

相似材料模型实验中围岩垂直应力测试的实验研究^{*}

Experimental study on vertical stress of surrounding rock with equivalent material model

柴敬 伍永平 侯忠杰 苏普正
(西安矿业学院采矿工程系, 西安, 710054)

文 摘 阐述了相似材料模型实验中测试模型采动过程中工作面顶板围岩应力形成的原理, 以及测试方法和实验步骤, 并分析了应力环式模型支架的工作特性与标定结果。两个实验实例表明, 该方法能满足实验的需要, 使模拟实验可量化分析, 其应用推进了支架与围岩相互作用关系的实验室研究。

关键词 相似材料模型, 围岩垂直应力, 压力传感器, 测试

中图法分类号 TD 315.3

作者简介 柴敬, 男, 1964年生, 副教授。1985年毕业于重庆大学, 1988年在西安矿业学院获硕士学位。现为西安矿业学院研究生部副主任。从事矿山岩层控制和实验岩石力学方面的教学与科研工作。

Chai Jing Wu Yongping Hou Zhongjie Su Puzheng

(Dept. of Mining Engineering, Xi'an Mining Institute, Xi'an, 710054, China)

Abstract The paper describes the principle and method of equivalent model experiment concerning vertical stress of surrounding rock by means of equivalent material simulation, and also analyzes the working function and calibration results of stress-loop type model supports. Two experimental examples indicate that this testing method meets the experiment requirement of quantitative analysis, and that its application advantageously improves the experiment study on the mutual relationship between supports and surrounding rock.

Key words equivalent material model, vertical stress, stress sensor, test

1 引 言^{*}

近年来, 随着岩石力学计算机方法的快速发展, 大量的实验工作已经被数值模拟所代替。然而, 作为实验岩石力学方法之一的相似材料模型实验目前仍在煤矿开采的研究中得到广泛的应用, 在研究大范围岩层垮落和运动方面具有数值模拟无可比拟的优势。我国西部神府矿区浅埋煤层的开发中, 所完成的大比例大型立体模型实验^[1~2], 不仅使人们在采前初步掌握了浅埋煤层的矿压显现规律, 而且有利地指导了现场生产实践。生产需要促使相似材料模型实验技术在以往定性研究的基础上有了进一步的发展。相似材料模型实验中应力测试是一个难题, 长期以来以测试位移场达到研究应力场^[3], 或者以设置底板压力传感器的方式测试工作面前方支承压力。本文试图介绍一种可以替代的测试工作面采动过程中围岩垂直应力的方法。

2 相似模型中围岩垂直应力测试的基本理论

2.1 应力相似

根据相似模型定律, 在几何相似、载荷相似的条件

下, 原型与模型的应力有下列关系^[4]

$$\left. \begin{aligned} C_{\sigma} &= C_{\rho} \cdot C_l \\ C_u &= C_l \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 C_{σ} 为应力相似比; C_{ρ} 为容重相似比; C_l 为几何相似比; C_u 为位移相似比。容重比和几何相似比是由模型设计时确定的。实验中只要能测试出模型的应力和位移, 就可以按式(1)求得原型的应力和位移。

2.2 支架与围岩相互作用原理

由采场矿山压力理论^[5], 支架和围岩是相互作用的一对力, 采动中顶板形成的围岩应力可看作是一个作用力, 支架视为一个反力, 两者相互适应, 大小相等, 可表示为

$$\left. \begin{aligned} P &= Q \\ P &= F_f / S_f \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 Q 为顶板围岩应力; P 为支架工作阻力; F_f 为支架立柱载荷; S_f 为支架顶梁支护面积。

式(2)表明顶板破断和运动形成的围岩应力即垂直应力可以通过测试支架工作过程中的立柱载荷 F_f 来反映。煤矿现场矿山压力观测正是采用的这一基本原理, 同样这一关系也适合于实验室模拟实验。

^{*} 到稿日期: 1999-01-29

相似材料模型实验中国岩垂直应力的原型值由式(1)得

$$Q = \frac{C_1 C_2 F}{S} \quad (3)$$

式中 F 为实验过程中模型支架立柱载荷值; S 为模型支架顶梁支护面积, $S = \frac{S_c}{C_1^2}$ 。

相似材料模型实验中研究开采形成的围岩垂直应力就转化成对模型支架立柱载荷 F 的测试。

3 模型支架工作阻力测试

3.1 模型支架压力传感器

模型实验中用于支架立柱载荷测试的传感器有以下3种:

(1) 液压式压力传感器 这种传感器为小型液压油缸, 由于模型支架和油缸尺寸小, 实验中易出现漏液, 影响实验结果。

(2) 气囊式压力传感器 传感器为承压式气囊, 容易出现漏气现象, 产生数据飘移。

(3) 应力环式压力传感器 传感器为一段粘贴应变片的薄壁圆钢管, 通过测试应变达到测试薄壁圆钢管的受力。

3.2 应力环式传感器工作特性

图1为一薄壁应力环沿直径方向作用一对集中力 F , 由于对称性, 只须考虑 $\frac{1}{4}$ 圆环, 横截面 mn 上无剪力, 压力为 $\frac{F}{2}$ 。由文献[6], $\frac{1}{4}$ 圆环上一点的弯矩为

$$M = \frac{1}{2} Fr \left(\frac{2}{\pi} - \cos \varphi \right) \quad (4)$$

mn 截面 ($\varphi = 0$) 的正应力为

$$\sigma = E \varepsilon_0 = \frac{M_0}{W} \quad (5)$$

式中 W 为截面抗弯模量; ε_0 为 mn 截面应变; 且 $W = \frac{bh^2}{6}$; b 为应力环的宽度; h 为应力环的壁厚; $\varepsilon = A \varepsilon_0$; ε 为实测应变读数; A 为应变测试中的桥臂系数; $A = 2.05$; E 为弹性模量。

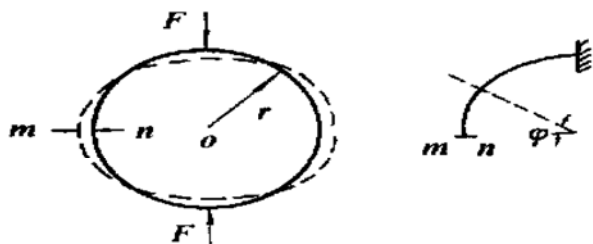


图1 薄壁圆环应力分析

Fig. 1 Stress analysis of thin wall loop

取 $\varphi = 0$, 由式(4)代入式(5)得

$$F = \frac{Ebh^2}{6 \cdot r \cdot A \left(\frac{1}{\pi} - \frac{1}{2} \right)} \cdot \varepsilon \quad (6)$$

对于一个确定的应力环, 式(6)中只有 ε 是变量, 且与 F 呈线性关系, 故测得 mn 截面应变就可计算出作用在应力环上的集中力 F 。

表1列出了二个模型实验中所用应力环模型支架荷载 F (单位: g) 与 ε 关系的理论计算式。钢材弹模 $E = 205 \text{ GPa}$, 应变片贴在应力环 $\varphi = 0$ 处。表2列出了 F 与 ε 关系的标定回归方程。由于各应力环支架制造偏差, 回归方程与表1计算式存在差异, 但结果相近, 因此模型实验中用各应力环标定的 $F - \varepsilon$ 关系式获取实验值 F , 以避免各应力环与理论计算的误差。

表1 应力环 F 与 ε 关系的理论计算

Table 1 Theoretical calculation of F and ε of stress-loops

实验项目	应力环参数/mm			$F = \Phi(\varepsilon)$
放顶煤支架适应性模拟	$r = 8$	$h = 0.45$	$b = 9$	$F = 2.13\varepsilon$
沿空留巷巷旁支护载荷模拟	$r = 19$	$h = 1.0$	$b = 22$	$F = 10.83\varepsilon$

表2 模型支架 F 与 ε 关系回归方程

Table 2 Regression equation of F and ε of model supports

实验项目	应力环编号	回归方程	相关系数
放顶煤支架适应性模拟	1	$F = 2.04\varepsilon - 1802$	0.997
	2	$F = 2.34\varepsilon - 710$	0.989
	3	$F = 2.19\varepsilon - 1922$	0.998
	4	$F = 2.4\varepsilon + 1557$	0.989
沿空留巷巷旁支护载荷模拟	1	$F = 12.3\varepsilon - 51.9$	0.992
	2	$F = 11.1\varepsilon + 196$	0.999
	3	$F = 10.6\varepsilon + 113$	0.998
	4	$F = 11.8\varepsilon + 12.2$	0.997
	5	$F = 12.5\varepsilon$	1.000

3.3 模型支架与现场使用液压支架性能对比分析

液压支架主要技术指标为初撑力和额定工作阻力, 在使用中以实测工作阻力是否大于额定工作阻力或以超过额定工作阻力架次的百分比大小来衡量支架对顶板的适应性。图2为现场使用液压支架工作特性曲线, 为恒阻式, 在额定工作阻力以下为线性变化。式(6)所确定的应力环式模型支架工作特性为线性变化, 它与实际使用支架存在差异, 但在额定工作阻力范围内它们的特性是一致的, 因此模型支架可在实验中使用, 达到实验目的。

