

# 巴西圆盘拉伸强度测试在岩石力学中的发展综述及新见解

张军<sup>1\*</sup>, 牟晋智<sup>1</sup>, 潘哲君<sup>1</sup>, 李玉伟<sup>2</sup>

1 东北石油大学石油工程学院, 大庆 163318

2 辽宁大学环境学院, 沈阳 110036

\* 通信作者, zhangjun410410@163.com

收稿日期: 2023-12-13

国家自然科学基金青年基金项目(52004065)资助

**摘要** 准确获取岩石抗拉强度, 全面了解岩石拉伸破坏演化机制, 是岩石力学理论研究和岩体工程应用的关键问题之一。由于直接拉伸试验存在试样夹持困难、端部应力集中显著、试验成功率低等诸多局限性难题, 岩石类材料抗拉强度通常采用间接方法测试。而巴西圆盘试验作为间接方法中最被广泛使用的测试技术, 自提出就因其特殊的力学机制而成为了岩石力学领域的研究热点, 但同时其结果的准确性和有效性也受到了广泛的质疑与讨论。本文系统调研了巴西圆盘试验相关的室内试验、解析模型和数值模拟研究, 总结并分析了该方法的发展趋势、形成的不同试验标准以及每种标准提出的基本依据和适用性。基于国内研究中的试验数据, 对比了巴西圆盘和直接拉伸试验在测试结果上的差异, 分析了控制巴西圆盘有效起裂的关键因素, 明确了外在因素(加载条件、几何形状)和内在因素(力学性质、非均质性)对巴西圆盘断裂机制和试验结果的影响。最后, 从初始裂纹萌生和扩展裂纹延伸两个阶段重新讨论了巴西圆盘测试岩石拉伸强度在实际条件下的有效性, 并结合近年来几种创新型的岩石拉伸测试新方法, 指出了岩石力学领域抗拉强度测试方法的发展方向。

**关键词** 岩石抗拉强度; 巴西圆盘试验; 加载条件; 非均质性

中图分类号: TE321; O39

## Discussion and prospects of the development on measurement while drilling technology in oil and gas wells

ZHANG Jun<sup>1</sup>, MOU Jinzhi<sup>1</sup>, PAN Zhejun<sup>1</sup>, LI Yuwei<sup>2</sup>

1 School of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China

2 School of Environment, Liaoning University, Shenyang 110036, China

**Abstract** Accurately obtaining the tensile strength of rocks and comprehensively understanding the evolution mechanism of rock tensile failure is one of the key issues in the theoretical research of rock mechanics and the application of rock engineering. Due to the limitations of direct tensile testing, such as difficulty in sample clamping, significant stress concentration at the end, and low success rate, indirect methods are usually used to test the tensile strength of rock materials. The Brazilian disk test, as the most widely used testing technique among indirect methods, has become a research hotspot in the field of rock mechanics since its proposal due to its special mechanical mechanism. However, the accuracy and effectiveness of its results have also been widely questioned and discussed. This article systematically investigated indoor experiments, analytical models, and numerical

引用格式: 张军, 牟晋智, 潘哲君, 李玉伟. 巴西圆盘拉伸强度测试在岩石力学中的发展综述及新见解. 石油科学通报, 2024, 02: 240-259

ZHANG Jun, MOU Jinzhi, PAN Zhejun, LI Yuwei. Discussion and prospects of the development on measurement while drilling technology in oil and gas wells. Petroleum Science Bulletin, 2024, 02: 240-259. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.018

simulation studies related to the Brazilian disc test, summarized and analyzed the development trend of this method, the different experimental standards formed, and the basic basis and applicability proposed by each standard. Based on experimental data from domestic research, the differences in test results between Brazilian disc and direct tensile test were compared, and the key factors controlling effective cracking of Brazilian disc were analyzed. The influence of external factors (loading conditions, geometric shape) and internal factors (mechanical properties, heterogeneity) on the fracture mechanism and test results of Brazilian disc was clarified. Finally, the effectiveness of Brazilian disk testing for rock tensile strength under actual conditions was discussed from the two stages of initial crack initiation and propagation crack extension. Combined with several innovative rock tensile testing methods in recent years, the development direction of tensile strength testing methods in the field of rock mechanics was pointed out.

**Keywords** rock tensile strength; Brazilian disc test; loading conditions; heterogeneity

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.018

## 0 引言

抗拉强度是衡量岩石抵抗破坏能力的一个重要参数,在钻完井工程、水力压裂等地下岩体工程问题中,由于岩石抗拉强度远小于抗压强度,储层岩石在压缩条件下也容易发生拉伸微断裂主导的脆性破坏<sup>[1-5]</sup>。因此,准确的获得岩石抗拉强度和掌握其拉伸破坏机制对地下岩体工程中的稳定性分析和工程方案设计至关重要。

岩石抗拉强度的有效测试方法至今仍然是岩石力学领域探讨的一个热点问题。理论上,直接拉伸试验是最为准确有效的岩石抗拉强度测试方法<sup>[6]</sup>。但在实际操作中,端面黏接优先开裂、偏心应力难以规避、端部应力集中显著等诸多局限性难题限制了直接拉伸试验的普遍应用和发展<sup>[7-9]</sup>。因此,间接测试岩石拉伸强度的巴西圆盘试验方法被提出,并凭借其制样简单、操作便捷、成功率高的优点,很快成为了岩石力学领域应用最为广泛的岩石抗拉强度测试方法。该方法分别在1978年和2008年被国际岩石力学学会(ISRM)和美国材料与试验协会(ASTM)列为测量岩石抗拉强度的标准方法<sup>[10-11]</sup>。随后,我国也将刚性杆加载的巴西劈裂法作为抗拉强度的测量方法列入国家标准和行业规范中<sup>[12-13]</sup>。与直接拉伸相比,巴西圆盘实际为径向压缩应力加载,其力学状态是较为复杂的双轴应力,其独特的力学机制使得该方法有着十分严苛的适用条件(各向同性、均质的理想弹性材料)和有效条件(初始裂纹萌生于圆盘中心)。因此,巴西圆盘拉伸强度测试方法也受到了很多学者的质疑。如Hudson J A等<sup>[14]</sup>在试验中发现平板加载下的巴西圆盘很多情况下会产生加载点开始的无效断裂,不建议将巴西试验作为测量材料抗拉强度的方法。Swab J J等<sup>[15]</sup>对尖晶石材料开展了不同加载方式的巴西圆盘试验,结果表明无论使用哪种类型的压板,断裂都是在加载处开始,他们认为径向压缩的巴西圆盘试验不适合确定尖晶石的抗

拉强度。Fuenkajorn K和Sippakorn K<sup>[16]</sup>认为即使巴西圆盘初始断裂由中心开始,拉伸和剪切微裂纹的萌生和扩展也会导致圆盘试样中应力分布不均匀,从而过高估计材料的拉伸强度。Gong F和Zhang L<sup>[17]</sup>通过一系列试验发现,无论哪种标准的巴西圆盘测试结果与直接拉伸强度都有显著差异,ASTM标准和ISRM标准下砂岩试件巴西劈裂强度分别为直接拉伸强度的1.52倍和1.61倍,而我国行业标准下的巴西劈裂强度约为直接抗拉强度的0.73倍。

巴西圆盘拉伸试验虽然存在种种质疑,由于该方法操作简单和试样制备要求较低,现有研究中基于巴西圆盘开展的拉伸强度测试仍然占绝大多数,但该方法测得的抗拉强度的准确性较低仍是不可回避的问题<sup>[18]</sup>。为进一步明确巴西圆盘试验的有效性,本文系统调研了巴西圆盘试验的发展历程,总结了现有的各种试验标准,分析了各种标准提出的基本依据,对比了巴西圆盘和直接拉伸试验在测试结果上的差异,明确了控制巴西圆盘有效起裂的关键因素以及岩石本身力学属性和非均质性对结果的影响。最后,从初始裂纹萌生和后续裂纹扩展两个阶段重新讨论了巴西圆盘试验测试岩石拉伸强度在实际条件下的有效性,并结合近年来几种新型的岩石拉伸测试方法,指出了岩石抗拉强度测试方法的发展方向。

## 1 巴西圆盘试验基本原理和典型方法

巴西圆盘试验又称径向压缩试验(Diametral Compression Test),是由Carneiro F<sup>[19]</sup>教授在1943年发明的。有趣的是,日本学者Akazawa T<sup>[20]</sup>在同一年也提出了该方法,将其命名为“劈裂拉伸测试”。与直接拉伸试验相比,巴西圆盘试验不需要将试件端部粘接或者夹持在加载装置上就能完成拉伸强度的测试,操作更加快捷方便,试验成功率更高<sup>[21-22]</sup>。该测试假

设集中的线荷载施加在圆盘直径上一个无穷小的宽度上(图 1a), 圆盘内部会产生两个相互垂直的拉伸主应力和压缩主应力, 而圆盘中心存在最大压应力和拉应力, 且前者是后者的 3 倍。根据 Griffith 强度准则, 岩石压缩强度是岩石拉伸强度的 8~12 倍, 因此圆盘试样中心会在横向拉应力的作用下先发生拉伸破坏。经典的巴西劈裂抗拉强度计算公式为<sup>[10~11]</sup>:

$$\sigma_T = -\frac{2P}{\pi DT} \quad (1)$$

式中,  $P$  为破坏时的临界载荷(N),  $D$  为试件的直径(mm),  $T$  为试件中心测得的厚度(mm)。

公式(1)成立的基本假设为: ① 加载区和圆盘之间为线荷载接触; ② 岩石在拉伸和压缩时都表现出弹性; ③ 两个加载点附近均存在较高的压应力, 因此拉伸裂纹不起源于加载区域; ④ 断裂开始于圆盘中心, 且加载区断裂不影响试件中心的应力分布。在经典解的假设中, 径向荷载作用在圆盘极短的接触弧长上。因此, 最初巴西圆盘采用的是平台加载方式(图 2a)。2008 年, 美国试验和材料学会(ASTM)将该方法纳入到标准中<sup>[11]</sup>。然而, 在很多平台加载的巴西试验中都观察到了非中心起裂的拉伸裂纹, 这使得测试结果的无效化<sup>[23~25]</sup>。因此, 学者们尝试了不同方式的改进和调整, 这主要包括 3 个方面: 加载钳口的改进、辅助件的加入以及试样几何形状的变化。

(1) 加载钳口的改进主要包括 1.5 倍曲率弧形钳口和等曲率弧形钳口(图 2b 和图 2c)。由于巴西圆盘在压缩荷载下会产生形变, 受到的实际荷载并不是集中的, 而是不均匀分布在圆盘的有限圆弧上(图 1b)。1971 年, Mellor M 和 Hawkes I<sup>[26]</sup> 第一次建议使用半径为试样 1.5 倍的弧形钳口作为加载装置。随后, 该方法被国际岩石力学学会(ISRM)推荐为标准测试方法<sup>[10]</sup>。但

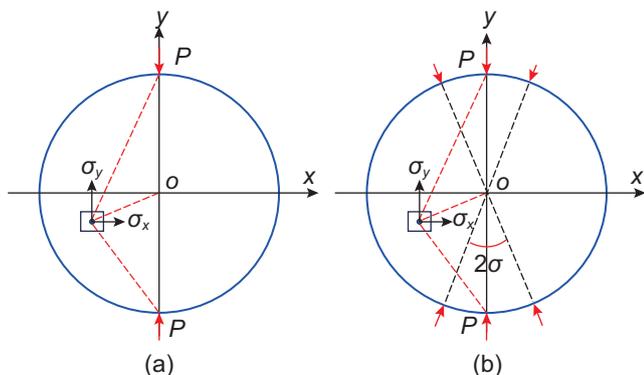


图 1 ASTM 和 ISRM 标准下巴西圆盘试验原理

Fig. 1 Principles of Brazilian disk testing under ASTM and ISRM standards

也有学者认为, 由于 ISRM 标准钳口和圆盘曲率不同, 加载过程中弧形钳口和圆盘会产生不同的切向形变, 这使得两者之间产生显著的切向力(摩擦力), 这会改变圆盘应力状态而影响最终测试结果。因此, 一种等曲率弧形加载装置被提出(图 1c)<sup>[27]</sup>。

(2) 加入的辅助件主要包括刚性杆和软性垫(图 2d 和图 2e)。巴西圆盘结果有效的一个前提是拉伸裂纹出现在圆盘中心。因此, 刚性杆加载被提出, 这种方法是在平台和圆盘之间安装一个直径很小的刚性杆, 在加载点应力集中的作用下, 使得断裂通过圆盘中心的可能性增大<sup>[17]</sup>。这一方法也被纳入到我国标准《工程岩体试验方法标准(GB/T 50266-99)》<sup>[12]</sup>。另一种常见的辅助配置是软性垫片的加入。与刚性杆增加加载点应力集中相反, 软性垫的作用是通过减少加载区应力集中来提高圆盘中应力分布的均匀程度<sup>[28~29]</sup>。

