

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.01.018

岩石强度理论的分类评述

丁少梅¹, 赵忠虎^{1,2}, 王宁宁¹, 胥杰洋¹

(1. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000;

2. 亚利桑那大学 岩体模拟与计算力学实验室, 美国 图森 85721)

摘要: 岩石强度理论是地下工程与基础工程设计必不可少的计算依据, 国内外学者从不同角度建立了诸多岩石强度准则及理论。按照研究方法的不同, 岩石强度理论可分为四大类: 经典强度理论、经验型强度理论、断裂与损伤强度理论以及能量强度理论。基于这四类岩石强度理论的主要研究成果, 分析了它们各自的特点和应用条件。最后对相关研究工作进行了总结, 并针对现有岩石强度理论的不足以及存在的科学问题, 提出了进一步研究工作的展望, 以期为从事岩石强度理论研究的学者提供参考。

关键词: 岩石; 强度理论; 断裂; 损伤; 能量

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)01-0095-08

The Classification Review of Rock Strength Theory

DING Shaomei¹, ZHAO Zhonghu^{1,2}, WANG Ningning¹, XU Jieyang¹

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. Rock Mass Modeling and Computational Rock Mechanics Laboratories, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA)

Abstract: The rock strength theory is essential basis for underground and foundation engineering design. Numerous strength criteria and theories have been established by domestic and foreign scholars from different angles. According to the different research methods, rock strength theory can be classified into four categories: classical strength theory, empirical strength theory, fracture and damage strength theory, and energy strength theory. Based on the main achievements of these rock strength theory, their respective characteristics and application conditions were analyzed. Finally, the related researches are summarized, and according to the deficiencies and scientific problems at present, the prospects of further research are put forward, which provide some reference for the researchers who are engaged in the work of rock strength theory.

Keywords: rock; strength theory; fracture; damage; energy

强度理论是研究材料在复杂应力状态下发生屈服或破坏规律的科学, 其成果为各类工程结构的强度设计提供计算依据, 是强度设计必不可少的基础理论; 同时, 也是材料的力学性质领域内最重要的研究课题之一。经过几个世纪的发展, 强度理论研究取得了比较丰硕的成果。

人类对岩石及其强度的认识经历漫长的年代, 而且仍在继续进行。在这一过程中, 积累了大量的经验, 也获得了一些科学的理论。早期的岩石力学采用了经典连续介质力学的研究方法, 强度理论主要借鉴了金属材料的研究成果。后来, 有关工作者

逐渐结合力学、化学、地质学等理论, 以及耗散结构、突变论、协同论、神经网络、遗传算法、混沌理论、分形几何、分岔理论、重正化群理论等非线性科学的有关理论, 极大的促进了岩石力学的发展, 从 1773 年库仑建立库仑准则(即土体的单剪理论)开始, 针对岩石的各种强度理论相继出现^[1-4], 并在工程应用中取得了可喜的成果。

正如俞茂宏教授^[4]所言, 目前建立的多种岩石强度理论正处于“百花齐放, 百家争鸣”的局面。这种景象不仅反映出实际工程对该理论的需求日益增加^[5], 同时, 也说明岩石强度理论存在很多的科学问

收稿日期: 2016-10-16

修稿日期: 2016-11-14

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(LZUJBKY-2016-110); 国家留学基金项目(201606185039)

作者简介: 丁少梅(1988—), 女(回族), 宁夏银川人, 硕士研究生, 研究方向为岩石力学。E-mail: dingshm14@lzu.edu.cn

题需要解决。正因为近年来岩石工程日趋庞大,结构更加复杂,准确分析岩石变形破坏的机理,建立更加符合实际的强度理论,提出地质灾害等工程事故的预防方法,已成为学术界与工程界的重要任务。因此,今后岩石强度准则及强度理论仍然是被重点关注的课题。

1 经典岩石强度理论及其发展

关于强度理论的研究,可以上溯到几个世纪以前。公元 15 世纪^[6], Leonardo da Vinci 和 Galileo Galilei 分别进行了铁丝和石料的拉伸试验, Da Vinci 认为铁丝的强度与其长度有密切关系,而 Galilei 认为荷载达到一定值时,材料发生破坏,提出了最大应力理论的思想雏形。17 世纪, Mariotte 首次论述了最大应变准则的思想。Coulomb 根据砂岩强度试验,阐述了最大剪应力理论,并对梁的弯曲、棱柱体的压缩,以及挡土墙和拱的稳定性进行了讨论,其论文 1773 年在法国科学院宣读,并于 1776 年公开发表。1856 年 Maxwell 首先讨论了形状改变比能与单元体破坏的关系^[4],后来经过 Beltrami 的研究发展,于 1885 年发表的论文中提出了形状改变比能理论的雏形。以上关于强度的认识尽管相当直观,并且也比较肤浅,但其中的朴素观点对后来有关强度理论的建立起到了很大的启蒙作用。经过 Lamé、Rankine、Saint - Venant、Poncelet、Foppl、Voigt、Mohr、Guest 等科学家与工程师的努力,到 19 世纪末,第一、二、三、四强度理论先后建立,表 1 为其表达式。

