

# (12)发明专利



(10) 授权公告号 CN 115655905 B (45) 授权公告日 2023.03.17

- (21)申请号 202211592816.9
- (22)申请日 2022.12.13
- (65) 同一申请的已公布的文献号 申请公布号 CN 115655905 A
- (43) 申请公布日 2023.01.31
- (73) 专利权人 北京科技大学 地址 100083 北京市海淀区学院路30号 专利权人 北京科技大学顺德创新学院
- (72) 发明人 李远 赵亮 范栋珏 涂才滔 吴梓琪 李庆文 乔兰
- (74) 专利代理机构 北京市广友专利事务所有限 责任公司 11237

专利代理师 张仲波

(51) Int.Cl.

GO1N 3/12 (2006.01)

(54) 发明名称

真三轴加载装置、岩石力学性能及损伤方向 性测试方法

(57)摘要

本发明涉及岩石力学真三轴试验技术领域, 特别是指一种真三轴加载装置、岩石力学性能及 损伤方向性测试方法,包括:高压密封舱体、竖向 刚性加载装置、柔性加载系统和超声波监测系 统,柔性加载系统包括环形支撑反力架,环形支 撑反力架安装于高压密封舱体内,环形支撑反力 架内侧面固定一对柔性活塞盒,柔性活塞盒内部 空腔嵌套聚氨酯橡胶皮囊,被测岩石置于一对所 述柔性活塞盒之间;超声波监测系统包括n个超 声波干耦合探头,其中,n/2个超声波干耦合探头 布置于被测岩石x方向的第一测面,n/2个超声波 干耦合探头布置于被测岩石x方向的第二测面。 4 案发明能够三向独立加载,真实反应被测岩石的 力学性能和损伤方向性(各向异性)。 (56) 对比文件

CN 103278389 A,2013.09.04 CN 105547849 A,2016.05.04

审查员 桂洁

权利要求书3页 说明书13页 附图6页

CN 115655905

1.一种岩石的力学性能测试方法,其特征在于,所述力学性能测试方法利用真三轴加载装置进行测试,包括:

将n/2个超声波干耦合探头布置于被测岩石x方向的第一测面,将n/2个超声波干耦合 探头布置于被测岩石x方向的第二测面;

采集第一测面的n/2个超声波干耦合探头信号,在同一测面两两之间的信号接收时间间隔,计算第一测面的平测波速;

采集第二测面的n/2个超声波干耦合探头信号,在同一测面两两之间的信号接收时间间隔,计算第二测面的平测波速;

采集第一测面的n/2个超声波干耦合探头与第二测面的n/2个超声波干耦合探头信号, 在对测面两两之间的信号接收时间间隔,计算对测波速;

利用第一测面和第二测面的所有平测波速的平均值,和所有对测波速的平均值,计算 被测岩石的泊松比和动态弹性模量;

其中,所述第一测面的平测波速通过如下方法计算:

$$V_{S} = \frac{l_{S}}{t_{S}},$$

其中,*l*<sub>s</sub>为第一测面不同超声波干耦合探头的布置间距,*t*<sub>s</sub>为第一测面不同超声波干耦 合探头之间的信号接收时间间隔;

所述第二测面的平测波速通过如下方法计算:

$$V_{S}' = \frac{l_{S}'}{t_{S}'},$$

其中,*l*<sub>s</sub>'为第二测面不同超声波干耦合探头的布置间距,*t*<sub>s</sub>'为第二测面不同超声波干耦合探头之间的信号接收时间间隔;

对测波速通过如下方法计算:

$$V_P = \frac{l_P}{t_P},$$

其中,*l*<sub>P</sub>为第一测面的超声波干耦合探头与第二测面的超声波干耦合探头的间距,*t*<sub>P</sub>为 第一测面的超声波干耦合探头与第二测面的超声波干耦合探头之间的信号接收时间间隔; 被测岩石的泊松比和动态弹性模量通过如下方法计算;

$$\mu = \frac{\left(\overline{V_p} / \overline{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\overline{V_p} / \overline{V_s}\right)^2 - 2}, \quad E_d = \rho \overline{V_s}^2 \frac{3\left(\overline{V_p} / \overline{V_s}\right)^2 - 4}{\left(\overline{V_p} / \overline{V_s}\right)^2 - 1},$$

其中, $\mu$ 为泊松比, $E_a$ 为动态弹性模量, $\overline{V_P}$ 为所有对测波速的平均值, $\overline{V_s}$ 为第一测面和 第二测面的所有平测波速的平均值,P为被测岩石的密度。

2.一种岩石的损伤方向性测试方法,其特征在于,所述损伤方向性测试方法利用真三轴加载装置进行测试,包括:

建立直角坐标系0-XYZ;

采集第一测面的n/2个超声波干耦合探头与第二测面的n/2个超声波干耦合探头信号, 在对测面得到两两之间信号的波速矢量;

获取每个波速矢量投影至直角坐标系0-XYZ的x轴、y轴和z轴的波速分量,构建波速分量矩阵;

构造测试矩阵,通过波速分量矩阵计算测试矩阵,并计算测试矩阵的特征值和特征向量;

通过测试矩阵的特征值表征各向异性矢量椭球标准方程,通过测试矩阵的特征向量表 征被测岩石的各向异性;

其中,所述波速分量矩阵表述为:

$$N = \begin{bmatrix} x_1^2 & y_1^2 & z_1^2 & 2x_1y_1 & 2x_1z_1 & 2y_1z_1 \\ x_2^2 & y_2^2 & z_2^2 & 2x_2y_2 & 2x_2z_2 & 2y_2z_2 \\ x_3^2 & y_3^2 & z_3^2 & 2x_3y_3 & 2x_3z_3 & 2y_3z_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{\frac{(n)}{2}}^2 & y_{\frac{(n)}{2}}^2 & z_{\frac{(n)}{2}}^2 & 2x_{\frac{(n)}{2}}^2 & 2x_{\frac{(n)}{2}}^2 & 2y_{\frac{(n)}{2}}^2 z_{\frac{(n)}{2}}^2 \end{bmatrix},$$