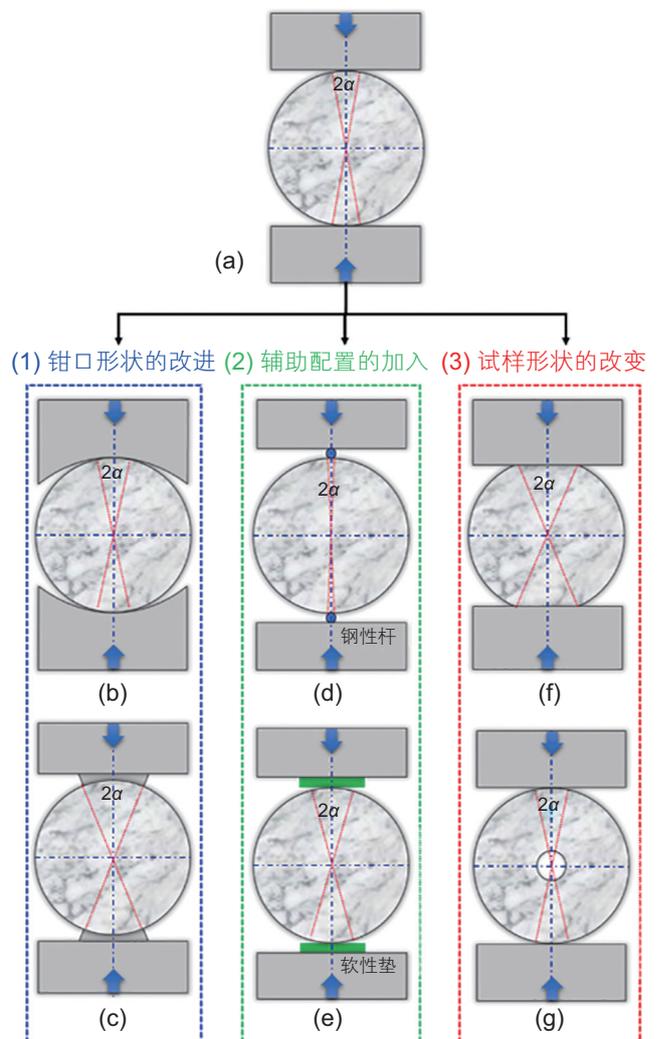


图 2 巴西圆盘试验发展的不同类型

Fig. 2 The different types of development of Brazilian disk experiments

(3) 试样几何形状的变化主要包括平台圆盘试样和钻孔环形试样(图 2f 和图 2g)。平台试样提出的目的与等曲率弧形加载类似, 同样是考虑非等曲率会产生显著切向应力的问题, 将圆盘两端加工成平台, 使其端面与平台平行, 即有了相同的曲率, 以此消除加载板和圆盘之间的摩擦力。但实际上, 加载板和试样形变能力的差异仍然会导致平台圆盘试样端部产生切向应力。很多学者考虑到巴西圆盘裂纹起裂点的不确定性, 提出以带钻孔环形试样测试拉伸强度, 集中在钻孔周围的集中拉伸应力能够刺激初始裂纹在孔壁上产生, 以此提高了初始裂纹产生的稳定性和集中性<sup>[30-32]</sup>, 但由于该方法人为控制作用较强, 其应用并不广泛。

综上所述, 巴西圆盘试验经历了多样化的发展, 形成了一系列标准和非标准的试验方法, 但不同方法的提出都具有较强的目的性, 优势和局限十分明显, 这些会在后面进行更加详细的讨论。

## 2 巴西圆盘与直接拉伸试验结果的差异

由于巴西圆盘试验是径向压缩条件下的一种间接方法, 很多学者对其结果的准确性表示怀疑。事实上, 很多研究都发现岩石直接拉伸和巴西圆盘试验拉伸强度之间存在显著差异, 如表 1 所示。

通过表 1 可以看出, 不同研究获得的岩石直接拉伸强度和巴西圆盘拉伸强度的关系有所不同, 现有研究认为这种差异是外在因素和内在因素共同导致的。外在因素主要指加载条件和圆盘形状。Liu J F 等(2014)<sup>[39]</sup>指出 ISRM 标准弧形加载获得的间接强度高于直接拉伸强度, 而我国标准(刚性杆加载)下的间接强度则低于直接拉伸强度。内部因素是指岩石本身的力学性质以及非均质性。Andreev G (1991)<sup>[35-36]</sup>发现直接拉伸和巴西圆盘得出的岩石抗拉强度之间的关系在不同的岩石材料中不同。Perras M A 和 Diederichs M S (2014)<sup>[50]</sup>基于其他研究中的数据重新梳理了直接拉伸强度和巴西圆盘拉伸强度的关系, 确定出 ISRM 标准获得的抗拉强度通常大于直接拉伸强度, 并且该关系取决于岩石类型。关系系数  $f(\sigma_{TTS} / \sigma_{BDS})$  对于变质岩可被认为约为 0.9, 对于火成岩可被认为约为 0.8, 对于沉积岩可被认为约为 0.7。

## 3 外在因素对巴西圆盘试验的影响

### 3.1 加载条件的影响

#### 3.1.1 线载荷与面载荷加载

平台加载、1.5 倍曲率弧形加载和刚性杆加载的

巴西圆盘试验作为国内外不同的标准方法, 其研究最为广泛, 很多学者通过试验观测<sup>[17]</sup>、数字图像相关技术(DIC)<sup>[51]</sup>以及数值模拟<sup>[52]</sup>对比研究了这 3 种标准试验的差异以及差异产生的原因。直接拉伸试验会产生垂直于加载轴线方向纯拉伸裂纹, 而在不同的巴西试验中则出现了不同的裂纹模式(图 3)。刚性杆加载条件下的巴西圆盘出现最为平整的拉伸裂纹, 但这种拉伸裂纹在很多研究中被认为是人为控制的结果。刚性杆可认为是线性载荷加载, 加载点附近会产生十分显著的应力集中, 导致了加载点首先发生“V”形压入式破坏, 然后裂纹由两端向圆盘中心继续扩展, 这显然不符合巴西圆盘试验结果有效性的前提。在 ASTM 标准的平板加载下, 巴西圆盘主要受拉破坏, 在加载端附近初始主裂纹处出现二次裂纹, 形成了锥形剪切破坏区。在 ISRM 标准弧形加载下, 初始拉伸裂纹出现在圆盘中心的概率增大, 但中心主裂纹周围会形成大量的二次裂纹, 并逐渐发育, 最终表现为多重的劈裂破坏模式。Gong F Q 等(2019)<sup>[17]</sup>认为刚性杆加载的最终破坏模式更符合巴西试验对于中心裂纹的要求, 但他们忽略的裂纹萌生的位置才是结果有效的前提。Xiao P 等(2022)<sup>[52]</sup>则认为刚性杆加载不适用于巴西圆盘试验, ASTM 平板加载和 ISRM 弧形加载的裂纹起始点都在圆盘中心, 可以获得有效的抗拉强度, 但他们并没有深入研究端部剪切裂纹和二次扩展裂纹对应力分布和试验结果的影响。

不同试验方法获得拉伸强度存在以下关系: 1.5 倍曲率弧形加载强度 > 平板加载强度 > 直接拉伸强度 > 刚性杆加载强度。弧形和平板加载会产生显著的局部压缩, 限制了加载过程中受拉区域的扩展, 因此需要更大的垂直力。而在刚性杆加载过程中, 加载端“V”形破坏区类似预置裂纹, 诱导局部裂纹扩展速度加快, 垂直力减小。Sgambitterra E 等(2018)<sup>[51]</sup>基于数字图像相关(DIC)技术获得应变场和局部应力分析(图 3)。他们发现平板和杆加载时, 极小的接触面积会在接触区附近产生非常显著的应力集中, 这种应力集中可能会在接触点对试件造成不必要的损伤和初始破坏, 从而使得圆盘中心拉应力值低于解析预测结果。ISRM 弧形钳口可以提高圆盘接触面积, 降低加载点应力集中效应, 但从能量角度看, 弧形加载产生的压应力较大, 圆盘断裂需要额外能量的输入, 这导致弧形加载获得抗拉强度偏大。

#### 3.1.2 不同曲率的圆弧加载

在巴西圆盘试验中, 材料的形变导致圆盘和加载块之间会形成一定的接触面积, 接触弧长对应的圆

表1 各研究获得的岩石直接拉伸强度和巴西圆盘强度关系的汇总

Table 1 Summary of the relationship between direct tensile strength of rocks and Brazilian disc strength obtained from various studies

岩石类型	直接拉伸强度 $\sigma_{\text{ITS}} / \text{MPa}$	巴西圆盘拉伸强度 $\sigma_{\text{BDS}} / \text{MPa}$	加载 方式	关系系数 $f$ $\sigma_{\text{ITS}} / \sigma_{\text{BDS}}$	参考文献
粗面岩	13.72	12.00		1.14	文献[33]
砂岩	3.59	3.72	弧形	0.97	
大理岩	6.90	8.72		0.79	
花岗岩	13.45	14.34	平板	0.94	文献[26]
石灰岩	5.86	6.21		0.94	
砂岩	2.96	7.80	弧形	0.38	文献[34]
正长岩	20.50	21.05		0.97	文献[35-36]
灰石膏	1.75	1.99	平板	0.88	
白石膏	1.42	1.29		1.10	
钙质砂屑岩	0.69	0.64	弧形	1.08	文献[37]
大理岩	5.90	6.90	平板	0.86	文献[38]
砂岩	6.49	10.68		0.61	文献[16]
大理岩	6.33	8.02	平板	0.79	
石灰岩	9.31	10.90		0.85	
花岗岩	9.53	11.24	平板	0.85	文献[39]
花岗岩	9.53	9.15	刚性杆	1.04	
大理岩	1.70	2.70		0.63	文献[40]
白色花岗岩	4.92	6.51	弧形	0.76	
红色花岗岩	6.66	7.76		0.86	
安山岩	13.91	16.77		0.83	
大理岩	1.30	2.05		0.63	文献[41]
花岗岩	3.30	4.40	刚性杆	0.75	
砂岩	0.56	1.11		0.50	
白色大理岩	3.27	6.76	平板	0.48	文献[42]
花岗岩	5.27	10.15	弧形	0.52	文献[43]
花岗岩	6.90	8.80	平板	0.78	文献[44]
砂岩	2.78	4.85	弧形	0.57	文献[45]
大理岩	5.75	7.45	平板	0.77	文献[46]
碳酸盐岩	3.19	6.74	弧形	0.47	文献[47]
火成岩	5.10	9.34		0.55	
花岗岩	5.62	9.91	弧形	0.57	文献[48]
大理岩	2.82	5.07		0.56	
盐岩	0.84	1.97	弧形	0.43	文献[49]
盐岩		1.15	刚性杆	0.73	

心角度在以往研究中被定义为接触角( $2\alpha$ )(图2)。接触角会随着圆盘材料、钳口材料和载荷水平而变化,同时也会对试验结果产生显著的影响<sup>[53]</sup>。Hondros G (1959)<sup>[54]</sup>的研究表明接触角的大小直接影响圆盘内部的应力分布,为此他提出了巴西抗拉强度的修正解(公式2)。随后, Satoh Y (1987)<sup>[55]</sup>提出了另一种考虑接触角的修正公式(公式3),这一公式中认为 $2\alpha = 15^\circ$ 。

$$\sigma_T = -\frac{2P}{\pi DT} \cdot K_1 = -\frac{2P}{\pi DT} \cdot \left( \frac{2\sin\alpha}{\alpha} - 1 \right) \quad (2)$$

$$\sigma_T = -\frac{2P}{\pi DT} \cdot K_2 = -\frac{2P}{\pi DT} \cdot \frac{(\sin 2\alpha)^2}{4\alpha \sin\alpha} \quad (3)$$

Tang H.(2022)<sup>[56]</sup>采用压痕法测量了巴西圆盘的接触角。结果表明, $2\alpha > 14.75^\circ$ 时,等效力值的最大值总是在圆盘中心处获得,此时加载形式对拉伸强度的影响可以忽略。而对于较小的接触角,在主裂纹附近