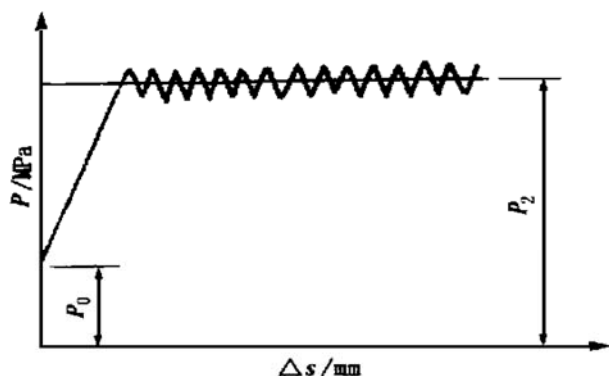


图2 支架工作特性曲线

Fig. 2 Curves of working function of supports

4 相似模型的应力测试实验步骤

- (1) 由提供的地质资料和支架参数, 设计相似模型的 C_l , C_p 。
- (2) 由式(1)设计模型支架结构尺寸、初撑力及额定工作阻力。
- (3) 由式(3)计算出 F , 确定应力环尺寸。
- (4) 应力环、模型支架制造和标定, 作回归方程。
- (5) 实验过程中测试每一步开挖时的 ε , 由回归方程计算 F 和由式(3)计算 Q 。

5 实验实例

5.1 综采工作面放顶煤支架适应性平面模型实验

以韩城矿区#15煤(丈八煤)的地质资料为实验对象。顶板Ⅱ级2类, 煤层硬度 $f = 1.5 \sim 2.0$, 综采放顶煤液压支架初撑力 $1\,853\text{ kN/m}$, 额定工作阻力 $2\,238\text{ kN/m}$ 。

实验在 5 m 平面应力模型架上进行, 几何相似比 $C_l = 40$, 容重比 $C_p = 1.5$, 应力相似比 $C_\sigma = 60$, 模型高度 1.2 m 。应力环式模型支架顶梁支护面积 $5.5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$, 实验用模型支架4个(如图3所示), 按 $1:40$ 比例制造, 实验前进行标定。

图4为工作面开采过程中支架工作阻力与推进距离变化曲线。工作面在 40.8 m , 46.8 m 和 57.6 m 处围岩产生大范围垮落。实验过程中应力环模型支架测得工作阻力平均值为 $1\,927\text{ kN/m}$, 按工作阻力平均值加一倍方差为判据, 即 $Q_m = 2\,524\text{ kN/m}$ 得出, 工作面围岩在 48 m 处为初次来压, 在 58.8 m 处为第一次周期来压。

表3为支架工作阻力变化分布, 支架超过额定工作阻力的架次仅为 4.7% , 在初撑力与额定工作阻力之间的架次为 47.65% 。实验得出所选支架满足该地质条件开采要求的结论。

表3 支架工作阻力变化分布

Table 3 Distribution of support working resistance

组距 $l/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	# 1 支架 $l(\%)$	# 2 支架 $l(\%)$	# 3 支架 $l(\%)$	# 4 支架 $l(\%)$	平均 $l(\%)$
小于 $1\,853$	41.8	44.2	58.1	46.5	47.65
$1\,853 \sim 2\,238$	55.8	46.5	37.2	51.1	47.65
大于 $2\,238$	2.4	9.3	4.7	2.4	4.7