其中, $x_i$ 、 $y_i$ 、 $z_i$ 分别为每个波速矢量投影至直角坐标系0-XYZ的x轴、y轴和z轴的波速分量, $i=1,2,3...,(\frac{n}{2})^2$ ,

测试矩阵表述为:

$$m = \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \end{bmatrix}, \pm p, A, B, C, D, E, F$$
 为未知量;

- -

通过求解方程: Nm = d, 计算测试矩阵m的未知量 A, B, C, D, E, F,

计算测试矩阵m的特征值入,入,入,及其对应的特征向量,测试矩阵的特征值表征的各向异性矢量椭球标准方程为:

$$\frac{x_i^2}{\lambda_0} + \frac{y_i^2}{\lambda_1} + \frac{z_i^2}{\lambda_2} = 1$$
,

其中, $\sqrt{\lambda_0}$ , $\sqrt{\lambda_1}$ , $\sqrt{\lambda_2}$  表征各向异性矢量椭球标准方程半主轴长,表征对应波速矢量  $v_{max}$ ,  $v_{mean}$ ,  $v_{min}$ 的大小,特征值 $\lambda_0$ 、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 对应的特征向量表征对应波速矢量  $v_{max}$ ,  $v_{mean}$ ,  $v_{min}$ 的方向,其中, $v_{max}$ 为 $\sqrt{\lambda_0}$ 对应的波速矢量, $v_{mean}$ 为 $\sqrt{\lambda_1}$ 对应的波速矢量,  $v_{min}$ 为 $\sqrt{\lambda_2}$ 对应的波速矢量;

由 $(\frac{n}{2})^2$ 个波速矢量表征被测岩石的损伤方向性。

## 真三轴加载装置、岩石力学性能及损伤方向性测试方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及岩石力学真三轴试验技术领域,特别是指一种真三轴加载装置、岩石力学性能及损伤方向性测试方法。

#### 背景技术

[0002] 对岩土材料的力学及变形性能试验研究是建立岩土本构模型的基础,土工试验也 是用来用来完善岩土体的发展理论及计算方法的有效手段,尤其是关于岩土材料三向受力 变形特征的研究对于现场设计和施工具有指导性意义。真三轴仪加载试验装置作为土木工 程领域的室内试验设备,可真实模拟岩土体的三向受力状态,即对长方体试件三个方向(x 方向、y方向和z方向)上分别单独施加σ<sub>3</sub>、 σ<sub>2</sub>、 σ<sub>1</sub>的应力分量,通过对三者应力分量的组 合,研究主应力与应变的关系及强度特征,即岩土体的本构关系。真三轴试验相较于传统常 规三轴试验可以更好的研究复杂应力环境下土体的力学及强度特征,从而具有广泛应用。

[0003] 真三轴仪的研发最早可追溯到上世纪三十年代,瑞典人W.K.jellman设计六块刚 性板实现对试件三向独立加载的功能,此类加载方式可归类为全刚性加载。随着科技的进 步,真三轴仪逐步发展出全柔性加载和半刚性加载的方式,目前研究及应用最广泛的是半 刚性加载方式,也称为混合边界加载方式,相较于全刚性加载可能出现的三方向相互干扰 碰撞以及全柔性加载时出现橡胶囊体偏移、试件受力不均等问题,半刚性加载在一定程度 上可以解决上述问题,但由于岩土体的变形不均匀性,试件加载过程会在传力装置加载端 产生较大的摩擦阻力,使试件(被测岩石)除受到三向加载应力外还会受到剪应力的影响从 而导致试验分析的复杂性,影响试验结果的可靠性。如何在真三轴仪加载过程中尽可能减 少或消除摩擦阻力带来的影响成为现如今真三轴仪研究的重点。

[0004] 现有的真三轴仪通常采用在内部安装位移传感器或在试件上贴应变片等方式记录试件(被测岩石)加载过程中的应力-应变情况,通过导出试验结果分析得到试件(被测岩石)的弹性模量及泊松比以及岩石损伤各向异性分析,但是现有方法的测试结果可靠性较差,无法真实反应岩石的力学性能和损伤各向异性。

#### 发明内容

[0005] 为了解决现有技术中岩石三向加载测试结果可靠性较差的技术问题,本发明的一个实施例提供了一种真三轴加载装置、岩石力学性能及损伤方向性测试方法,所述真三轴加载装置包括,高压密封舱体、竖向刚性加载装置、柔性加载系统和超声波监测系统,其中, [0006] 所述高压密封舱体包括底盘和环形密封盘,所述底盘上开设底盘进油孔和底盘出油孔,所述环形密封盘开设舱体排气孔,通过所述底盘进油孔向所述高压密封舱体注入液压油;

[0007] 所述柔性加载系统包括环形支撑反力架,所述环形支撑反力架安装于所述高压密封舱体内,所述环形支撑反力架内侧面固定一对柔性活塞盒,所述柔性活塞盒内部空腔嵌 套聚氨酯橡胶皮囊,被测岩石置于一对所述柔性活塞盒之间;

[0008] 所述柔性活塞盒开设活塞盒进油孔和活塞盒出油孔,通过所述活塞盒进油孔向所述柔性活塞盒内注入液压油,挤压所述聚氨酯橡胶皮囊膨胀;

[0009] 所述超声波监测系统包括数字化声发射控制器和n个超声波干耦合探头,其中,n/ 2个超声波干耦合探头布置于被测岩石x方向的第一测面,n/2个超声波干耦合探头布置于 被测岩石x方向的第二测面;

[0010] n个所述超声波干耦合探头连接至所述数字化声发射控制器。

[0011] 在一个较佳的实施例中,所述竖向刚性加载装置包括柱墩,所述柱墩置于所述高 压密封舱体内,安装于所述底盘上,所述柱墩上安装可滑动的下垫块;

[0012] 所述竖向刚性加载装置还包括柱塞,所述柱塞底部固定万向滑轨,并伸入到所述 高压密封舱体内,所述万向滑轨底部安装可滑动的上压头;