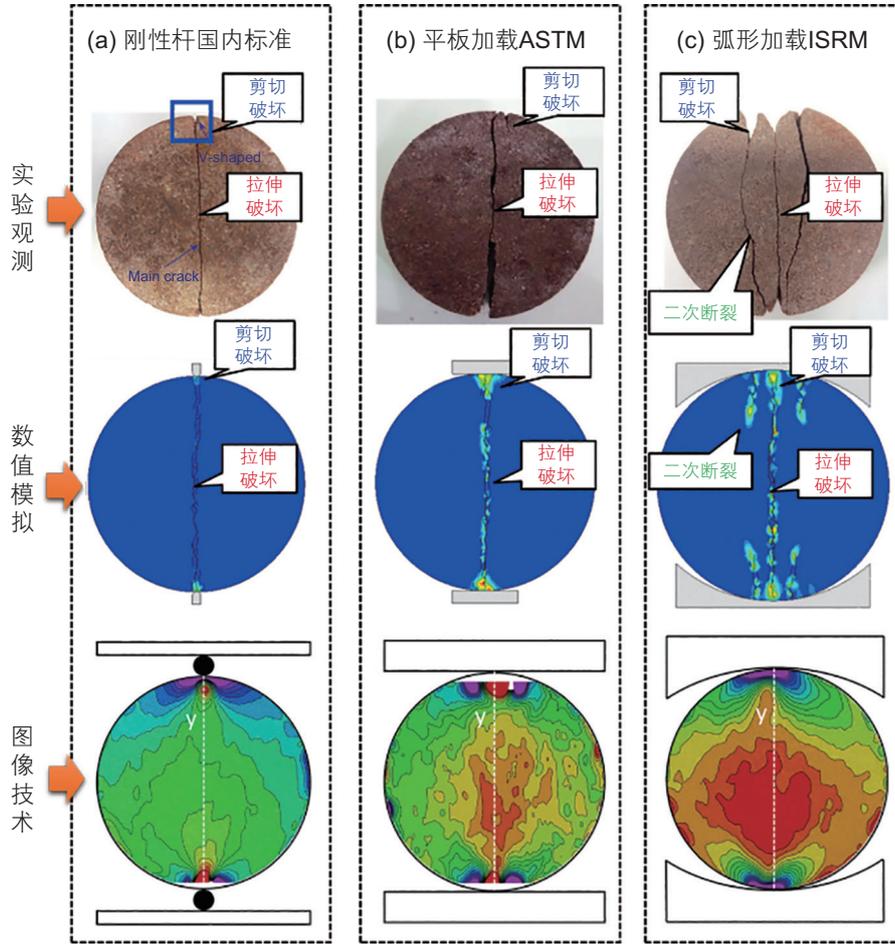


图 3 不同标准巴西圆盘试验获得裂纹形态<sup>[17, 51-52]</sup>

Fig. 3 Crack morphology in Brazilian disc tests with different standards<sup>[17, 51-52]</sup>

可以观察到二次裂纹。证实了刚性杆加载和平台加载产生的较小接触角会引起加载区附近显著的应力集中而导致加载区过早破坏的结论。相比刚性杆加载和平台加载，ISRM弧形加载在促进圆盘中心起裂上具有一定优势，但其缺点也十分明显。一方面，不同材料的圆盘与标准弧形钳口间的接触弧长差异显著，导致ISRM标准下的接触角难以确定。另一方面，由于圆盘和ISRM加载钳口曲率不同，两者沿圆盘圆周的切向变形也有显著差异，切向位移在加载过程中被摩擦力所平衡<sup>[57]</sup>。Markides Ch F等(2010)<sup>[58, 23-24]</sup>的研究表明，在非均匀径向应力条件下，弧形钳口和圆盘间的摩擦的作用是不可忽视的，尤其是当表面粗糙度较高时，切向应力会显著改变了加载区附近的应力状态，加剧了该区域裂纹的不稳定起裂和发展，导致局部过早开裂的可能性增加，这意味着断裂可能始于加载点而不是试样中心。

为了最大限度的减少试验中弧形钳口和圆盘之间的切向力并获得明确的接触角度，等曲率弧形加载方

式被提出(图 2c)。这种弧形钳口的曲率与圆盘试样相同，并可以预先设定所需的接触角。Erarslan N 和 Williams D J (2012)<sup>[59-60]</sup>开展了一系列的测试，探讨了ISRM标准弧形和等曲率弧形加载巴西圆盘试验的差异。如图 4 所示，ISRM弧形钳口并没有诱导圆盘产生中心起裂的有效拉伸裂纹，而是产生了多重的纵向劈裂破坏。不同接触角度同曲率加载弧的试样破坏形态有所差异。 $2\alpha = 15^\circ$ 时，圆盘出现了偏离中心轴线的中心裂纹。 $2\alpha = 20^\circ$ 时，出现了垂直的中心裂纹。 $2\alpha = 30^\circ$ 时，虽然产生了中心起裂裂纹，但是由于径向载荷过大，裂纹并未贯通整个圆盘试样。他们推荐使用接触角  $20^\circ$  等曲率弧形加载开展巴西试验。Bahaaddini M 等(2019)<sup>[61]</sup>的FLAC模拟表明，随着接触角的增加，加载端的压应力减小，而圆盘中心拉伸区增大，破坏机制是由加载边缘开裂向中心开裂转变。当接触加载角接近  $15^\circ$ 时，拉伸区的拉应力值达到实际试样的实际抗拉强度，此时破坏机制是有效的。他们认为接触角为  $30^\circ$  或更高的加载角度是在所有岩石类材料中实

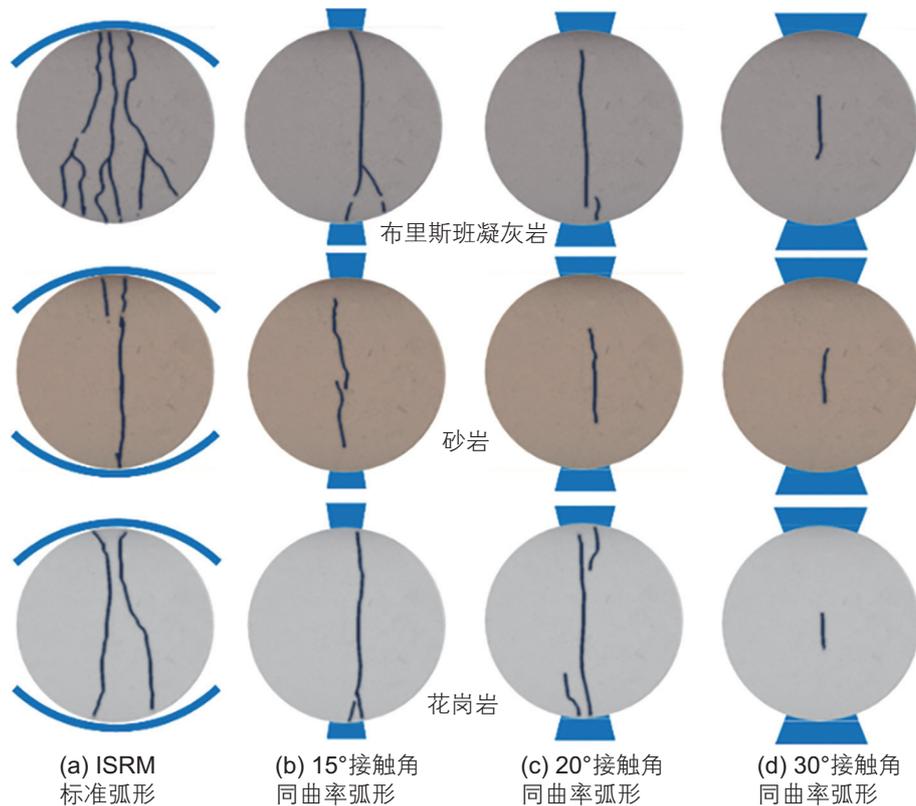


图4 不同曲率及接触角弧形加载下的裂纹模式<sup>[59-60]</sup>

Fig. 4 Crack modes under arc-shaped loading with different curvatures and contact angles<sup>[59-60]</sup>

现有效破坏机制的最稳健的设置。Gutiérrez-Moizant R 等(2020)<sup>[62]</sup>的数值模拟结果则表明与20°加载弧相比,30°的加载弧下圆盘等效应力虽然相对较大但分布在圆盘中心较小的区域内,因此得出了20°接触角更好的结论。

综上所述,等曲率弧形加载角的合理设置目前还未形成统一的认识,同时也有学者对该方法提出了反对意见。首先,这种方法圆盘和加载钳口虽然曲率相同,但材料的不同引起的剪切摩擦力仍然没有完全消除,同时等曲率弧形钳口边界处显著的应力集中,这使得钳口容易嵌入圆盘,更容易诱导边缘的优先断裂。此外,Markides Ch F 和 Kourkoulis S K (2020)<sup>[63]</sup>认为对于接近圆盘半径的钳口,圆盘中心处的应力场发生了明显的扭曲,使得经典解析公式不再适用。

### 3.1.3 软性垫片的使用

Addinall E 和 Hackett P (1964)<sup>[28]</sup>提出在圆盘和压板之间放置一个柔性垫片可以更好的协助载荷分配。Ghouli S 等(2021)<sup>[29]</sup>在巴西圆盘试验中采用了与弧形钳口曲率相同的PMMA垫块。他们都认为该方法能够更平滑、更均匀的将荷载传递给试件,最大限度地减少了由于加载点附近的裂缝开始而导致圆盘破裂的可能性。然而,在原本的巴西试验中,由于圆盘和钳口

材质的差异而产生的切向摩擦力本身就会对试验结果产生显著影响,而软性垫作为试验中的第3种材料,其加入会加剧这种作用,增大钳口、垫片以及圆盘之间的摩擦力而改变加载端部的局部应力状态<sup>[64]</sup>。因此,该方法只在极少数的研究中使用。

## 3.2 圆盘形状的影响

在巴西圆盘试验的发展中,也有学者对试样形状提出了改进方法。最典型是平台圆盘试样和钻孔圆盘试样。

### 3.2.1 平台巴西圆盘

平台巴西圆盘(Flattened Brazilian Disc)最初是一种岩石断裂韧性的测试方法<sup>[65]</sup>。随后,Wang Q Z 等(2004)<sup>[66]</sup>将该方法扩展到了岩石抗拉强度的测试,并认为试验机能够对FBD平整的表面施加均匀载荷,可以避免加载端部的局部应力集中。他们提出了平台巴西圆盘试验的经验公式:

$$\sigma_t = -\frac{2P}{\pi DT} \cdot K_3$$

$$= -\frac{2P}{\pi DT} \cdot \left[ \frac{(2\cos^3 \alpha + \cos \alpha + \sin \alpha / \alpha)^2}{8(\cos \alpha + \sin \alpha / \alpha)} \cdot \frac{\alpha}{\sin \alpha} \right] \quad (4)$$

此公式存在临界加载角度，即  $2\alpha$  大于  $20^\circ$  时才能保证平台圆盘试样的中心受拉起裂。Huang Y G 等 (2015)<sup>[67]</sup> 发现，随着加载角的增加，平台加载端附近的压应力集中程度显著降低，这可以降低岩石试样的压缩破坏可能性。但加载角超过  $30^\circ$  后，应力值和受拉区域略有减小，不利于中心起裂。他们认为最佳的平台加载角度为  $20^\circ\sim 30^\circ$ ，并提出了另一种 FBD 抗拉强度计算公式：

$$\sigma_t = -\frac{2P}{\pi DT} \cdot K_4 = -\frac{2P}{\pi DT} \cdot \left( \frac{\sin \alpha \cos^2 \alpha}{\sin \alpha \cos \alpha - 2\alpha} \right) \quad (5)$$

Stirling R A 等 (2013)<sup>[68]</sup> 和 Zhang B 等 (2023)<sup>[69]</sup> 分别通过 DIC 技术和数值模拟对比分析了 ASTM、ISRM 和 FBD 共 3 种巴西试验的渐进破坏过程，结果表明 ASTM 和 ISRM 圆盘最大拉应变集中区逐渐向加载点发展，而 FBD 试样能够减弱加载区域的应力集中，使得裂纹扩展的水平应变一直处于中心发展状态，它的断裂行为是裂纹从圆盘中心开始并向顶部和底部扩展，他们认为 FBD 试验在产生中心初始裂纹方面更具有优势。

有部分学者对该方法的适用性存在不同的观

点。首先，促进中心裂纹起裂方面，Wang M 和 Cao P (2018)<sup>[70]</sup> 的试验应变数据和试样破坏类型均表明，FBD 裂纹并非起源于圆盘中心，而是沿着加载平面边缘扩展，他们认为 FBD 并不能保证试验结果的有效性，不适合测量岩石材料的间接拉伸强度。其次，与其他巴西试验不同，FBD 普遍存在加载边缘的二次断裂，相应的加载曲线也存在两个峰值<sup>[71-72]</sup> (图 5)。现有研究认为第一次断裂为圆盘中心产生的拉伸裂纹，第二次为沿加载平面边缘产生的压剪断裂。当载荷达到第一个峰值载荷时，中心拉伸裂纹萌生，FBD 试件达到其抗拉强度，而第二峰值是加载边缘发生压剪断裂的临界载荷。剪切裂纹的产生使 FBD 所确定强度值与直接拉伸强度相差很大，但边缘压剪断裂对中心拉伸裂纹产生的内在影响和联系目前尚不清楚。Khavari P 和 Heidari M (2016)<sup>[73]</sup> 的研究发现只有加载角度超过  $30^\circ$  时，才能避免在试件扁平端部产生裂纹。与圆盘试样相比，FBD 接触角的增大会带来不同的结果。Wu S 等 (2018)<sup>[74]</sup> 的离散元模拟研究表明，FBD 试样满足裂纹从巴西圆盘中心开始的假设。然而，FBD 本身的几何形状已不再是经典的巴西圆盘，也就意味着

