

doi:10.3969/j.issn.1005-7854.2024.02.001

矿山尾砂胶结充填体抗拉强度测试方法研究进展

郭利杰^{1,2,3} 唐国星^{2,3} 马青海^{2,3} 贾冲^{2,3} 井鑫山^{2,3}

(1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;

2. 北京矿冶研究总院, 北京 100160;

3. 国家金属矿绿色开采国际联合研究中心, 北京 102628)

摘 要: 矿山尾砂胶结充填是实现金属矿绿色开采的重要技术载体, 尾砂胶结充填体抗拉力学性能是影响矿山采场充填体整体稳定性以及确保相邻采场安全高效充填采矿的关键要素。科学、准确测量尾砂胶结充填体抗拉强度是确保矿山充填材料强度合理设计的重要环节。尾砂胶结充填材料属于低强度材料, 我国尚无针对尾砂胶结充填材料抗拉性能的统一试验方法或测试标准。系统回顾了矿山充填材料抗拉强度测试方法的应用情况, 并指出了当前借鉴混凝土、岩土工程等领域抗拉强度测试方法存在的问题。从抗拉强度直接拉伸测试方法、抗拉强度间接拉伸测试方法和适用于尾砂胶结充填材料的抗拉强度测试方法创新 3 个方面介绍了最新的测试方法研究应用进展。首先系统梳理总结了 4 种直接拉伸测试方法及其应用场景, 然后研究分析了 3 种间接拉伸测试方法及其应用条件, 并对比分析了两大类不同测试方法的优缺点。在研究分析上述测试方法的基础上, 并考虑尾砂胶结充填材料的力学特性, 创新发明了一种“工字型”尾砂胶结充填体抗拉强度测试法, 研发了相应的压-拉转换装置, 实现了用单轴压缩的方式开展胶结充填体试样直接拉伸测试。经中国和加拿大相关矿山和研究机构验证, 该方法适用于矿山尾砂胶结充填材料抗拉性能测试的科学方法, 目前已被国际矿业咨询机构—Paterson & Cooke 公司、加拿大 2 家矿业公司、中国 3 家矿业公司采用, 可为国内外金属矿山充填采矿研究与设计提供参考与技术支撑。

关键词: 抗拉强度; 直接拉伸; 测试方法; “工字型”试样; 尾砂; 矿山充填

中图分类号: TD853

文献标志码: A

文章编号: 1005-7854(2024)02-0141-13

Research progress on test methods for measuring tensile strength of cemented tailings backfill

GUO Lijie^{1,2,3} TANG Guoxing^{2,3} MA Qinghai^{2,3} JIA Chong^{2,3} JING Xinshan^{2,3}

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;

2. Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100160, China;

3. National Centre for International Research on Green Metal Mining, Beijing 102628, China)

Abstract: The utilization of cemented tailings backfill technology plays a pivotal role in achieving eco-friendly mining of metal ores. The tensile strength of the cemented tailings backfill is a crucial factor that influences its stability and guarantees safe and effective mining with backfill in adjacent stopes. Ensuring rational mine backfill design requires accurate measurement of cemented tailings backfill tensile strength. Cemented tailings backfill, due to its low-strength characteristics, lacks a unified test method or standard for its tensile properties in China. This article presents a systematic review of the application of tensile strength test methods for cemented tailings backfill. It also identifies the current issues with the existing testing methods referenced from concrete, geotechnical engineering, and other fields. The recent developments in the field of tensile testing methods were discussed in this article, focusing on three aspects: direct and indirect test methods, as well as innovations in test methods for measuring the tensile strength of cemented tailings backfill. Firstly, four direct tensile test methods and their application scenarios are systematically sorted out and summarized, and then three indirect tensile test methods and their application conditions are studied and analyzed, and the advantages and disadvantages of the two different types of test methods are compared and analyzed. Based on research and analysis of the above test methods, Prof. Guo of BGRIMM developed a new method of testing the tensile strength of cemented tailings

收稿日期: 2024-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52274122)

第一作者: 郭利杰, 博士、正高级工程师, 研究方向为矿山固废充填理论与技术。E-mail: guolijie@bgrimm.com

backfill. This method involves using a compression to tensile load converter on dog-bone-shaped specimens, which enables direct tensile strength testing through uniaxial compression. The innovation takes into account the mechanical characteristics of the cemented tailings backfill and provides more accurate results. The method has been scientifically verified by relevant mines and research institutes in China and Canada for evaluating the tensile properties of cemented tailings backfill. It has been adopted by Paterson and Cooke, an international mine backfill consultancy firm, as well as two Canadian mining companies and three mining companies in China. The method can provide references and technical support for the research and design of metal mine backfill both domestically and internationally.

Key words: tensile strength; direct tensile; test method; dog-bone specimen; tailings; mine backfill

矿山尾砂胶结充填技术是实现金属矿绿色开采的重要载体,一方面可以将尾矿大宗量充填井下采空区以保证矿体后续安全开采,另一方面有效减少矿山固废在地表的堆存^[1,2]。矿山尾砂胶结充填料浆在井下采空区经养护后形成具有一定强度的胶结充填体,尾砂胶结充填体能够起到支撑围岩、控制采场地压的作用^[3-5],其强度与稳定性对于矿山安全生产安全至关重要^[6-8]。

当前,金属矿山充填开采根据矿岩赋存条件,主要分为阶段/分段空场嗣后充填采矿法、上向水平分层充填采矿法和进路充填采矿法。但在一些使用两步骤阶段空场嗣后充填法的矿山中,当胶结充填体单侧揭露面积大时,可能发生带有拉伸断裂性质的滑动破坏^[9];在下向进路充填采矿法中,胶结充填体顶板在上覆荷载的作用下可能产生塌落、滑动剪切、挠曲和转动等破坏模式,这些破坏模式均与胶结充填体抗拉强度不足有关^[10]。而无论是尾砂胶结充填体的压缩破坏还是弯曲破坏,均是由于拉应力或剪应力、拉应变或剪应变超过其承载极限引起的^[11],因此,尾砂胶结充填体抗拉强度是评价矿山采场充填体质量与稳定性的重要力学特性指标之一,已越来越受到工程设计的重视。

目前,采矿工程师及研究人员在进行采场充填体强度计算与设计时大多关注尾砂胶结充填体的单轴抗压强度与抗剪强度,极少有针对尾砂胶结充填体的拉伸试验规范。因而在实际工程设计与稳定性分析工作中,通过参考教科书中的抗拉强度经验值,或者借鉴岩石力学、土力学中的相关拉伸试验开展抗拉强度测试。这些因素导致矿山在进行充填设计时难以确定所需的最低强度,容易保守估计充填成本;同时不易获得采场充填体的实际抗拉强度,对充填体的质量评价带来困扰。

近年来,随着学科交叉与先进实验方法的融合,金属矿山尾砂胶结充填体抗拉强度测试方法研

究取得了长足发展,在尾矿胶结充填体抗拉强度测试方面出现了许多新方法与新技术。因此,笔者对矿山尾砂胶结充填体抗拉强度测试方法进展进行系统梳理与总结,以启发在该方向的创新工作。

1 抗拉强度直接拉伸测试方法研究进展

尾砂胶结充填体抗拉强度测试方法尚未形成完备的试验标准,当前主要参考岩土工程、混凝土领域的拉伸试验测试方法。抗拉强度测试方法主要以室内试验为主,经过近一个世纪的研究,形成了直接法和间接法两种测试方法。直接法是对试件直接施加拉伸荷载测得其抗拉强度,以直接拉伸试验为代表。直接拉伸试验是通过固定试样的两端,在无围压的条件下对试样施加轴向拉伸荷载,使试样发生拉伸破坏从而测得抗拉强度的一种试验方法。直接拉伸试验的抗拉强度计算公式为:

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (1)$$

式中, F 为试样拉伸破坏时的峰值荷载, A 为试样的断面面积。

1.1 抗拉强度直接拉伸测试方法

直接拉伸试验中,针对如何对试件施加拉应力,国内外学者普遍采用三种方式:1)采用黏合剂或预埋件等方法,将试件两端与拉伸试验机托盘相连;2)采用夹头或夹具夹持试件两端以便对其施加拉伸荷载;3)采用特殊形状的试件,使其端部易于承受拉伸荷载。

采用黏合剂或预埋钢筋等方法连接试件两端和拉伸试验机托盘,是最简单、直观的直接拉伸测试方法。1978年,国际岩石力学学会^[12](ISRM)推荐了一种直接拉伸试验作为测定岩石抗拉强度的标准方法,如图1所示。该方法使用圆柱体试样,通

过与试样黏结的端帽传递拉应力。清华大学研究团队^[13]采用化学黏合剂黏结刚性传力托盘与红黏土长方体试样的端部,通过端板向试样施加轴向拉力,研究了含水量对该黏土抗拉强度的影响。BOLZAN等^[14]将沥青混凝土加工成圆柱体状,在试样的两端用环氧树脂黏接直径相同的钢板,钢板上设有圆环,通过圆环使试样与试验机相连,利用直接拉伸的方法测试了其抗拉强度。BOLZAN等认为在试验过程中当拉力出现偏心时试样会发生剪切破坏,黏结剂的用量、涂抹的均匀程度对试验结果有较大影响。陈萍等^[15]组装了一套直接拉伸试验装置并成功地测得三峡三级配混凝土的轴向拉伸全应力变形曲线。试验采用等截面的直接拉伸试样,尺寸为 $250\text{ mm} \times 250\text{ mm} \times 1\,400\text{ mm}$ 。试样两端预埋带螺纹的组合杆件,用于传递荷载。张小江等^[16]为防止试验时加载板发生脱落,在纤维加筋土的端部加入木螺钉进行锚固,并将螺钉和端部一起用环氧树脂固定在一起,如图2所示。该直接拉伸试验采用卧式加载的方式,在试样底部设置了密排滚珠来减少摩擦对试验结果的影响。



图1 国际岩石力学学会推荐的直接拉伸试验测试方法^[12]

Fig. 1 ISRM recommended method diagram^[12]

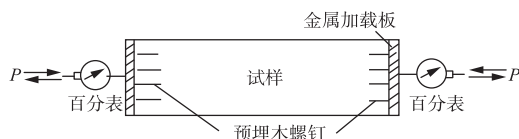


图2 增加锚固的黏贴式直接拉伸试验^[16]

Fig. 2 Anchorage adhesion direct tensile test^[16]

采用夹头或夹具夹持试件两端以便对其施加拉伸荷载。1979年,张绍麟^[17]针对长方体混凝土试样设计了一种用于固定试样两端的夹板式夹具,并使用这种夹具分别对长方体试样和中部测试段面积逐渐减小的变截面试样进行了直接拉伸试验。试验结果表明该夹具能够取得良好的试验效果,且安装、拆卸方便,可以重复利用。2006年,张辉等^[18]使用自制的夹具,对砾质土料的击实试样进行直接拉伸试验。该夹具采用增大摩擦力的方式约束试样端部,试验原理简单、安装方便,但在试验过程中夹具会与试样发生微小的滑动。

采用特殊形状的试件,使其端部易于承受拉伸荷载。1964年,HOEK^[19]将试样加工成两端宽、中间窄的狗骨头状,并对其进行了直接拉伸试验,试样形状如图3所示。试验时将试样平放于试验机上,用楔型夹钳夹住端部,对试样施加轴向拉力直至破坏。2010年,KLANPHUMESRI^[20]对哑铃形的岩石试样进行直接拉伸试验。同时,还对圆盘和圆环试样进行了巴西劈裂试验。经过定性对比,发现直接拉伸得到的抗拉强度小于巴西劈裂试验。2014年,TOLOOIYAN等^[21]对直接拉伸条件下澳大利亚褐煤的强度和破坏机制进行了研究。试样被加工成三种形状:狗骨形、与狗骨形中部同宽同厚的长方体、中心有槽的狗骨形。其中第二种形状通过与木质端部黏结,组成和第一种相同的形状。由于应力集中,狗骨形状的试样破坏基本发生在过渡区。第二种形状在煤木黏结面处破坏,而对于第三种形状,由于在开槽处引入了应力集中,破坏总是发生在槽的中间部分。TOWNER^[22]设计了一种哑铃型试样,如图3所示,在试样所在的模具一端连接弹簧秤,在另一端施加荷载。试样拉伸断裂后,记录弹簧秤的最大示数,减去上部试样与夹具的重量后再除以断裂面的面积,即可得到试样的抗拉强度。徐玉博等^[23]制备哑铃状的试件,测量了含水合物土的抗拉强度,如图4所示,他指出哑铃状的试样可以消除试样两端的应力集中的问题。

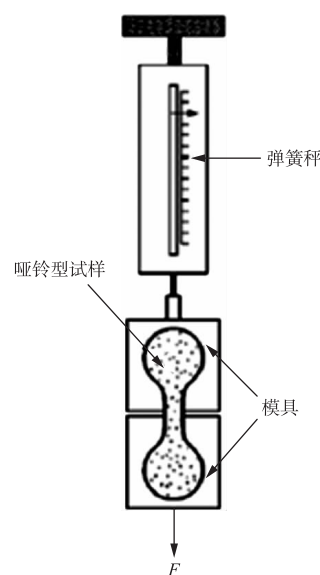


图3 哑铃型直接拉伸试验装置^[22]

Fig. 3 Dumbbell type direct tensile test device^[22]

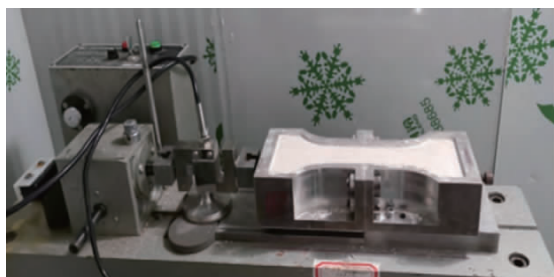
图4 哑铃状试件的抗拉强度试验装置实物图^[23]

Fig. 4 Photo of the tensile strength testing device for dumbbell-shaped specimens^[23]

1.2 非传统直接拉伸测试方法

传统直接拉伸测试方法依赖拉伸试验机，导致直接拉伸试验门槛较高。为此，一些学者开始思考如何将压缩荷载转换为拉伸荷载作用在试件，从而可以利用压缩试验机开展直接拉伸试验。

GORSKI 等设计了一种适用于脆性材料的抗拉强度测试装置，该装置由上下两个支架组成，上下支架各有一个套筒，分别固定试样的下、上部，可对狗骨头形状的试样进行加载，如图5所示^[24]。当装置受压时，上支架向下压迫试样下端，从而使试样发生拉伸破坏。此外，上下套筒还可以相对转动，避免发生弯矩和扭矩，使试样处于单轴拉伸状态。

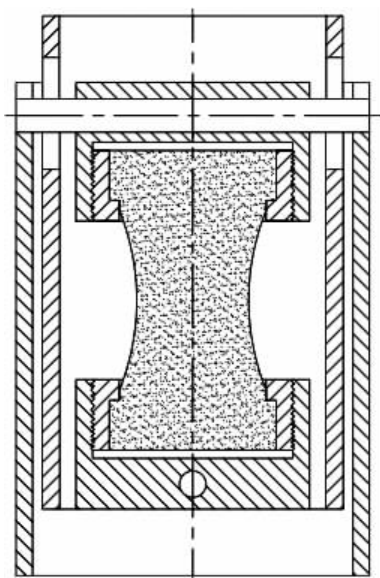
图5 Gorski 设计的压-拉转换装置^[24]