[0013] 被测岩石置于所述下垫块与所述上压头之间。

[0014] 在一个较佳的实施例中,所述万向滑轨底部嵌入x方向滑体,所述x方向滑体的两端固定x方向滑轨挡板;所述x方向滑体下侧固定y方向滑体,所述y方向滑体的两端固定y方向滑轨挡板;所述上压头顶部嵌入所述y方向滑体底部;

[0015] 所述x方向滑体被配置为在万向滑轨上沿x方向往复滑动,所述上压头被配置为在 y方向滑体上沿y方向往复滑动。

[0016] 在一个较佳的实施例中,所述柱墩上安装引伸计固定架,所述引伸计固定架上安装引伸计。

[0017] 在一个较佳的实施例中,所述高压密封舱体顶部采用环形密封盘密封,所述环形 密封盘上开设舱体排气孔。

[0018] 在一个较佳的实施例中,所述柔性加载系统包括还高压油泵、油泵控制阀和长效 伺服保载仪,所述油泵控制阀控制所述高压油泵向所述高压密封舱体内注入液压油;

[0019] 所述长效伺服保载仪连接所述油泵控制阀,使所述高压密封舱体内的油压恒定。

[0020] 本发明的另一个实施例提供了一种岩石的力学性能测试方法,所述力学性能测试方法利用真三轴加载装置进行测试,包括:

[0021] 将n/2个超声波干耦合探头布置于被测岩石x方向的第一测面,将n/2个超声波干耦合探头布置于被测岩石x方向的第二测面;

[0022] 采集第一测面的n/2个超声波干耦合探头信号,在同一测面两两之间的信号接收时间间隔,计算第一测面的平测波速;

[0023] 采集第二测面的n/2个超声波干耦合探头信号,在同一测面两两之间的信号接收时间间隔,计算第二测面的平测波速;

[0024] 采集第一测面的n/2个超声波干耦合探头与第二测面的n/2个超声波干耦合探头 信号,在对测面两两之间的信号接收时间间隔,计算对测波速;

[0025] 利用第一测面和第二测面的所有平测波速的平均值,和所有对测波速的平均值, 计算被测岩石的泊松比和动态弹性模量。

[0026] 在一个较佳的实施例中,所述第一测面的平测波速通过如下方法计算:

 $[0027] \qquad V_S = \frac{l_S}{t_S},$ 

[0028] 其中, *l*<sub>s</sub>为第一测面不同超声波干耦合探头的布置间距, *t*<sub>s</sub>为第一测面不同超声 波干耦合探头之间的信号接收时间间隔;

[0029] 所述第二测面的平测波速通过如下方法计算:

$$[0030] \quad V_{S}' = \frac{l_{S}'}{t_{S}'},$$

[0031] 其中,*l*<sub>s</sub>'为第二测面不同超声波干耦合探头的布置间距,*t*<sub>s</sub>'为第二测面不同超声 波干耦合探头之间的信号接收时间间隔;

[0032] 对测波速通过如下方法计算:

$$[0033] \qquad V_P = \frac{l_P}{t_P} ,$$

[0034] 其中, **1**<sub>p</sub>为第一测面的超声波干耦合探头与第二测面的超声波干耦合探头的间距, **t**<sub>p</sub>为第一测面的超声波干耦合探头与第二测面的超声波干耦合探头之间的信号接收时间间隔;

[0035] 被测岩石的泊松比和动态弹性模量通过如下方法计算:

$$[0036] \qquad \mu = \frac{\left(\overline{V_{P}}/\overline{V_{S}}\right)^{2} - 2}{2\left(\overline{V_{P}}/\overline{V_{S}}\right)^{2} - 2}, \quad E_{d} = \rho \overline{V_{S}}^{2} \frac{3\left(\overline{V_{P}}/\overline{V_{S}}\right)^{2} - 4}{\left(\overline{V_{P}}/\overline{V_{S}}\right)^{2} - 1},$$

[0037] 其中, $\mu$ 为泊松比, $E_a$ 为动态弹性模量, $\overline{V_P}$ 为所有对测波速的平均值, $\overline{V_s}$ 为第一测面和第二测面的所有平测波速的平均值,P为被测岩石的密度。

[0038] 本发明的又一个实施例提供了一种岩石的损伤方向性测试方法,所述损伤方向性测试方法利用真三轴加载装置进行测试,包括:

[0039] 建立直角坐标系0-XYZ;

[0040] 采集第一测面的n/2个超声波干耦合探头与第二测面的n/2个超声波干耦合探头 信号,在对测面得到两两之间信号的波速矢量;

[0041] 获取每个波速矢量投影至直角坐标系0-XYZ的x轴、y轴和z轴的波速分量,构建波速分量矩阵;

[0042] 构造测试矩阵,通过波速分量矩阵计算测试矩阵,并计算测试矩阵的特征值和特征向量;

[0043] 通过测试矩阵的特征值表征各向异性矢量椭球标准方程,通过测试矩阵的特征向量表征被测岩石的损伤方向性。

[0044] 在一个较佳的实施例中,所述波速分量矩阵表述为:

$$\begin{bmatrix} 0045 \end{bmatrix} \quad N = \begin{bmatrix} x_1^2 & y_1^2 & z_1^2 & 2x_1y_1 & 2x_1z_1 & 2y_1z_1 \\ x_2^2 & y_2^2 & z_2^2 & 2x_2y_2 & 2x_2z_2 & 2y_2z_2 \\ x_3^2 & y_3^2 & z_3^2 & 2x_3y_3 & 2x_3z_3 & 2y_3z_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{\binom{n}{2}^2}^2 & y_{\binom{n}{2}^2}^2 & z_{\binom{n}{2}^2}^2 & 2x_{\binom{n}{2}^2}^2 & 2x_{\binom{n}{2}^2}^2 & 2x_{\binom{n}{2}^2}^2 & 2x_{\binom{n}{2}^2}^2 \\ \end{bmatrix},$$

[0046] 其中, $x_i \, v_i \, z_i$ 分别为每个波速矢量投影至直角坐标系0-XYZ的x轴、y轴和z轴的波速分量, $i=1,2,3...,(\frac{n}{2})^2$ ,