表 1 古典强度理论分类

强度理论名称	判据表达式
最大拉应力理论(第一强度理论)	$\sigma_1 \leq [\sigma]$
最大伸长线应变理论(第二强度理论)	$[\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \sigma_1 \leq [\sigma]$
最大剪应力理论(第三强度理论)	$(\sigma_1 - \sigma_3) \leq [\sigma]$
形状改变比能理论(第四强度理论)	$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq [\sigma]$

这四个强度理论称为古典强度理论,只能适应应用特定材料的特定受力状态,一般认为第一、二强度理论常应用于脆性断裂,第三、四强度理论则应用于塑性屈服中^[7]。

以上强度理论主要采用唯象的试验方法^[5],学者们的研究主要靠经验,所以结果仅适用于简单应力状态。面对愈来愈复杂的岩石工程,古典强度理

论的不足日益明显。因此,研究者借助先进的实验测试手段和数学分析方法,建立了很多广义的强度理论。Mohr 经过研究认为破坏是广义的,于 1882 年提出了材料破坏的思想,即材料可以是屈服,也可以是断裂,并于 1900 年发表论文,全面阐述了 Mohr - Coulomb 理论(简称 M - C 理论)^[8]:

$$\sigma_1 - \frac{[\sigma_1]}{[\sigma_c]} \sigma_3 \leq [\sigma_1] \quad (1)$$

该准则认为剪应力是材料破坏的唯一决定因素,并且某平面上的极限剪应力是该截面上正应力的函数。M - C 理论在岩石力学界得到了非常广泛的应用,并且成为岩石力学著作中最基本的内容之一^[9]。M - C 理论最大缺点是没有考虑中间主应力的影响。

M - C 理论建立后,在 20 世纪又提出了很多的准则和材料模型。1913 年, Mises 通过对金属材料的拉伸与屈服研究^[10],提出了一种屈服准则,也称 von Mises 准则,如式(2)所示:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 6J_2 \quad (2)$$

von Mises 屈服准则的屈服面在 π 平面上的投影曲面处处可导,适用于数值计算分析。但该准则没有反映平均主应力对强度的影响。

Drucker D C^[11]通过增加静水压力项对 Mises 准则进行修正,于 1952 年提出了 Drucker - Prager 准则,见式(3),并证明了屈服面的外凸性。

$$f(I_1, \sqrt{J_2}) = \sqrt{J_2} - aI_1 - k = 0 \quad (3)$$

该准则考虑了平均主应力对强度的影响,并具有比较完美的数学表达式,因而得到广泛的应用,其屈服曲面光滑且没有棱角,有利于数值计算。但该准则无法对岩石的拉伸与压缩子午极限线之间差别^[12]进行有效的区分,而且不符合岩石三轴试验结果,故在岩石力学中应用较少。

1961 年,俞茂宏建立了双剪应力强度理论。其观点为:三个主剪应力中,除最大剪应力外,另两个剪应力也将对材料的屈服产生影响。但它们之中,只有两个主剪应力为独立量。所以,双剪应力强度理论只需关心两个较大的剪应力。

俞茂宏于 1985 年建立了适合于岩石材料的双剪应力强度理论^[13],并在 1990 年完善了双剪应力强度理论^[14],丰富和发展了岩土材料的强度理论。

俞茂宏^[15]把强度理论分为:单剪强度理论、三剪强度理论、双剪强度理论。并对这些强度理论做了进一步的概括^[16-17],提出统一强度理论。2002

年,俞茂宏又建立了适合岩石材料的统一强度理论^[18]:

$$\begin{cases} F = \sigma_1 - \frac{a}{1+b}(b\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_1, & \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + a\sigma_3}{1+a} \\ F' = \frac{1}{1+b}(\sigma_1 + b\sigma_2) - a\sigma_3 = \sigma_1, & \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + a\sigma_3}{1+a} \\ F'' = \sigma_1 = \sigma_1, & \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0 \end{cases} \quad (4)$$

其系列极限面如图 1 所示^[4]。表面上统一强度理论的数学表达很简练,但其内涵已非常丰富。可以说,它是不同于其它单一强度理论或破坏准则的一种系列强度理论。对于岩土类材料拉、压子午线不等的问题,可以利用统一强度理论有效解决,因而该理论被广泛应用于岩土类材料。

