

矿井复杂动力现象 研究

(中) 谭学术 等著
(美) Sya S Peng

重庆大学出版社

矿井复杂动力现象研究

[中] 谭学术 等著
[美] Syd S. Peng

重庆大学出版社

内 容 简 介

煤与瓦斯突出及煤矿动力底鼓问题等是最有害的矿井动力现象。本书对上述现象及有关问题进行了研究和探讨。

在第一章中,利用变弹性模量三维光弹性实验,首次对石门揭煤巷道前方煤岩体的三维应力和弹性潜能进行了研究。第二章中,提出了煤与瓦斯突出不仅是由瓦斯压力、瓦斯含量以及瓦斯能等宏观因素引起,而且还与瓦斯的分子量和热容量等微观因素有关的新结论。第三章通过对南桐煤矿的模拟实验,提出了预测大范围区域地质构造应力分布的新方法。第四章探讨了复合岩体的破坏机理与煤和瓦斯突出之间的关系。第五章提出了预防煤与瓦斯突出发生的主要原则。第六章对煤矿巷道底鼓等问题进行了研究。

本书可作为采矿、地质、矿山安全工程、实验力学、岩土工程等专业大学生和研究生的教材,也可作上述各专业大、中专教师以及工程技术人员参考。

矿井复杂动力现象研究

[中] 译学术

[美] Syd S. 等著 Peng

责任编辑 谢晋洋 李长惠 陈晓阳

重庆大学出版社出版
重庆建筑工程学院印刷厂印刷



开本: 787×1092 1/16 印张: 10 字数: 250 千

1992年9月第1版

1992年9月第1次印刷

印数: 1—1200

标准书号: ISBN 7-5624-0498-2 定价: 6.50元
TD·6

(川)新登字020号

前 言

煤与瓦斯突出及煤矿动力底鼓是所有矿井动力现象中最有害的动力现象。本书对矿井动力现象中的上述几个问题进行了研究。

在第一章中,利用变弹性模量三维光弹性实验,首次对石门揭煤巷道前方煤岩体中的三维应力和弹性潜能进行了研究。同时,还对石门揭煤突出实例作了分析。由此指出矿井石门揭煤突出是弹性潜能和瓦斯能量的突然变化等因素所引起的。

第一章中还提出了变弹模三维光弹模型中通过变弹模交界层点的应力初值计算公式、应力校核公式以及粘结约束应力计算公式等。从而解决了变弹模三维光弹性实验中的几个关键问题。

第二章根据热力学理论等,对矿井煤与瓦斯突出中的瓦斯膨胀能作了计算分析。因此提出了煤与瓦斯突出不仅是由瓦斯压力、瓦斯含量以及瓦斯能等宏观因素引起的,而且还与瓦斯的分子量和热容量等微观因素有关等重要的新结论。

在第三章中,作者利用变弹模三维光弹性实验,模拟研究了南桐煤矿地质构造应力分布与煤和瓦斯突出关系的一些重要问题。根据实验结果等,我们获得了预防突出的主要地质构造应力指标是弹性潜能和最大剪应力,预报突出的地质特征是煤层中的软弱煤等主要结论。本章提出的模拟实验方法对预测大范围区域的地质构造应力分布等问题具有一定的实际价值。

第四章对石灰岩和泥质岩试件分别进行了三轴抗压试验。然后,将石灰岩和泥质岩组合成为一体,再次用同样的方法进行了三轴抗压试验。同时还对复合岩体的应力和应变作了有限元分析。本章对于探讨复合岩体的破坏机理与煤和瓦斯突出之间关系具有参考价值。

第五章根据作者的实验结果、突出实例分析以及影响煤和瓦斯突出的主要条件等因素,提出了预防煤与瓦斯突出发生的主要原则。本章还指出了在选择预防煤与瓦斯突出方法中应该特别注意的一些问题。

第六章主要应用边界元以及理论分析等方法,对美国某矿的巷道底鼓诸问题进行了较为成功的研究,其研究成果指出较大的水平地应力等是导致煤矿巷道底鼓的重要原因之一。

本书提出的研究成果对于研究煤与瓦斯突出和煤矿巷道底鼓等动力现象的发生机理及其预防具有一定的参考价值和指导意义,其中的变弹模三维光弹性实验方法为采矿工程等问题的研究指出了一条新途径。

