围压增高后，文献[22]的损伤试样弱面强度得到显著提高，不再影响试样强度。当然，试样在炉中位置差异等原因也会引起损伤不同，表现为强度的离散性。试样整体具有的较高黏结力仅在高围压时起作用。

如图 4 所示，文献[20]和文献[22]所做完整试样的强度相当，后者离散略小；不过，文献[21, 23]引用文献[20]完整试样的三轴强度时将主应力差误为最大主应力。

图 5 给出低围压下损伤试样的强度，文献[21]的损伤试样其晶界完全开裂，强度变化较为规则，因而具体计算各段围压影响系数。不过，并不能据此基于 Coulomb 准则计算内摩擦角：摩擦因子是一个确定的

材料参数; 但可如下计算试样的摩擦滑移面倾角。

完整试样的初始围压影响系数 $K_0=5.23$, 可确定大理岩的摩擦角 $\varphi_0=42.8^\circ$; 倾角 β 断面的摩擦承载能力随围压的变化系数为^[24]

$$K = \frac{\tan \beta + \tan \varphi_0 \tan^2 \beta}{\tan \beta - \tan \varphi_0} = \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \varphi_0)} \quad (6)$$

围压影响系数 K 和摩擦面倾角 β 在图 5 给出, 两者具有正相关。围压对强度的影响机理是: 开裂的晶界使得岩石破裂包含爬坡和剪断的两种成分, 两者方向不同; 低围压时“爬坡”所需载荷较小, 表现为沿轴向的劈裂特征; 围压增大使得爬坡的阻力增大, 引起爬坡角减小, 摩擦与剪断的方向逐步接近, 体现为“表观黏结力”的增加而摩擦对强度的贡献减小。

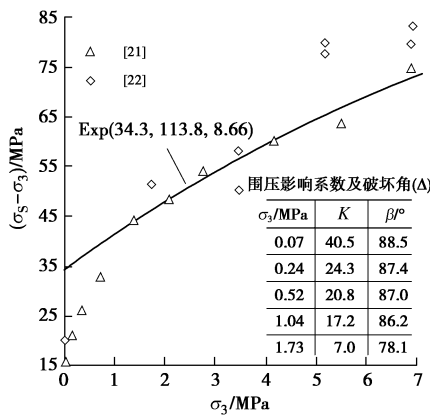


图 5 热损伤大理岩在低围压下的强度

Fig. 5 Strengths of heat-damaged Wombeyan marble under low confining pressures

1.3 花岗岩的强度及裂隙影响

花岗岩由石英、长石和云母等矿物构成, 内部有大量的晶界裂隙和穿晶^[25-26]。围压较低时裂隙决定了试样的强度; 围压 20 MPa 以上, 二长岩因缺乏高强度石英矿物其强度才低于花岗岩 (图 6)。

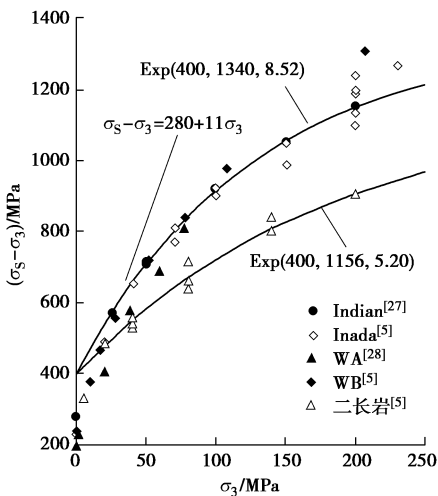


图 6 二长岩及 4 种花岗岩的常规三轴压缩强度

Fig. 6 Strengths of monzonite and four granites under various confining pressures

Inada 花岗岩低围压时强度离散较小(2 个单轴强度为 226 和 232 MPa), 而围压 200 MPa 时强度 1301~1438 MPa^[5]。后者源于试样尺度较小 (15 mm×30 mm) 而晶粒尺度较大 (3~4 mm) 引起的试样内矿物分布差异; 前者表明矿物分布差异对单轴及低围压的劈裂破坏过程关系不大。Indian 花岗岩晶粒较小 (0.3~0.5 mm) 而试样尺度较大 (25 mm×62.5 mm)^[27], 强度离散性整体较小, 围压 50 MPa 的 3 个强度相差 11.5 MPa, 围压 100 MPa 的 2 个强度相同; 其单轴强度 278.5 和 280.6 MPa 远大于 Westerly 花岗岩 WA 的 201 MPa^[28], 但围压增加后两者强度差异减小 (图 6)。