Fig. 5 Compression-tension conversion device designed by Gorski^[24]

SARFARAZI 等^[25]研制了如图6所示的压-拉转换装置，对中间有圆孔的混凝土试样进行直接拉

伸试验。该转换装置由上、下两部分组成，通过圆孔分别与混凝土试样的下部和上部接触。在加载时，上转换装置将压缩荷载传递至试样的下部，而由于下转换装置固定了试样的上部，压缩荷载起到了拉伸试样的作用，由此可测试混凝土的抗拉强度。

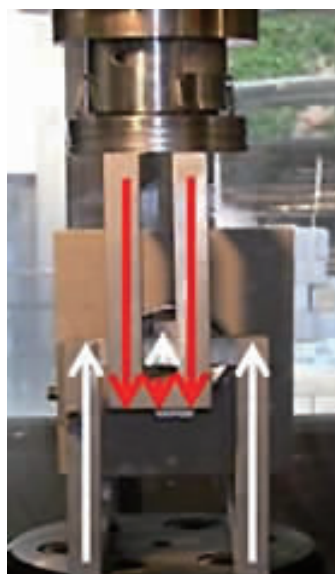
图6 SARFARAZI 设计的压-拉转换装置^[25]

Fig. 6 Test apparatus designed by SARFARAZI^[25]

尾砂胶结充填体强度低、刚度小，采用黏合剂、预埋件或夹头夹具连接试件和拉伸试验机托盘的办法容易导致试件在端部破坏，从而使拉伸强度试验失败。此外，直接拉伸法要求拉伸荷载方向与试件轴向在同一直线上，否则偏心问题将导致测得的试件抗拉强度大于实际值^[26-28]。压-拉转换装置的出现有助于降低拉伸试验的门槛，为尾砂胶结充填体抗拉强度测试在矿山广泛推广提供了新的思路。

2 抗拉强度间接拉伸测试方法研究进展

抗拉强度间接拉伸测试法是在一些理论假设的基础上利用压裂、弯曲的方式使试样中产生拉应力并在拉应力的作用下发生破坏，常用方法有巴西劈裂试验、梁弯曲试验与轴向压裂试验。其中，巴西劈裂试验是目前最被广泛使用的抗拉强度测试方式。

2.1 巴西劈裂测试法

巴西劈裂试验是由 CANEIRO^[29]和 AKAZAWA^[30]

于1943年分别独立提出的一种抗拉强度间接测定方法，也是目前测试岩土材料抗拉强度最常用的手段。该试验方法是将立方体或者圆盘试样置于压力机的加载板之间，当试样受压时，水平拉应力会在试样径向荷载作用的竖直平面内产生，当试样中心区域的拉应力达到试样抗拉强度极限时，裂纹从中心点产生，并沿垂直于拉应力的方向扩展，使试样劈裂成两半。根据加载方式的不同可分为平板加载、垫板加载、垫条加载和弧形加载几种，如图7所示。巴西劈裂法的抗拉强度计算公式见式(2)。

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (2)$$

式中， P 为试样破坏时的峰值荷载， D 为试样的直径， t 为试样的厚度。

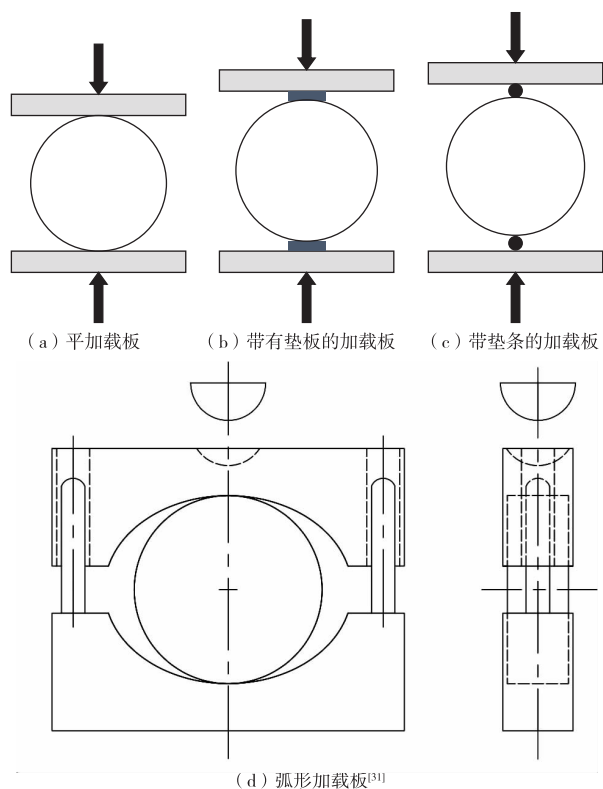


图7 巴西劈裂试验的常见加载形式

Fig. 7 Common loading forms for Brazilian splitting tests

这一方法得到了国内外学者广泛认可。1978年，国际岩石力学学会^[32] (ISRM)将巴西劈裂试验作为岩石抗拉强度测试的标准试验，并建议使用弧形加载板和高径比为0.5的圆盘试样(图7(d))。1999年，我国《工程岩体试验方法标准》^[33]推荐使用巴西劈裂法来测试岩石的抗拉强度，并建议的圆盘试样为直径48~54 mm，高径比为0.5~1.0。2002年，我国《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[34]规定采用半径为75 mm的弧形垫条

和边长为150 mm的标准立方体混凝土试样进行劈裂试验测定混凝土的抗拉强度，试验装置如图8所示。

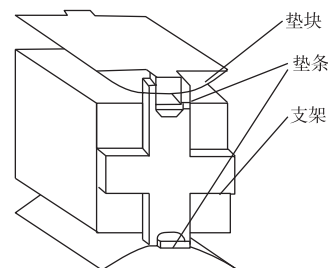


图8 国标混凝土劈裂抗拉强度试验示意图^[34]

Fig. 8 Schematic diagram of splitting tensile strength test of national standard concrete^[34]

然而，巴西劈裂法并不适用于所有材料的抗拉强度测量。例如，1971年，HUDSON等^[35]对大理岩和花岗岩试样进行巴西劈裂试验，发现当施加线形荷载、即圆盘试样与加载板直接接触时，破坏发生在加载点下，且试样中心没有任何裂纹。而即使将荷载分散到10°的圆弧上，试样依然无法从中心劈裂。HUDSON认为，由于破坏不是起源于圆盘的中心，也就是假定的最大拉应力区域，所以巴西劈裂试验显示的拉伸强度值是错误的，因此不推荐巴西试验作为材料抗拉强度的测试方法。

同样于1971年，MELLOR等^[36]从理论上研究了巴西劈裂试验有效性，并对岩石、塑料、玻璃和冰这四种力学性质不同的材料进行了试验。MELLOR等认为，根据格里菲斯准则，圆盘的精确中心是满足拉伸破坏条件的唯一点，其值等于单轴拉伸强度。而试验结果表明，巴西劈裂法不适用于非格里菲斯类型的材料，如冰这类抗压强度与抗拉强度之比非常低的材料，巴西劈裂试验会得出完全错误的结果。