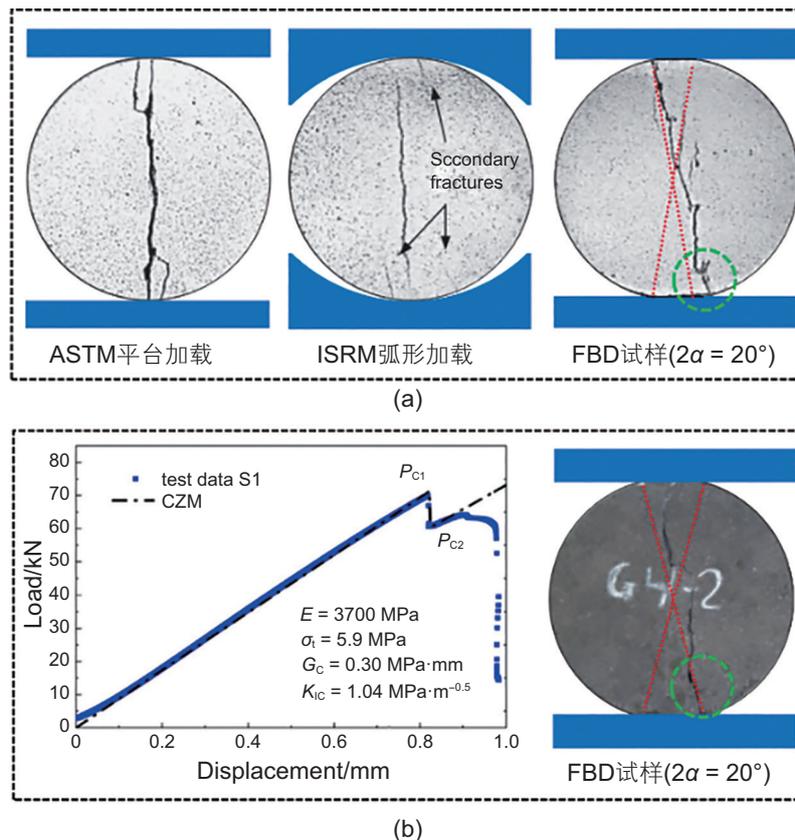


图 5 ASTM 和 ISRM 标准下巴西圆盘裂纹模式与不同加载角度的 FBD 裂纹模式对比<sup>[68, 71]</sup>

Fig. 5 Comparison of Brazilian disk crack modes under ASTM and ISRM standards and FBD crack modes at different loading angles<sup>[68, 71]</sup>

中心起裂的假设并不能作为FBD有效的充分必要条件。较大接触角下的FBD试样更接近单轴压缩,其结果出现了单轴压缩中典型的单斜面剪切破坏和X形共轭剪切破坏模式也证明了这一点。FBD加载平面边缘产生的二次剪切裂纹需要试验机提供额外的力从而导致试验结果偏大,次生裂纹的形成过程从本质上影响试验的有效性。此外,Markides C F和Kourkoulis S K (2020)<sup>[75]</sup>的研究发现在均匀载荷作用下,FBD平台两端会出现不均匀的变形,从而不满足该方法的前提假设。为了使这些边缘在变形后保持平面,在FBD边缘上应该施加适当的非均匀载荷,但这在试验中是非常难以实现的。

### 3.2.2 钻孔环形圆盘

Hobbs D W (1964)<sup>[30]</sup>、Price D G和Knill J L(1966)<sup>[31]</sup>、Hiramatsu Y和Oka Y (1970)<sup>[32]</sup>等学者考虑到巴西圆盘试验中裂纹起裂点的不确定性,提出以钻孔环形试样来取代巴西圆盘试样以测试拉伸强度。圆盘预置的中心圆孔能够以刺激拉伸应力集中,诱发初始拉伸裂纹出现在孔壁上,从而克服了初次裂缝发育远离试样中心的问题。Hobbs D W (1965)<sup>[76]</sup>使用Filon应力函数和边界应力条件的傅里叶表达式来表示环的应力分布,给出了钻孔圆盘测试拉伸强度的计算公式:

$$\sigma_t = -\frac{2P}{\pi DT} \cdot K_5 = -\frac{2P}{\pi DT} \cdot (6 + 38\rho^2) \quad (6)$$

其中, $\rho$ 为内孔半径 $r$ 和圆盘半径 $R$ 的比值。

钻孔的存在虽然会诱导中心裂纹的产生,但也显著改变了试样应力状态,从而过高估计了岩石抗拉强度。Chen C S和Hsu S C (2001)<sup>[77]</sup>通过一些列测试发现钻孔环形试样测得的抗拉强度约为巴西试验的3~5倍。此外,钻孔圆盘试样裂纹起裂扩展模式受参数 $\rho$ 的显著影响。Abdullah R A和Tsutsumi T (2018)<sup>[78]</sup>的数值模拟结果表明, $0 \leq \rho \leq 0.2$ 时,断裂是由加载点开始的,只有当 $\rho$ 超过0.2后,断裂才是由内孔处开始的。然而,Jiao Y Y等(2012)<sup>[9]</sup>、Xia M等(2021)<sup>[80]</sup>的离散元模拟研究结果表明, $\rho=0.28$ 的环形试样在径向压缩作用下,垂直裂纹首先在加载接触区,随后内孔上下端的拉伸裂纹才会形成并逐渐扩展。Haeri H等(2015)<sup>[81]</sup>、Li D Y等(2016)<sup>[82]</sup>的数值和试验研究表明, $0 < \rho < 0.3$ 时,环形试件沿径向加载方向开裂,过大的内孔会使环形试件断裂成3扇或4扇(图6)。Zhou X (2020)等<sup>[83]</sup>认为这种差异与岩石参数有显著的关系。综上所述,该方法虽然提出较早,但其结果的有效性还未得到证实,同时环形试件几何尺寸目前也未形成统一的认识。

### 3.2.3 圆盘的厚度

经典解的一个重要的前提假设是二维条件,但巴西劈裂试验从根本上讲是一个三维弹性问题,因此圆盘几何形状也会对结果有显著的影响。Chau K T和Wei X X (2001, 2013)<sup>[84-85]</sup>的理论研究表明,在三维条件下,巴西圆盘最大拉应力出现在两端面中心,而不是圆盘三维几何中心。应力空间、三维解和平面解的影响会引起高达10%的误差,而计算公式中没有考虑这种误差。大量研究表明巴西抗拉强度与试样厚度-直径比呈正比例关系<sup>[74, 86-87]</sup>。Yu Y等(2006)<sup>[88]</sup>提出了考虑巴西圆盘试样三维尺寸效应的抗拉强度计算修正公式:

$$\sigma_t = -\frac{2P}{\pi DT} \cdot K_6 = -\frac{2P}{\pi DT} \cdot (0.2621q + 1) \quad (7)$$

式中, $q$ 为圆盘试样的厚度与直径之比( $t/D$ )。

然而,该公式没有考虑拉伸应变的分布及其对巴西试样裂纹生和扩展的影响。Aliha M R M (2013)<sup>[89]</sup>采用有限元分析方法推导出了一般的三维抗拉强度计算公式。

$$\sigma_t = -\frac{2P}{\pi DT} \cdot K_7 = -\frac{2P}{\pi DT} \cdot (0.312q + 0.964) \quad (8)$$

由此公式(7)和公式(8)可以看出,巴西圆盘试验结果对参数 $q$ 的依赖程度较高,说明巴西圆盘试验存在比较显著的尺寸效应,而直接拉伸的尺寸效应不显著,这也是巴西法被质疑的一个原因。

## 4 内在因素对巴西圆盘试验的影响

### 4.1 岩石力学性质的影响

岩石试件和加载钳口的弹性模量比 $E_s/E_j$ 以及岩石

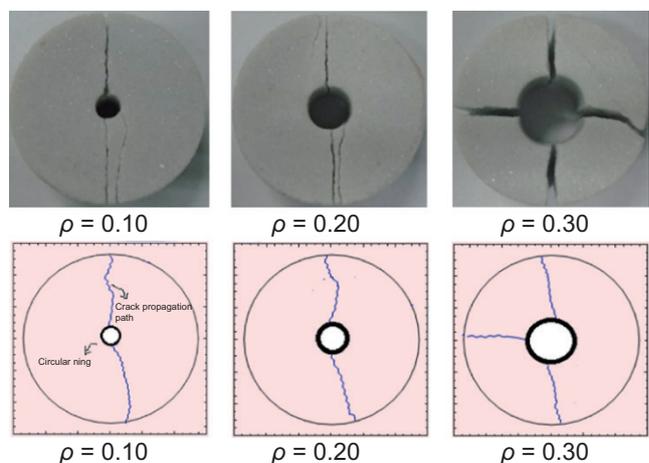


图6 砂岩环形试样径向压缩试验及数值模拟<sup>[81-82]</sup>

Fig. 6 Radial compression test and numerical simulation of sandstone annular specimens<sup>[81-82]</sup>

压—拉强度比  $\sigma_c/\sigma_t$  是影响接触附近应力分布、圆盘破坏模式以及最终测试强度的关键内在因素。

由于加载块刚度一般都是极高且固定的参数。因此,  $E_s/E_j$  实际上表征的就是圆盘本身弹性模量的大小。Andreev G E (1991)<sup>[35-36]</sup> 回顾了巴西圆盘试验的计算公式和接触条件, 认为通过增大圆盘试样与加载板的弹性模量差异, 可以避免接触区域的破坏。Markides C F 等(2010)<sup>[58]</sup>、Kourkoulis S K 等(2013)<sup>[57]</sup> 研究指出, 高弹性模量的硬岩试样会抑制载荷从载荷边缘向试样卸载部分的平稳过渡, 从而导致圆盘试样在边缘而非中心处起裂。Komurlu E 等(2015, 2016)<sup>[90-91]</sup> 测定了 19 种岩石材料的 200 多个试样抗拉强度。结果表明, 在相同加载条件下, 硬岩试样大都观察到了边缘分支裂缝, 而在凝灰岩等软岩试样中, 断裂为理想中心劈裂。

Yuan R 和 Shen B (2017)<sup>[92]</sup> 的离散元数值模拟结果表明, 随着  $\sigma_c/\sigma_t$  的降低, 圆盘试样的失效起始位置偏离中心, 向接触边界移动。Li D (2020) 等<sup>[93]</sup> 得到了相似的结论: 随着  $\sigma_c/\sigma_t$  的减小, 基于莫尔理论的最大等效应力通常会发生在远离圆盘中心的地方。他们认为平台或者圆弧试验方法可能导致高刚度和低压拉比岩石材料的失效模式。Zhao Z (2021) 等<sup>[94]</sup> 的数值模拟研究表明,  $\sigma_c/\sigma_t$  大于 6 时, 岩石的破坏可视为理想拉伸破坏。当该比值小于 6 时, 加载区的楔形破坏是主要的破坏形式。在这种情况下, 即使发生径向裂纹, 也不能认为是纯拉伸引起的。Zhang X P 等<sup>[95]</sup> 的研究结果表明, 加载方式与不同岩石材料间有不同的适配性, 根据岩石的  $\sigma_c/\sigma_t$  比值选择合适的加载压板对于最小化直接拉伸和巴西圆盘试验结果的差异至关重要。他们建议巴西平板试验、弧形钳口试验和 FBD 的岩石的合理的  $\sigma_c/\sigma_t$  比值范围分别为 10~15、8~10 和 5~8, 这意味着巴西圆盘试验只有在掌握了岩石力学关键参数才能有针对性的使用, 这与力学测试的目的相悖。

此外, AlAwad M N (2022)<sup>[96]</sup> 探究了不同泊松比岩石中的压缩和拉伸区。结果表明, 泊松比越大, 拉伸区越小, 而加载端的压缩区越大, 表明巴西劈裂试验在对高泊松比岩石测试时, 加载端更容易发生过早断裂。进一步, 他们基于泊松比效应提出修正的巴西间接抗拉强度公式, 该公式适用于大多数岩石和泊松比介于 0.10~0.45 之间的类岩石岩土材料。

$$\sigma_t = -\frac{2P}{\pi DT} \cdot K_8 = -\frac{2P}{\pi DT} \cdot (1-\nu) \quad (9)$$

上述研究还反映出值得探究的潜在问题。现有研究表明, 岩石的脆性与弹性模量和压—拉强度比正相关, 而与泊松比负相关<sup>[97-98]</sup>。然而, 上述研究

在岩石脆—塑性与巴西圆盘试验适配关系的结论上是不统一的。从压—拉强度比和泊松比的角度, 现有研究认为是脆性岩石巴西圆盘更容易产生中心裂纹, 而从弹性模量上看, 是脆性岩石巴西圆盘容易在加载边缘产生初始断裂。因此, 巴西圆盘试验是否适合脆性岩石拉伸强度的测试, 目前是不明确的。