文献[13]指出, Byerlee 所做常规三轴压缩试验围压在 58~1086 MPa^[29], 其在文献[30]及 Paterson 在文献[31]给出强度趋势线的单轴强度在 450 MPa 左右; 而花岗岩实际试验值总在 250 MPa 左右。与图 5 热损伤大理岩的强度变化类似, 图 6 中围压 20 MPa 附近, 花岗岩破坏机理发生改变, 围压对强度影响机制不同。不考虑低围压的强度, 则剪切破坏时花岗岩以及二长岩的强度都可以指数准则描述。

图 6 中岩石低围压时的强度在图 7 给出, 另补充风化的 Stone Mount 花岗岩^[32]的强度, 其单轴强度仅为 82.8 MPa。图中给出围压影响系数 12 的一组直线以描述围压 20 MPa 以内试样具有沿轴向的脆性劈裂破坏特征。文献[33]以文字给出试验结果: 直径 50 mm、长 100 mm 的 Inada 花岗岩试样, 在围压 0, 5, 10, 20 和 40 MPa 时强度为 200, 260, 320, 410 和 520 MPa; 前 3 个数据的围压影响系数正好是 12。如前所述, 并不能就此而依据 Coulomb 准则计算岩石的摩擦因子或内摩擦角。

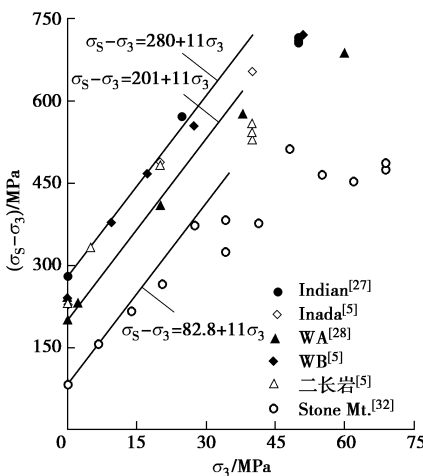


图 7 二长岩及 5 种花岗岩低围压下的强度

Fig. 7 Strengths of monzonite and five granites under low confining pressures

若试样内有局部损伤, 单轴强度会略有偏低; 而损伤在围压作用后会闭合承载其影响减小乃至消失,

如 Westerly 花岗岩 WB、Inada 花岗岩和二长岩,此时围压对强度的影响系数大致为 12。显然,对花岗岩这样的脆性岩石,理想的压拉强度比之为 12,而不是 Griffith 准则所预测的 8。该值可作为花岗岩类岩石压拉强度比的下限。当然,损伤对拉伸破坏的影响更大,即抗拉强度会更低,压拉强度比将大于 12。

花岗岩试样最终破坏由晶粒破断与晶界开裂构成;细晶的 Indian 花岗岩试样尺度较大,晶界开裂所占比例将较大;而粗晶的 Inada 花岗岩试样尺度较小,晶界滑移受阻则引起晶粒破断而强度增大。图 6 给出 Indian 花岗岩指数准则拟合,极限主应力差为 1340 MPa;不考虑单轴强度,平均拟合偏差仅 1.6 MPa。

对直径 12.5 mm 左右的 Westerly 花岗岩试样的强度,修正高围压时试样的端部摩擦效应之后,指数准则给出的极限主应力差是石英的单轴压缩强度 2400 MPa^[2],即高围压下试样达到峰值承载能力时石英晶粒剪断,而裂隙摩擦力与石英剪切强度相同。

2 讨 论

图 8 给出几种岩石常规三轴压缩的强度,基于绝对偏差最小以指数准则和广义 Hoek-Brown 准则拟合。后者不能描述 Yamaguchi 大理岩的屈服强度和 Vosage 砂岩的峰值强度;且因强度增加速率随围压逐渐减慢,围压范围越大其拟合参数 n 越小、 m 越大,只是初始围压影响系数 $1+mn$ 及单轴强度 σ_c 大致保持恒定,即式 (3) 的拟合结果随着选用试验数据的范围而变化,通常还对高围压时强度给出大的偏估计。