2007年，邓代强等^[37]对胶结充填体进行巴西劈裂试验。结果表明，随着灰砂比的增大，胶结充填体的抗拉强度和峰荷应变也逐渐增大，但抗拉强度的增长率随之降低。从试样的断裂方式来看，大裂纹是唯一的主导裂纹，并将试样分成两半，胶结充填体的破坏模式表现为脆性破坏。之后，CAO等^[38]、CHEN等^[39]在2019年，WANG等^[40]在2020年也先后使用巴西劈裂试验测量不同条件下胶结充填体强度。

巴西劈裂试验操作简便，试样制备简单，对设备要求低，并可以使用压力机进行试验，这使得巴

西劈裂法成为最受欢迎的抗拉强度试验方法。然而,巴西劈裂试验所采用的试件高径比通常为0.5~1,并不符合平面应力或平面应变的前提假设,因此得到的抗拉强度并不准确。许多研究表明,巴西劈裂适用于测试脆性或者遵从格里菲斯强度准则的材料^[39,41-43],这也是巴西劈裂试验在岩石和混凝土中广泛应用的原因。巴西劈裂试验计算公式基于破坏发生在最大拉应力点的假设^[43],即试样的中心。而对于软弱岩体,在试样中心沿其受载直径出现拉伸断裂之前,塑性区已经在加载处形成^[34],因此,使用巴西劈裂试验测得胶结充填体抗拉强度并不可靠。

2.2 梁弯曲试验

梁弯曲试验是将材料制作成长方体的横梁,约束其端部的竖向位移,在跨中或者跨中等距处加以集中荷载,使试样下缘发生拉伸破坏。梁弯曲试验的加载方式主要有两种,分别为三点加载和四点加载,如图9所示,而目前各国多采用三点加载作为试验标准^[38,39]。梁弯曲抗拉强度的计算公式为:

$$\sigma_t = 1.5 \frac{PL}{bh^2} \quad (3)$$

式中, P 为试样破坏时的最大荷载, L 为梁支撑的跨度, b 为梁的宽度, h 为梁的高度。

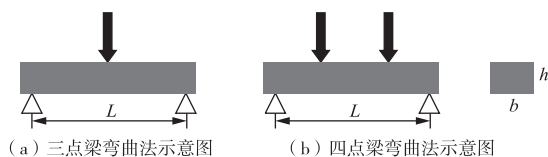


图9 梁弯曲法示意图

Fig. 9 Diagram of beam bending tensile method

1963年,LEONARDS和NARRAIN^[44]对击实黏土进行梁弯曲试验,研究了其在拉伸状态下的开裂变形特征。试验结果表明,随着含水率的升高,试样的极限应变增大。

2004年,杨同等^[45]对砂岩、大理岩、花岗岩分别进行三点梁弯曲试验与巴西劈裂试验,发现梁弯曲法得到的抗拉强度是劈裂抗拉强度的1.4~2倍。2006年,李积彦等^[46]使用三点梁弯曲试验得到了黏性土的抗拉强度,同样发现测得的抗拉强度偏大,并认为该现象是因为土体的力学性质不符合梁弯曲试验的一些假设条件导致的。

2011年,AZMATCH等^[47]对冻结土进行了四点梁弯曲试验,如图10所示,分别研究了温度、含水率、加载速率以及应变速率对其抗拉强度的影响。

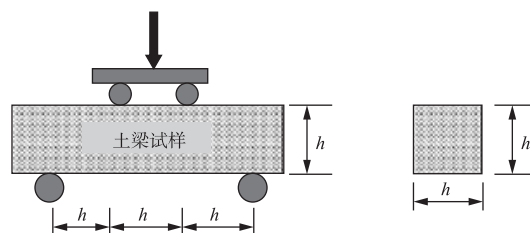


图10 四点梁弯曲试验^[47]

Fig. 10 Four-point beam bending tensile test^[47]

梁弯曲试验是一种具有工程实际意义的材料拉伸特性测试方法,试验难度低、要求少,能够获取抗拉强度、应力-应变曲线与拉伸变形模量,反映了材料在纯弯曲状态下的强度特性,但梁弯曲试验的抗拉强度计算公式假设梁断面始终为平面,材料遵从胡克定律,在压缩和拉伸时的弹性模量相同、应力-应变线性相关。这些假设与实际情况有所出入,无论是岩石、土还是混凝土,梁弯曲法测得的抗拉强度也大于实际值^[46,48,49]。除了公式里含有的跨度、高度和宽度外,预置裂纹的长度和宽度、预置裂纹的位置对梁弯曲试验测得的抗拉强度有较大影响^[50]。胶结充填体的压缩弹性模量与拉伸弹性模量不相同,也不满足梁弯曲试验计算公式的弹性假设,因此梁弯曲试验不适用于测定胶结充填体的抗拉强度。

2.3 轴向压裂试验

轴向压裂试验是一种是由CHEN^[51]基于完全塑性理论提出的、最初用于混凝土抗拉强度测定的间接试验方法,又称双冲压法。试验方法是在圆柱体试样的两端中心各放置一个圆柱形刚性短柱作为衬垫,在衬垫上施加压力,使试样沿轴向劈裂。1973年,FANG^[52]在CHEN^[51]研究的基础上,根据完全塑性理论推导出轴向压裂法的抗拉强度计算公式:

$$\sigma_t = \frac{Q}{\pi(kbH - a^2)} \quad (4)$$

式中, Q 为最大轴向压力, H 为试样高度, b 为试样半径, a 为衬垫半径, k 为修正系数。轴向压裂法失效机理如图11所示。

1971年,DISMUKE等^[53]使用轴向压裂法测得了岩芯试样的抗拉强度,并与巴西劈裂试验的结果进行比对,发现轴向压裂试验得到的抗拉强度低于劈裂抗拉强度。

2005年,刘菀茹等^[54]研究了轴向压裂法中衬垫的直径和试样的高径对抗拉强度测试值的影

响。试验结果表明,随着衬垫直径的增大,测得的抗拉强度也逐渐增大,这种现象在具有较高抗拉强度的试样中更加显著,而高径比的增加会导致抗拉强度测试值的减小,这种变化规律随高径比的增加而减弱。

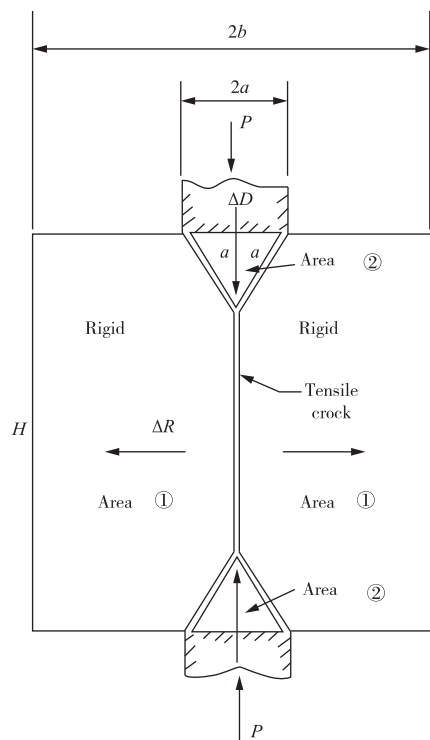


图 11 轴向压裂法失效机理^[52]

Fig. 11 Failure mechanism of axial fracturing^[52]

2014 年, LIANG 等^[55]对轴向压裂法进行了理论分析,并使用该方法对黄土的抗拉强度进行了测试。通过试验数据和理论分析,推导出对于计算黄土的抗拉强度,公式(4)中的 k 值应该取 2.19。

轴向压裂试验操作简单,制样方便,数据稳定、保守,虽然可以测定抗拉强度但无法获取应力-应变曲线。此外,轴向压裂试验受试样高径比与衬垫直径的影响,抗拉强度随高径比的增大而减小,随衬垫直径的增大而增大。有研究人员建议试样高径比为 2,衬垫直径为 2~3 cm^[54],但目前还缺乏有关轴向压裂试验的相关标准,尾砂胶结充填体的力学特性也不符合该试验的完全塑性理论假设。