## 4.2 岩石非均质性的影响

岩石的非均质性也是影响巴西圆试验结果的一个重要内在因素, 许多研究人员在他们的巴西圆盘试验和数值研究中探究了岩石非均质性的影响<sup>[99-100]</sup>。Yue Z Q 等(2003)<sup>[101]</sup> 采用有限元分析方法证明, 在经典的巴西试验中, 材料的非均匀性对沿垂直加载直径的拉应力分布有显著影响。Yuan R 和 Shen B (2017)<sup>[92]</sup> 的研究表明, 岩石非均质性较高时, 裂纹开始于较低的接触附近, 然后扩展到中心区域。Jiang R (2022) 等<sup>[102]</sup> 的研究表明在非均质性的影响下, 巴西盘的起裂位置偏离了盘的中心。

Liao Z Y 等(2019)<sup>[103]</sup> 的三维有限元数值模拟研究表明, 在试验初期, 在非均质性的影响下, 一些远离圆盘中心且强度较弱的单元即使所拉应力不是最高的, 也有可能优先发生断裂, 尤其是在加载端, 薄弱单元甚至发生压减断裂。Khadivi B 等(2023)<sup>[104]</sup> 采用声发射(AE)与高速成像耦合技术, 对巴西加载下产生的微观和宏观裂缝进行表征, 得到了相同的结论。在微观尺度上, 巴西圆盘的初始微裂纹可以通过孔隙破碎、沿原有裂纹滑动、晶粒间弹性失配、位错运动和赫兹接触等多种机制萌生, 这使得不同结构的岩石其初始裂纹萌生机制有所不同。例如, 砂岩初始微裂纹萌生主要依靠孔隙破碎, 而割理网络裂纹滑动则是煤岩的主要破坏机制(图 7)。

Palaniappan S K 等(2023)<sup>[105]</sup> 的研究表明, 在巴西拉伸试验载荷作用下, 最弱的矿物控制了花岗岩横截面的裂纹萌生和破坏模式。他们指出岩石非均质性会增加局部应力集中的数量和幅度, 使得最大拉应力不可能出现在巴西圆盘的中心。即使巴西圆盘中心存在最大拉应力, 初始剪切断裂也有可能发生在远离中心的低强度矿物或微结构面处产生。压剪裂纹的产生会消耗额外的能量, 这进一步导致了试验结果被高估。对于直接拉伸试验, 即使试样存在大量低强度矿物或原生缺陷, 在纯拉伸力下岩石只会发生拉伸断裂, 而不会存在压剪裂纹。由此可以看出, 岩石非均质性导致巴西圆盘力学行为偏离了基于岩石均质假设的已知岩石破坏理论。

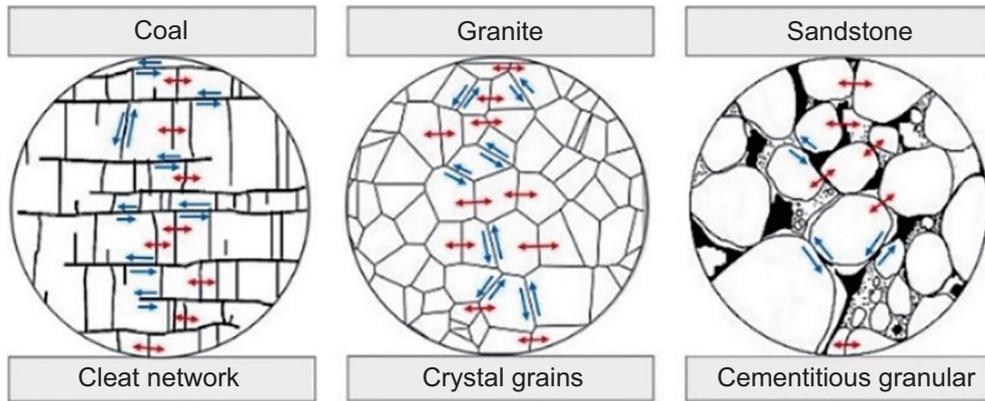


图7 不同类型岩石巴西圆盘径向压缩条件下微裂纹产生示意图<sup>[104]</sup>

Fig. 7 Schematic diagram of microcrack generation under radial compression conditions of Brazilian discs for different types of rocks<sup>[104]</sup>

## 5 巴西圆盘试验结果有效性的讨论

巴西圆盘间试验的提出本身是为了替代制样繁琐和成功率低的直接拉伸试验。然而，无论从试验结果上，还是破坏机制上，与直接拉伸试验结果都有着显著的差异。因此，很多学者对巴西圆盘试验本质的有效性提出了质疑。Fairhurst C (1964)<sup>[106]</sup>首先讨论了巴西圆盘试验有效性这一重要问题。他表示，“在加载接触区域角度较小的情况下，破坏可能发生在远离测试盘中心的地方”，并指出巴西试验计算出的抗拉强度低于真实值。Hudson J A 等(1972)<sup>[14]</sup>认为巴西圆盘试验失效总是直接在加载点下开始的，并不是测量抗拉强度的合适方法。实际上，自巴西圆盘测试被引入测量岩石和类岩石材料的抗拉强度，有关其有效性的讨论至今仍然没有一个公认的结论。上述研究大都是从初始裂纹产生这一个方面来探讨巴西圆盘试验的有效性。但是实际上，巴西圆盘中心裂纹产生并不代表加载曲线的峰值，这类似单轴压缩试验中的起裂应力。本文从初始裂纹萌生和裂纹扩展贯通两个阶段对巴西圆盘试验的有效性重新进行讨论。根据经典解，在理想化条件下整个巴西圆盘都是拉—压双轴应力状态，但不同的位置由不同的应力主导。其中，巴西圆盘中间为拉应力主导，而加载端则是剪应力主导(图 8a)。因此，可以将圆盘划分为 3 个区域：I 区代表拉应力主导区、II 区代表压应力主导区、III 代表拉—压复合应力区。初始裂纹萌生和裂纹扩展贯通两个阶段就有可能在不同的应力状态以及岩石微观强度的组合下发生如图 8b~图 8c 的裂纹模式。

### 5.1 初始裂纹萌生阶段

这部分讨论的核心问题是满足初始裂缝产生于圆盘中间的理想条件是否存在？对于理想的均质材料，圆盘任意位置的强度相同，在 I 区中心最大拉应力的影响下，圆盘中心首先出现拉伸裂纹(图 8b3)，这满足巴西圆盘方法中心起裂的基本要求。但如 4.2 所述，在岩石非均质性的影响下，断裂通常是由强度较弱的矿物或者晶间界面萌生的。因此，II 区和 III 区若存在胶结强度非常低的矿物颗粒或缺陷，即使没有达到最大有效应力，也有可能先发生破坏，形成压—剪初始裂纹以及拉—剪初始裂纹(图 8b1、b2)。而在直接拉伸中，由于不存在压应力，即使最弱的矿物破坏，仍然是纯拉伸破坏。因此，可以认为图 8b1、b2 中的断裂模式是无效的。

下面进一步讨论在实际条件下，图 8b3 中的裂纹起裂模式是否可能出现。巴西劈裂的加载条件由应力集中的线载荷，发展到弧形面载荷，再发展到和圆盘曲率相等的弧形加载。这代表了增大接触角度和减小圆盘曲率能够促进圆盘中心起裂。从 M-C 准则上看 ( $\tau = \sigma_n \cdot \tan \varphi + C$ )，当内聚力和内摩擦角等岩石力学性质一定时，剪切裂纹的产生一方面需要足够的剪应力，一方面也需要克服正应力所产生摩擦阻力。增大钳口与圆盘接触角度能够增大 II 区内的局部正应力，而减小钳口曲率则能够降低 II 区内的局部剪应力，因此这两种方式实际都是通过增大 II 区结构稳定性来增大 I 区产生拉伸裂纹的可能。但这两种措施都存在一定局限。首先，增大钳口接触角忽略了中心裂纹形成的过程性。从力学角度看，II 区内部过大的正应力，会提高已形成中心裂纹的继续扩展的阻力，这也能够

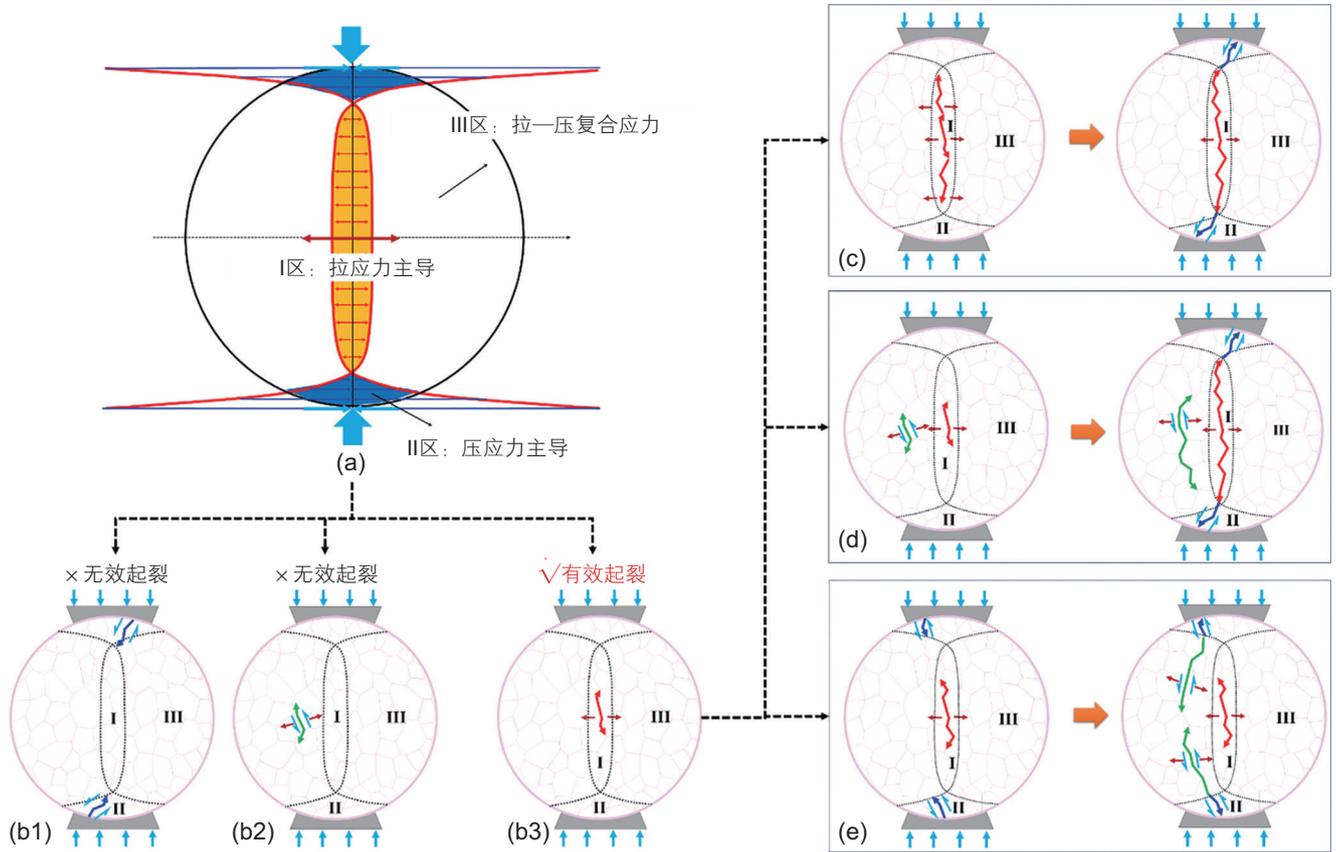


图 8 基于应力状态的巴西圆盘分区及可能产生的起裂扩展模式

Fig. 8 Schematic diagram of microcrack generation under radial compression conditions of Brazilian discs for different types of rocks

解释为什么接触角增大到  $30^\circ$  后，只能在圆盘中心观察到起裂但无法贯通圆盘的微小中心裂纹。从能量角度看，过高的正应力需要试验机提供额外的能量，这也是弧形加载结果偏高的原因。其次，减小钳口曲率能够减小加载界面的局部切应力，但是钳口和圆盘试样变形能力仍有差别，也就意味着切应力为 0 的理论条件是不存在的。只要存在切应力，那就会在一定程度上削弱 II 区的剪切稳定性，进一步考虑岩石非均质性的条件下，II 区内可能存在薄弱矿物或者晶间界面，该区产生压-剪破坏的可能进一步增加。

以上仅仅是考虑了岩石均质性和加载端切向应力的情况，当进一步考虑弧形加载的非均匀应力、圆盘厚度(中间主应力的影响)、圆盘弹塑性以及各向异性，中心裂纹产生的力学条件将更为复杂，巴西圆盘出现非中心的起裂模式概率进一步增大。因此，这使得这种看似简单的试验方式，仅在初始起裂有效方面的条件就十分苛刻。