粗面岩围压 100 MPa 的强度明显偏高源于试样较大侧向变形引起的端部摩擦效应;删除该数据点拟合,广义 Hoek-Brown 准则由 HB (100, 27.9, 0.361) 变为 HB (100, 38.7, 0.324),平均偏差由 2.7 MPa 变为 2.5 MPa;而指数准则保持为 Exp (100, 316, 7.54) 不变,但平均偏差由 5.4 MPa 降低到 1.1 MPa。后者的拟合曲线凸显了异常数据 (图 8)。

实际岩石总是存在损伤的,试样间也有所差异。赵固砂岩单轴强度 119.7~141.9 MPa,以平均值 132.4 MPa 参与拟合为 Exp (132.6, 327.7, 10.7),平均偏差为 3.6 MPa。显然,单轴强度较低者其强度随围压增加较快,围压增大使强度离散消失即 Q_∞ 大致相同,参数

$$R = \frac{Q_\infty - Q_0}{K_0 - 1}, \quad (7)$$

对同组试样而言可设定为常数^[6-7],即 20.1 MPa。

粗砂岩^[35] 13 个单轴强度为 37.2~67.7 MPa;图 9 给出指数准则的拟合结果 Exp (52.7, 236.0, 9.03),参数 $R=22.8$ MPa。该组试样极限主应力差可设定为

233~237 MPa,即不同试样的 Q_∞ 略有差异而非文献[6]所说的常数,则单轴强度在 26~68 MPa 之间,可利用指数准则给出其三轴强度的取值范围 (图 9)。

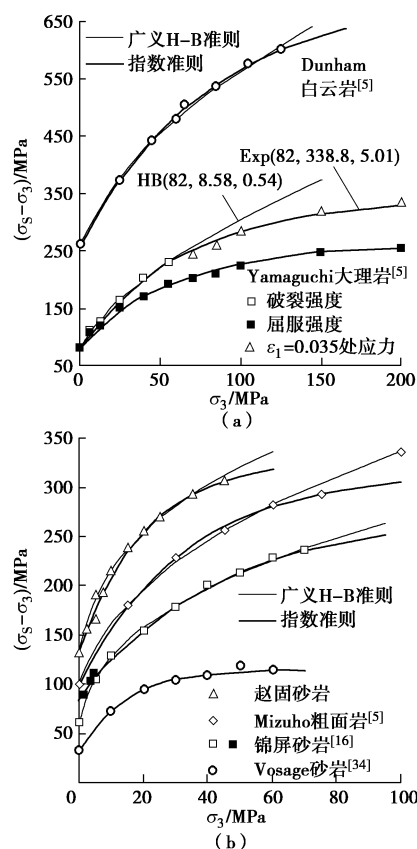


图 8 指数准则与广义 Hoek-Brown 准则对岩石强度的拟合
Fig. 8 Fitting of strengths of rocks by the exponential criterion and the generalized Hoek-Brown criterion

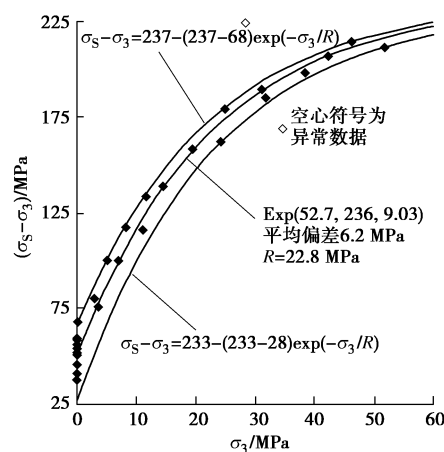


图 9 粗砂岩强度^[35]的离散性及指数准则拟合
Fig. 9 Scatterness of strengths of coarse sandstone^[35] and fitting by the exponential criterion