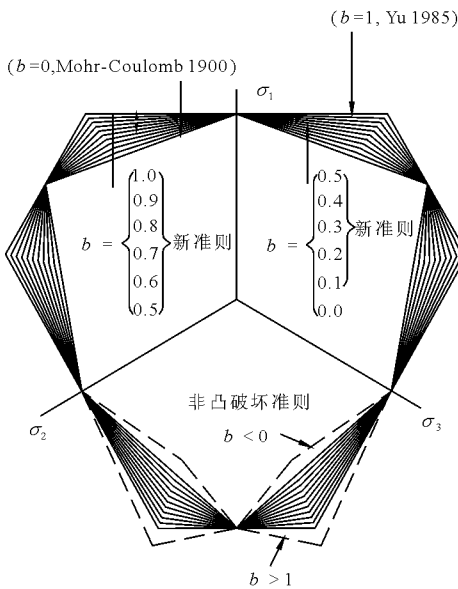


图 1 统一强度理论在偏平面上的系列极限面^[4]

以上准则是古典强度理论和广义强度理论在岩石力学研究中的应用和推广,基于此,可以建立岩石在复杂应力状态下破坏的强度准则^[19],其隐性数学表达式如下:

$$F(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}, \dot{\epsilon}_{ij}, T, C_1, C_2, \dots, C_n) = 0 \quad (5)$$

式中: C_1, C_2, \dots, C_3 为岩石材料常数,可由试验获得。

综上所述,这些强度理论基本都是在连续介质力学框架内^[5],结合弹塑性分析得到,因而可以称为经典强度理论。这些理论建立的过程中,将理性推导与试验分析相结合,并综合运用了物理学、数学的相关成果,弥补了古典强度理论唯象性的不足。现阶段,经典强度理论体系已经日趋完善,能够较好地解决了强度理论的计算问题,是相关工程设计中分

析计算的重要依据。

但是,经典强度理论忽略了岩石内部充满大量微缺陷这一本质特征,进而使计算结果与岩石材料的实际破坏形式不符,也没有揭示出岩石发生破坏的真正物理原因。鉴于此,为了完善经典岩石强度理论,岩石力学学者们要通过全新的研究思路,以及分析方法,使得该理论更好的服务于岩石工程。

2 经验型岩石强度准则研究

在经典强度理论发展的同时,为了克服以 Mohr - Coulomb 准则为代表的经典强度准则的不足,相关研究者以试验结果为基础,利用经验手段研究岩石变形破坏过程中的基本规律,建立了很多经验型强度准则。

1980 年,基于广义的 Griffith 理论,Hoek E 等^[20]统计了几百组岩石三轴试验资料和大量岩体现场试验结果,并利用试错法,推出了岩块及岩体破坏时极限主应力之间的数学表达式,也就是国际上所称的 Hoek - Brown 经验准则或岩体经验强度准则:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + \sigma_c^2} \quad (6)$$

在主应力空间,其破坏面是一个以平均主应力轴为中心轴,由六条抛物线围成的曲边六边形截面的锥体面,该准则与大量试验结果接近,被广泛的应用于工程中。

Hoek - Brown 经验准则是一种估算完整岩石或节理岩体剪切强度的半经验准则(也称狭义的 H - B 强度准则)^[21 - 22]。该准则根据岩体本质特性以及非线性的破坏规律,修正了 M - C 强度准则仅适用于研究受压区的岩体剪切破坏,而无法承受拉应力,且不太适应低应力区的不足。因此,该准则可就拉应力区、低应力区和最小主应力对强度的影响进行合理解释,使之更加符合岩体破坏的特征。

此后,经过 30 余年的发展,Hoke 及其合作者对该准则做了深入研究,并进行了多次改进,将其发展到了广义强度准则。

1988 年 Hoke E 等^[23]提出了改进的模型,其表达式为式(7),该准则主要用于岩体拉伸破坏中。

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_c}{2} (m - \sqrt{m^2 + 4s}) \quad (7)$$

1992 年 Hoek E 等^[24]提出了广义的 Hoek - Brown 强度准则,如式(8)所示,并给出了各类岩体经验参数值。该准则主要适用于裂隙岩体中。

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} \right)^a \quad (8)$$

2002 年 Hoek E 等^[25]又提出了 Hoek - Brown 强度准则的 2002 版,其表达式为式(9)。为了描述开挖、爆破等施工工程对岩体扰动的影 响,在该准则中, Hoek 提出了扰动参数(D)的概念。

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (9)$$

除 Hoke 和其合作者外,其他一些学者也从不同角度将 Hoek - Brown 强度准则做了研究与修正。经 Bhawani S 等^[26]修正后的准则考虑了中间主应力 σ_2 的影响,但没有考虑 σ_2 效应的区间性,并且也是经验性的公式,其表达式如下:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_c \left[\frac{m(\sigma_2 + \sigma_3)}{2\sigma_c} + s \right]^n \quad (10)$$