## 5.2 裂纹扩展贯通阶段

假设圆盘中已经产生了满足解析解有效性的中心

起裂裂纹(图 8b3)，那么结果是否能够反映岩石真实的抗拉强度？Lanaro F 等(2009)<sup>[100]</sup>、Fuenkajorn K 和 Sippakorn K (2010)<sup>[16]</sup>认为即使断裂是从圆盘中心开始的，剪切微裂纹的萌生和扩展同样会导致结果的高估。当中心裂纹产生，后续的扩展模式如图 8c~e 所示，有可能形成 3 种贯通裂纹。首先，I 区虽然是拉伸应力主导，但仍存在压应力，为典型的双轴应力。在这种条件下，即使第一个产生的微裂纹位于圆盘中心，那么在 I 区内后续的扩展阶段，也有可能产生剪切裂纹<sup>[107]</sup>。Liu J F (2014) 等<sup>[39]</sup>的声发射监测结果表明，巴西圆盘中心由于压缩区和拉伸区同时存在，也显示出了显著的剪切断裂信号。其次，即使 I 区产生的为纯拉伸裂纹，但 III 区在初始裂纹形成后也有可能产生二次剪切裂纹。Zhang S 等(2020)<sup>[108]</sup>采用主、被动超声技术研究了巴西圆盘三维损伤演化过程。在远离圆盘中心约 10mm 处观察到了剪切信号。从能量角度看，这是高能积累和释放造成的。在 ISRM 标准圆盘试验中，由于切向应力的显著存在，虽然不会对中心应力产生影响，但会同时提高 II 和 III 区内的剪应力，使得这两个区域内的剪切应变能相对提高，而

脆性材料本身就具有低耗散和能量快速释放的特点。这解释了 ISRM 和脆性材料的间接拉伸试验中为什么会常出现多重的二次扩展裂纹。而在直接拉伸试验中,声发射事件主要沿破坏面拉伸断裂信号,二次扩展裂纹是不会产生的。Shams G 等(2023)<sup>[109]</sup>的数字图像相关(DIC)和声发射(AE)分析结果表明,直接拉伸产生了 86% 拉伸声发射事件,而巴西测试仅产生了 27% 的拉伸声发射事件。Wang Y S 等(2019)<sup>[42]</sup>的试验中,直接拉伸试验中微拉伸破坏的量比约为 87.5%,而在巴西试验中为 47.1%。此外,与直接拉伸试验相比,巴西试验的微拉伸破坏量和能量比更分散,集中在加载区附近,而不是圆盘中心。

由此可以看出,即使初始裂纹为拉伸断裂且产生在圆盘中心,圆盘后续裂纹扩展仍然是极为复杂的。那么是否意味着只要通过一定方法区分并获得 I 区内部拉伸裂纹扩展对应的强度,就能够获得岩石的拉伸强度? Wang Y S 等(2019)<sup>[42]</sup>建立了一种新的强度因子参数,用于间接评价微拉伸和微剪切破坏产生的微裂纹对强度的贡献,将特定条件下的“理想”抗拉强度定义为微拉伸破坏占岩石总破坏量 100% 时对应的抗拉强度,这种方法考虑的是整个过程拉伸和剪切的贡献,但实际上,在非均质性的影响下,岩石巴西圆盘破坏过程比图 8 中的更为复杂和有序,这意味这拉伸微裂纹、拉-剪微裂纹、压-剪微裂纹之间并没有固定的产生顺序,因此,完全区分 I 区中的拉伸断裂在目前是无法实现的。

## 6 新型拉伸试验方法及发展建议

### 6.1 几种创新性拉伸强度测试方法

虽然中心起裂是巴西圆盘试验结果有效的必要条件,但并不是充分条件,中心起裂只是达到了起裂应力,而岩石最终破坏时峰值应力前如果考虑剪切断裂,势必会提高最终测试的强度。因此,巴西圆盘测试有效性必须同时考虑起裂和扩展两个方面。想要保证所有岩石材料都能够中心起裂,就需要通过一定的措施来减小加载端附件 II 区的范围以及内部应力,但显然这是无法同时实现的。例如,垫条加载能够减小 II 区范围,但会显著提高该区的局部压应力造成应力集中,垫片能够减小 III 区应力值但会增大其范围。要想获得纯拉伸断裂强度,就需要通过一定方法或者技术,能够区别出 I 区拉伸断裂对应的强度。这种方法的前提是 II 和 III 区的不会对 I 区内拉伸裂纹的产生有影响。然而,2 种破坏之间是否存在其他中间状态,2 种破坏

之间的临界点在哪里,这些都不清楚。科学界一直在努力分析并改进巴西圆盘试验的局限性,但这些研究关注的实际是巴西圆盘这一经典案例中极为独特的应力-应变机制,因此有学者称巴西圆盘试验是岩石力学中的“艺术”。巴西圆盘试验对丰富岩石力学的理论体系和促进岩石力学理论发展的贡献是巨大的,但仅就一种参数测试方法而言,巴西圆盘在快速精准的预测岩石强度上是不适合的。为此,其他一些学者开始寻找新的岩石拉伸强度测试方法。

#### (1) Luong 试验

Luong 试样可以在普通的压缩加载框架中进行,当试样的内部加载端 A 和外部加载端 B 被压缩时,中部断裂区 C 就会受到拉伸力作用而断裂<sup>[110]</sup>。很多学者也对该方法开展了试验研究。Stimpson B 和 Chen R<sup>[111]</sup>利用该方法实现了同一试样拉伸和压缩模量的测量。Liu J F (2022) 等<sup>[113]</sup>提出了该方法的计算公式。

$$\sigma_t = \frac{P}{A} = \frac{P}{\pi \left[ \left( \frac{d_2}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_1 + 2b_1}{2} \right)^2 \right]} \quad (10)$$

其中,  $d_1$  和  $d_2$  分别为 2 钻孔内径,  $b_1$  为钻孔壁厚(图 9)。Fu J 等(2022)<sup>[113]</sup>采用颗粒流程序对类似的试验进行了数值模拟,结果表明,和巴西试验相比,该方法更接近直接拉伸试验结果。这种方法改变了传统拉伸测试的固有思维,通过试样的特殊构造实现了压缩-拉伸应力的转变。然而,他的缺点也十分突出,一方面,拉应力并非作用在同一轴线上,试样中存在显著的剪切应力;另一方面,边界的集中效应显著,使得断裂通常发生在内外圆柱形切口的底部(图 10)。

#### (2) 压-拉转变直接拉伸测试

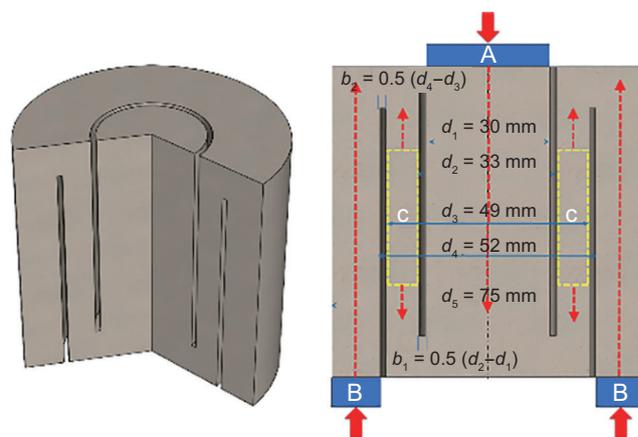


图 9 Luong 试验测试岩石拉伸强度原理<sup>[110]</sup>

Fig. 9 Luong experimental testing of rock tensile strength principle<sup>[110]</sup>

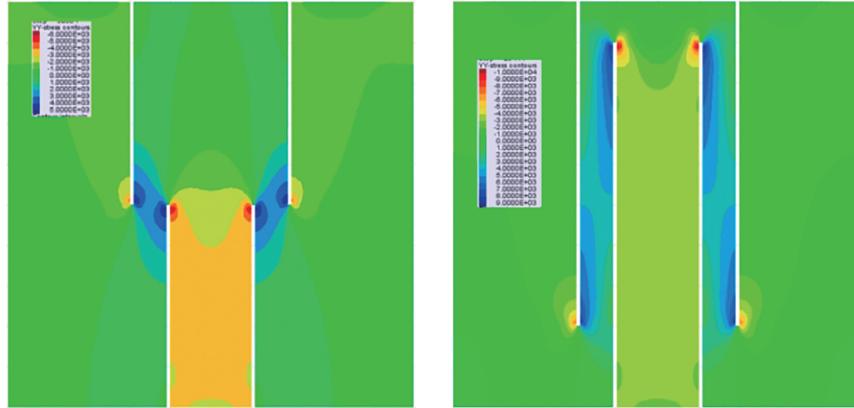


图 10 Luong 试验数值模拟结果<sup>[113]</sup>

Fig. 10 Stress distribution in numerical simulation research of Luong Experiment<sup>[113]</sup>

Fuenkajorn K 和 Klanphumeesri S (2010)<sup>[114]</sup>、Li H 等(2013)<sup>[115]</sup>、Guo L 等(2022)<sup>[116]</sup>先后提出了不同结构的压缩—拉伸负载变换器(图 11~图 13), 这类装置能够在压缩应力下围压条件下的拉伸强度。与 Luong 测试通过试样特殊结构产生的压—拉应力转化不同, 这类方法通过加载装置应力传递实现压缩—拉伸载荷的转变。然而, 这种方法实际上仍然采用端部夹持的狗骨型试样或端部粘连的圆柱试样, 大都用于测试混凝土材料的拉伸强度, 对于难以车铣加工的岩石试样的适用性较差。

(3) 环形试样内孔拉伸试验

Komurlu E 和 Demir S (2019)<sup>[117]</sup>、Li Y 等(2020)<sup>[118]</sup>提出了环形试样内孔拉伸试验(图 14)。与前面讨论的径向压缩环形试样不同, 该方法通过两个半圆的加载块在钻孔内部产生由内向外径向拉伸应力, 从而使环

形试样在拉伸应力下发生破坏。该方法能够在环形试样内孔上产生纯拉伸应力, 不会出现压—剪应力诱发的复杂的断裂模式, 几乎所有试样都是由内孔起裂并形成与拉伸载荷垂直的单一裂纹(图 15)。就破坏机制和裂纹类型来说, 是最接近直接拉伸试验的一种测试方式。同时, 该方法还具有试样加工简单、无需夹持或者粘连试样等优点。但由于该方法提出较晚, 相关

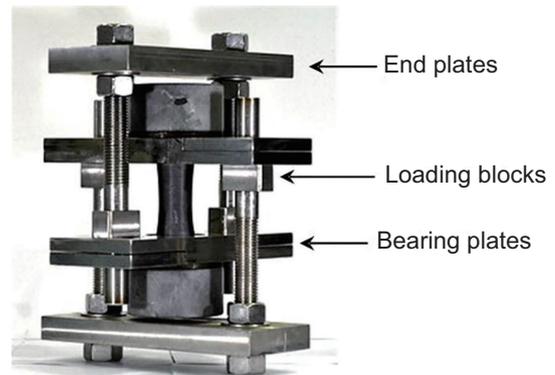


图 12 压—拉转变式拉伸强度测试装置②<sup>[115]</sup>

Fig. 12 Compressive-tensile load converter ②<sup>[115]</sup>

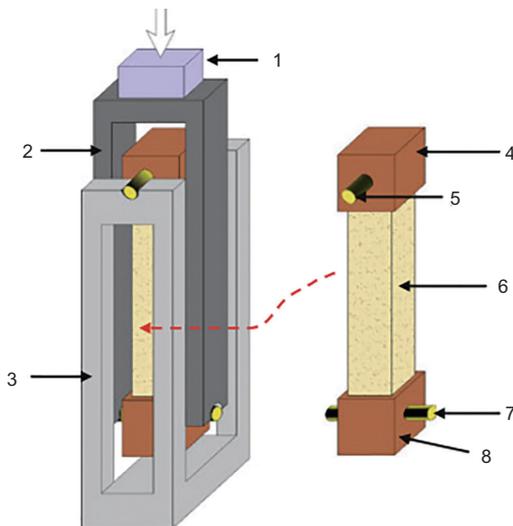


图 11 压—拉转变式拉伸强度测试装置①<sup>[114]</sup>

Fig. 11 Compressive-tensile load converter ①<sup>[114]</sup>

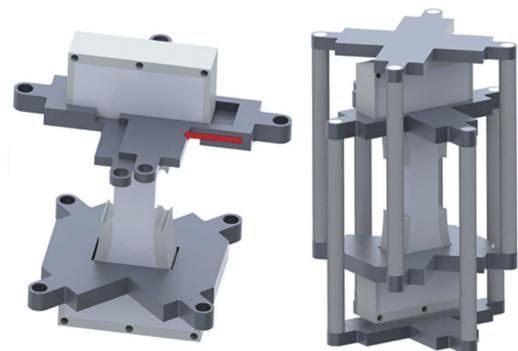
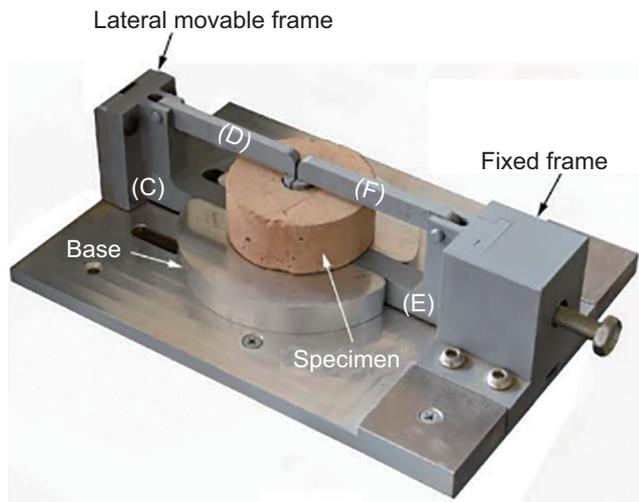
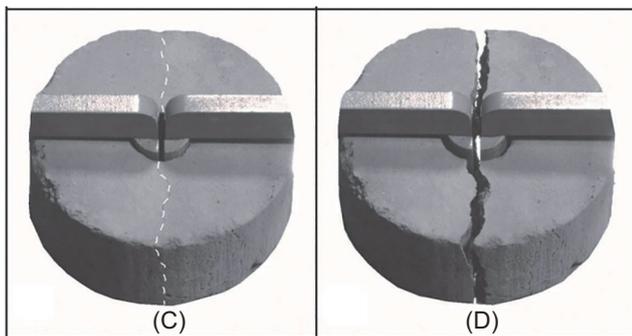