本书可作为采矿、地质、矿山安全工程、实验力学、岩土工程等专业的大学生和研究生的教材,也可供上述各专业大、中专教师以及工程技术人员参考使用。

本书主要由重庆大学的谭学术和美国 West Virginia 大学的 Syd S. Peng 编著,重庆大学的鲜学福和李通林也参加了本书的部分编写工作。

编著者

1991年7月

ABA 12/05

目 录

绪论	1
第一章 矿井石门揭煤突出的变弹模三维光弹性实验研究及其实例的分析	5
§1-1 变弹模三维光弹性模拟实验	5
§1-2 变弹模三维光弹性应力和弹性潜能计算	14
§1-3 模型中变弹模交界层面处的应力校核	20
§1-4 变弹模三维光弹模型中的粘结约束应力	27
§1-5 实验结果和突出实例分析及初步结论	31
第二章 煤与瓦斯突出中的瓦斯膨胀能	41
§2-1 概述	41
§2-2 瓦斯膨胀能的计算	41
§2-3 瓦斯膨胀能的分析及结论	43
第三章 南桐煤矿地质构造应力分布与煤和瓦斯突出的变弹模三维光弹性实验研究	46
§3-1 南桐煤矿地质构造体的模拟实验	46
§3-2 变弹模三维光弹性应力计算过程	61
§3-3 实验结果分析及初步结论	67
第四章 复合岩体的抗压试验和有限元分析	73
§4-1 复合岩体和岩石的三轴抗压试验	73
§4-2 复合岩体的三维有限元分析计算	74
§4-3 对试验和有限元计算结果的分析及其结论	84
第五章 预防矿井煤与瓦斯突出发生的主要原则	87
§5-1 主要预防原则	87
§5-2 预防措施选择注意问题	88
第六章 煤矿巷道底鼓及其控制	89
§6-1 巷道底鼓及其控制方法的边界元模拟研究	89
§6-2 煤矿巷道底鼓与采空区范围以及水平地质构造应力之间关系的研究	97
§6-3 不同底板锚杆设计对煤矿巷道底鼓的控制效果	105
§6-4 底板岩石破坏与巷道底鼓之间关系的力学分析	110
§6-5 与巷道底鼓相关的吸水膨胀应力	117
§6-6 三种岩石交界处的力学分析	122
问题和建议	130
附录	132
附录 I 变弹模三维光弹模型中的粘结约束应力	132
附录 II 石门揭煤巷道变弹模光弹模型中各计算点的光力条纹值	140
附录 III 南桐地质体变弹模光弹模型中各计算点的光力条纹值	147
参考文献	152

绪 论

在矿井生产中,煤与瓦斯突出是一种极为复杂的动力现象,也是矿井生产中的重大自然灾害之一,它的发生将严重影响矿井生产的安全。

自从1834年在法国鲁阿雷煤田的依萨克矿井发生世界上第一次煤与瓦斯突出以后,各产煤国也相继发生煤与瓦斯突出。例如欧洲在1879年就发生了煤与瓦斯突出事故;澳大利亚煤矿最早的煤与瓦斯突出是1895年发生在 Metropolitan 煤矿中,从那以后,澳大利亚已发生了450多次不同规模的突出事故……目前,全世界发生煤与瓦斯突出较严重的国家已有19个,其中尤以法国、前苏联,中国等国家最为严重。根据不完全统计,全世界各国已发生煤与瓦斯突出的总次数有2万多次,其中突出强度最大的一次是1969年7月13日发生在前苏联顿巴斯矿区的加林矿井,此次突出的煤量为14000t,喷出的瓦斯气体在25万 m^3 以上。

在中国,1933年前后曾在吉林省辽源矿务局的富国矿和太信矿发生过煤与瓦斯突出,但缺乏原始记载资料。1946年左右,四川省天府矿和南桐矿也发生过类似于煤与瓦斯突出的所谓“跳炭”现象,同样也缺乏当时的原始记载资料。全国解放以后,1950年4月20日在辽源矿务局的富国矿西二坑,发生了我国第一次有确切记载资料的煤与瓦斯突出;此后,又分别在天府矿务局、鸡西矿务局、北票矿务局等地发生了突出事件。目前,中国煤与瓦斯突出比较严重的是重庆、湖南、北票、贵州等地的部分矿井。根据有关统计资料,中国已发生了1万次左右的突出事件。

随着开采深度的不断增加和能源需求量的不断增大,煤与瓦斯突出事故也随之增多。在所有的突出现象中,石门揭煤突出是强度最大和危险性最大的矿井动力现象。例如中国发生的最大煤与瓦斯突出就是石门揭煤时,突出地点在四川省天府矿务局三汇坝一矿,突出煤量为12780t,喷出瓦斯为140万 m^3 。所以,国内外采矿学者对矿井石门揭煤突出问题的研究十分重视,并为之付出极大的代价。

