

中华人民共和国国家标准

GB/T 23561.9—2009

煤和岩石物理力学性质测定方法 第9部分：煤和岩石三轴强度及 变形参数测定方法

Methods for determining the physical and mechanical properties of
coal and rock—Part 9: Methods for determining the triaxial strength
and deformation parameters of coal and rock

2009-04-08 发布

2009-12-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

前 言

GB/T 23561《煤和岩石物理力学性质测定方法》按部分发布,分为 16 个部分:

- 第 1 部分:采样一般规定;
- 第 2 部分:煤和岩石真密度测定方法;
- 第 3 部分:煤和岩石块体密度测定方法;
- 第 4 部分:煤和岩石孔隙率计算方法;
- 第 5 部分:煤和岩石吸水性测定方法;
- 第 6 部分:煤和岩石含水率测定方法;
- 第 7 部分:单轴抗压强度测定及软化系数计算方法;
- 第 8 部分:煤和岩石变形参数测定方法;
- 第 9 部分:煤和岩石三轴强度及变形参数测定方法;
- 第 10 部分:煤和岩石抗拉强度测定方法;
- 第 11 部分:煤和岩石抗剪试验方法;
- 第 12 部分:煤的坚固性系数测定方法;
- 第 13 部分:煤和岩石点载荷强度测定方法;
- 第 14 部分:岩石膨胀率测定方法;
- 第 15 部分:岩石膨胀应力测定方法;
- 第 16 部分:岩石耐崩解性指数测定方法。

本部分是 GB/T 23561 的第 9 部分。

本部分的附录 A、附录 B、附录 C 为规范性附录。

本部分由中国煤炭工业协会提出并归口。

本部分起草单位:煤炭科学研究总院开采设计研究分院和煤炭科学研究总院检测研究分院。

本部分主要起草人:齐庆新、李纪青、毛德兵。

煤和岩石物理力学性质测定方法

第9部分:煤和岩石三轴强度及变形参数测定方法

1 范围

GB/T 23561 的本部分规定了煤和岩石三轴压缩强度及变形参数测定中涉及的术语和定义、主要仪器设备、试件规格、试验步骤和数据计算。

本部分适用于在实验室条件下,能够加工成标准试件的煤和岩石在轴对称三向应力($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$)条件下,煤和岩石试件强度和变形参数的测定。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过 GB/T 23561 的本部分的引用而成为本部分的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本部分,然而,鼓励根据本部分达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本部分。

GB/T 23561.7—2009 煤和岩石物理力学性质测定方法 第7部分:单轴抗压强度测定及软化系数计算方法

GB/T 23561.8—2009 煤和岩石物理力学性质测定方法 第8部分:煤和岩石变形参数测定方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于 GB/T 23561 的本部分。

3.1

三轴压缩试验 triaxial compressive test

在恒定围压(即 $\sigma_2 = \sigma_3$)下施加轴向压应力直至试件破坏的过程。

3.2

三轴压缩强度 triaxial compressive strength

煤或岩石试件在恒定围压作用下,达到破坏时所能承受的最大压应力。

4 主要仪器设备

4.1 试件加工机械

钻石机、锯石机、磨石机或磨床。

4.2 检验工具

试验样品的检验工具如下:

- a) 游标卡尺,最小分度值 0.02 mm;
- b) 万能角度尺、百分表架及百分表;
- c) 水平检测台。

4.3 设备

4.3.1 材料试验机

材料试验机精度应不低于一级。加载范围应满足式(1):

$$1.25p_{\max} < p_0 < 5p_{\max} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

p_0 ——材料试验机度盘最大值,单位为千牛(kN);

$p_{\max}$ ——预计试件的最大破坏载荷,单位为千牛(kN)。

试验机附加的三轴压力室及能保持侧向应力稳定的侧向加压装置。压力室内上、下承压板硬度应不低于 HRC58,不平行度应小于 0.02 mm,两承压板之一应带有球形座。