何云松等^[27]基于 MATLAB 语言以 Mohr - Coulomb 强度准则和 Hoek - Brown 强度准则建立目标函数,对岩石强度参数进行了优化求解。咎月稳等^[28]应用统一强度理论、双剪力学以及双剪函数理论,解决了 Hoek - Brown 强度理论无法反映中间主应力效应的不足,从而修正了 Hoek - Brown 强度准则,也弥补了 Bhawani 修正准则的不足。

张建海等^[29]人将准则的系数进行简单平均化处理,以反映坝基、边坡、地下洞室围岩等介于扰动和未扰动之间的岩体。Sonmez H 等^[30]通过采用影响系数进一步完善了准则参数的取值方法。闫长斌等^[31]引入完整性系数而建立修正系数来表征岩体受扰动程度, Saroglou H 等^[32]用表征岩石各项异性强度的参数修正了 Hoek - Brown 强度准则。何江达等^[33]对准则的参数做了断裂力学分析。孙金山等^[34]对扰动参数 D 的确定方法做了探讨。李洪涛等^[35]、Zuo J P 等^[36]从断裂力学的角度对该准则进行了研究,从理论上推导出了其数学表达式。Hoek - Brown 准则一经建立,就得到了科学家和工程们的青睐,用其解决了很多实际问题,时至今日,仍然是岩石强度预测及稳定性分析领域应用最广泛的理论之一。

除 Hoek - Brown 强度准则外,一些学者根据岩石的三轴试验数据,相继建立了其它一些岩石的经验强度准则。

Hobbs D W^[37]建立的破坏准则为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_c + \alpha \sigma_3^b \quad (11)$$

Franklin J A^[38]提出的破坏准则为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \alpha(\sigma_1 + \sigma_3)^b \quad (12)$$

Mogi^[39]提出了八面体剪应力联合破坏准则,其表达式如下:

$$\begin{cases} F = \tau_8 + A(\sigma_1 + \sigma_3)^n \\ F = \tau_8 + f(\sigma_1 + \alpha\sigma_2 + \sigma_3) \end{cases} \quad (13)$$

Bieniawski^[40]强度准则的表达式为

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = 1 + B \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right)^\alpha \quad (14)$$

Ramamurthy T 等^[41]提出的强度准则为

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_3} = B \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right)^\alpha \quad (15)$$

刘宝琛等^[42]根据 55 种岩石试验结果的分析,建议了一种幂函数形式的岩石强度准则,其表达式为

$$\frac{\tau_m}{\tau_{m0}} = \alpha \left(\frac{\tau_m}{\tau_{m0}} \right)^b \quad (16)$$

此外, You M Q^[43]根据岩石的真三轴实验,提出了一个适用于岩石的强度准则。

经验型准则形式简单,使用方便。但是这些准则一般都是依据实验结果,经拟合数据而得到,经验成份占主导地位,致使准则本身缺乏强有力的理论支撑,科学含义略显不足。此外,与经典强度理论一样,也没有体现出岩石因微裂纹扩展而导致破坏的特点。

3 岩石断裂与损伤强度理论

3.1 岩石断裂强度理论

1921 年断裂力学创始人 Griffith A A^[44]提出了裂纹在材料中萌生和扩展的概念,并从裂纹能量释放率的角度建立了材料的断裂判据,开启了岩石强度特性研究的新领域,即断裂强度理论研究^[45],其一般的数学表达式如下:

$$G = \frac{d\Pi}{da} \quad (17)$$

此后, Irwin G R^[46]借助复变函数、积分变换、保角映射等数学方法研究了裂纹尖端的应力场,初步提出按应力强度因子建立断裂判据的方法。

1967 年 Sih G C 等^[47]建立了复合裂纹应变能密度因子理论,并提出了复合裂纹扩展的判据:

$$s = a_{11}K_I^2 + 2a_{12}K_I K_{II} + a_{22}K_{II}^2 + a_{33}K_{III}^2 \quad (18)$$

夏熙伦等^[48]则发展了断裂因子之间的关系,通过能量释放率、应力强度因子和应变能密度因子就可建立断裂韧性强度理论。

谢和平^[49-50]借助分形模型研究了岩石中裂纹群的作用,得到了分形统计强度理论,表达式为:

$$\sigma_c = \frac{\alpha K_{IC}}{\sqrt{\pi}} C^{-\frac{1}{2D}} \Gamma \left(1 + \frac{1}{2D} \right) \quad (19)$$

此外, Germanovich L N 等^[51]研究了压缩过程中开孔的断裂机制和不稳定性。徐余等^[52]把断裂强度理论应用于模拟基坑开挖过程。Bussolotto M 等^[53]以科林斯裂谷断层为例,深入分析了泥晶灰岩断裂变形机制。魏炯等^[54]利用带切口的三点弯曲梁试验,研究了砂岩的断裂韧度和抗拉强度特性,为岩石抗拉与断裂强度耦合分析提供了理论依据。