国内外学者对煤与瓦斯突出现象给予了不同的描述。如日本著名学者Y. Hiramatsu等人将日本的煤与瓦斯突出现象解释为是将煤岩层中聚积的瓦斯和破碎煤体被突然喷射到采掘空间去这样一种状况……前苏联科学院的S. A. Khristianovich等人认为:突出倾向性煤层中常常含有高压瓦斯,在这些地区采掘时,有可能在瓦斯释放过程中伴随煤岩体破碎,大量煤岩突出以及瓦斯气体喷射到开挖空间这种煤与瓦斯突出事故……澳大利亚的J. Hanes等人根据煤矿生产实践经验指出:尽管煤与瓦斯突出与二氧化碳气体有着密切的关系,但是,大多数的突出却与甲烷气体有着更为紧密的联系。并且,煤与瓦斯突出总是在非均质地质构造区域发生,如岩脉和断层处。前苏联的B. N. Onopchuk也认为:突出总是在地质断层带附近区域和含有高压瓦斯的破碎煤中发生,突出过程往往受煤层开采之前煤和瓦斯混合物各种特性的影响和控制。中国一些学者认为:煤与瓦斯突出是由于突出倾向性煤层中饱含瓦斯,在地层重力、地质构造力以及瓦斯等因素的作用下,使煤层中积存了强大的弹性潜能和瓦斯内能,当采掘工作面接近这些区域时,煤层的二向受压状态得到解除,贮存在煤岩层中的弹性潜能和瓦斯内能突然释放使煤岩破碎而产生突出;在突出过程中,煤层中的大量吸附瓦斯瞬

时解吸使煤体粉化，并伴随高压瓦斯冲向采掘空间；突出发生使煤壁受到极大破坏，并在煤体中形成不规则形状的孔洞，喷出的瓦斯气体具有强大的冲击力，它可以将煤岩抛射到距工作面若干米远的地方。同时，喷出的瓦斯和突出的煤岩可以极大地破坏通风系统，还可以造成瓦斯窒息、瓦斯爆炸以及煤流埋人等重大安全事故。

为了预防煤与瓦斯突出，必须首先对突出发生机理给予正确解释。目前，国内外学者已经对此问题作了一定研究，但基本上处于定性阶段，或从感性上对突出机理进行解释。J. Hanes等人根据对澳大利亚两个典型煤矿的考察分析，认为可将煤与瓦斯突出发生和发展过程分为四个阶段：第一阶段称之为激发阶段，此阶段中，处于三维应力状态的固体煤层，因其煤层的突然暴露和煤层瓦斯阻力的降低，因此在煤层中产生大量的破裂现象，这为突出发生提供了条件。第二阶段中，煤层中的吸附瓦斯解吸释放使煤体破碎，并且，瓦斯压力的降低是随瓦斯的连续解吸作用和解吸瓦斯从破裂煤体中不断渗透出来的过程中发生的。当瓦斯解吸量大于渗透量时，煤层瓦斯压力则将升高，这意味着突出的临界状态（第三阶段）将来临。第三阶段是由第二阶段引起的，此阶段将出现煤岩物质的运动状态，瓦斯气体作为一种传递介质，它使破裂煤和粉化煤从煤体中抛射到采掘空间去。第四阶段是突出的结束，此时，所有的粉碎物质已经抛射出煤体。目前，澳大利亚主要从三个方面去研究突出发生机理，即煤的地质力学特性、地质和应力条件以及煤和瓦斯的渗透性。

中国煤炭科学研究所的宋士钊等学者在理论分析和现场观测的基础上，将煤与瓦斯突出过程分为五个阶段：第一阶段是准备阶段，即弹性潜能和瓦斯气体的不断积聚过程。如较高的集中压力形成，瓦斯的正常排放受阻而形成自由瓦斯聚积带等，第二阶段为激发阶段，即局部煤岩体的高速破碎和大量吸附瓦斯的解吸过程。第三阶段是煤体破碎和瓦斯解吸过程的进一步扩展阶段。第四阶段称之为煤和瓦斯的抛射阶段。第五阶段是瓦斯气体的进一步排放阶段。根据多次观察分析，第一、第五阶段的持续时间较长，可达几小时，甚至若干天。第二、第三、第四阶段的持续时间较短，一般在几秒或十多秒钟内完成。并且，第一、第二、第三、第四阶段有时可能循环发生多次。