4.3.2 电液伺服三轴试验机

电液伺服三轴试验机的精度应不低于一级,并能够以 0.5 MPa/s~1.0 MPa/s 的速率加载。上述 2 种试验机可任选一种。

4.4 仪器

普通材料试验机升级改造中可选择配备的试验仪器如下:

- a) 油压传感器;
- b) 静态或动态电阻应变仪,工作频率应不小于 2 000 Hz;
- c) 其他具有精度为 0.001 mm 的测量变形的装置(如变形传感器及其固定支座);
- d) 计算机数据采集处理系统。

4.5 材料

试验中所需材料如下:

- a) 电阻应变片(以下简称电阻片):标距 $3 \times 15 \text{ mm} \sim 3 \times 20 \text{ mm}$,精度 0.2,电阻值为 $(120 \pm 0.2) \Omega$;
- b) 粘结剂:502 胶水、环氧树脂胶或其他类似性能的粘结剂;
- c) 防潮、防油剂:环氧配胶、聚氯乙烯粘胶或聚乙烯缩醛胶;
- d) 清洁剂:丙酮、纱布、分析纯乙醇和脱脂棉等;
- e) 防油套:各种能将试件与机油隔开的乳胶套、橡胶套和塑料套等。

5 试件规格

5.1 试件规格:标准试件采用圆柱体,其直径为承压板直径的 $(0.98 \sim 1.00)$ 倍,取 $(50 \pm \frac{6}{2}) \text{ mm}$,高径比为 (2 ± 0.2) 。

5.2 试件层理一般应同纵向加载方向垂直,其他方向应加以特别说明。

5.3 试件数量:每组煤样、岩样至少要选五个试件做不同侧压下的三轴压缩试验。

5.4 试件的加工精度及含水状态等应按 GB/T 23561.7—2009 中第 5 章的规定。

6 试验步骤

6.1 测定前核对煤、岩样的名称和编号,对试件的颜色、颗粒、层理、节理、裂隙、风化程度、含水状态、加载方向以及加工过程中出现的问题等进行描述,并填入记录表内,见附录 A。

6.2 检查试件加工精度,测量试件的直径和高度并填入记录表内,见附录 A。

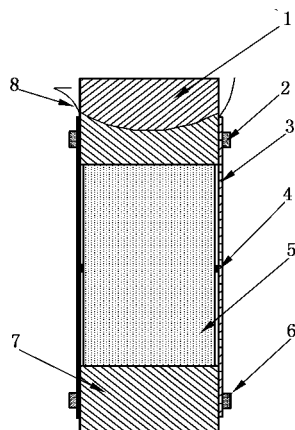
- a) 直径量测:直径应在试件的上下端面附近以及中央附近的断面,测定相互垂直的两个方向的直径,取其算术平均值作为试件的直径。
- b) 高度量测:高度应在试件的过中心轴的两个相交的平面内各取两点,测定两个高度值,取其算术平均值作为试件的高度。

6.3 侧压力的选择:如本组试件已做过单轴抗压强度试验,可以此为“零”侧压试验数据。最大侧压力可根据实际情况选定,侧压力等级可按等差级数或等比级数进行选择。

6.4 选择材料试验机时应符合 4.3.1。

6.5 试件安装:拭净上、下垫块端面,将试件置于上、下垫块间,使三者中心成一直线。垫块应按

GB/T 23561.8—2009中 7.4 的规定。再将试件与垫块套上防油套,用橡皮筋或密封带等封闭试件,试件安装见图 1。必要时防油套与上、下垫块的接口处可涂上聚氯乙烯粘胶以增强封闭效果。然后将下部垫块置于压力室底座中心,上好压力室顶盖活塞。再将放好试件的压力室,置于材料试验机上、下加压板之间,并使压力室轴线与上、下加压板轴线相重合。开动材料试验机,施加 0.1 kN~0.5 kN 的压力,以固定试件。然后打开压力室的排气孔,启动侧压油泵,向压力室注油,边注油边排空气,当压力室空气排净后拧紧排气孔。