[0047] 测试矩阵表述为:

$$\begin{bmatrix} 0048 \end{bmatrix} \qquad m = \begin{vmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \end{vmatrix},$$

[0049] 其中, A, B, C, D, E, F 为未知量,

[0050] 通过求解方程: Nm = d, 计算测试矩阵 m 的未知量 A, B, C, D, E, F;

**F17** 

[0052] 计算测试矩阵 m的特征值 <sup>2</sup>, <sup>2</sup>, <sup>2</sup>, <sup>2</sup>及其对应的特征向量,测试矩阵的特征值表征的各向异性矢量椭球标准方程为:

[0053]  $\frac{x_i^2}{\lambda_0} + \frac{y_i^2}{\lambda_1} + \frac{z_i^2}{\lambda_2} = 1$ ,

[0054] 其中, $\sqrt{\lambda_0}$ , $\sqrt{\lambda_1}$ , $\sqrt{\lambda_2}$  表征各向异性矢量椭球标准方程半主轴长,表征对应波速矢量 $v_{\text{max}}$ , $v_{\text{mean}}$ , $v_{\text{min}}$ 的大小,特征值 $\lambda_0$ 、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 对应的特征向量表征对应波速矢量 $v_{\text{max}}$ , $v_{\text{mean}}$ , $v_{\text{min}}$ 的方向,其中, $v_{\text{max}}$ 为 $\sqrt{\lambda_0}$ 对应的波速矢量, $v_{\text{mean}}$ 为 $\sqrt{\lambda_1}$ 对应的波速矢量, $v_{\text{min}}$ 为 $\sqrt{\lambda_2}$ 对应的波速矢量;

[0055]  $\operatorname{h}(\frac{n}{2})^2$ 个波速矢量表征被测岩石的损伤方向性。

[0056] 本发明实施例提供的技术方案带来的有益效果至少包括:

[0057] 本发明提出一种真三轴加载装置、岩石力学性能及损伤方向性测试方法,实现对 长方体尺寸被测岩石进行三向(x方向、y方向和z方向)独立加载,在竖向加载设计万向滑 轨,可保证在被测岩石受力压缩过程中,上压头及下垫块随被测岩石变形相对滑动,削弱其 他方向的加载时带来的摩擦阻力影响测试结果的问题。

[0058] 本发明提出一种真三轴加载装置、岩石力学性能及损伤方向性测试方法,被测岩石x方向由高压密封舱体内注入液压油提供加载应力,柔性活塞盒注入液压油的方式,可以很好地将被测岩石y方向通过聚氨酯橡胶皮囊液实现柔性贴合加载,避免了全柔性加载应力复杂难以解释的问题。柱塞和底盘分别设置平整面和凹槽确保和既有常规刚性岩石力学试验机连接,提升装置整体的组装通用性。

[0059] 本发明提出一种真三轴加载装置、岩石力学性能及损伤方向性测试方法,在现有 刚性岩石力学加载设备的基础上实现功能拓展,结构简单,操作方便且互相独立不受影响, 是一种较好的复杂应力加载装置,可适用于多种试件尺寸,提高了试验装置的通用性,降低 试验成本。

[0060] 本发明提出一种真三轴加载装置、岩石力学性能及损伤方向性测试方法,在被测 岩石x方向的第一测面和x方向的第二测面均布置n/2个超声波干耦合探头,采集被测岩石 加载变形过程中波速,通过波速计算被测岩石的泊松比和动态弹性模量,以及表征被测岩 石损伤方向性(各向异性),建立波速椭球方程进而研究被测岩石加载过程中内部裂隙发展 情况,能够真实反应被测岩石的力学性能和损伤方向性(各向异性),对岩土体力学性能研 究具有重要意义。

[0061] 本发明提出一种真三轴加载装置、岩石力学性能及损伤方向性测试方法,可对 MTS-815刚性岩石力学液压伺服力学系统及TAW-2000电液伺服岩石三轴试验仪等设备改进,扩展常规刚性单轴或三轴试验机功能,结合常规加载框架对三轴实验舱体进行改进实现真三轴加载,提升所述真三轴加载试验装置的组装通用性。

#### 附图说明

[0062] 为了更清楚地说明本发明实施例中的技术方案,下面将对实施例描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0063] 图1是本发明一种真三轴加载装置的高压密封舱体的俯视图。

[0064] 图2是本发明一种真三轴加载装置在图1中A-A剖视角度下的整体结构示意图。

[0065] 图3是本发明一种真三轴加载装置在图1中B-B剖视角度下的整体结构示意图。

[0066] 图4是本发明一种真三轴加载装置的万向滑轨的结构示意图。

[0067] 图5是本发明一种真三轴加载装置的环形支撑反力架内侧面固定柔性活塞盒的结构示意图。

[0068] 图6是本发明被测岩石上布置超声波干耦合探头的结构示意图。

#### 具体实施方式

[0069] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0070] 本发明的说明书和权利要求书及上述附图中的术语"第一"、"第二"、"第三""第 四"等(如果存在)是用于区别类似的对象,而不必用于描述特定的顺序或先后次序。应该理 解这样使用的数据在适当情况下可以互换,以便这里描述的本发明的实施例例如能够以除 了在这里图示或描述的那些以外的顺序实施。此外,术语"包括"和"具有"以及他们的任何 变形,意图在于覆盖不排他的包含,例如,包含了一系列步骤或单元的过程、方法、系统、产 品或设备不必限于清楚地列出的那些步骤或单元,而是可包括没有清楚地列出的或对于这 些过程、方法、产品或设备固有的其它步骤或单元。

[0071] 根据本发明的实施例,提供一种真三轴加载装置,对岩石破坏过程中的三向(x方向、y方向和z方向)应力测试,以及对岩石破坏过程中的力学性能和损伤方向性测试。为了 使本发明的更加清晰的说明,进行如下定义:z方向对应岩石的<sup>G1</sup>应力方向,y方向对应岩石 的<sup>G2</sup>应力方向,x方向对应岩石的<sup>G3</sup>应力方向,需满足<sup>G1</sup>>G2>G3的加载条件。

