

## 充填体抗拉强度特性的试验研究

姚志全,张钦礼,胡冠宇

(中南大学资源与安全工程学院,湖南长沙410083)

**摘要:**充填体可以改善围岩应力状态、限制围岩移动、维护采场稳定.通过在室内条件下制作和养护充填体试件,然后采取劈裂法对不同配比和浓度的充填体试件进行测试,得出了充填体试件在不同配比、浓度下的峰值载荷、峰值位移、平均峰值应变、抗拉强度以及应力-应变曲线.通过分析这些拉伸试验条件下的力学性质,对提高充填体质量和维护采场稳定有指导作用.

**关键词:**充填体;尾砂;单轴拉伸强度;劈裂法;力学性质

**中图分类号:**TD85

**文献标识码:**A

## Experimental Study on Tension Strength Characteristics of Backfilling

YAO Zhi-quan, ZHANG Qin-li, HU Guan-yu

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

**Abstract:** Stability of mined-out area is maintained by improving the state of stress and restricting its displacement in surrounding rock with backfilling. In this paper, the backfill samples were made and conserved in the conditions of indoors, and then tested with the splitting method at different ratio of fill and different concentrations. According to the obtained test data of uniaxial splitting tensile strength, the peak load, the peak displacement, the average peak strain, tensile strength as well as stress-strain curves were educed. These mechanical properties under the condition of the tensile test were analyzed, which are of instructive significance to the mine for improving the quality of backfilling and maintaining the stability of the stopes.

**Key words:** backfilling; tailings; uniaxial splitting tensile strength; splitting method; mechanical properties

随着人类对矿产资源大规模的开发和利用,浅部的矿产资源逐渐枯竭,开采正转向深部矿体.因此,地压问题将日益突出,并成为实现深部安

全、高效开采的主要障碍<sup>[1]</sup>. 充填技术是解决深部地压控制、维护采空区稳定、保障安全作业、保护地表不遭破坏和维持既有的生态环境的有效途

收稿日期:2008-10-23

基金项目:国家科技支撑计划基金资助项目(2006BAB02A03);科技部“十一五”科技支撑基金资助项目(2006BA02B05)

作者简介:姚志全(1984-),男,湖南益阳人,中南大学硕士研究生.主要研究方向:充填理论与安全.

径之一<sup>[2]</sup>.在地应力高、围岩破碎的矿区,为保证采矿正常进行和矿山工作人员安全对充填体的强度和稳定性提出了更高的要求.

充填体的抗拉强度一般是指充填体试件单位面积上所能承受的拉伸应力,它是充填体的重要性能之一<sup>[3]</sup>.充填体在外部荷载作用下的瞬时轴向变形可以用其应力-应变关系来描述.充填体拉伸曲线同压缩曲线一样存在峰后软化现象,即也存在下降段.长期以来,大部分试验数据都是从充填体间接拉伸试验获得,并不能真实反映充填体的抗拉性能,充填体拉伸应力-应变曲线是最能反映充填体抗拉性能的试验方法.

对采用充填法的矿山调查发现,许多充填体由于抗拉强度和拉伸变形能力不足而导致开裂,严重者甚至发生质量事故.实际上,充填体的压缩、弯曲破坏均是由于其拉应力或剪应力、拉应变或剪应变超过其承载能力<sup>[4]</sup>而造成的,可见对充填体拉伸性能的研究非常必要.

## 1 充填体单轴劈裂拉伸强度特性试验的试验条件

### 1.1 试验材料

试验材料包括:焦家金矿自制的尾砂固结材料(一种类似早强水泥的固结材料)、尾砂为该矿选冶厂排出的尾砂、粉煤灰来源于龙口火力发电厂以及该矿选冶厂排出的尾水.

### 1.2 充填体试件的制作、养护

充填体单轴拉伸强度试验的试件制作采取在室内加工制作.首先按照每组试验试件的配比和浓度要求,将搅拌好的料浆灌入7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm标准三联试模.为保证试块浇注过程中,料浆不发生沉淀,采用边搅拌、边灌模的试件浇灌方式.为消除试件中的气泡,在浇灌过程中边浇灌,边捣固.