在采矿生产中，煤（岩）与瓦斯突出问题是极为复杂的。为了认识和防治突出现象，波兰科学院的学者J. Litwinski对突出机理等问题从理论上作了较好的研究。他的主要观点如下：煤岩体属于多孔介质，这种介质的孔隙形成了各种结构、各种几何形态以及不同大小的毛细管系统，并且，介质孔隙中充填着瓦斯气体。在微孔内部，瓦斯气体经受着毛细浓缩作用，于是，煤岩介质体以固、液、气三种相态存在。……当应力波通过煤岩介质时，其应力状态、变形情况以及密度取决于介质状态方程和初始边界条件等。当冲击波传递时，其介质特性取决于热力学函数的二阶导数 $(\partial^2 p / \partial v^2)_s$ ，当满足关系 $(\partial^2 p / \partial v^2)_s < 0$ 时（ p 、 v 分别为压力和比容； S 为相应于熵状态的导数），并且具有相应的初始条件时，“反常”物质中就有形成膨胀冲击波的条件。反之，则无形成膨胀冲击波的条件。在冲击波区域中，煤岩介质将出现应力突变现象。如果介质相态转变发生的应力时间区间包含在冲击波应力突变的时间区间内，则将在介质中产生相态转变。在膨胀冲击波作用下，煤岩介质的骨架被破坏，于是，就可能发生煤与瓦斯突出。J. Litwinski还提出在介质中可以产生两种冲击波，即压缩冲击波和稀疏冲击波。如果 $(\partial^2 p / \partial v^2) < 0$ ，则为稀疏冲击波产生提供了条件，在这种冲击波的范围内，因应力突变而引起煤岩介质结构破坏，从而导致产生突出现象。

日本的Y. Hiramatsu等人经过对日本煤矿中煤与瓦斯突出特点的观察，并以应力分析

结果和现场实测结果为依据,对突出发生机理作了研究。他们发现煤与瓦斯突出是地应力和瓦斯综合作用下,使煤岩体产生机械破坏的物理现象,并提出煤层瓦斯含量是导致突出产生的主要因素等结论。前苏联是煤与瓦斯突出严重的国家之一,因此,对突出发生机理等问题的研究十分重视,并取得有意义的成果。例如,前苏联科学院有关学者认为:在突出倾向性煤层中,积存有大量的瓦斯气体,并且,煤层具有渗透性。当含有瓦斯气体的煤层具有自由释放面时,就有可能产生突出。如煤层中没有瓦斯气体,在应力作用下,尽管有自由释放面,只可能出现煤层压出现象,而不会发生煤与瓦斯突出。另外,他们还提出了采掘工作面前方煤层中存在有定向裂隙区、弹塑性阻隔区及其这些区域的几何尺寸等参数与突出发生之间的相互关系等问题。这些研究成果对于预防煤与瓦斯突出有一定的理论指导意义。

目前,国际上提出了几十种关于煤与瓦斯突出发生的假说理论,例如常见的假说理论有地压作用假说、瓦斯作用假说、火山作用假说、放炮震动假说、瓦斯膨胀能假说、顶底板位移不均匀与应力不连续作用假说、瓦斯水化物作用假说以及综合作用假说等。这些作用假说对于解释煤与瓦斯突出发生机理及其预防措施的选择都具有一定的意义。但是,根据国内突出资料的综合分析以及煤矿生产实践经验的总结,我们认为综合作用假说是比较合理的。这是因为该假说同时考虑了引起突出产生的主要因素,并且,在任何情况下发生的煤与瓦斯突出中,地压、瓦斯以及煤岩的物理力学性质都将起着不同程度的作用。从越来越多的突出现象中,国内外采矿及岩石力学学者发现综合作用假说更能解释煤与瓦斯突出产生的原因。因此,支持综合作用假说的学者越来越多,例如日本的平松良雄、前苏联的霍多特、美国的Farmer以及中国的陈锐和吴泽源等学者。

煤与瓦斯突出是矿井生产中的一大灾害,为了预防这种灾害,必须寻求预防突出发生的有效措施。目前,国内外采用的主要预防措施有水力冲孔、解放层开采、钻孔排放瓦斯、煤层注水以及震动性放炮等。上述这些预防措施在一定条件下都有一定的效果。如果煤层的透气性较好,采用钻孔预先抽放或排放突出倾向性煤层中的瓦斯气体不仅可以起到较好的防突作用,而且还可以将抽放或排放出的瓦斯气体作为工业和民用燃料。所以,这是国内外学者所公认的较好措施。

国内外学者在煤与瓦斯突出方面已经取得了一定的研究成果,有些成果已用于矿山生产中。但是,必须指出,目前对于突出问题的研究还多停留在感性认识和定性分析上。因现实此,必须对煤与瓦斯突出问题作全面深入地研究。根据国内外煤与瓦斯突出问题的研究状,笔者认为下述问题需要解决或需作进一步的研究:

(1) 矿井石门揭煤突出机理的研究,揭示非均质变弹模煤岩体在地压和瓦斯等因素作用下产生煤与瓦斯突出的内在原因,为制定合理的预防石门揭煤突出措施提供依据。

(2) 突出倾向性煤层倾角等参数变化与突出发生关系的模拟研究。

(3) 煤与瓦斯突出与地质构造应力分布关系的模拟实验研究,正确划分突出点或突出区域的位置,为采掘设计提供参考依据。

(4) 煤(岩)的微观结构与煤(岩)与瓦斯突出产生的本质关系。

(5) 在三轴应力作用下,煤岩体破坏发生和发展过程,特别应注意充填着瓦斯气体的煤岩体的破坏发生机理。

(6) 煤层瓦斯状态的热力学分析,寻求煤层瓦斯气体在突出发生前、后以及发生过程中的热力学实际变化状态。

(7) 对 CH_4 、 CO 、 CO_2 、 N_2 等突出气体的膨胀能、压力、含量以及热容量等参数作探讨, 并分析其在突出发生过程中的作用大小。

(8) 建立正确的煤层真实瓦斯气体渗流方程, 并在此基础之上进行物理模拟实验以及数值计算分析, 为预抽(排)突出倾向性煤层中的瓦斯气体提供可靠的理论依据。

(9) 应用电子计算机技术进行煤与瓦斯突出的动力模拟计算, 并将其结果与动力物理模拟实验结果作对比分析, 从而探讨煤与瓦斯突出发生过程中的各种动力效应等问题。

(10) 研究提高低透气性煤层渗透性系数的有效方法, 为预抽(排)低透气性煤层中的瓦斯气体提供条件, 从而达到预防突出发生之目的。

当然, 要解决以上问题, 消除或降低煤与瓦斯突出的危险性, 一定不能限制在传统和单一的研究方法上, 应该寻求多种反映实际的研究手段, 特别应注意综合各门相关学科知识来研究煤与瓦斯突出等矿井动力问题。为了实现这个目的, 这要求研究者本身除应具有较好的基础理论、专业知识以及试验技能外, 还应具备丰富的生产实践经验。只有这样, 才有可能取得有理论指导意义和实用价值的研究成果。

矿井中的巷道底鼓是煤矿生产中的另一种复杂动力现象。它的发生将会破坏井下的通风系统和运输系统等, 从而影响矿井的正常生产。目前, 全世界许多产煤国家都面临着不同程度的矿井巷道底鼓问题, 例如美国、中国、日本、前苏联以及加拿大等国都是矿井巷道底鼓比较严重的国家。可以预料, 随着矿井开采深度的增大以及地质条件的复杂性, 巷道底鼓现象将会越来越严重。因此, 研究巷道底鼓的产生机理以及预防措施不仅具有重要的学术价值, 而且更有着十分重要的应用价值。

煤矿巷道底鼓的类型主要有两种, 一种称之为动力底鼓, 另一种称之为软化底鼓。前者主要发生在脆性岩石之中, 而后者主要发生在含水软化岩石之中。巷道底鼓的影响因素比较多。目前, 国内外许多采矿和岩石力学学者普遍认为, 煤矿巷道底鼓与顶(底)板岩石的物理力学性质、地质构造条件、采掘设计、煤(岩)层的埋藏深度、底(顶)板岩石中的应力分布以及岩石的吸水性等因素密切相关。因此, 研究工作者如何在上述众多因素找出影响某具体煤矿中的巷道底鼓因素是需要解决的主要问题。

本书在已有的研究基础之上, 对矿井石门揭煤突出、煤与瓦斯突出中的瓦斯膨胀能、南桐煤矿地质构造应力分布与瓦斯突出关系、复合煤岩体的应力应变、预防突出发生的主要原则、煤矿巷道底鼓的产生机理及其控制等几个问题分别进行了探讨。这些问题都是煤矿生产中比较关心的问题, 因此, 本书提出的研究成果可供采矿和岩石力学学者参考。

第一章 矿井石门揭煤突出的变弹模三维 光弹性实验研究及其实例的分析

在所有矿井动力现象中, 石门揭煤时的煤与瓦斯突出是强度最高和危险性最大的。如全世界最大的煤与瓦斯突出和我国最大的煤与瓦斯突出都是在石门揭煤时发生的。分析国内外煤与瓦斯突出资料, 可知石门揭煤突出的平均强度是煤层平巷的7~14倍, 有的甚至高达40多倍。在我国所发生的千吨以上的大突出中, 约有80%是发生在石门揭煤时。并且, 石门揭煤突出时的瓦斯涌出量也特别大。我国多次千吨以上石门揭煤突出中, 其瓦斯涌出量为70~650m³/t。