[0072] 结合图1至图6,根据本发明的实施例,一种真三轴加载装置包括:高压密封舱体1、 竖向刚性加载装置2、柔性加载系统3和超声波监测系统4。

[0073] 高压密封舱体1整体呈直立圆柱状,包括底盘103、中间段舱体102、环形密封盘101 和柱塞密封盘104。高压密封舱体1顶部采用环形密封盘101密封。中间段舱体102分别与环 形密封盘101和底盘103采用12.9级高强螺栓及伺服胶圈密封拧接,高压密封舱体1内壁光 滑。在一些实施例中,底盘103可根据不同型号试验机更换匹配。

[0074] 底盘103上开设底盘进油孔105、底盘出油孔106和数据传输孔107,环形密封盘101 上开设舱体排气孔100。通过底盘进油孔105向高压密封舱体1注入液压油,通过舱体排气孔 100和底盘出油孔106出油作为高压密封舱体1内注满液压油的标识。

[0075] 在一个优选的实施例中,环形密封盘101上设置有排气阀门,以在高压密封舱体1 注入液压油时排气,保证高压密封舱体1内部压力稳定。

[0076] 底盘进油孔105通过柔性加载系统3向高压密封舱体1内注入液压油。柔性加载系统3下文中详细阐述。

[0077] 超声波监测系统4的数据线通过数据传输孔107接入到高压密封舱体1内,连接至超声波监测系统4的超声波干耦合探头,以导出数据。超声波监测系统4下文中详细阐述。

[0078] 根据本发明的实施例,竖向刚性加载装置2包括柱塞210和柱墩207,柱墩207置于 高压密封舱体1内,安装于底盘103上,具体地,底盘103上开设凹槽,柱墩207安装于底盘103 的凹槽内。柱墩207上安装可滑动的下垫块206,具体地,下垫块206与柱墩207上部通过凹槽 嵌接,使下垫块206可以在凹槽内相对柱墩207滑动。

[0079] 柱塞210插入环形密封盘101,柱塞密封盘104与环形密封盘101通过8根12.9级高强螺栓套接,并通过伺服胶圈密封。

[0080] 柱塞210一端固定万向滑轨200,并伸入到高压密封舱体1内,万向滑轨200底部安装可滑动的上压头205。被测岩石5置于下垫块206与上压头205之间。

[0081] 具体的实施例中,万向滑轨200顶部与柱塞210底部使用12.9级高强螺栓固定连接。

[0082] 在具体的实施例中,万向滑轨200底部嵌入x方向滑体202,x方向滑体202的两端固定x方向滑轨挡板209。x方向滑体202下侧固定y方向滑体201,y方向滑体201的两端固定y方向滑轨挡板208。上压头205顶部嵌入y方向滑体201底部,从而实现在万向滑轨200底部安装上压头205。

[0083] 根据本发明的实施例,x方向滑体202被配置为在万向滑轨200上沿x方向往复滑动,上压头205被配置为在y方向滑体201上沿y方向往复滑动。具体地,万向滑轨200通过燕尾槽结构嵌入x方向滑体202,上压头205通过燕尾槽结构嵌入y方向滑体201。

[0084] x方向滑体202在万向滑轨200上沿x方向往复滑动,当上压头205在y方向滑体201 上沿y方向往复滑动时,上压头205相对万向滑轨200沿y方向往复滑动。

[0085] x方向滑轨挡板209对万向滑轨200沿x方向往复滑动进行限位,y方向滑轨挡板208 对上压头205沿y方向往复滑动进行限位。在一个优选的实施例中,万向滑轨200可提供y方 向±40mm的自由滑动量程,x方向±30mm的自由滑动量程。

[0086] 根据本发明的实施例,柱墩207上安装引伸计固定架203,引伸计固定架203上安装 引伸计(应变计)204。具体地,伸计固定架203通过螺纹连接的方式固定在柱墩207上。将引 伸计204固定在引伸计固定架203上,当柱塞210下压,带动上压头205下压,被测岩石5在上 压头205和下垫块206之间被加载挤压,引伸计204获取被测岩石5竖向加载(z方向)时被测 岩石5的**5**应力方向的应力情况。

[0087] 在具体的实施例中,被测岩石5放置于上压头205和下垫块206之间时,应当与测岩石5的接触面保持水平,竖向刚性加载装置2各组件保持安装轴向一致性,确保竖向应力均匀传递。

[0088] 本发明通过万向滑轨200,以及下垫块206与柱墩207上部的凹槽嵌接,两者均保证 了被测岩石5的可滑动性,削弱被测岩石5加载过程中因被测岩石5变形产生的不同方向上 的摩擦阻力,从而提高试验精度。

[0089] 根据本发明的实施例,柔性加载系统3包括油泵控制阀300、高压油泵301、精准油 压表302、长效伺服保载仪303和压力控制器304。

[0090] 油泵控制阀300控制高压油泵301向高压密封舱体1内注入液压油。通过长效伺服 保载仪303控制油泵控制阀300,使高压密封舱体1内的油压恒定。

[0091] 具体地,高压油泵301连接油泵控制阀300,油泵控制阀300连接长效伺服保载仪303,长效伺服保载仪303连接压力控制器304。油泵控制阀300通过高压油管连接至底盘进油孔105,从而向高压密封舱体1内注入液压油。

[0092] 根据本发明的实施例,柔性加载系统3还包括环形支撑反力架305。环形支撑反力架305安装于高压密封舱体1内,固定在底盘103上方。环形支撑反力架305内侧面固定一对 柔性活塞盒306,柔性活塞盒306内部空腔嵌套聚氨酯橡胶皮囊307,被测岩石5置于一对柔 性活塞盒306之间。在具体的实施例中,柔性活塞盒306使用12.9级高强螺栓固定在环形支 撑反力架305内侧两端。

[0093] 具体的实施例中,环形支撑反力架305与一对柔性活塞盒306分别通过8根螺栓连接固定。聚氨酯橡胶皮囊307嵌套在柔性活塞盒306的内部空腔,聚氨酯橡胶皮囊307与一对