3 适用于尾砂胶结充填材料的抗拉强度测试方法创新

抗拉强度是确保采场尾砂胶结充填体稳定、充填设计合理的重要参数,而现有拉伸测试方法不能准确获得充填体的抗拉强度,二者之间的矛盾促使

矿业科技工作者在充填体拉伸测试方面寻求创新。矿冶科技集团有限公司郭利杰教授和加拿大多伦多大学 Andrew Pan 联合提出了一种充填体抗拉强度测试方法(又称为 Guo-Tensile Method),利用自主研制的压-拉装置对“工字型”充填体试件进行拉伸试验。该测试方法兼具直接法结果准确与间接法加载经济的特点,且大量试验研究验证了其可靠性。

3.1 方法创新——“工字型”充填体结构及压-拉转换装置

“工字型”充填体试件由端部、过渡段和测试段共 3 个功能区组成,如图 12 所示。试件端部宽大,便于固定和加载;测试段位于试件的中部,其横截面的形状与面积恒定,在直接拉伸条件下处于单轴应力状态,试件的拉伸断裂应发生在此处;端部与测试段之间为过渡段,横截面积由端部至测试段逐渐减小,使试件中的应力分布更加均匀,降低端部应力集中与加载扰动对测试段的影响^[56]。

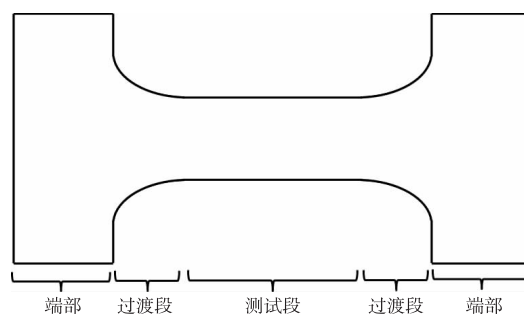


图 12 “工字型”充填体试件示意图

Fig. 12 Schematic diagram of Dog-bone specimen

尾砂胶结充填体试件需要在模具中浇筑、养护成型,Andrew Pan 为“工字型”充填体试件设计制作了如图 13 所示的养护试模^[57]。试模由两块侧板和一至两块底板组成,底板与侧板通过螺母与螺栓连接,侧板之间利用预设的凹槽和凸起嵌合。

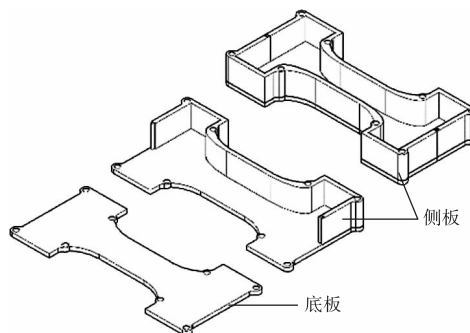


图 13 “工字型”充填体养护试模^[57]

Fig. 13 Curing mold of dog-bone backfill specimen^[57]

压-拉转换装置则是由两个相似的支架组成,如图 14 所示。试验时,“工字型”试件的上端部被下支架固定,试件在试验装置中处于悬空状态;上支架紧扣试件的下端部,当上支架受压,荷载便会作用于试件的下端,使试件处于单轴拉伸状态,并在测试段发生拉伸破坏。拉伸破坏后的“工字型”试件如图 15 所示。

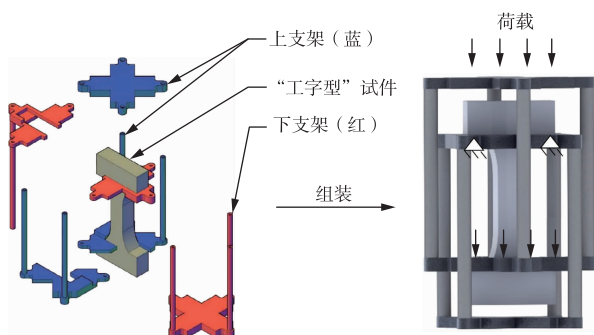


图 14 压-拉转换试验装置^[57]

Fig. 14 Compression to tensile load converter^[57]

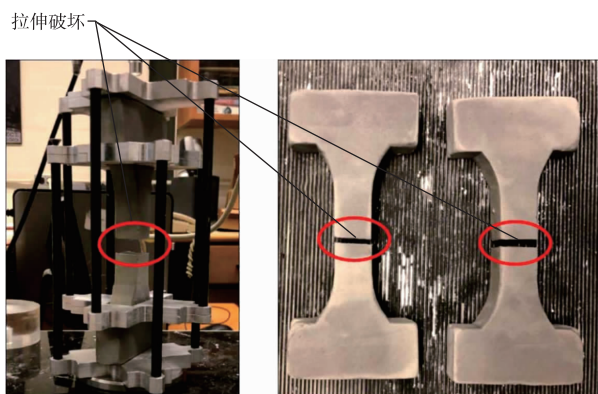


图 15 尾砂胶结充填体“工字型”试件的典型破坏模式^[57]

Fig. 15 Typical damage patterns of dog-bone cemented tailings backfill specimens^[57]

郭利杰等在试验过程中发现,一部分“工字型”试件的断裂出现在端部与过渡段的连接处附近,其原因在于该处在加载时存在明显的应力集中,导致强度较低的充填体提前破坏。为防止此类现象的发生,提高该试验方法的可靠性,郭利杰等对“工字型”充填体试件及养护试模的结构做出了改进。改进后的试模如图 16 所示,将原侧板变为“头板+侧板”的组合模式,头板包裹端部与过渡段的连接处,起到保护的作用,新侧板只覆盖测试段两侧。尾砂胶结充填体试件养护完成后无需完全脱模,拆除新试模的底板和侧板即可按照与之前相同的方式安装。试验结果表明,新试模能够有效避免“工字型”试件的端部破坏^[58,59]。而为了提高

该方法试验结果的准确性,Andrew Pan 调整了“工字型”试样的尺寸,在增加端部长度的同时减少测试段的范围,以降低弯矩对试验结果的影响^[60]。郭利杰等在压-拉转换装置中添加一组限位销,如图 17 所示,使试件的轴线可与装置保持一致。

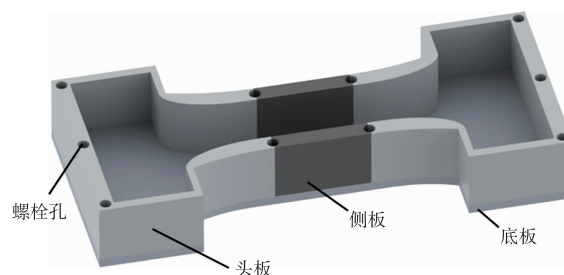


图 16 郭利杰等设计的“工字型”养护试模^[58]

Fig. 16 The curing mold designed by Prof. Guo^[58]