最近十多年来, 因为石门揭煤突出现象越来越严重, 所以, 采矿工作者和岩石力学工作者对此问题的研究更加重视, 并付出了极大的代价, 也取得了一定的研究成果。尽管国内外学者对石门揭煤突出等动力现象作过许多研究, 其研究成果对于预防石门揭煤突出等动力现象具有一定的价值。但是, 在石门揭煤突出等动力问题的研究中, 还存在有许多急待解决的问题。例如, 国内外学者还没有完全获得石门揭煤巷道端部前方等位置煤岩体中的三维应力和弹性潜能的分布规律及其影响其分布的诸因素, 从而揭示石门揭煤突出等动力现象的发生机理。

众所周知, 材料的光弹性效应早在1816年就被发现, 但广泛用来解决工程实际问题还是本世纪30年代的事情。自从50年代人们发现环氧树脂可用作光弹材料以后, 光弹性实验技术得以迅速发展, 并较为广泛地应用于力学中的各个领域。在地学领域中, 对变弹模光弹材料的研究起源于50年代, 近年来有了较快的发展。人们已经发现了用改变环氧树脂中固化剂含量、增塑剂含量以及高分子树脂含量的方法来制造所需的变弹模光弹材料。尽管光弹性实验技术发展如此之快, 人们对变弹模光弹材料也有一定的研究, 但迄今为止, 在煤矿工程实际中, 还没有用变弹模光弹性实验技术来模拟研究矿井石门揭煤巷道前方煤岩体中的三维应力和弹性潜能的分布等煤矿实际问题。主要困难在于选择适合地层的光弹材料和制作变弹模三维光弹模型。特别是在研究石门揭煤巷道前方煤岩体中应力和弹性潜能时, 要首先解决通过不同弹模值光弹材料的光弹性应力计算诸问题。

本章采用变弹模三维光弹性实验技术, 对上述问题作了探讨。

§1-1 变弹模三维光弹性模拟实验

一、实验模型的选择

在地学中, 模拟实验是按照相似理论制作一个与原型相似的模型, 并通过模型研究所提出的问题, 然后将模型实验结果转换到原型结构上去。

1. 原型选择

为了模拟矿井石门揭煤巷道前方煤岩体中的应力分布，可以在煤系地层中划出一个六面体作为原型。六面体的几何尺寸考虑如下：因为在原始地层中开掘了石门揭煤巷道，所以，巷道围岩的应力要发生变化。根据圣维南原理，石门揭煤巷道对应力变化的影响是有限的，即在此区域影响较大，远离此区域几乎不受影响。因此，原型结构的几何尺寸不应小于该影响范围。同时，所选择的原型结构中应包括煤层和顶、底板岩石等。

本实验选择三个原型，选择时考虑地层自重压力和煤岩变弹模材料的影响等因素。

(1) B^* 原型：该原型选择某石门揭煤巷道（见图1-1）。石门揭煤巷道形状为半圆拱，煤层倾角 38° ，共由煤层、顶、底板以及间接顶、底板共五层不同的弹模材料组成，并认为各层材料是粘合的。各层光弹材料的弹模值，弹模比值以及各部分的几何尺寸分别如下：

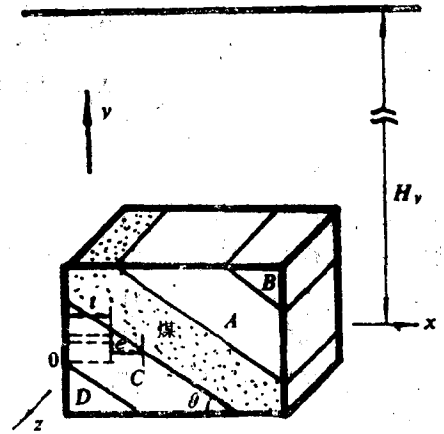


图1-1 B^* 石门揭煤巷道示意图

A—顶₁， B—顶₂， C₁—底₁，
D₂—底₂， $\theta = 38^\circ$

$$\left. \begin{aligned} E_{\text{顶}2} &= 1.592 \times 10^5 \\ E_{\text{顶}1} &= 0.66 \times 10^5 \\ E_{\text{煤}} &= 0.40 \times 10^5 \\ E_{\text{底}1} &= 1.9768 \times 10^5 \\ E_{\text{底}2} &= 0.62 \times 10^5 \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

$$E_{\text{顶}2} : E_{\text{顶}1} : E_{\text{煤}} : E_{\text{底}1} : E_{\text{底}2} = 3.98 : 1.65 : 1.00 : 4.94 : 1.546 \quad (1-2)$$

$$\left. \begin{aligned} L_{\text{顶}2} &= 17.78\text{m} \\ L_{\text{顶}1} &= 17.50\text{m} \\ L_{\text{煤}} &= 14.36\text{m} \\ L_{\text{底}1} &= 22.84\text{m} \\ L_{\text{底}2} &= 14.10\text{m} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

$$\left. \begin{aligned} t &= 9.23\text{m} \\ R &= 2.30\text{m} \\ h &= 2.80\text{m} \\ e &= 5.67\text{m} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