充填体试件在标准养护条件(温度为20℃±3℃,相对湿度为60%~80%)下养护28 d后进行单轴拉伸强度试验.

### 1.3 充填体单轴拉伸强度特性试验测试方法

充填体试件单轴拉伸强度测试采用劈裂法,在WDW-200万能压力测试机测定劈裂拉伸强度(如图1).全程试验过程由计算机控制,并由计算机保存全部试验的图形和数据结果.

试验时,在立方体试件上、下面中心平行粘贴两根合金钢丝,两根钢丝构成一纵向平面,然后将试件置于试验机上加压,借助合金钢丝将集中载

荷转变为线载荷,从而产生垂直于该平面的拉应力,最后导致试件发生拉伸破坏.

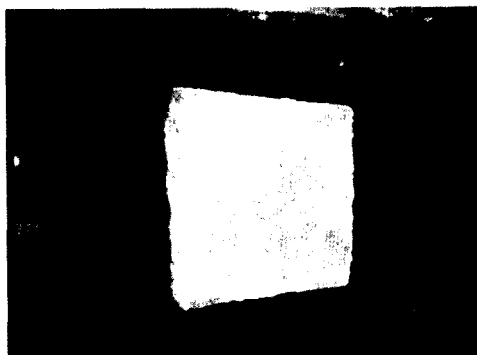


图1 劈裂拉伸试验加载过程示意图

Fig. 1 Loading process in split tensile test

### 1.4 劈裂拉伸强度特性试验测试原理

充填体的抗拉强度就是充填体试件在单轴拉应力作用下抵抗破坏的极限能力,它在数值上等于试件破坏时的最大拉应力<sup>[3]</sup>.由于轴向抗拉强度试验方法测定充填体抗拉强度时存在轴向对准和试件夹头难以设计的困难,因而本试验使用劈裂拉伸的方法测定充填体抗拉强度.劈裂拉伸强度试验方法的基本原理是:在一个立方体上如果施加两个大小相等、方向相反的径向集中荷载时,沿着直径的平面上会产生与其相垂直且均匀分布的拉应力<sup>[3]</sup>.其测试原理图如图2所示.

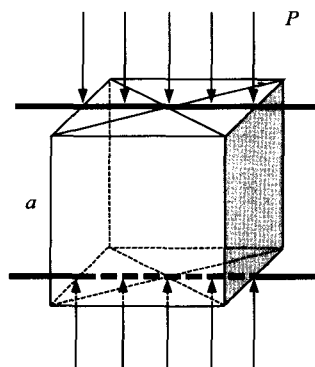


图2 劈裂拉伸强度测试原理

Fig. 2 The theory of loading process in split tensile test

充填体作为一种混凝土类材料,其单轴劈裂拉伸强度测试采用混凝土单轴劈裂拉伸强度试验的规则与方法.假定试块是均质、各向同性的线弹性体,由弹性力学可知,垂直于承载平面的拉应力为:

$$\sigma_t = -k \frac{2P}{\pi\alpha^2} \quad (1)$$

式中  $k$ — 充填体试件系数,  $k = 0.98$ ;

$P$ — 充填体试件断裂时, 所施加的最大载荷, N;

$a$ — 充填体试件边长, m.

## 2 单轴拉伸强度特性试验的结果分析

### 2.1 抗拉性能测试结果

充填体的拉伸性能强烈影响充填体整体的开裂、剪切和层面等的行为, 充填体在拉应力作用下的开裂是决定充填体非线性行为的重要因素, 也是影响充填体稳定性的主要因素, 同时也能间接衡量抗剪强度、冲击强度等重要指标. 混凝土拉伸应力-应变曲线是最能反映混凝土抗拉性能的试验方法<sup>[7]</sup>. 充填体作为一种混凝土材料, 通过拉

伸应力-应变曲线可以更真实地反映充填体的抗拉性能.