图 5 中热损伤大理岩在围压 1.4 MPa 内以及图 6 中二长岩、Indian 花岗岩等在围压 20 MPa 内并非剪切破坏,摩擦滑移与材料剪断的方向并不一致,即出现“爬坡”引起的劈裂破坏,不能基于 Coulomb 准则以围压对强度的影响系数计算岩石的内摩擦系数。

如果试样具有相同的力学特征, 则剪切破坏时强度可以3个材料参数的指数准则予以描述, 文献[12, 36]也为此提供了试验数据支撑。指数准则所体现的力学机理是, 材料内部的摩擦承载能力随围压增加, 若超过附近材料黏结力时, 裂隙不再滑移而是材料的黏结力丧失转换为摩擦承载。

3 结 语

岩石内陡倾弱面可能引起试样单轴或低围压的劈裂破坏, 即摩擦滑移与材料剪断方向不同。围压 20 MPa 以内对完好花岗岩强度的影响系数为 12, 该值为压拉强度比的下限。围压增加试样转为剪切破坏。

岩石试样在围压下强度特征取决于局部损伤、材料的摩擦系数以及真实黏结力。局部损伤对试样强度的影响随着围压增加而减小; 岩石剪切破坏的强度可以指数准则描述, 主应力差随围压增加趋于确定值, 或岩石承载的剪应力以真实黏结力为上限。

参考文献:

- [1] GONZALEZ-GARCIA A J. Rock strength and failure: some common and uncommon issues[C]// Harmonizing Rock Engineering and the Environment. Netherlands: CRC Press, 2012: 81 - 90.
- [2] 尤明庆. 常规三轴压缩的端部效应及花岗岩强度的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增刊 1): 3160 - 3168. (YOU Ming-qing. Study on ends effect in conventional triaxial compression test and the strengths property of granites[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3160 - 3168. (in Chinese))
- [3] 谢 璨, 李树忱, 晏 勤, 等. 不同尺寸裂隙岩石损伤破坏特性光弹性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(3): 568 - 575. (XIE Can, LI Shu-chen, YAN Qin, et al. Photoelastic experimental study of failure characteristics of different size fractured rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(3): 568 - 575. (in Chinese))
- [4] JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R W. Fundamentals of rock mechanics[M]. New York: Wiley-Blackwell, 2007.
- [5] MOGI K. Experimental rock mechanics[M]. London: Taylor & Francis, 2007, 17 - 47: 66 - 110.
- [6] 尤明庆. 围压对岩石试样强度的影响及离散性[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 929 - 937. (YOU Ming-qing. Study on effect of confining pressure on strength and the scatter of rock specimens[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5): 929 - 937. (in Chinese))
- [7] YOU M. Comparison of the accuracy of some conventional triaxial strength criteria for intact rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(5): 852 - 863.
- [8] YOU M. Comparison of two true-triaxial strength criteria[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 54: 114 - 124.
- [9] EBERHARDT E. ISRM suggested method: The Hoek-Brown failure criterion[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(6): 981 - 988.
- [10] YOU M. True-triaxial strength criteria for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(1): 115 - 127.
- [11] 李冰洋, 尤明庆. 岩石黏结摩擦特性及非线性强度的指数准则描述[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 1945 - 1953. (LI Bing-yang, YOU Ming-qing. Study on nonlinear strength property of rocks with cohesion and friction using the exponential criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10): 1945 - 1953. (in Chinese))
- [12] 张 磊, 刘保国. 考虑抗拉强度的岩石强度准则对比分析[J]. 工程力学, 2016, 33(11): 201 - 207. (ZHANG Lei, LIU Bao-guo. A comparison study of rock strength criteria considering tensile strength[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(11): 201 - 207. (in Chinese))
- [13] 尤明庆, 吴秋红, 苏承东. 花岗岩直板轴向压缩的分层破坏及围岩失稳探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2346 - 2354. (YOU Ming-qing, WU Qiu-hong, SU Cheng-dong. Laminated failure of granite plates under axial compression and instability of surrounding rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2346 - 2354. (in Chinese))
- [14] 尤明庆. 单参数的正则抛物线准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1580 - 1586. (YOU Ming-qing. Normal parabolic criterion with a single parameter[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1580 - 1586. (in Chinese))
- [15] 李冰洋, 尤明庆. 正则抛物线准则及岩石初始损伤的估计[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1740 - 1744. (LI Bing-yang, YOU Ming-qing. Normal parabolic criterion and estimation to the initial damage of rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(9): 1740 - 1744. (in Chinese))