式中 $E_{\text{顶}1}$ 、 $E_{\text{底}1}$ 、 $E_{\text{顶}2}$ 、 $E_{\text{底}2}$ 、 $E_{\text{煤}}$ 、 $L_{\text{顶}1}$ 、 $L_{\text{底}1}$ 、 $L_{\text{顶}2}$ 、 $L_{\text{底}2}$ 、 $L_{\text{煤}}$ 分别为煤层顶底板、间接顶底板以及煤层的弹性模量 (kg/cm^2) 和厚度； t 、 R 、 h 分别为石门揭煤巷道的长度，圆弧半径以及墙高； e 为石门揭煤巷道端部距前方煤层的水平距离。

(2) C^* 原型：该原型选择如图1-2所示。其石门揭煤巷道形状为正方形，煤层倾角 70° ；

共由煤层和顶、底板三层不同弹模值材料组成，各层材料是粘合的。各层材料的弹模值、弹模比值以及各部分的几何尺寸分别如下：

$$\begin{aligned} E_{\text{顶1}} &= 1.20 \times 10^5 \\ E_{\text{煤}} &= 0.40 \times 10^5 \\ E_{\text{底1}} &= 1.34 \times 10^5 \end{aligned} \quad (1-5)$$

$$E_{\text{顶1}}:E_{\text{煤}}:E_{\text{底1}} = 3.00:1.00:3.35 \quad (1-6)$$

$$\left. \begin{aligned} L_{\text{顶1}} &= 32.1\text{m} \\ L_{\text{煤}} &= 12.9\text{m} \\ L_{\text{底1}} &= 42.5\text{m} \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

$$\left. \begin{aligned} t &= 31.35\text{m} \\ e &= 6.10\text{m} \\ a &= 3.82\text{m} \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

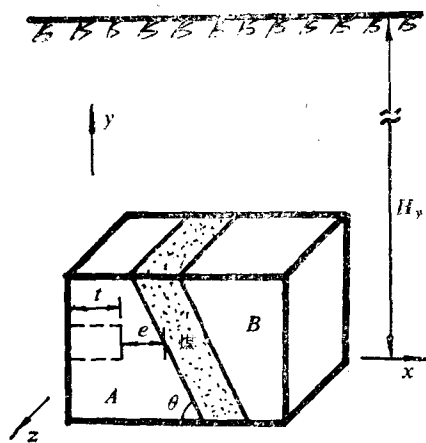


图1-2 C*、D*石门揭煤巷道示意图
A—底1； B—顶1； $\theta = 70^\circ$ 。

式中：a为方形石门揭煤巷道的边长。

(3) D*原型：前述B*、C*原型中各层材料都是粘合的，而D*原型中煤层和顶、底板岩石却是自由叠合的。除此条件不同外，D*原型的选择不与C*原型的选择完全相同。

该原型的选择仍参见图1-2，但认为该图中煤岩处于非粘合状态。

需要说明的是各原型选择时，考虑石门揭煤巷道断面较大些是出于制作实验模型等的需要。作为近似模拟，这样考虑是允许的。特别是本实验主要是为了寻求石门揭煤巷道前方煤岩体中的应力分布的相对规律等，故上述考虑是可以的。

2. 相似条件确定

有关文献指出，对于弹性静力相似问题，模型与原型除了要求几何相似、载荷相似及边界条件相似外，还要求虎克数和泊松比分别应相同，或即满足下述条件：

$$C_P = C_E \cdot C_L \quad (1-9)$$

$$C_\mu = 1 \quad (1-10)$$

式中：C_P、C_E、C_L、C_μ分别为载荷相似系数、弹模相似系数、几何相似系数和泊松比相似系数。

因为脆性岩石破坏之前可用小变形弹性理论进行研究，所以，此类实验可以用广义相似。因此，在这种情况下，其应力σ、位移Δ均与载荷p成线性关系，即

$$\sigma = K_1 p \quad (1-11)$$

$$\Delta = K_2 p \quad (1-12)$$

式中：K₁、K₂为比例常数。

在满足上述两式条件下，其量纲方程为：

$$\phi_1(\mu) = \frac{\sigma \cdot L^2}{p} \quad (1-13)$$

$$\phi_2(\mu) = \frac{\mu \cdot E \cdot L}{p} \quad (1-14)$$

所以,在此条件下,当不考虑体积力,其均布载荷 q 作用下的线性结构相似关系如下:

$$C_d = \frac{C_q \cdot C_L}{C_E} \quad (1-15)$$

$$C_\sigma = C_q \quad (1-16)$$

$$C_\epsilon = \frac{C_q}{C_E} \quad (1-17)$$

式中: C_d 、 C_q 、 C_σ 、 C_ϵ 分别为位移、荷载集度、应力以及应变相似系数。

因此,在广义相似问题中,只需满足几何相似、物理相似、载荷相似和边界条件相似。并且,当弹模相似系数 C_E 确定后,其几何相似系数 C_L 和载荷相似系数 C_q (或 C_σ) 可作任意选择。