- 1——上垫块;
- 2——橡皮筋;
- 3——防油胶套;
- 4——电阻应变片;
- 5——试件;
- 6——橡皮筋;
- 7——下垫块;
- 8——电阻片引线。

图 1 试件安装图

6.6 加载:轴向加载,使压力稳定在 2 kN~10 kN 之间时,再以 0.05 MPa/s 的加载速度施加侧压力至某一预定侧向压力值,在试验过程中使此侧压力值始终保持恒定,变动范围不应超过选定值的 $\pm 2\%$ 。此时可调整电阻应变仪读数使之为零,作为应变测量的起始点。然后再以 0.5 MPa/s~1.0 MPa/s 的稳定加载速率施加纵向载荷直至试件破坏,记下破坏载荷值。卸载后取出试件,记录其破坏状况。当有完整破坏面时,应量测破坏面与最大主应力作用面之间的夹角 θ ,见图 2,用于检验求得的内摩擦角 ϕ 。

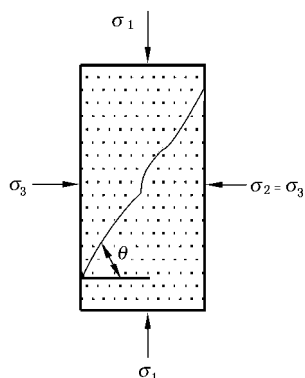
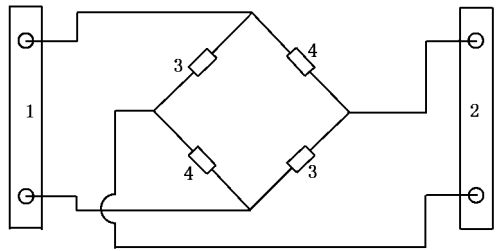


图 2 试件破坏状态

做变形参数试验时,可按一定载荷级测记一次变形值。如用电液伺服岩石三轴试验机或计算机数据采集处理系统进行试验时,可按上述加载速度一次连续加载直至试件破坏,由其测试系统自动记录测试数据。三轴压缩试验记录表见附录 A。

6.7 变形参数测定：试件的纵向和横向变形的测量可采用电阻应变法或其他精度为 0.01 mm 以上的变形测定装置，见 GB/T 23561.8—2009 中 8.2.7。

6.7.1 用电阻应变法测定变形时，电阻应变片粘贴和防潮处理按 GB/T 23561.8—2009 中第 6 章进行。一般采用全桥连接方式的测量电路，见图 3。在同一测量桥路中，补偿片与测量片的电阻值之差不应大于 0.5 Ω。补偿片应粘贴在与被测试件同种材料上，用防油套套好浸没在置于压力室附近的油盆内，油盆内放置与压力室同样的液压油。三轴变形参数记录表见附录 B。



- 1——输入；
- 2——输出；
- 3——测试片；
- 4——补偿片。

图 3 变形参数测量全桥接线图

6.8 应用电液伺服岩石三轴试验机或计算机数据采集处理系统进行三轴试验。

当采用电液伺服岩石三轴试验机或计算机数据采集处理系统进行试验时，可将载荷、位移、应变测试仪器与数据采集处理系统连接，并按上述加载速度一次连续加载或按约定采用控制应变速率方式进行加载，直至试件破坏，由测试系统自动记录测试数据。