- [16] 汪 斌, 朱杰兵, 邬爱清, 等. 高应力下岩石非线性强度特性的试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(3): 542 – 548. (WANG Bin, ZHU Jie-bing, WU Ai-qing, et al. Experimental validation of nonlinear strength property of rock under high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(3): 542 – 548. (in Chinese))
- [17] GOWD T N, RUMMEL F. Effect of confining pressure on the fracture behavior of a porous rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1980, **17**(4): 225 – 229.
- [18] BIED A E, SULEM J, MARTINEAU F. Microstructure of shear zones in Fontainebleau sandstone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, **39**(7): 917 – 932.
- [19] YOU M. Strength and damage of marble in ductile failure[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011, **3**(2): 161 – 166.
- [20] PATERSON M S. Experimental deformation and faulting in Wombeyan marble[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1958, **69**(4): 465 – 476.
- [21] ROSENGREN K J, JAEGER J C. The mechanical properties of an interlocked low-porosity aggregate[J]. Géotechnique, 1968, **18**(3): 317 – 326.
- [22] GEROGIANNOPOULOS N G. A critical state approach to rock mechanics[D]. London: University of London, 1976.
- [23] BAHRAANI N, KAISER P K, VALLEY B. Distinct element method simulation of an analogue for a highly interlocked, non-persistently jointed rockmass[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, **71**: 117 – 130.
- [24] 尤明庆. 岩样三轴压缩的破坏形式和 Coulomb 强度准则[J]. 地质力学学报, 2002, **8**(2): 179 – 185. (YOU Ming-qing. Destroy character and coulomb criterion of rock specimen in pseudo-triaxial compression[J]. Journal of Geomechanics, 2002, **8**(2): 179 – 185. (in Chinese))
- [25] MOORE D E, LOCKNER D A. The role of microcracking in shear-fracture propagation in granite[J]. Journal of Structural Geology, 1995, **17**(1): 95 – 114.
- [26] KAWAKATA H, CHO T, KIYAMA T, et al. Three-dimensional observations of faulting process in Westerly granite under uniaxial and triaxial conditions by X-ray CT scan[J]. Tectonophysics, 1999, **313**(3): 293 – 305.
- [27] MASUDA K, MIZUTANI H, YAMADA I. Experimental study of strain-rate dependence and pressure dependence of failure properties of granite [J]. Journal of Physical Earth, 1987, **35**(1): 37 – 66.
- [28] HAIMSON B, CHANG C. A new true triaxial cell for testing mechanical properties of rock, and its use to determine rock strength and deformability of westerly granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, **37**(1/2): 285 – 296.
- [29] BYERLEE J D. The frictional characteristics of Westerly granite[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1966.
- [30] BYERLEE J D. Frictional characteristics of granite under high confining pressure[J]. Journal of Geophysical Research, 1967, **72**(14): 3639 – 3648.
- [31] PATERSON M S, WONG T F. Experimental rock deformation—the brittle field[M]. Netherlands: Springer, 2004.
- [32] SCHWARTZ A E. Failure of rock in the triaxial shear test[C]// Proceedings of the 6th US Symposium on Rock Mechanics. Rolla, 1964: 109 – 151.
- [33] MARANINI E, YAMAGUCHI T. A non-associated viscoplastic model for the behaviour of granite in triaxial compression[J]. Mechanics of Materials, 2001, **33**(5): 283 – 293.
- [34] BESUELLE P, DESRUES J, RAYNAUD S. Experimental characterization of the localization phenomenon inside a Vosges sandstone in a triaxial cell[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, **37**(8): 1223 – 1237.
- [35] FRANKLIN J A, HOEK E. Development in triaxial testing technique[J]. Rock Mechanics, 1970, **2**(4): 223 – 228.
- [36] 张 强, 李 诚, 郭 强, 等. 指数型岩石真三轴强度准则[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(4): 625 – 633. (ZHANG Qiang, LI Cheng, GUO Qiang, et al. Exponent true triaxial strength criterion of rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(4): 625 – 633. (in Chinese))