在本试验中, 对配比为尾砂固结材料: 尾砂(质量比) = 1:8、1:10、1:15、1:20, 质量浓度 = 70%、73% 共 8 组的各组试件在达到 28 d 龄期后, 各取两块测试其劈裂拉伸强度, 如果两个试件的强度误差值小于 10%, 则取其平均值; 反之, 则测定第 3 个试件, 取 3 个试件中相近两个的平均值, 作为该龄期充填体的劈裂拉伸强度值. 各组的劈裂拉伸强度特性试验结果见表 1. 典型试件的应力-应变曲线如图 3 所示, 各配比、浓度充填体试件抗压强度与尾砂固结材料的关系见图 4.

表 1 充填体试件单轴劈裂拉伸强度测试结果

Table 1 Measured results of backfill samples under split tensile tests

| 编号 | 配比   | 浓度/% | 峰值载荷/N | 峰值位移/mm | 平均峰值应变/% | 平均抗拉强度/MPa |
|----|------|------|--------|---------|----------|------------|
| 1  | 1:8  | 70   | 1 561  | 1.810   | 2.56     | 0.31       |
| 2  | 1:8  | 73   | 1 793  | 1.874   | 2.65     | 0.36       |
| 3  | 1:10 | 70   | 1 283  | 1.710   | 2.43     | 0.26       |
| 4  | 1:10 | 73   | 1 497  | 1.753   | 2.48     | 0.30       |
| 5  | 1:15 | 70   | 969    | 1.400   | 1.98     | 0.19       |
| 6  | 1:15 | 73   | 1 171  | 1.612   | 2.28     | 0.23       |
| 7  | 1:20 | 70   | 515    | 0.728   | 1.03     | 0.10       |
| 8  | 1:20 | 73   | 564    | 0.792   | 1.12     | 0.11       |

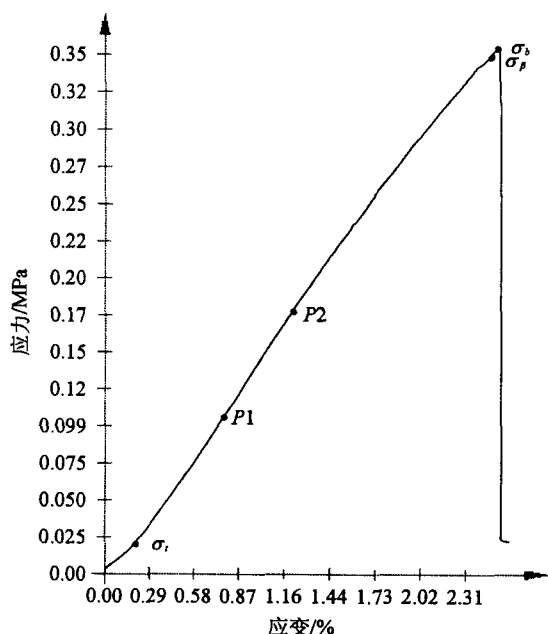


图 3 尾砂固结材料: 尾砂 = 1:8(质量比)、质量浓度 = 73% 的充填体试件应力-应变曲线

Fig. 3 The stress-strain curve of backfilling

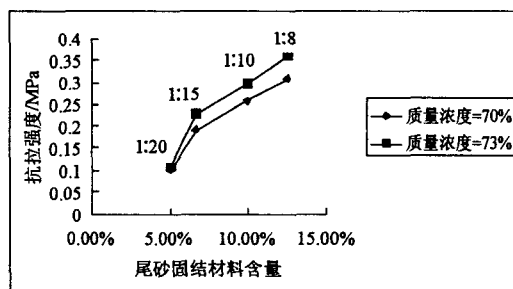


图 4 各配比、浓度的平均抗压强度与尾砂固结材料含量的关系

Fig. 4 Average tensile strength vs content of cement

### 2.2 抗拉强度特性分析

通过以上图和表格可以得出充填体试件的抗拉强度特性:

1) 由表 1 可知, 随着尾砂固结材料的增加, 充填体试件的抗拉强度增长很快, 从图 4 可以更直观的看出这种变化, 但是从图 4 可以看出, 在同一浓度下, 随着尾砂固结材料含量的增加, 充填体

抗拉强度的增长逐渐趋于缓慢. 充填体试件的抗拉强度随着尾砂固结材料的增加而提高的规律说明了随着尾砂固结材料的增加充填体试件的抗拉性能得到了改善, 抵抗破坏的能力增强, 从而有利于矿山生产, 矿山可以根据实际生产情况, 通过添加尾砂固结材料的含量来达到提高充填体抗拉强度的目的.