7 数据计算

7.1 手工计算试验结果

7.1.1 轴向最大主应力

在一定侧压力作用下的煤、岩石轴向最大主应力按式(2)计算：

$$\sigma_{1\max} = \frac{10p}{F} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$\sigma_{1\max}$ ——在一定侧压力作用下的煤、岩石轴向峰值应力，单位为兆帕(MPa)；

p ——纵向破坏载荷，单位为千牛(kN)；

F ——受压试件初始承压面积，单位为平方厘米(cm²)。

7.1.2 绘制应力-应变曲线

以主应力差($\sigma_1 - \sigma_3$)为纵坐标，纵向应变或横向应变为横坐标，绘制主应力差与纵向或横向应变的关系曲线，在每条曲线上标出侧向压力值 σ_3 ，见图 4。如试验结果呈现较大离散时，可按附录 C 处理。

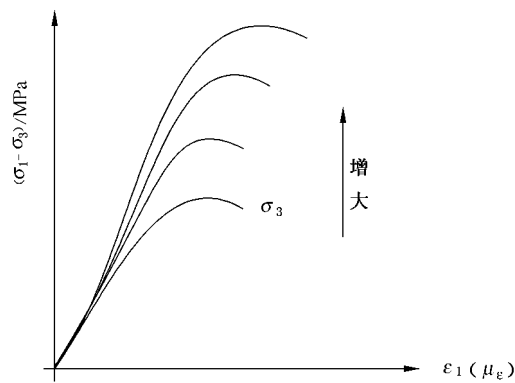


图4 应力-应变关系曲线

纵向应力 σ_1 按式(3)计算:

$$\sigma_1 = \frac{10p}{F} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

σ_1 ——纵向应力,单位为兆帕(MPa);

p ——纵向载荷,单位为千牛(kN);

F ——试件初始承压面积,单位为平方厘米(cm^2)。

7.1.3 弹性模量和泊松比

三轴应力状态下试件弹性模量计算按式(4)或式(5),泊松比的计算按式(6):

$$E = \frac{(\Delta\sigma_1 + 2\Delta\sigma_3)(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)}{\Delta\sigma_3(\Delta\epsilon_1 - 2\Delta\epsilon_3) + \Delta\sigma_1\Delta\epsilon_1} \dots\dots\dots (4)$$

$$E = \frac{\Delta\sigma_1 - 2\mu\Delta\sigma_3}{\Delta\epsilon_1} \dots\dots\dots (5)$$

$$\mu = \frac{3\Delta\epsilon_1 - \Delta\sigma_1\Delta\epsilon_3}{(\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_3)\Delta\epsilon_1 - 2\Delta\sigma_3\Delta\epsilon_3} \dots\dots\dots (6)$$

式中:

E ——三轴应力状态下试件的弹性模量,单位为兆帕(MPa);

μ ——泊松比;

$\Delta\sigma_1$ ——轴向应力增量,单位为兆帕(MPa);

$\Delta\sigma_3$ ——侧向应力增量,单位为兆帕(MPa);

$\Delta\epsilon_1$ ——轴向应变增量;