由断裂力学建立的强度理论与实际比较符合,然而断裂强度理论直接应用到岩石中后带来了许多的问题。比如,应力强度因子 K 和裂纹能量释放率 G 难于计算,岩石中分布着的宏观主裂纹和微裂纹的关系,所有裂纹之间的相互作用等。以上因素给利用断裂理论研究岩石力学问题带来了困难。

3.2 岩石损伤强度理论

20 世纪 70 年代后,损伤力学体系逐渐建立,诸多学者开始用损伤力学研究岩石的强度理论。损伤是指在荷载作用下,材料内部的微缺陷发展使其内部粘聚力降低,最终导致单元体破坏,材料宏观力学性质劣化的现象。在损伤理论中,主要通过损伤变量 D 表示材料劣化的程度。 D 为 0~1 之间的数值,其中 $D=0$ 时,认为材料没有损伤(起始判据), $D=1$ 时,材料发生宏观断裂。

损伤力学的主要成果可参见彭瑞东^[5]对岩石宏观损伤理论的研究现状分析。基于弹塑性力学以及热力学理论等学术观点,利用损伤模型,唯象分析材料的损伤过程,再应用特定的损伤变量,获得符合一定实际状态的损伤演化模型,然后通过损伤演化模型结合等效理论,构建损伤本构模型。基于此,可以根据包含损伤变量的损伤模型,以及损伤变量的值来反映材料是否发生破坏,从而建立单参数岩石损伤强度准则,并应用到工程实践。此外,刘红岩等^[55]提出了考虑宏微观损伤耦合的节理岩体本构模型,对节理岩体的损伤强度研究提供了一定的参考。

损伤强度理论尽管在一定程度上弥补了断裂强度理论的不足,然而研究过程中,很多研究相关理论的学者,构建的损伤模型物理意义不明确,而且形式难以统一,也没有解释损伤变量的值达到多大时才造成真正意义上的“破坏”。所以断裂和损伤强度理论尽管有很强的理论依据,但离工程应用还有一定的距离。

4 岩石能量强度理论研究进展

面对近年来日益复杂的岩体工程,现有强度理

论开始表现出了不足之处。基于此,科学家便开始了用能量观点进行科学问题研究的新方法。通过分析岩石破坏过程中的能量转化特征,研究岩石的储能机制及耗能机制,进而建立了各种岩石能量强度准则。这些研究为岩体工程设计,及各种岩体地质灾害的防治提供了新的依据。

Maxwell 首先意识到了应变能与材料破坏的关系^[6],即最大形状改变比能的屈服理论,然而这一思想直到 20 世纪 30 年代才被人知晓。1885 年 Beltrami 提出了形状改变比能理论的雏形^[4],1921 年 Griffith A A^[44]用能量的观点开启了断裂强度理论的研究。Wiebols G A 等^[56]合作提出了附加能的概念,并用此分析了岩石的断裂过程区,建立了一个裂纹扩展的能量强度准则:

(1) 单向应力状态下:

$$W_{\text{eff}} = \frac{\pi N \sigma_u^2}{2} \left[\frac{7\mu^6 + 15\mu^4 + 9\mu^2 + 1}{30(\mu^2 + 1)^{5/2}} + \frac{5\mu^2 + 3}{6(\mu^2 + 1)^{1/2}} - \frac{16\mu}{15} \right] \quad (20)$$

(2) 双向应力状态下:

$$W_{\text{eff}} = \frac{\pi N \sigma_\beta^2}{2} \left[\frac{\mu^7 + 9\mu^5 + 15\mu^3 + 7\mu}{30(\mu^2 + 1)^{5/2}} - \frac{2\mu^5 + 6\mu^3 + 4\mu}{3(\mu^2 + 1)^{3/2}} - \frac{3\mu^3 + \mu}{(\mu^2 + 1)^{1/2}} + \frac{32\mu^2 + 8}{15} \right] \quad (21)$$

以上两式, W_{eff} 代表等效剪切应变能, N 是单位体积单位立体角中裂缝的平均数量,他们的研究表明应用岩石单轴抗压强度,以及岩石裂纹表面间的滑动摩擦系数,可以预测岩石的多轴抗压强度。

Gaziev E^[57]研究了断裂能与弹性能的关系。Li Q M^[58]通过研究进一步提出了弹性能存储于原子键之间,势能的变化引起了材料的变形及损伤的观点,并指出,耗散能导致了材料强度的裂化。

在国内,周筑宝等^[59]研究了从能量原理建立强度理论的优越性及可行性,并提出通过能量可能会建立同一模式的强度理论。彭瑞东^[5]提出可以通过损伤极限面建立岩石的能量耗散强度准则。Hua A Z^[60]等利用能量原理,系统的研究了卸荷过程中的岩石破坏及地下岩爆。尤明庆等^[61]以能量的观点,深入分析了岩石试样破坏过程。赵忠虎^[62]建立的岩石能量破坏判据,阐明了岩体开挖中由于应力状态改变,而引起能量状态的改变,从而导致岩体的破坏。高红等^[63]提出了岩土摩擦材料的能量屈服准则。黎立云等^[64]利用 SHPB 动态冲击实验,进行了岩石可释放应变能及耗散能的相关研究。