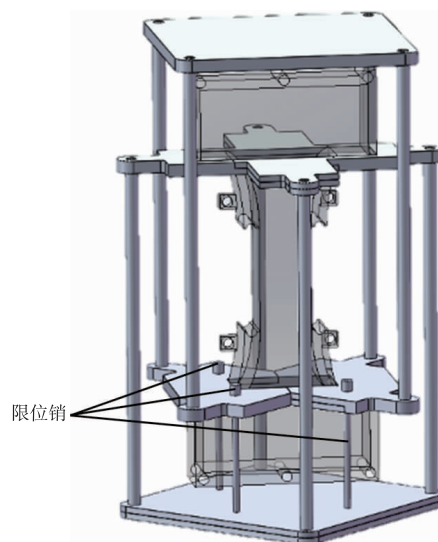


图 17 带有限位销的压-拉转换装置

Fig. 17 Compression to tensile load converter with limit pins

3.2 Guo-tensile 测试方法应用

郭利杰等利用 Guo-Tensile 测试方法对充填体的抗拉强度开展了大量试验研究,通过分析多种配比龄期充填体的抗拉强度,得到了抗拉强度随灰砂比、质量浓度、养护龄期的发展规律,并探究了抗拉强度对这三种因素的敏感性差异^[58]。Guo-Tensile测试方法本质上是一种测试抗拉强度的直接方法,相较于间接法能够获得更加真实的尾砂胶结充填体拉伸应力-应变关系,进而体现其拉伸力学特性。Andrew Pan 记录了 Guo-Tensile 测试方法过程中“工字型”充填体试件的应力-位移曲线,在曲线中直观地展现出充填体具有峰前拉伸

应力-位移关系呈线弹性、峰后应力迅速下降至 0 的特点，反映出试件的破坏表现为脆性断裂，且符合单轴拉伸的破坏特征^[60,61]。

当下，巴西劈裂试验是最常用于测试充填体抗拉强度的方法。然而，这种间接拉伸试验难以真正反映充填体的抗拉强度。为揭示巴西劈裂试验结果与充填体真实抗拉强度的关系，郭利杰将 Guo-Tensile 测试方法与巴西劈裂试验的结果进行了对比，如图 18 所示，在相同配比龄期下，两种测试方法在抗拉强度发展方面的表现相似，而在强度值方面，Guo-Tensile 测试方法的结果显著高于巴西劈裂试验^[59]。

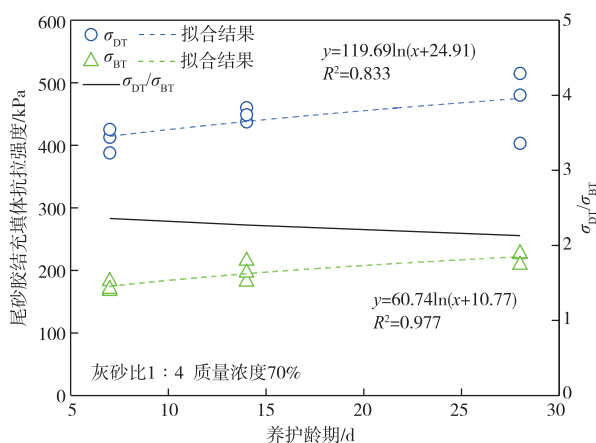


图 18 配比相同时 Guo-tensile 与巴西劈裂试验测得的充填体抗拉强度^[59]

Fig. 18 Tensile strength of cemented tailings backfill measured by Guo-tensile method and Brazilian splitting test for the same mix design^[59]

充填体抗拉强度的测定是矿山充填领域长期存在的难题，利用单轴抗压强度进行换算也是获取充填体抗拉强度的一种常用且便捷的手段^[60,62]。长期以来，充填体的抗拉强度被认为是其抗压强度的 10% 左右^[63-65]。而郭利杰等通过单轴压缩试验与 Guo-Tensile 测试方法发现，尾砂胶结充填体抗拉强度为其抗压强度的 15%~20%，如图 19 所示^[66]，且图 19 显示的充填体抗拉强度与抗压强度之间的线性关系建立在大量试验的基础上，能够作为经验公式为矿山充填材料的强度设计提供指导。

Andrew Pan 测试了不同养护龄期的尾砂胶结充填体的抗压强度与抗拉强度，其试验结果如图 20 所示，充填体的抗压强度仅为为其抗拉强度 3~4 倍，二者之间的比值随着养护龄期的增加而提高^[59,60]。

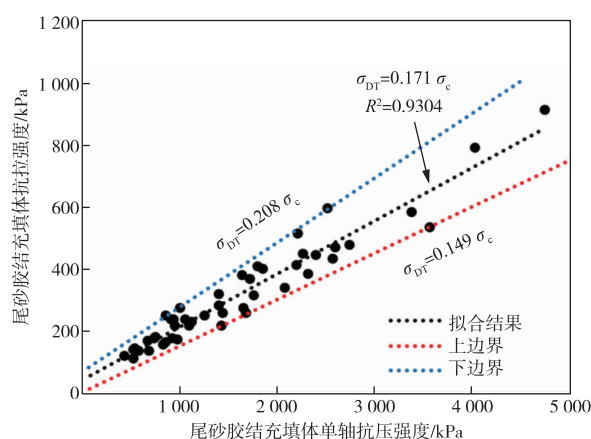


图 19 不同配比充填体抗拉强度与抗压强度的关系^[66]

Fig. 19 Variations of tensile strength against unconfined compressive strength for different cemented tailings backfill mix designs^[66]

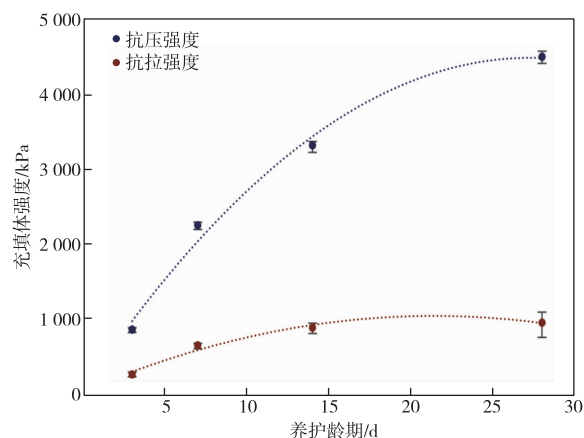


图 20 尾砂胶结充填体抗拉强度与抗压强度的对比^[66]

Fig. 20 Comparison between tensile strength and unconfined compressive strength of cemented tailings backfill^[66]

Guo-Tensile 测试方法的实际应用表明，无论是采用巴西劈裂试验还是抗压强度换算的方法均会低估尾砂胶结充填体的抗拉强度，从而导致矿山胶凝材料的浪费与非必要充填成本的增加；同时也证明了 Guo-Tensile 测试方法作为一种能够科学、准确获得充填体抗拉强度的试验技术，能够真实反映充填体的拉伸力学特性，并能有效指导矿山充填实践。

4 结论

1) 尾砂胶结充填体抗拉力学性能是影响金属矿山采场充填体整体稳定性的关键要素。尾砂胶结充填材料抗拉强度对于了解充填体力学性能以及确保相邻采场充填采矿设计的有效性和安全性至关重

要。采用先进的方法测定充填材料抗拉强度是科学评价采场原位充填体质量及力学性能的核心工作,也是实现矿山充填开采过程力学模拟分析的关键。

2)尾砂胶结充填材料属于低强度材料,巴西劈裂等间接测试方法不适用该类材料;巴西劈裂测试方法适用于岩石、混凝土等部分典型脆性材料抗拉强度测试。矿冶集团郭利杰团队发明的“工字型”充填体抗拉强度测试法(Guo-Tensile Method)是适用于矿山尾砂胶结充填材料抗拉性能测试的新方法。利用3D打印技术加工“工字型”树脂模具用于制备尾砂充填体试件,创新研发的利用压-拉转换装置带模加载的直接拉伸试验法能在普通压力机系统实现“工字型”充填材料试件拉伸强度的有效测试。Guo-Tensile Method已被国际矿业咨询机构-Paterson & Cooke公司、加拿大2家矿业公司、中国3家矿业公司采用,在国内外矿山充填领域应用前景广阔。