2) 由图3中充填体试件应力-应变曲线可以直观地看出, 一旦充填体试件所受的外载荷超出了峰值荷载<sup>[6]</sup>之后, 其抗拉强度迅速降低. 同时, 在充填体试件的承载平面会出现一条明显的裂纹, 裂纹贯通在瞬间完成, 这是因为充填体进入应力或荷载峰值过后应力集中得到急剧的释放, 大裂纹成为唯一的主导裂纹, 试件被“撕裂”为两半, 裂纹走向主要决定于充填体材料的非均一性, 充填材料完全表现为脆性断裂.

3) 由表1和图4可知, 提高充填料浆的浓度对充填体试件的抗拉强度有所提高, 这在高配比的组分比较中显得更为明显. 但是, 并不是浓度越高充填体的抗拉强度越高, 同时充填料浆的输送都采用管道输送的方式, 所以, 充填料浆的浓度还需要结合流动性是否满足管道输送的要求<sup>[7]</sup>.

4) 若充填体的许用抗拉强度用 $|\sigma_t|$ 表示, 则可以认为 $\sigma_t < |\sigma_t|$ 时充填体稳定<sup>[5]</sup>. 在实际的矿山生产中, 应根据上下盘围岩<sup>[8]</sup>以及充填体的具体情况, 确定充填体的许用抗拉强度, 并结合经济技术分析, 确定充填料浆的合适配合比和浓度, 使充填体达到维护采场稳定的作用.

### 3 结论

采场充填体属于人工支护的范畴, 其目的在于维护采场围岩的自身强度和支护结构的承载能力, 防止采场或巷道围岩的整体失稳或局部垮冒. 充填后与岩石接触的充填体, 对岩爆或各种地压活动引起的压缩冲击波经反射后产生的拉应力能够在岩石和充填体界面处部分反射, 降低了“切断”作用. 通过对充填体的单轴拉伸强度特性试验可以得出以下结论:

1) 充填体试件的拉伸强度有随尾砂固结材料含量和浓度的增加而提高的趋势, 但随着尾砂固结材料和浓度的增加, 充填体试件抗拉强度的提高逐渐趋于缓慢.

2) 通过对充填体试件抗拉强度的应力-应变曲线和抗压过程可以看出, 在外荷载超出充填体试件的峰值载荷后, 充填体试件迅速失去承载能力, 并在中心处出现和加载方向平行的一条大裂纹. 充填体的抗拉强度与充填体的致密性以及空隙率都有很大的关系. 在拉伸作用下, 充填体完全变现为一种脆性材料.

3) 矿山应该结合实际生产情况, 确定充填体的合理需用抗拉强度, 根据试验的结果并结合经济技术分析, 确定合适的配合比和浓度.

4) 通过对充填体试件单轴拉伸强度试验研究, 我们了解了充填体的力学参数以及力学规律, 可以为预防充填体断裂和垮冒做出正确的判断, 从而起到对矿山生产的积极指导作用.

### 参考文献:

- [1] 王新民, 肖卫国, 张钦礼. 深井矿山充填理论与技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005.
- [2] 邹勇, 徐国元, 谭政. 胶结充填体的力学性能研究[J]. 西部探矿工程, 2007(4): 88-90.
- [3] 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): 32-34.
- [4] 刘同有. 充填采矿技术及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- [5] 陈升平, 蒋俊玲, 李四年. 混凝土拉伸损伤演变的细胞学研究[J]. 工程力学, 2003, 20(5): 190-193.
- [6] 王志方. 充填体强度研究[J]. 化工矿山技术, 1996, 25(3): 13-16.
- [7] 古德生, 李夕兵. 现代金属矿床开采科学技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [8] 李一帆, 张建明, 邓飞, 等. 深部采空区尾砂胶结充填体强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 865-868.