图3 应力环模型支架

Fig. 3 Stress-loop type model support

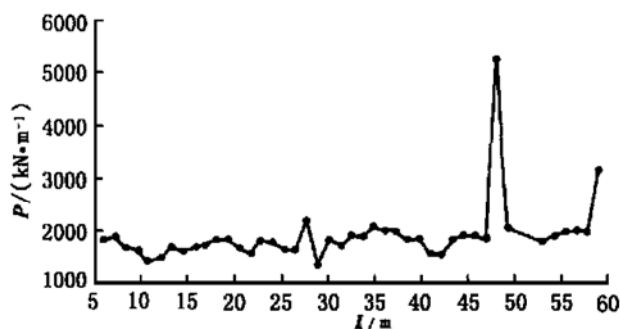


图4 随工作面推进支架工作阻力变化

Fig. 4 Variation of support working resistance with working face advancing

5.2 沿空留巷巷旁支护载荷模拟实验

沿空留巷技术是工作面无煤柱开采的方法之一, 应用该技术的关键是沿空留巷巷旁充填体承载能力的合理确定和如何实现支护。模拟实验结合陕西省红石岩煤矿12901工作面地质条件进行。12901工作面开采#2煤层, 煤层厚度 $2.8 \sim 4.23\text{ m}$, 平均厚度 3.5 m , 倾角 $2^\circ \sim 3^\circ$, 煤层硬度系数 $f = 2 \sim 3$, 工作面埋藏深度平均 162 m 。#2煤层的老顶为泥岩, 其间夹有薄层的粉砂岩, 质细性脆; 直接顶为细砂岩, 厚度 9.1 m , 工作面长度 120 m , 推进距离 $1\,000\text{ m}$ 。模拟实验在 3 m 平面模型架上进行, 几何相似比 $C_l = 50$, 容重比 $C_p = 1.5$, 应力比 $C_\sigma = 75$, 模型铺装高度 1.6 m , 加配重铁砖四层。用应力环式模型支架代替巷旁充填体, 模型支架支护面积 $2.5\text{ cm} \times 4\text{ cm}$, 实验共用5个支架。支架按 $1:50$ 比例制造, 实验前进行标定。



图5 模拟实验

Fig. 5 Simulating model experiment

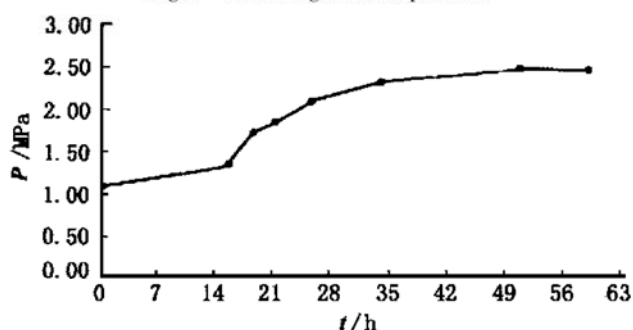


图6 随时间巷旁支架工作阻力变化

Fig. 6 Variation of support working resistance with time

模拟实验如图5,先在模型中开巷道,在一侧支设模型支架代替巷旁充填体测试载荷,支架初撑力1.125 MPa(原型值),工作面从50 m远处向巷道方向开采。

随工作面推进顶板在后方跨落,工作面采至模型支架前,支架工作阻力变化很小,此时顶板悬伸8 m。图6为工作面采完后支架工作阻力随时间变化曲线,由于巷道上方顶板沿煤壁处破断,破断角 55° ,支架工作阻力开始增大,开采后约2d工作阻力升至2.13 MPa,

以后保持不变。

支架工作阻力升高和顶板沿煤壁破断,表明模型支架初撑力过小,不足以支护顶板的运动。由此得出该条件下巷旁充填体初撑力应大于顶板破断后岩层形成的作用力,即2.13 MPa可以保证顶板破断在巷道充填体外侧。该项研究目前正在现场试验中。

6 结 语

(1) 相似材料模型实验中,以应力环模型支架为测力元件,通过测试支架工作阻力变化,研究采动中的顶板围岩应力变化和围岩破断运动规律,达到了定量描述的目的。为机械化开采中液压支架适应性研究提供了试验依据。

(2) 顶板围岩垂直应力测试仅是相似材料模型围岩应力测试的一个方面,需要进一步发展全场应力测试的方法和理论。

参 考 文 献

- 1 张俊云,侯忠杰等. 浅埋采场矿压及覆岩破断规律. 矿山压力与顶板管理, 1998(3): 9~ 11
- 2 西安矿业学院矿山压力研究所. 神府石圪台矿111-2上02高产高效工作面“支架—围岩”模拟实验研究报告. 陕西煤炭技术, 1995(1): 16~ 31
- 3 任伟中,朱维申等. 一种新的位移量测技术—CCD图像处理法. 岩土力学, 1997(增刊): 115~ 119
- 4 李鸿昌. 矿山压力的相似模拟实验. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998
- 5 钱鸣高,刘听成. 矿山压力及其控制(修订本). 北京: 煤炭工业出版社, 1996
- 6 王彪. 采动影响范围内巷道岩体的壳结构模型与支护设计:[硕士学位论文]. 西安: 西安矿业学院, 1994

量、单位及名词术语字母大写体规则

1. 来源于人名的计量单位符号的首字母;
2. 化学元素符号的首字母;
3. 量纲符号;
4. 等于、大于 10^6 的SI词头符号;
5. 科技名词术语外文缩写;
6. 外国人姓名首字母;
7. 国家组织、机关、报刊、会议名称首字母;
8. 地质时代及地层单位首字母。