应用能量耗散与释放的观点, Xie H P 等^[65]建立了岩体整体破坏准则:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2v(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] = \sigma_c^3 \quad (22)$$

$$\sigma_3[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2v(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] = \sigma_1^3 \quad (23)$$

两式分别代表受压和受拉情况, 该准则可以用来分析地下洞室围岩发生整体破坏的临界条件。

周辉等^[66]考虑岩石破坏时剪切滑移和法向压密的机制, 建立了具有统一形式的岩石能量强度准则:

$$w_s + aw_v + b = 0 \quad (24)$$

研究表明: w_s 越大, w_v 越小, 岩石材料越容易破坏。

牛超颖等^[67]提出了岩石释能基于应力分配的一般形式, 研究了最小主应力对岩石强度的影响, 建立了新的岩石能量强度准则, 研究结果表明: 能量原理可以用来研究中间主应力效应; 相同的最小主应力状态下, 岩石强度与释能分配系数成负的线性关系。

刘新荣等^[68]研究了盐岩的弹性应变能和耗散能间的关系, 并基于弹性应变能, 建立了盐岩的强度准则, 对比分析有关试验结果, 可以看出该准则试验值与理论值吻合较好。

岩石在热、力耦合状态下变形破坏的研究, 由左建平^[69]开展, 作者指出随着温度的升高, 岩石的强度呈降低趋势。他们还建立了温度—压力耦合作用下, 深部岩石的强度准则, 分析该准则可知岩石的塑性耗能与热传导耗能累积到一定的数值时, 岩石将会发生破裂。

变形破裂过程中, 岩石一直与外界的物质以及能量进行着互相交换。外载对岩石所做的功, 一部分转化为可储存的弹性应变能, 另一部分转化为岩石的耗散能。耗散能不断弱化着岩石的强度, 并可导致强度的最终丧失。而破坏时, 先前储存的弹性能将完全释放出来, 造成岩石或者岩体的突然破坏, 所以能量耗散与能量释放伴随在岩石变形的整个过程中, 并成为岩石破坏的本质原因^[70]。为此, 从能量角度建立岩石变形破坏的强度准则, 进而完善岩石的能量强度理论, 就能很好的解决岩石工程问题。

能量理论为强度研究提供了新的方法, 但目前建立的模型还存在如下问题: 只是定性的说明了岩石强度劣化、整体破坏的原因; 对于岩石储能、耗能机制的认识尚不清晰; 定量计算与准确测量缺乏成

熟的理论与有效的手段; 可释放应变能如何转变为耗散能的过程研究还不深入; 岩石在宏观、细观、微观不同尺度下统一的破坏模型还有待探讨等。

5 结 语

从以上研究可以看出, 经过学者们不同时期的研究, 岩石强度理论取得了比较丰硕的成果。鉴于利用了连续介质力学的假定, 经典的岩石强度理论, 并不符合岩石的实际破坏形式。经验型岩石强度理论主要依靠分析试验数据后拟合而来, 缺乏有效的理论基础, 并且使用也很局限。岩石断裂与损伤强度理论抓住了岩石由于微缺陷演化而导致破坏的重要特征, 但是由于岩石内部结构的复杂性, 使强度计算变得很困难, 限制了其工程应用。岩石能量强度理论解释了岩石破坏是由于能量转换的结果, 抓住了岩石破坏的根本特征, 但是目前建立的模型只是定性的说明了岩石强度劣化的原因, 没有解释岩石突然破坏的工程与试验现象, 所以没有得到广泛的认可。

综上所述, 相比其它三类强度准则, 能量型强度准则可以解释岩石破坏的物理原因及破坏过程的本质特征。但是目前的研究还不深入, 没有得到定量的模型, 也没有提出统一的理论, 所以应该继续深入该方面的研究。

鉴于以上岩石强度理论研究中存在的问题, 展望如下:

- (1) 针对岩石材料的物理力学性质, 使这四类强度理论与岩石破坏特征的结合更加完善。
- (2) 正如前面所说, 由于能量强度理论, 能抓住岩石失稳破坏的本质, 使得其更加适合岩石材料。下一步工作的重点, 可以放在岩石能量强度理论的研究上。
- (3) 可以把每类强度理论的优点结合起来, 建立全新的岩石能量理论, 更好的为岩石工程服务。

参考文献:

- [1] 林天健, 张金铸. 近十年来岩石(工程)强度理论的发展[J]. 力学与实践, 1981, 3(3): 17-23.
- [2] Hudson J A. Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice and Projects[M]. Oxford: Pergamon Press, 1993.
- [3] Sun Jun, Wang Sijing. Rock mechanics and rock engineering in China: developments and current state of the art[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2000, 37(1/2): 447-465.
- [4] Yu Maohong. Advances in strength theories for materials un-