柔性活塞盒306之间的被测岩石5的尺寸对应。在一些实施例中,聚氨酯橡胶皮囊307的尺寸稍大于被测岩石5在y方向(**9**2应力方向)截面的尺寸。

明书

[0094] 柔性活塞盒306开设活塞盒进油孔308和活塞盒出油孔309,通过活塞盒进油孔308 向柔性活塞盒306内的聚氨酯橡胶皮囊307内部注入液压油,挤压聚氨酯橡胶皮囊307,使聚 氨酯橡胶皮囊307膨胀,从而使被测岩石5在一对柔性活塞盒306之间施加y方向(<sup>•</sup> 应力方向)柔性加载。

[0095] 在一些实施例中,聚氨酯橡胶皮囊307参数如下:硬度65±3HA,拉伸强度≥30MPA, 扯断伸长率≥600%,撕裂强度≥50KN/m,扯断永久变形≤25%,阿克隆磨耗≤0.1,耐热氧老 化≤15%。聚氨酯橡胶皮囊307对被测岩石5在y方向(**σ**2应力方向)提供最大40MPa的柔性加 载应力。

[0096] 具体的实施例中,活塞盒进油孔308通过高压油管连接至底盘进油孔105,活塞盒 出油孔309通过高压油管连接至底盘出油孔106,油泵控制阀300通过底盘进油孔105向高压 密封舱体1内注入液压油的同时,通过活塞盒进油孔308向柔性活塞盒306内的聚氨酯橡胶 皮囊307内部注入液压油。

[0097] 向柔性活塞盒306内的聚氨酯橡胶皮囊307内部注入液压油的过程中,活塞盒出油 孔309连接底盘出油孔106进行排气,保证被测岩石5在y方向(**5**应力方向)均匀施加压力。

[0098] 油泵控制阀300通过底盘进油孔105向高压密封舱体1内注入液压油,液压油充满 高压密封舱体1后,高压密封舱体1内的液压油对被测岩石5在x方向(**5**应力方向)柔性加 载。

[0099] 在一些实施例中,高压密封舱体1内的液压油对被测岩石5在x方向(5%应力方向) 提供最大70MPa的柔性加载应力。

[0100] 根据本发明的实施例,通过柱塞210和万向滑轨200对被测岩石5在竖向(z方向、 应力方向)施加载荷,聚氨酯橡胶皮囊307对被测岩石5在y方向(2应力方向)施加柔性载 荷,注入高压密封舱体1内的液压油直接对被测岩石5在x方向(3应力方向)施加柔性载 荷。

[0101] 本发明通过万向滑轨200,以及下垫块206与柱墩207上部的凹槽嵌接,两者均保证 了被测岩石5的可滑动性,削弱被测岩石5在y方向(**5**应力方向)和x方向(**5**应力方向)变 形时与上压头205和下垫块206的摩擦阻力,保证三向加载的独立性,从而提高试验精度。

[0102] 根据本发明的实施例,超声波监测系统4包括高频数字化示波器402、数字化声发射控制器401和n个超声波干耦合探头400。

[0103] 高频数字化示波器402连接数字化声发射控制器401,数字化声发射控制器401连接n个超声波干耦合探头400。在一些实施例中,数字化声发射控制器401工作频率可实时设置为10KHz-260KHz,具体,根据被测岩石5的岩石特性设置相应工作频率。

[0104] n个超声波干耦合探头400中,n/2个超声波干耦合探头400布置于被测岩石5在x方向的第一测面,n/2个超声波干耦合探头400布置于被测岩石5在x方向的第二测面。

[0105] n个超声波干耦合探头400连接至数字化声发射控制器401。具体地,数字化声发射控制器401通过数据线穿过数据传输孔107接入到高压密封舱体1内,连接至超声波监测系统4的n个超声波干耦合探头400,以导出数据。

[0106] 下面以8个超声波干耦合探头400为例,对超声波干耦合探头400布置于被测岩石5

的方式进行说明。结合图6,本实施例中的8个超声波干耦合探头400分别编号为S1、S2、S3、S4、S5、S6、S7和S8。其中,S1、S2、S3和S4号超声波干耦合探头400布置于被测岩石5在x方向的第一测面的四个角;S5、S6、S7和S8号超声波干耦合探头400布置于被测岩石5在x方向的第二测面的四个角。

[0107] 当一个超声波干耦合探头400发出超声波信号时,另一个超声波干耦合探头400接收超声波信号,总共可测得*C*<sup>2</sup> = 28组波速数据。

[0108] 当在第一测面S1、S2、S3和S4号中的一个超声波干耦合探头400发出超声波信号时,在第一测面的其他三个超声波干耦合探头400接收超声波信号,则可测得6组波速数据,将该情况测得的波速数据定义为第一测面的平测波速。

[0109] 同样地,当在第二测面S5、S6、S7和S8号中的一个超声波干耦合探头400发出超声 波信号时,在第二测面的其他三个超声波干耦合探头400接收超声波信号,则可测得6组波 速数据,将该情况测得的波速数据定义为第二测面的平测波速。

[0110] 当在第一测面S1、S2、S3和S4号中的一个超声波干耦合探头400发出超声波信号时,在第二测面的S5、S6、S7和S8号超声波干耦合探头400接收超声波信号,或者在第二测面S5、S6、S7和S8号中的一个超声波干耦合探头400发出超声波信号时,在第一测面S1、S2、S3和S4号超声波干耦合探头400接收超声波信号,则可测得16组波速数据,将该情况测得的波速数据定义为对测波速。

[0111] 根据本发明的实施例提供一种岩石的力学性能测试方法,包括:

[0112] 将n/2个超声波干耦合探头400布置于被测岩石5在x方向的第一测面,将n/2个超声波干耦合探头400布置于被测岩石5在x方向的第二测面。

[0113] 采集第一测面的n/2个超声波干耦合探头信号,在同一测面两两之间的信号接收时间间隔,计算第一测面的平测波速。

[0114] 具体地,第一测面的平测波速通过如下方法计算:

$$[0115] \quad V_S = \frac{l_S}{t_S},$$

[0116] 其中, *l*<sub>s</sub>为第一测面不同超声波干耦合探头的布置间距, *l*<sub>s</sub>为第一测面不同超声 波干耦合探头之间的信号接收时间间隔。