$\Delta\epsilon_3$ ——侧向应变增量。

弹性模量计算精确至小数点后两位;泊松比计算精确至 0.01。

7.1.4 计算内摩擦角 ϕ 和凝聚力 C

以侧压力 σ_3 为横坐标,纵向峰值应力 $\sigma_{1\max}$ 为纵坐标,将同组试件的侧压力与纵向峰值应力的关系在图上标出,见图 5。

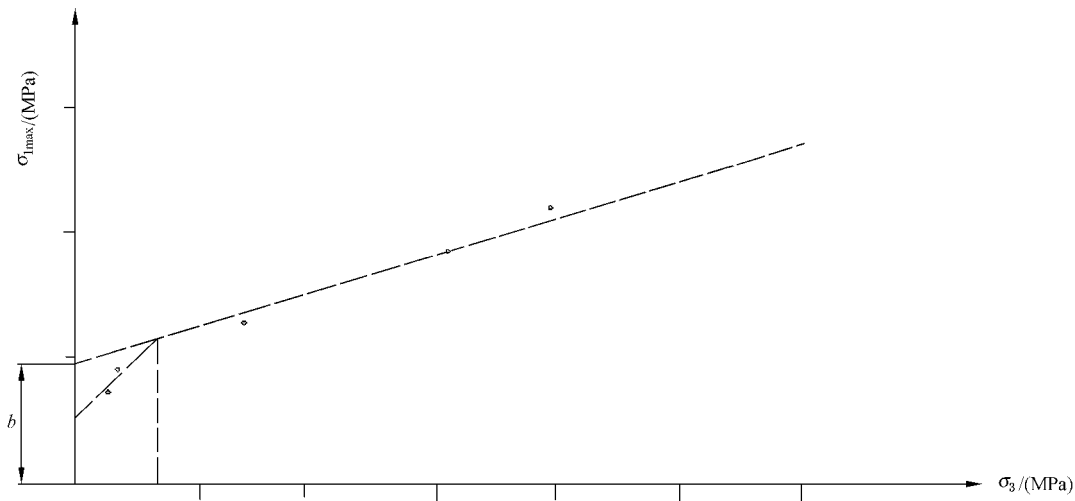


图 5 侧压力与纵向抗压强度关系曲线示意图

通过上述各点绘制平均曲线,再从实际情况出发,在曲线上选取最适当的线段绘一条直线或在曲线上选取不同的线段绘出几条直线。对每条直线都要计算出它们的斜率 m 和纵轴上的截距 b 。

各段直线方程的表达式为式(7):

$$\sigma_1 = b + m\sigma_3 \quad \dots\dots\dots (7)$$

b, m 可分别用式(8)、式(9)计算:

$$b = \frac{\sum \sigma_3 \sigma_1 \sum \sigma_3 - \sum \sigma_1 \sum \sigma_3^2}{(\sum \sigma_3)^2 - n \sum \sigma_3^2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$m = \frac{\sum \sigma_3 \sum \sigma_1 - n \sum \sigma_3 \sigma_1}{(\sum \sigma_3)^2 - n \sum \sigma_3^2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

n 为该直线段内的点数, σ_1, σ_3 分别为该直线段内各点相对应的纵向峰值应力与侧向压力值。利用参数 m 和 b , 计算内摩擦角 ϕ 和凝聚力 C 的公式分别按式(10)、式(11):

$$\phi = \arcsin \frac{m-1}{m+1} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$C = \frac{b(1 - \sin \phi)}{2 \cos \phi} \quad \dots\dots\dots (11)$$

7.1.5 绘制摩尔圆及其包络线

可采用以下方法绘制摩尔圆及包络线。

取纵、横坐标比例相同的坐标纸,采用以压应力为正的直角坐标系,按不同的侧压力 σ_3 及相应的纵向抗压强度 σ_1 绘出摩尔圆族。画摩尔圆时,可先根据实际情况在所研究的范围内选定 3~5 个 σ_3 值,然后运用该组 σ_1 所通过的直线方程 $\sigma_1 = b + m\sigma_3$ 求出相对应的 σ_1 ,以 $(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, 0)$ 为圆心, $(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2})$ 为半径绘出一组摩尔圆及其包络线,此包络线即为该组岩石的强度曲线,见图 6,包络线在纵轴上的截距为凝聚力 C ,与横轴的夹角为内摩擦角 ϕ 。