- der complex stress state in the 20th century[J]. Applied Mechanics Reviews, ASME, 2002,55(3):169-218.
- [5] 彭瑞东. 基于能量耗散及能量释放的岩石损伤与强度研究[D]. 北京:中国矿业大学,2005.
- [6] Timoshenko S P. History of Strength of Materials[M]. New York: McGraw Hill, 1953.
- [7] 孙训方,方孝淑,关泰来. 材料力学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,2005.
- [8] 俞茂宏,咎月稳,范文,等. 20世纪岩石强度理论的发展[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(5):545-550.
- [9] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京:水利电力出版社,1990.
- [10] Chen W F. Constitutive Equations for Engineering Materials, Vol 2: Plasticity and Modeling[M]. Amsterdam: Elsevier, 1994.
- [11] Drucker D C, Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design [J]. Quarterly of Applied Mathematics, 1952,10(2):157-165.
- [12] 李世辉. 隧道支护设计新论[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [13] Yu Maohong, He Linan, Song Lingyu. Twin shear stress theory and its generalization[J]. Scientia Sinica, Series A, 1985,28(11):1174-1183.
- [14] 俞茂宏. 双剪理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [15] 俞茂宏. 双剪应力强度理论研究[M]. 陕西:西安交通大学出版社,1988.
- [16] 俞茂宏,刘凤羽,刘锋,等. 一个新的普遍形式的强度理论[J]. 土木工程学报,1990,23(1):34-40.
- [17] Yu Mao-Hong. Unified Strength Theory and Its Applications [M]. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004.
- [18] Yu M H, Zan Y W, Zhao J, et al. A unified strength criterion for rock material[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002,39(8):975-989.
- [19] 谢和平,彭瑞东,周宏伟,等. 基于断裂力学与损伤力学的岩石强度理论研究进展[J]. 自然科学进展,2004,14(10):1086-1092.
- [20] Hoek E, Brown E T. Empirical strength criterion for rock masses[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1980,106(2):1013-1035.
- [21] Hoek E, Kaiser P K, Bawden W F. Strength of Rock Masses, Support of Underground Excavations in Hard Rock[M]. Rotterdam: Balkema, 1995:4-16.
- [22] Hoek E. Strength of jointed rock masses (Rankine Lecture) [J]. Geotechnique, 1983,33(3):187-223.
- [23] Hoek E, Brown E T. The Hoek-Brown failure criterion-a 1988 update[C]//Curran J C. The Proceedings of the 15th Canadian Rock Mechanics Symposium. University of Toronto, Toronto, 1988:31-38.
- [24] Hoek E, Wood D, Shah S. A modified Hoek-Brown failure criterion for jointed rock masses [C]//The Proceedings of the International ISRM Symposium on Rock Characterization. Chester, UK, 1992:209-214.
- [25] Hoek E, Carranza-Torres C T, Corkum B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition [C]//Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium. Toronto, Canada, 2002:267-73.
- [26] Bhawani S, Goel R K, Mehrotra V K, et al. Effect of intermediate principal stress on strength of anisotropic rock mass [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998,13(1):71-79.
- [27] 何云松,胡广,赵其华. 基于智能算法的岩石强度参数优化求解[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(4):78-83.
- [28] 咎月稳,俞茂宏,王思敬. 岩石的非线性统一强度准则[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(10):1435-1441.
- [29] 张建海,何江达,范景伟. 小湾工程岩体力学参数研究[J]. 云南水力发,2000,16(2):26-27.
- [30] Sonmez H, Ulusay R. Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes assessment of the in-situ shear strength of rock masses and discontinuities[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1999,36(5):743-760.
- [31] 闫长斌,徐国元. 对 Hoek-Brown 公式的改进及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(22):4030-4035.
- [32] Saroglou H, Tsiambaos G. A modified Hoek-Brown failure criterion for anisotropic intact rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008,45(2):223-234.
- [33] 何江达,张建海,范景伟. 霍克-布朗强度准则中 m , s 参数的断裂分析[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(4):432-435.
- [34] 孙金山,卢文波. Hoek-Brown 经验强度准则的修正及应用[J]. 武汉大学学报(工学版),2008,41(1):63-66.
- [35] 李洪涛,左建平,李辉. Hoek-Brown 强度准则的断裂力学理论研究[J]. 岩土工程学报,2004,26(2):212-215.
- [36] Zuo J P, Li H T, Xie H P, et al. A nonlinear strength criterion for rock-like materials based on fracture mechanics [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008,45(4):594-599.
- [37] Hobbs D W. The behavior of broken rock under triaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1970,7(2):125-148.