[0117] 采集第二测面的n/2个超声波干耦合探头信号,在同一测面两两之间的信号接收时间间隔,计算第二测面的平测波速。

[0118] 具体地,第二测面的平测波速通过如下方法计算:

$$[0119] \quad V_{S}' = \frac{l_{S}'}{t_{S}'},$$

[0120] 其中,*l*<sub>s</sub>'为第二测面不同超声波干耦合探头的布置间距,*t*<sub>s</sub>'为第二测面不同超声 波干耦合探头之间的信号接收时间间隔。

[0121] 采集第一测面的n/2个超声波干耦合探头与第二测面的n/2个超声波干耦合探头 信号,在对测面两两之间的信号接收时间间隔,计算对测波速。

[0122] 具体地,对测波速通过如下方法计算:

$$[0123] \quad V_{P} = \frac{l_{P}}{t_{P}},$$

[0124] 其中, **1**<sub>p</sub>为第一测面的超声波干耦合探头与第二测面的超声波干耦合探头的间距, **t**<sub>p</sub>为第一测面的超声波干耦合探头与第二测面的超声波干耦合探头之间的信号接收时间间隔。

[0125] 利用第一测面和第二测面的所有平测波速的平均值,和所有对测波速的平均值, 计算被测岩石的泊松比和动态弹性模量。

[0126] 具体地,被测岩石5的泊松比和动态弹性模量通过如下方法计算:

$$[0127] \quad \mu = \frac{\left(\overline{V_{P}}/\overline{V_{S}}\right)^{2} - 2}{2\left(\overline{V_{P}}/\overline{V_{S}}\right)^{2} - 2}, \quad E_{d} = \rho \overline{V_{S}}^{2} \frac{3\left(\overline{V_{P}}/\overline{V_{S}}\right)^{2} - 4}{\left(\overline{V_{P}}/\overline{V_{S}}\right)^{2} - 1},$$

[0128] 其中, $\mu$ 为泊松比, $E_{a}$ 为动态弹性模量, $\overline{V_{P}}$ 为所有对测波速的平均值, $\overline{V_{s}}$ 为第一测面和第二测面的所有平测波速的平均值, $\rho$ 为被测岩石的密度。

[0129] 由此,通过本发明提供一种真三轴加载装置对被测岩石5施加载荷的过程中,测试 被测岩石5的力学性能(泊松比和动态弹性模量)。

[0130] 根据本发明的实施例,提供一种岩石的损伤方向性测试方法,包括:

[0131] 建立直角坐标系0-XYZ。

[0132] 采集第一测面的n/2个超声波干耦合探头与第二测面的n/2个超声波干耦合探头 信号,在对测面得到两两之间信号的波速矢量(对测波速的矢量)。

[0133] 获取每个波速矢量投影至直角坐标系0-XYZ的x轴、y轴和z轴的波速分量,构建波速分量矩阵。

[0134] 具体地,波速分量矩阵表述为:

$$\begin{bmatrix} 0135 \end{bmatrix} \quad N = \begin{bmatrix} x_1^2 & y_1^2 & z_1^2 & 2x_1y_1 & 2x_1z_1 & 2y_1z_1 \\ x_2^2 & y_2^2 & z_2^2 & 2x_2y_2 & 2x_2z_2 & 2y_2z_2 \\ x_3^2 & y_3^2 & z_3^2 & 2x_3y_3 & 2x_3z_3 & 2y_3z_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{\binom{n}{2}}^2 & y_{\binom{n}{2}}^2 & z_{\binom{n}{2}}^2 & 2x_{\binom{n}{2}}^2 y_{\binom{n}{2}}^2 & 2x_{\binom{n}{2}}^2 z_{\binom{n}{2}}^2 z_{\binom{n}{2}}^2 \end{bmatrix},$$

[0136] 其中, $x_i \, v_i \, z_i$ 分别为每个波速矢量投影至直角坐标系0-XYZ的x轴、y轴和z轴的波速分量, $i=1,2,3...,(\frac{n}{2})^2$ 。

[0137] 以8个超声波干耦合探头400为例,波速分量矩阵表述为:

$$\begin{bmatrix} 0138 \end{bmatrix} \quad N = \begin{bmatrix} x_1^2 & y_1^2 & z_1^2 & 2x_1y_1 & 2x_1z_1 & 2y_1z_1 \\ x_2^2 & y_2^2 & z_2^2 & 2x_2y_2 & 2x_2z_2 & 2y_2z_2 \\ x_3^2 & y_3^2 & z_3^2 & 2x_3y_3 & 2x_3z_3 & 2y_3z_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{16}^2 & y_{16}^2 & z_{16}^2 & 2x_{16}y_{16} & 2x_{16}z_{16} & 2y_{16}z_{16} \end{bmatrix},$$

[0139] 其中, $x_i \, v_i \, z_i$ 分别为每个波速矢量投影至直角坐标系0-XYZ的x轴、y轴和z轴的波速分量,i=1,2,3...16。

[0140] 构造测试矩阵,通过波速分量矩阵计算测试矩阵,并计算测试矩阵的特征值和特征向量。

[0141] 具体地,测试矩阵表述为:

[0142] 
$$m = \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \end{bmatrix}$$
,其中,  $A, B, C, D, E, F$ 为未知量。

[0143] 每个波速矢量投影至直角坐标系0-XYZ的x轴、y轴和z轴的波速分量应当满足:

[0144] 
$$\begin{bmatrix} x_i \ y_i \ z_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & D & E \\ D & B & F \\ E & F & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = 1,$$