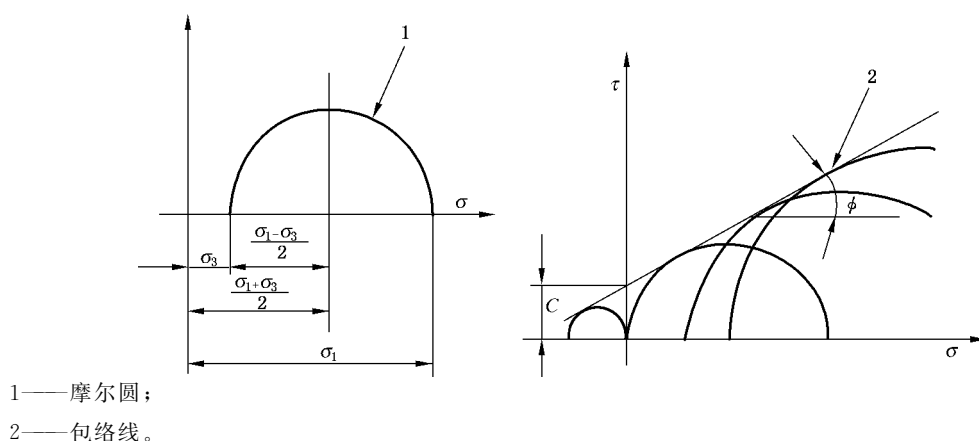


图6 摩尔圆及其包络线

7.2 应用计算机数据采集处理系统或电液伺服三轴试验机整理试验结果

7.2.1 绘制应力-应变曲线

依据系统采集试验数据,由计算机软件直接绘制出以主应力差($\sigma_1 - \sigma_3$)为纵坐标,纵向应变或横向应变为主应力差与纵向或横向应变的关系曲线,并在每条曲线上标出侧向压力值 σ_3 。

7.2.2 抗压强度

利用软件直接读出不同侧压力下主应力差与纵向或横向应变的关系曲线峰值载荷,并根据已输入系统的式(2)及试件的初始截面积(cm^2),计算出该试件的抗压强度,并打印这一组试件(五块)抗压强度及相关参数(包括侧压、加载速率、试件直径、高度、初始截面积等)的测试结果表。

7.2.3 计算内摩擦角 ϕ 和凝聚力 C

由数据采集处理系统绘制侧压力与纵向抗压强度关系曲线以及相应的直线,并由计算机直接给出各拟合直线的 b 、 m 值,利用已输入数据处理系统的式(9)、式(10)和式(11),计算并打印出该组试件的内摩擦角 ϕ 和凝聚力 C 及相关参数。

7.2.4 绘制摩尔圆及其包络线

当要求提供强度曲线时,数据采集处理系统能够直接绘制出此组试件的摩尔圆及其包络线,并在曲线图中标明凝聚力 C 和内摩擦角 ϕ 。

附 录 B
(规范性附录)
三轴变形参数试验记录表

送样单位：_____

试件直径：_____

采样地点：_____

试件高度：_____

岩石名称：_____

试件截面积：_____

岩样编号：_____

侧向压应力：_____

试件编号：_____

试件含水状态：_____

序 号	试件描述		纵向 载荷 P/ kN	纵向应变 $\epsilon_1 (\mu\epsilon)$				横向应变 $\epsilon_d (\mu\epsilon)$				纵向 应力/ MPa	$(\sigma_1 - \sigma_3)/$ MPa	备 注
	试验 前	试验 后		1 片	2 片	3 片	平均	1 片	2 片	3 片	平均			

试验：

计算：

校核：

附 录 C
(规范性附录)
试验数据整理方法

由于岩石的不均质性与不连续性,岩石三轴试验的结果往往呈现较大的分散性。当采用上述方法整理出直线方程 $\sigma_1 = b + m\sigma_3$, 其相关系数太小(例如小于 0.9)时,可根据具体情况,作如下处理:

- C.1 根据试件的初始条件及试验过程中的异常情况,舍弃可疑的数据或个别的异常值,然后再绘制 $\sigma_1 - \sigma_3$ 关系曲线。
 - C.2 将所有得出的 σ_1 ,按其偏大、偏小值分为两族,分别绘制两条 $\sigma_1 - \sigma_3$ 关系曲线及摩尔圆包络线,其中一条代表岩石强度的上限,另一条代表下限,然后根据作试验的具体目的分别选用上限或下限。
 - C.3 增加试验的块数,尤其是同一个侧压力下的试验块数。
-