3)目前,我国尚无针对矿山尾砂胶结充填材料相关力学性能测试的统一方法标准,仍以水泥、混凝土材料领域的力学性能相关测试标准为主,但尾砂胶结充填材料与混凝土材料的宏观力学性能差异很大,研究证明其相关测试标准已不适用。应重点发展科学统一的矿山充填体力学性能测试方法与标准(譬如Guo-Tensile抗拉强度测试方法),为矿山充填采矿研究与设计提供科学参考依据。

参考文献

- [1] 郭利杰,刘光生,马青海,等. 金属矿山充填采矿技术应用研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4182-4200.
GUO L J, LIU G S, MA Q H, et al. Research progress on mining with backfill technology of underground metalliferous mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4182-4200.
- [2] 张雷,郭利杰,许文远,等. 细尾砂在矿山充填应用中关键工艺与材料的研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(23): 22100279. DOI: 10. 11896/cldb. 22100279.
ZHANG L, GUO L J, XU W Y, et al. Research on crucial technological and material issues of applying fine tailings to mine filling: a review[J]. Materials Review, 2023, 37(23): 22100279. DOI: 10. 11896/cldb. 22100279.
- [3] FAN C, YANG P Y, LI L, et al. Poisson's ratio of granular materials for Mohr-Coulomb elastoplastic model[J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2023, 37(10): 780-804.
- [4] 罗方伟,李广涛,何名声,等. 基于FLAC3D机械化两步条带式上向分层充填采矿法采场稳定性分析[J]. 矿冶, 2022, 31(2): 16-21.
LUO F W, LI G T, HE M S, et al. Optimization of stope structure parameters based on FLAC3D two step mechanized strip upward slicing and filling mining method[J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(2): 16-21.
- [5] 孟梦. 北方地区复杂地形下的煤矿采空区地质稳定性建模分析[J]. 矿冶, 2022, 31(5): 7-13.
MENG M. Modeling and analysis of geological stability of coal mine goaf under complex terrain in North China [J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(5): 7-13.
- [6] 黄松,王俊,乔登攀,等. 六边形进路开采围岩稳定性的多因素影响分析[J]. 矿冶, 2023, 32(4): 1-5.
HUANG S, WANG J, QIAO D P, et al. Analysis of multi-factor influence on surrounding rock stability in hexagonal approach mining [J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32(4): 1-5.
- [7] 林振春,李磊,李保生,等. 特厚煤层矸石充填控制岩层变形特性研究[J]. 矿冶, 2023, 32(6): 15-20, 51.
LIN Z C, LI L, LI B S, et al. Study on control characteristics of rock deformation by gangue filling in extra-thick coal seam[J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32(6): 15-20, 51.
- [8] 宋洪宇,马宏伟,邵琳,等. 极分散深部矿体开采对地表及建构筑物的影响分析[J]. 矿冶, 2023, 32(4): 19-26.
SONG H Y, MA H W, SHAO L, et al. Analysis of influence of mining of extremely dispersed deep orebodies on surface and structures[J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32(4): 19-26.
- [9] YU T R. Mechanisms of fill failure and fill strength requirements [C] //16th Canadian Rock Mechanics Symposium, Edited by PK Kaiser and DR McCreath, Sudbury, Canada, 1992: 43-46.
- [10] MITCHELL R J. Sill mat evaluation using centrifuge models[J]. Mining Science and Technology, 1991, 13(3): 301-313.
- [11] 刘同有. 充填采矿技术及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
LIU T Y. Filling mining technology and application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.
- [12] BIENIAWSKI Z, HAWKES I. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials[J].

- International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1978, 15(3): 99-103.
- [13] 水利系工程地质及土力学教研组. 用粘结试件端部的方法进行粘性土的拉力试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1973, 1973(1): 103-108.
- Engineering Geology and Soil Mechanics Teaching and Research Group, Department of Water Resources. Tensile test of cohesive soil by bonding the end of the specimen[J]. Journal of Tsinghua University(Natural Science), 1973, 1973(1): 103-108.
- [14] BOLZAN P E, HUBER G A. Direct tension test experiments [R]. Washington, DC: Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1993.
- [15] 陈萍, 梁正平, 黄书秦, 等. 三峡三级配混凝土轴向拉伸应力-变形全曲线[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2001, 29(5): 38-42.
- CHEN P, LIANG Z P, HUANG S Q, et al. Complete curve of axial tensile stress-deformation of three-graded concrete in three gorges project [J]. Journal of Hohai University (Natural Science Edition), 2001, 29(5): 38-42.
- [16] 张小江, 周克骥, 周景星. 单轴静动拉压试验仪的研制和纤维加筋土断裂特性试验[J]. 大坝观测与土工测试, 1997, 21(4): 37-40.
- ZHANG X J, ZHOU K J, ZHOU J X. Development of uniaxial static and dynamic tension tester and fracture characteristics test of fiber reinforced soil [J]. Dam Observation and Geotechnical Test, 1997, 21(4): 37-40.
- [17] 张绍麟. 混凝土的劈裂抗拉强度与轴心抗拉强度的理论关系和试验对比[J]. 长沙铁道学院学报, 1979(2): 63-80, 197.
- ZHANG S L. The theoretical relationship and experimental comparison between the splitting tensile strength and the axial tensile strength of concrete[J]. Journal of Changsha Railway University, 1979(2): 63-80, 197.
- [18] 张辉, 朱俊高, 王俊杰, 等. 击实砾质土抗拉强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(增刊2): 4186-4190.
- ZHANG H, ZHU J G, WANG J J, et al. Experimental study on tensile strength of compacted gravel soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(Sup. 2): 4186-4190.
- [19] HOEK E. Fracture of anisotropic rock[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1964, 64(10): 103-108.
- [20] KLANPHUMEE S. Direct tension testing of rock specimens[D]. Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology, 2010.
- [21] TOLOOIYAN A, MACKAY R, XUE J. Measurement of the tensile strength of organic soft rock[J]. Geotechnical Testing Journal, 2014, 37(6): 991-1001.
- [22] TOWNER G. The mechanics of cracking of drying clay [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1987, 36(2): 115-124.
- [23] 徐玉博, 姜大伟, 颜荣涛, 等. 含水合物土抗拉强度特性 [J]. 工程地质学报, 2023, 31 (5): 1563-1572.
- XU Y B, JIANG D W, YAN R T, et al. Tensile strength characteristics of hydrate-bearing soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31 (5): 1563-1572.
- [24] Her Majesty the Queen in Right of Canada. Tensile testing apparatus; US 19910765263[P]. 1993-03-16.
- [25] SARFARAZI V, FARIDI H R, HAERI H, et al. A new approach for measurement of anisotropic tensile strength of concrete[J]. Advances in Concrete Construction, 2015, 3(4): 269-282.
- [26] TANG G, GUO L, LIU G, et al. Determination of the relationship between direct tensile test and Brazilian splitting test of cemented tailings backfill [C]. Paste 2023: 25th International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings, 2023, University of Alberta, Edmonton, and Australian Centre for Geomechanics, Perth.
- [27] 许年春, 杨全虎, 吴同情, 等. 岩石直接拉伸试验装置及方法 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18 (6): 1949-1953, 1961.
- XU N C, YANG Q H, WU T Q, et al. The device and method for direct tensile tests of rock [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18 (6): 1949-1953, 1961.
- [28] PAN A N, GRABINSKY M W. Tensile strength of cemented paste backfill [J]. Geotechnical Testing Journal, 2021, 44(6): 1886-1897.
- [29] CARNEIRO FLLB. A new method to determine the tensile strength of concrete [C] //Proceedings of the 5th Meeting of the Brazilian Association for Technical Rules, 1943.
- [30] AKAZAWA T. New test method for evaluating internal stress due to compression of concrete: the splitting tension test[J]. Japan Soc Civil Eng, 1943, 29: 777-787.