图 13 压—拉转变式拉伸强度测试装置③<sup>[116]</sup>

Fig. 13 Compressive-tensile load converter ③<sup>[116]</sup>

图 14 环形试样内孔拉伸试验<sup>[118]</sup>Fig. 14 Internal hole tensile test of circular specimen<sup>[118]</sup>图 15 环形试样内孔拉伸试验裂纹模式<sup>[118]</sup>Fig. 15 Crack mode in tensile test of inner hole of annular specimen<sup>[118]</sup>

研究较少，目前拉伸强度的计算仍采用直接拉伸试验计算公式，即通过最大载荷除以断裂面截面积的计算方法。对于环形试样，其内部的应力状态与为不均匀分布，采用直接拉伸强度的计算方法显然是不合适的。因此，其理论体系还有待完善。

## 6.2 拉伸强度测试发展建议

通过上述分析，本文对岩石力学领域拉伸强度测试方法的发展提出了以下两点建议：

(1) 根据应用领域和目的分别发展通用测试和专用测试方法：岩石拉伸试验获得的参数，其最终目的多用于不同领域理论计算或者模型赋值，很多模型研究中会在拉伸强度赋值后进一步设置外部压缩载荷条件，如果试验获得拉伸强度本身就已经受到了多种应力的影响，必然会引起研究结果的失准。因此，基础力学参数的应用性决定了岩石拉伸强度的一定是在最简单的拉伸应力状态下获得，这需要继续探索加载应力条件更为简单，可行性更高的岩石拉伸强度通用测试方法。但特定应力条件下的岩石力学专用测试对于很多领域也是比不可少的，例如环形剪切测试、扭转拉伸测试等，这些测试是针对某些领域中的特殊应力引发的工程问题而提出的，从这个角度看，巴西圆盘试验其内部的应力状态，更适合作为一种双轴应力下的专用测试方法。

(2) 最大限度弱化压应力和剪应力的影响：除了粘接式的直接拉伸试验，其他所有拉伸强度的试验方法都不可避免存在压应力，如哑铃状拉伸试验加载端局部压缩、ISRM巴西圆盘弧形压缩、三点弯曲的点载荷压缩等。想要探索出一种完全没有压缩载荷的拉伸试验方法是十分困难的。但一种更为科学合理的岩石拉伸强度试验方法应该能够最小化压缩载荷对测试结果的影响，例如环形内孔拉伸试验，虽然内孔壁面也会产生由内向外的压缩载荷，但其压应力区很小且应力集中效应较弱，因此产生的是非常接近直接拉伸试验的纯拉伸裂纹。而最大限度弱化剪应力的影响，就需要保证加载方向和试样形状的对称性，例如Luong试验就因为上下加载方式和试样形状的不对称，会在试样内部产生显著的剪切应力从而影响测试结果。

## 参考文献

- [1] BRACE W F, PAULDING JR B W, SCHOLZ C H. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks[J]. Journal of geophysical research, 1966, 71(16): 3939–3953.
- [2] HASHIBA K, FUKUI K. Effect of water on the deformation and failure of rock in uniaxial tension[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48: 1751–1761.
- [3] LI H B, ZHAO J, LI T J. Micromechanical modelling of the mechanical properties of a granite under dynamic uniaxial compressive loads[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2000, 37(6): 923–935.
- [4] WONG L N Y, EINSTEIN H H. Crack coalescence in molded gypsum and Carrara marble: Part 2—microscopic observations and interpretation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2009, 42: 513–545.
- [5] XIAO P, LI D, ZHAO G, et al. Mechanical properties and failure behavior of rock with different flaw inclinations under coupled static

- and dynamic loads[J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(10): 2945–2958.
- [6] OBERT L, DUVALL W I, WINDES S L. Standardized tests for determining the physical properties of mine rock[M]. US Bureau of Mines, 1946.
- [7] HAWKES I, MELLOR M. Uniaxial testing in rock mechanics laboratories[J]. *Engineering Geology*, 1970, 4(3): 179–285.
- [8] NOVA R, ZANINETTI A. An investigation into the tensile behaviour of a schistose rock[C]//*International Journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*. Pergamon, 1990, 27(4): 231–242.
- [9] OKUBO S, FUKUI K. Complete stress-strain curves for various rock types in uniaxial tension[C]//*International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*. Pergamon, 1996, 33(6): 549–556.
- [10] ISRM. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials[J]. *Int. J. Rock Mech. Min Sci and Geomech. Abstr*, 1978, 15(1): 99–103
- [11] ASTM International. Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens[S]. West Conshohocken, USA. 2008, D3967–08.
- [12] 中华人民共和国国家标准编写组. 工程岩体试验方法标准(GB/ T50266–99)[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. [National Standard Writing Group of the People’s Republic of China. Standard for engineering rock mass test methods (GB/T50266–99) [S]. Beijing: China Planning Press, 1999.]
- [13] 中华人民共和国行业标准编写组. 水利水电工程岩石试验规程(SL264–2001)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. [Industry Standard Writing Group of the People’s Republic of China. Code for rock testing of hydraulic and hydroelectric engineering (SL264–2001) [S] Beijing: China Water Resources and Hydropower Publishing House, 2001.]
- [14] HUDSON J A, BROWN E T, RUMMEL F. The controlled failure of rock discs and rings loaded in diametral compression[C]//*International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Pergamon, 1972, 9(2): 241–248.
- [15] SWAB J J, YU J, GAMBLE R, et al. Analysis of the diametral compression method for determining the tensile strength of transparent magnesium aluminate spinel[J]. *International journal of fracture*, 2011, 172: 187–192.
- [16] FUENKAJORN K, KLANPHUMESRI S. Laboratory determination of direct tensile strength and deformability of intact rocks[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2010, 34(1): 97–102.
- [17] GONG F, ZHANG L, WANG S. Loading rate effect of rock material with the direct tensile and three Brazilian disc tests[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 6260351.
- [18] 刘建锋, 梁超, 王璐, 等. 基于一种普适性直接拉伸方法的岩石拉伸测试及问题分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42 (09): 2140–2147. [LIU J F, LIANG C, WANG L, et al. Rock tensile testing and problem analysis based on a universal direct tensile approach[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42 (09): 2140–2147.]
- [19] CARNEIRO F. A new method to determine the tensile strength of concrete[C]//*Proceedings of the 5th meeting of the Brazilian Association for Technical Rules*. 1943, 3(16): 126–129.
- [20] AKAZAWA T. New test method for evaluating internal stress due to compression of concrete (the splitting tension test)(part 1)[J]. *J Jpn Soc Civ Eng*, 1943, 29: 777–787.
- [21] INDRIYANTHO B R. Finite element modeling of concrete fracture in tension with the Brazilian splitting test on the case of plane-stress and plane-strain[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 95: 252–259.
- [22] GUERRERO-MIGUEL D J, ÁLVAREZ-FERNÁNDEZ M I, GARCÍA-FERNÁNDEZ C C, et al. Analytical and numerical stress field solutions in the Brazilian Test subjected to radial load distributions and their stress effects at the centre of the disk[J]. *Journal of Engineering Mathematics*, 2019, 116: 29–48.
- [23] MARKIDES C F, KOURKOULIS S K. Naturally accepted boundary conditions for the Brazilian disc test and the corresponding stress field[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46: 959–980.
- [24] KOURKOULIS S K, MARKIDES C F, CHATZISTERGOS P E. The standardized Brazilian disc test as a contact problem[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 57: 132–141.
- [25] 王启智, 李炼, 吴礼舟, 等. 改进巴西试验: 从平台巴西圆盘到切口巴西圆盘 [J]. *力学学报*, 2017, 49 (04): 793–801. [WANG Q Z, LI L, WU L Z, et al. Improvement of Brazilian Test: From Flattened Brazilian Disc to Grooved Brazilian Disc [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49 (04): 793–801.]
- [26] MELLOR M, HAWKES I. Measurement of tensile strength by diametral compression of discs and annuli[J]. *Engineering Geology*, 1971, 5(3): 173–225.
- [27] JAEGER J C, HOSKINS E R. Rock failure under the confined Brazilian test[J]. *Journal of Geophysical research*, 1966, 71(10): 2651–2659.
- [28] ADDINALL E, HACKETT P. Tensile failure in rock-like materials[C]//*ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. ARMA, 1964: ARMA–64–515.
- [29] GHOULI S, BAHRAMI B, AYATOLLAHI M R, et al. Introduction of a scaling factor for fracture toughness measurement of rocks

- using the semi-circular bend test[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(8): 4041–4058.
- [30] HOBBS D W. The tensile strength of rocks[C]//*International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Pergamon, 1964, 1(3): 385–396.
- [31] PRICE D G, KNILL J L. A study of the tensile strength of isotropic rocks[C]//*ISRM Congress*. ISRM, 1966: ISRM-1CONGRESS-1966-075.
- [32] HIRAMATSU Y, OKA Y. Disc test, ring test, rectangular plate test and irregular specimen test for determining the tensile strength of rocks[C]//*ISRM Congress*. ISRM, 1970: ISRM-2CONGRESS-1970-107.
- [33] JAEGER J C. Failure of rocks under tensile conditions[C]//*International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Pergamon, 1967, 4(2): 219–227.
- [34] PANDEY P, SINGH D P. Deformation of a rock in different tensile tests[J]. *Engineering geology*, 1986, 22(3): 281–292.
- [35] ANDREEV G E. A review of the Brazilian test for rock tensile strength determination. Part I: calculation formula[J]. *Mining Science and Technology*, 1991, 13(3): 445–456.
- [36] ANDREEV G E. A review of the Brazilian test for rock tensile strength determination. Part II: contact conditions[J]. *Mining Science and Technology*, 1991, 13(3): 457–465.
- [37] COVIELLO A, LAGIOIA R, NOVA R. On the measurement of the tensile strength of soft rocks[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2005, 38: 251–273.
- [38] EFIMOV V P. The rock strength in different tension conditions[J]. *Journal of mining science*, 2009, 45(6): 569–575.
- [39] LIU J, CHEN L, WANG C, et al. Characterizing the mechanical tensile behavior of Beishan granite with different experimental methods[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 69: 50–58.
- [40] CACCIARI P P, FUTAI M M. Assessing the tensile strength of rocks and geological discontinuities via pull-off tests[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 105: 44–52.
- [41] ZHANG Y, YU D. Comparative study on the test method for tensile elastic modulus of rock materials[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 3161953.
- [42] WANG Y S, DENG J H, LI L R, et al. Micro-failure analysis of direct and flat loading Brazilian tensile tests[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52: 4175–4187.
- [43] DEMIRDAG S, TUFEKCI K, SENGUN N, et al. Determination of the direct tensile strength of granite rock by using a new dumbbell shape and its relationship with Brazilian tensile strength[C]//*IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2019, 221(1): 012094.
- [44] QI S, LAN H, MARTIN D, et al. Factors controlling the difference in Brazilian and direct tensile strengths of the Lac du Bonnet granite[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53: 1005–1019.
- [45] RAO Q, LIU Z, MA C, et al. A New flattened cylinder specimen for direct tensile test of rock[J]. *Sensors*, 2021, 21(12): 4157.
- [46] HUANG Z, ZHANG Y, LI Y, et al. Determining tensile strength of rock by the direct tensile, Brazilian splitting, and three-point bending methods: A comparative study[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 1–16.
- [47] EFE T, DEMIRDAG S, TUFEKCI K, et al. Estimating the direct tensile strength of rocks from indirect tests[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14: 1–23.
- [48] ZHAO G F, ZHANG Y, HOU S, et al. Experimental and numerical studies on small-scale direct tension test for rock[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022: 1–22.
- [49] LIU J, WANG C, WANG L, et al. Tensile failure and acoustic emission characteristics of rock salt under different tensile testing conditions[J]. *Journal of Central South University*, 2023, 30(4): 1345–1358.
- [50] PERRAS M A, DIEDERICHS M S. A review of the tensile strength of rock: Concepts and testing[J]. *Geotechnical and geological engineering*, 2014, 32: 525–546.
- [51] SGAMBITTERRA E, LAMUTA C, CANDAMANO S, et al. Brazilian disk test and digital image correlation: a methodology for the mechanical characterization of brittle materials[J]. *Materials and structures*, 2018, 51: 1–17.
- [52] XIAO P, ZHAO G, LIU H. Failure transition and validity of Brazilian Disc Test under different loading configurations: A numerical study[J]. *Mathematics*, 2022, 10(15): 2681.
- [53] JAEGER J C, COOK N G W, Zimmerman R. *Fundamentals of rock mechanics*[M]. John Wiley & Sons, 2009.
- [54] HONDROS G. The evaluation of Poisson's ratio and the modulus of materials of a low tensile resistance by the Brazilian (indirect tensile) test with particular reference to concrete[J]. *Aust. J. Appl. Sci.*, 1959, 10: 243–264.
- [55] SATOH Y. Position and load of failure in Brazilian test, a numerical analysis by Griffith criterion[J]. *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 1987, 36(410): 1219–1224.
- [56] TANG H, HE J, GAN Z, et al. Tensile strength and elastic modulus determined in the Brazilian test: Theory and experiment[J]. *Meccanica*, 2022, 57(10): 2533–2552.