- [38] Franklin J A. Triaxial strength of rock material[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1971,3(2):86-98.
- [39] Mogi K. Flow and fracture of rocks under general triaxial compression[C]//*Proceedings of the Fourth Congress International Society for Rock Mechanics*, Montreal, Rotterdam, A A Balkema, 1979:123-130.
- [40] Bieniawski Z T, Denkhaus H G, Vogler U W. Failure of fractured rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1969,6(3):323-341.
- [41] Ramamurthy T, Arora V K. Strength predictions for jointed rocks in confined and unconfined states[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1994,31(1):9-22.
- [42] 刘宝琛,崔志莲,涂继飞.幂函数型岩石强度准则研究[J].*岩石力学与工程学报*,1997,16(5):437-444.
- [43] You Mingqing. True-triaxial strength criteria for rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009,46(1):115-127.
- [44] Griffith A A. The phenomena of rupture and flow in solids [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Sereis A, 1921,221:163-198.
- [45] [苏]Г П 切列帕诺夫.脆性断裂力学[M].北京:科学出版社,1990.
- [46] Irwin G R. Analysis of stresses and strains near the end of crack traversing a plate[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1957,24(3):361-364.
- [47] Sih G C, Liebowitz H. On the Griffith energy criterion for brittle fracture[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1967,3(1):1-22.
- [48] 夏熙伦,黎继珍,罗忠庆,等.压缩状态下岩石的 I、II 复合型断裂试验[J].*岩土工程学报*,1985,7(2):66-74.
- [49] 谢和平.分形-岩石力学导论[M].北京:科学出版社,1996.
- [50] Xie H P, Gao F. The mechanics of cracks and a statistical strength theory for rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000,37(3):477-488.
- [51] Germanovich L N, Dyskin A V. Fracture mechanisms and instability of openings in compression [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2000,37(S1/2):263-284.
- [52] 徐余,刘润.应用断裂强度理论模拟基坑开挖过程及实测数据分析[J].*岩石力学与工程学报*,2004,23(15):2573-2578.
- [53] Bussolotto M, Benedicto A, Moen-Maurel L, et al. Fault deformation mechanisms and fault rocks in micritic limestones: Examples from Corinth rift normal faults[J]. *Journal of Structural Geology*, 2015,77:191-212.
- [54] 魏炯,朱万成,李如飞,等.岩石抗拉强度和断裂韧度的三点弯曲试验研究[J].*水利与建筑工程学报*,2016,14(3):128-132.
- [55] 刘红岩,吕淑然,丹增卓玛,等.节理岩体宏微观损伤耦合的三维本构模型研究[J].*水利与建筑工程学报*,2013,11(3):85-88.
- [56] Wiebols G A, Cook N G W. An energy criterion for the strength of rock in polyaxial compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1968,5(6):529-549.
- [57] Gaziev E. Rupture energy evaluation for brittle materials [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2001,38(42/43):7681-7690.
- [58] Li Q M. Strain energy density failure criterion[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2001,38(38/39):6997-7013.
- [59] 周筑宝,卢楚芬,郑学军.按能量原理建立强度理论的新探索与展望[J].*长沙铁道学院学报*,1996,14(4):1-9.
- [60] Hua A Z, You M Q. Rock failure due to energy release during unloading and application to underground rock burst control[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2001,16(3):241-246.
- [61] 尤明庆,王安增.岩石试样破坏过程的能量分析[J].*岩石力学与工程学报*,2002,21(6):778-781.
- [62] 赵忠虎.基于能量耗散与能量释放的岩石变形破坏研究[D].成都:四川大学,2007.
- [63] Gao H, Zheng Y R. Discussion on strength criteria[J]. *Materials Research Innovations*, 2011,15(S1):504-507.
- [64] 黎立云,谢和平,鞠杨,等.岩石可释放应变能及耗散能的实验研究[J].*工程力学*,2011,28(3):35-40.
- [65] Xie H P, Li L Y, Ju Y, et al. Energy analysis and criteria for structural failure of rocks[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2009,1(1):11-20.
- [66] 周辉,李震,杨艳霜,等.岩石统一能量屈服准则[J].*岩石力学与工程学报*,2013,32(11):2170-2184.
- [67] 牛超颖,贾洪彪,马淑芝,等.基于能量原理与中间主应力效应的新岩石强度准则探讨[J].*长江科学院院报*,2015,32(11):93-98.
- [68] 刘新荣,郭建强,王军保,等.基于能量原理盐岩的强度与破坏准则[J].*岩土力学*,2013,34(2):305-310.
- [69] 左建平,谢和平,周宏伟.温度压力耦合作用下的岩石屈服破坏研究[J].*岩石力学与工程学报*,2005,24(16):2917-2921.
- [70] 赵忠虎,谢和平.岩石变形破坏过程中的能量传递和耗散研究[J].*四川大学学报(工程科学版)*,2008,40(2):26-31.