- [31] OSIDZE V I, KHOPERIYA D L. Effect of aggregate size on the tensile strength of hydraulic-concrete specimens[J]. *Hydrotechnical Construction*, 1979, 13(3): 239-244.
- [32] ISRM. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 1978, 15(15): 99-103.
- [33] 中华人民共和国电力工业部. 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—1999 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
Ministry of Electric Power Industry of the People's Republic of China. Standard for tests method of engineering rock mass: GB/T 50266—1999 [S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [34] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002 [S]. 中国建筑工业出版社, 2003.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002 [S]. China Construction Industry Press, 2003.
- [35] HUDSON J A, BROWN E T, RUMMEL F. The controlled failure of rock discs and rings loaded in diametral compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1972, 9(2): 241-248.
- [36] MELLOR M, HAWKES I. Measurement of tensile strength by diametral compression of discs and annuli[J]. *Engineering Geology*, 1971, 5(3): 173-225.
- [37] 邓代强, 姚中亮, 唐绍辉. 单轴拉伸条件下充填体的力学性能研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2007(1): 36-38, 53.
TANG D Q, YAO Z L, TANG S H. Study on the mechanical property of backfill under split tension[J]. *Journal of Underground Space and Engineering*, 2007(1): 36-38, 53.
- [38] CAO S, XUE G L, SONG W. Mechanical, flexural and microstructural properties of cement-tailings matrix composites: effects of fiber type and dosage[J]. *Composites Part B Engineering*, 2019.
- [39] CHEN X, SHI X, ZHOU J, et al. Influence of polypropylene fiber reinforcement on tensile behavior and failure mode of tailings cemented paste backfill[J]. *IEEE Access*, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2919480.
- [40] WANG S, SONG X, CHEN Q, et al. Mechanical properties of cemented tailings backfill containing alkalized rice straw of various lengths [J/OL]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 276: 111124. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111124>.
- [41] COVIELLO A, LAGIOIA R, NOVA R. On the measurement of the tensile strength of soft rocks[J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2005, 38(4): 251-273.
- [42] LI D, WONG L N Y. The brazilian disc test for rock mechanics applications: review and new insights[J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2013, 46(2): 269-287.
- [43] LU N, WU B, TAN C P. Tensile strength characteristics of unsaturated sands[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(2): 144-154.
- [44] LEONARDS G A, NARRAIN J. Flexibility of clay and cracking of earth dams[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 1963, 89(2): 47-98.
- [45] 杨同, 王宝学, 高谦, 等. 岩石弯曲拉伸试验研究[J]. *勘察科学技术*, 2004(6): 3-5, 53.
YANG T, WANG B X, GAO Q, et al. Study on bending tensile tests of rock samples[J]. *Survey Science and Technology*, 2004(6): 3-5, 53.
- [46] 李积彦, 何昌荣, 唐辉. 粘性土抗拉强度试验对比研究[J]. *路基工程*, 2007(2): 104-105.
LI J Y, HE C R, TANG H. Comparative study on tensile strength test of cohesive soil[J]. *Roadbed Engineering*, 2007(2): 104-105.
- [47] AZMATCH T F, SEGO D C, ARENSON L U, et al. Tensile strength and stress - strain behaviour of Devon silt under frozen fringe conditions[J]. *Cold Regions Science & Technology*, 2011, 68(1/2): 84-90.
- [48] 姜福田. 混凝土抗拉强度测定中的几个问题[J]. *水力发电*, 1986(9): 25-30.
JIANG F T. Several problems in the determination of tensile strength of concrete [J]. *Hydropower*, 1986(9): 25-30.
- [49] 李海波, 张君伟, 邵蔚, 等. Bukit Timah 花岗岩的动态拉伸力学特性实验研究[J]. *岩土力学*, 2002, 23(增刊 1): 1-4.
LI H B, ZHANG J W, SHAO W, et al. Experimental study on dynamic tensile mechanical properties of bukit timah granite[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(Sup.1): 1-4.
- [50] 沈忠言, 彭万巍, 刘永智, 等. 轴向压裂法测定冻

- 土抗拉强度初步研究[J]. 冰川冻土, 1995(1): 33-39.
- SHENG Z Y, PENG W W, LIU Y Z, et al. Preliminary study on determination of tensile strength of frozen soil by axial fracturing method[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995(1): 33-39.
- [51] CHEN W F. Double punch test for tensile strength of concrete[J]. Aci Journal, 1970, 67 (12): 993-995.
- [52] FANG H Y. Method of test for tensile strength of soil, rock and stabilized materials by double punch test, July 1970 [R]. Fritz Laboratory Reports, 348. 4. 1970-01-01.
- [53] DISMUKE T D, CHEN W F, FANG H Y. Tensile strength of rock by the double-punch method[J]. Rock Mechanics, 1972, 4(2): 79-87.
- [54] 刘菀茹, 何昌荣, 朱安龙, 等. 轴压法测定黏性土抗拉强度的若干问题探讨[J]. 水电站设计, 2005(2): 69-71.
- LIU W R, HE C R, ZHU A L, et al. Discussion on some problems of measuring tensile strength of viscous soil by axial compression method[J]. Design of Hydropower Station, 2005(2): 69-71.
- [55] LIANG Q, WU X, LI C, et al. Mechanical analysis using the unconfined penetration test on the tensile strength of Q3 loess around Lanzhou City, China [J]. Engineering Geology, 2014, 183: 323-329.
- [56] BALDUZZI G, ZELAYA-LAINEZ L, HOCHREINER G, et al. Dog-bone samples may not provide direct access to the longitudinal tensile strength of clearwood [J]. The Open Civil Engineering Journal, 2021(15): 1-12.
- [57] PAN A, GRABINSKY M W F. Tensile strength of cemented paste backfill [J]. Geotechnical Testing Journal, 2021, 44(6): 1886-1897.
- [58] 唐国星, 郭利杰, 刘光生, 等. 尾砂胶结充填体抗拉强度试验及其影响因素研究[J]. 中国矿业, 2022, 31(4): 124-131.
- TANG G X, GUO L J, LIU G S, et al. Experimental study on tensile strength of cemented tailings backfill and influencing factors [J]. China Mining Industry, 2022, 31(4): 124-131.
- [59] TANG G, GUO L, LIU G, et al. Determination of the relationship between direct tensile test and Brazilian splitting test of cemented tailings backfill [C]//Paste 2023: Proceedings of the 25th International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings. University of Alberta, Edmonton, and Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2023: 98-111.
- [60] PAN A, GRABINSKY M. Direct tensile measurement for cemented paste backfill [J]. Minerals, 2023, 13(9): 1218.
- [61] PERRAS M A, DIEDERICH S M. A review of the tensile strength of rock: concepts and testing [J]. Geotechnical and geological engineering, 2014, 32: 525-546.
- [62] GRABINSKY M, JAFARI M, PAN A. Cemented paste backfill (CPB) material properties for undercut analysis [J]. Mining, 2022, 2(1): 103-122.
- [63] KEITA A M T, JAHANBAKHSHZADEH A, LI L. Numerical analysis of the failure mechanisms of sill mats made of cemented backfill [J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 16(7): 802-814.
- [64] MITCHELL R J. Sill mat evaluation using centrifuge models [J]. Mining Science and Technology, 1991, 13(3): 301-313.
- [65] DENG X, ZHANG J, KLEIN B, et al. Experimental characterization of the influence of solid components on the rheological and mechanical properties of cemented paste backfill [J]. International Journal of Mineral Processing, 2017, 168: 116-125.
- [66] 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. DOI: 10.3389/fmats. 2022.864264.