[0145] 
$$Ax_i^2 + By_i^2 + Cz_i^2 + 2Dx_iy_i + 2Ex_iz_i + 2Fy_iz_i = 1$$
,

$$[0146] \quad \square: Nm = d ,$$

[0147] 其中,矩阵*d*满足:*d* = 1 1 1

[0148] 通过求解方程: Nm = d, 计算测试矩阵 m 的未知量 A, B, C, D, E, F。

[0149] 采集的第一测面的n/2个超声波干耦合探头与第二测面的n/2个超声波干耦合探头,在对测面得到两两之间信号的波速矢量(对测波速的矢量),共(2)<sup>2</sup>组。以8个超声波干耦合探头400为例,则共4×4=16组对测波速的矢量。

[0150] 将采集的 $(\frac{n}{2})^2$ 组对测波速的矢量的分量代入波速分量矩阵N中,可计算得到测试矩阵m的未知量A, B, C, D, E, F。

[0151] 通过测试矩阵的特征值表征各向异性矢量椭球标准方程,通过测试矩阵的特征向量表征被测岩石的损伤方向性。

[0152] 在计算得到测试矩阵**m**的未知量**A**,**B**,**C**,**D**,**E**,**F**后,通过计算测试矩阵m的特征值 **λ**<sub>0</sub>、**λ**<sub>1</sub>、**λ**<sub>2</sub>及其对应的特征向量,由测试矩阵的特征值**λ**<sub>0</sub>、**λ**<sub>1</sub>、**λ**<sub>2</sub>表征的各向异性矢量椭球标准方程为:

[0153] 
$$\frac{x_i^2}{\lambda_0} + \frac{y_i^2}{\lambda_1} + \frac{z_i^2}{\lambda_2} = 1$$
,

[0154] 其中, $\sqrt{\lambda_0}$ , $\sqrt{\lambda_1}$ , $\sqrt{\lambda_2}$  表征各向异性矢量椭球标准方程半主轴长,表征对应波速矢量 $v_{\text{max}}$ , $v_{\text{mean}}$ , $v_{\text{min}}$ 的大小,特征值 $\lambda_0$ 、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 对应的特征向量表征对应波速矢量 $v_{\text{max}}$ , $v_{\text{mean}}$ , $v_{\text{min}}$ 的方向,其中, $v_{\text{max}}$ 为 $\sqrt{\lambda_0}$ 对应的波速矢量, $v_{\text{mean}}$ 为 $\sqrt{\lambda_1}$ 对应的波速矢量, $v_{\text{min}}$ 为 $\sqrt{\lambda_2}$ 对应的波速矢量。

[0155]  $\operatorname{h}(\frac{n}{2})^2$ 个波速矢量(对测波速的矢量)表征被测岩石的损伤方向性,

[0156] 即,由被测岩石5加载过程中波速各向异性情况,反应被测岩石5损伤方向性(各向 异性)。

[0158] (1) 在被测岩石5的y方向(**5** 应力方向)与x方向(**5** 应力方向)两侧贴好应变片并 用热缩管包裹,被测岩石5在x方向(**5** 应力方向)的第一测面和第二测面按照本发明的方 式布置8个超声波干耦合探头400(如图6所示),无需再涂抹凡士林或其他耦合剂。

[0159] (2)将底盘103固定于中间段舱体102,采用12.9级高强螺栓及伺服胶圈密封拧接。 环形支撑反力架305固定于底盘103上方,聚氨酯橡胶皮囊307嵌套在柔性活塞盒306的内部 空腔,柔性活塞盒306使用12.9级高强螺栓固定在环形支撑反力架305内侧两端。

[0160] (3)将引伸计固定架203安装在柱墩207上并放置于底盘103上部凹槽中,调整引伸 计204至合适位置,下垫块206放置于柱墩207楔形滑动凹槽中。

[0161] (4)将已布置好超声波干耦合探头400的被测岩石5放置于下垫块206之上,将活塞 盒进油孔308通过高压油管连接至底盘进油孔105,活塞盒出油孔309通过高压油管连接至 底盘出油孔106,油泵控制阀300通过高压油管连接至底盘进油孔105,数字化声发射控制器 401通过数据线穿过数据传输孔107接入到高压密封舱体1内,连接至超声波监测系统4的n 个超声波干耦合探头400。

[0162] (5)环形密封盘101通过柱塞密封盘104与柱塞210紧密连接,柱塞210底部与万向

滑轨200拧接,上压头205通过燕尾槽滑动嵌接于万向滑轨200下方的y方向滑体201之中,使 用螺栓将环形密封盘101与中间段舱体102拧接,柱塞210顶部接触于现有刚性岩石力学试 验机压头上。

[0163] (6) 油泵控制阀300控制高压油泵301,通过底盘进油孔105向高压密封舱体1内注入液压油,同时通过活塞盒进油孔308向柔性活塞盒306内的聚氨酯橡胶皮囊307内部注入液压油。以舱体排气孔100和底盘出油孔106出油作为高压密封舱体1内注满液压油的标识,使用对应螺丝拧盖对舱体排气孔100和底盘出油孔106密封。

[0164] (7) 通过现有刚性岩石力学试验机轴向压缩柱塞210,高压油泵301对柔性活塞盒 306内部的聚氨酯橡胶皮囊307及高压密封舱体1内部进行压力加载,随后通过长效伺服保 载仪303维持压力恒定。

[0165] (8) 柱塞210继续下压, 增加对被测岩石5的竖向压力, 直至被达到预定值或被测岩石5破坏。

[0166] (9)卸载压力,排出液压油,测试结束,在第(7)步和第(8)加载载荷的过程中,数字 化声发射控制器401控制超声波干耦合探头400发送和接收超声波信号,并采集超声波干耦 合探头400的波速数据,测试被测岩石5的力学性能和损伤方向性。具体的被测岩石5的力学 性能和损伤方向性在上文中已经阐述,这里不再赘述。

[0167] 本发明提供的一种真三轴加载装置,可对被测岩石5进行常规单轴压缩试验、双向 压缩试验、真三轴压缩破坏试验,实验过程均与上述类似,仅在第(7)步去除柔性活塞盒306 加压或者高压密封舱体1加压阶段即可。

[0168] 最后应说明的是:以上各实施例仅用以说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述各实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分或者全部技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的范围。





图2