- [57] KOURKOULIS S K, MARKIDES C F, HEMSLEY J A. Frictional stresses at the disc–jaw interface during the standardized execution of the Brazilian disc test[J]. *Acta Mechanica*, 2013, 224: 255–268.
- [58] MARKIDES C F, PAZIS D N, KOURKOULIS S K. Closed full-field solutions for stresses and displacements in the Brazilian disk under distributed radial load[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(2): 227–237.
- [59] ERARSLAN N, WILLIAMS D J. Experimental, numerical and analytical studies on tensile strength of rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 49: 21–30.
- [60] ERARSLAN N, LIANG Z Z, WILLIAMS D J. Experimental and numerical studies on determination of indirect tensile strength of rocks[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45: 739–751.
- [61] BAHAAADDIMI M, SERATI M, MASOUMI H, et al. Numerical assessment of rupture mechanisms in Brazilian test of brittle materials[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2019, 180: 1–12.
- [62] GUTIÉRREZ-MOIZANT R, RAMÍREZ-BERASATEGUI M, SANTOS-CUADROS S, et al. A novel analytical solution for the Brazilian test with loading arcs[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 1–19.
- [63] MARKIDES C F, KOURKOULIS S K. The influence of jaw’s curvature on the results of the Brazilian disc test[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(2): 127–146.
- [64] COLBACK P S B. An analysis of brittle fracture initiation and propagation in the Brazilian test[C]//ISRM Congress. ISRM, 1966: ISRM–1CONGRESS–1966–066.
- [65] WANG Q Z, XING L. Determination of fracture toughness KIC by using the flattened Brazilian disk specimen for rocks[J]. *Engineering fracture mechanics*, 1999, 64(2): 193–201.
- [66] WANG Q Z, JIA X M, KOU S Q, et al. The flattened Brazilian disc specimen used for testing elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks: analytical and numerical results[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(2): 245–253.
- [67] HUANG Y G, WANG L G, LU Y L, et al. Semi-analytical and numerical studies on the flattened Brazilian splitting test used for measuring the indirect tensile strength of rocks[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48: 1849–1866.
- [68] STIRLING R A, SIMPSON D J, DAVIE C T. The application of digital image correlation to Brazilian testing of sandstone[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 60: 1–11.
- [69] ZHANG B, NADIMI S, EISSA A, et al. Modelling fracturing process using cohesive interface elements: Theoretical verification and experimental validation[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 365: 130132.
- [70] WANG M, CAO P. Experimental study on the validity and rationality of four Brazilian disc tests[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2018, 36: 63–76.
- [71] YU H, ANDERSEN D H, HE J, et al. Is it possible to measure the tensile strength and fracture toughness simultaneously using flattened Brazilian disk? [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 247: 107633.
- [72] YAN Z, DAI F, LIU Y, et al. New insights into the fracture mechanism of flattened Brazilian disc specimen using digital image correlation[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 252: 107810.
- [73] KHAVARI P, HEIDARI M. Numerical and experimental studies on the effect of loading angle on the validity of flattened Brazilian disc test[J]. *J. Geol. Min. Res*, 2016, 8: 1–12.
- [74] WU S, MA J, CHENG Y, et al. Numerical analysis of the flattened Brazilian test: Failure process, recommended geometric parameters and loading conditions[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 204: 288–305.
- [75] MARKIDES C F, KOURKOULIS S K. Mathematical formulation of an analytic approach to the stress field in a flattened Brazilian disc[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2020, 28: 710–719.
- [76] HOBBS D W. An assessment of a technique for determining the tensile strength of rock[J]. *British journal of applied physics*, 1965, 16(2): 259.
- [77] CHEN C S, HSU S C. Measurement of indirect tensile strength of anisotropic rocks by the ring test[J]. *Rock mechanics and rock engineering*, 2001, 34(4): 293–321.
- [78] ABDULLAH R A, TSUTSUMI T. Evaluation of tensile strength of Brazilian test under solid and ring disks using finite element analysis[J]. *Sains Malaysiana*, 2018, 47(4): 683–689.
- [79] JIAO Y Y, ZHANG X L, ZHAO J. Two-dimensional DDA contact constitutive model for simulating rock fragmentation[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2012, 138(2): 199–209.
- [80] XIA M, CHEN G, YU P, et al. Improvement of DDA with a new unified tensile fracture model for rock fragmentation and its application on dynamic seismic landslides[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54: 1055–1075.
- [81] HAERI H, KHALOO A, MARJI M F. Fracture analyses of different pre-holed concrete specimens under compression[J]. *Acta mechanica sinica*, 2015, 31: 855–870.
- [82] LI D, TAO W, CHENG T, et al. Static and dynamic tensile failure characteristics of rock based on splitting test of circular ring[J].

- Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(7): 1912–1918.
- [83] ZHOU X, WANG L, SHOU Y. Understanding the fracture mechanism of ring Brazilian disc specimens by the phase field method[J]. *International Journal of Fracture*, 2020, 226: 17–43.
- [84] CHAU K T, WEI X X. A new analytic solution for the diametral point load strength test on finite solid circular cylinders[J]. *International journal of solids and structures*, 2001, 38(9): 1459–1481.
- [85] WEI X X, CHAU K T. Three dimensional analytical solution for finite circular cylinders subjected to indirect tensile test[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2013, 50(14–15): 2395–2406.
- [86] XU X, WU S, GAO Y, et al. Effects of micro-structure and micro-parameters on Brazilian tensile strength using flat-joint model[J]. *Rock mechanics and rock engineering*, 2016, 49: 3575–3595.
- [87] KHOSRAVI A, SIMON R, RIVARD P. The shape effect on the morphology of the fracture surface induced by the Brazilian test[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 93: 201–209.
- [88] YU Y, YIN J, ZHONG Z. Shape effects in the Brazilian tensile strength test and a 3D FEM correction[J]. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 2006, 43(4): 623–627.
- [89] ALIHA M R M. Indirect tensile test assessments for rock materials using 3-D disc-type specimens[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, 7: 4757–4766.
- [90] KOMURLU E, KESIMAL A. Evaluation of indirect tensile strength of rocks using different types of jaws[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48: 1723–1730.
- [91] KOMURLU E, KESIMAL A, DEMIR S. Experimental and numerical study on determination of indirect (splitting) tensile strength of rocks under various load apparatus[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, 53(2): 360–372.
- [92] YUAN R, SHEN B. Numerical modelling of the contact condition of a Brazilian disk test and its influence on the tensile strength of rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 93: 54–65.
- [93] LI D, LI B, HAN Z. Evaluation on rock tensile failure of the Brazilian discs under different loading configurations by digital image correlation[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(16): 5513.
- [94] ZHAO Z, SUN W, CHEN S, et al. Determination of critical criterion of tensile-shear failure in Brazilian disc based on theoretical analysis and meso-macro numerical simulation[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 134: 104096.
- [95] ZHANG X P, ZHANG P Y, JI P Q, et al. The applicability of Brazilian test loading with different platens to measure tensile strength of rock: A numerical study[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023: 1–28.
- [96] ALAWAD M N J. Modification of the Brazilian indirect tensile strength formula for better estimation of the tensile strength of rocks and rock-like geomaterials[J]. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 2022, 34(2): 147–154.
- [97] 刘泉声, 刘建平, 时凯, 等. 评价岩石脆性指标对滚刀破岩效率的影响 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35 (03): 498–510. [LIU Q S, LIU J P, SHI K, et al. Evaluation of rock brittleness indexes on rock fragmentation efficiency by disc cutter[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35 (03): 498–510.]
- [98] 陈响, 金衍, 陈勉. 基于能量耗散的岩石脆性评价方法 [J]. *力学学报*, 2015, 47 (06): 984–993. [CHEN Y, JIN Y, CHEN M. A rock brittleness evaluation method based on energy dissipation[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47 (06): 984–993.]
- [99] CAI M, KAISER P K. Numerical simulation of the Brazilian test and the tensile strength of anisotropic rocks and rocks with pre-existing cracks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41: 478–483.
- [100] LANARO F, SATO T, STEPHANSSON O. Microcrack modelling of Brazilian tensile tests with the boundary element method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(3): 450–461.
- [101] YUE Z Q, CHEN S, THAM L G. Finite element modeling of geomaterials using digital image processing[J]. *Computers and Geotechnics*, 2003, 30(5): 375–397.
- [102] JIANG R, DUAN K, ZHANG Q. Effect of heterogeneity in micro-structure and micro-strength on the discrepancies between direct and indirect tensile tests on brittle rock[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022: 1–20
- [103] LIAO Z Y, ZHU J B, TANG C A. Numerical investigation of rock tensile strength determined by direct tension, Brazilian and three-point bending tests[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 115: 21–32.
- [104] KHADIVI B, HEIDARPOUR A, ZHANG Q, et al. Characterizing the cracking process of various rock types under Brazilian loading based on coupled acoustic emission and high-speed imaging techniques[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 168: 105417.
- [105] PALANIAPPAN S K, PAL S K, TRIPATHI A K. Indirect tensile test modelling for inhomogeneous rock samples using digital image processing[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2023, 16(8): 450.
- [106] FAIRHURST C. On the validity of the ‘Brazilian’ test for brittle materials[C]//*International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Pergamon, 1964, 1(4): 535–546.

- [107] GORSKI B, CONLON B, LJUNGGREN B, et al. Forsmark site investigation: Determination of the direct and indirect tensile strength on cores from borehole KFM01D[M]. Svensk kärnbränslehantering (SKB), 2007.
- [108] ZHANG S, WU S, ZHANG G, et al. Three-dimensional evolution of damage in sandstone Brazilian discs by the concurrent use of active and passive ultrasonic techniques[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15: 393–408.
- [109] SHAMS G, RIVARD P, MORADIAN O. Tensile strength and failure behavior of rock-mortar interfaces: Direct and indirect measurements[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, In Press.
- [110] LUONG M P. Un nouvel essai pour la mesure de la résistance à la traction[J]. *Revue Française de Géotechnique*, 1986 (34): 69–74.
- [111] STIMPSON B, CHEN R. Measurement of rock elastic moduli in tension and in compression and its practical significance[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, 30(2): 338–347.
- [112] LIU J, LYU C, LU G, et al. Evaluating a new method for direct testing of rock tensile strength[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 160: 105258.
- [113] FU J, SARFARAZI V, HAERI H, et al. Study of tensile crack growth in rock-like materials under punch shear test[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 121: 103509.
- [114] FUENKAJORN K, KLANPHUMESRI S. Direct tension tests of intact rocks using compression-to-tension load converter[J]. *Engineering Journal of Research and Development*, 2010, 21(2): 51–57.
- [115] LI H, LI J, LIU B, et al. Direct tension test for rock material under different strain rates at quasi-static loads[J]. *Rock mechanics and rock engineering*, 2013, 46: 1247–1254.
- [116] GUO L, PENG X, ZHAO Y, et al. Experimental study on direct tensile properties of cemented paste backfill[J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 9: 864264.
- [117] KOMURLU E, DEMIR S. Determination of direct tensile strength values of rock materials by a new test method of drilled disc tension[J]. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2020, 64(1): 33–41.
- [118] LI Y, GUAN F, SU H, et al. A new direct tension test method for soils and soft rocks[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2020, 43(6): 1317–1334.

(责任编辑 陈勉 编辑 马桂霞)