本模拟实验满足广义相似。为了保证实验模型和原型保持相似,需满足下述关系。

(1) 几何相似:问题中的主要几何参数有石门揭煤巷道的几何尺寸、煤层和顶底板岩石的厚度、煤层倾角、原型的外形尺寸以及石门揭煤巷道距前方煤层的距离等。在所研究问题的几何系统中,任一点的相应坐标应满足以下条件:

$$C_L = \frac{L_H}{L_M} \quad (1-18)$$

$$\alpha_H = \alpha_M \quad (1-19)$$

式中 L_H 、 L_M 、 α_H 、 α_M 分别为原型与模型相应点的几何尺寸和煤层倾角。

(2) 物理相似:原型结构中的主要物理量有弹性模量、泊松比等。因为原型为复合弹模材料所构成,因此,必须尽可能使原型和模型中各层材料的弹模比值相同。另外,本实验可以不考虑原型与模型中各材料的泊松比相同。

(3) 载荷和边界条件相似:所选择的原型上部承受地层重力的作用,方向为铅直向下,并均匀地作用在原型上。原型周围处于固定约束状态,并使其应变 ϵ_x 和 ϵ_z 都等于零。该原型结构在铅直均布载荷作用下处于平衡状态。这就是原型的载荷和边界条件。所以,选择的模型也应具有相似的边界和载荷作用条件。

当然,在工程模拟实验中,要完全满足上述各相似条件中相关量的相似关系是十分困难的。因此,研究者在解决具体问题时,应采用抓主要矛盾的方法,即抓住研究问题中的主要相关量,忽略次要相关量,从而使模拟实验能够得以实现。

3. 实验模型选择

根据相似条件和原型的实际情况,现选择下述模型分别模拟研究各个原型。

(1) B^* 模型:此模型的选择仍参见图1-1。其几何相似系数选择如下:

$$C_L = 1153.4 \quad (1-20)$$

根据几何相似系数 C_L , 计算确定的 B^* 模型各部分几何尺寸如下:

$$\left. \begin{aligned} L_{顶2} &= 15.42 \text{ mm} \\ L_{顶1} &= 15.17 \text{ mm} \\ L_{煤} &= 12.45 \text{ mm} \\ L_{底1} &= 19.78 \text{ mm} \\ L_{底2} &= 12.18 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \quad (1-21)$$

$$\begin{aligned}
 t &= 8 \text{ mm} \\
 R &= h = 2 \text{ mm} \\
 c &= 5 \text{ mm} \\
 \alpha &= 38^\circ
 \end{aligned}
 \tag{1-22}$$

$$\begin{aligned}
 a_x &= 70 \text{ mm} \\
 b_x &= 60 \text{ mm} \\
 C_y &= 51 \text{ mm}
 \end{aligned}
 \tag{1-23}$$

式中 a_x 、 b_x 、 c_y 分别为实验模型的长、宽、高。

此模型的载荷和边界条件与 B^* 原型相同和相似，模型中各层光弹材料的弹模比值与 B^* 原型各层材料的弹模比值式 (1-2) 基本相同。

(2) C^* 模型：此模型选择参考图 1-2。模型的几何相似系数和几何尺寸分别如下：

$$C_L = 764.5 \tag{1-24}$$

$$L_{\text{底}1} = 54.30 \text{ mm}$$

$$L_{\text{煤}} = 16.90 \text{ mm} \tag{1-25}$$

$$L_{\text{顶}1} = 42 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 41 \text{ mm} \\
 a &= 5 \text{ mm} \\
 c &= 8 \text{ mm} \\
 \alpha &= 70^\circ
 \end{aligned}
 \tag{1-26}$$

$$\left. \begin{aligned}
 a_x &= 85 \text{ mm} \\
 b_x &= c_y = 93 \text{ mm}
 \end{aligned} \right\} \tag{1-27}$$

该模型的载荷和边界条件选择与 C^* 原型相同或相似。各层光弹材料的弹模比值与 (1-6) 式基本相同。

(3) D^* 模型：此模型的选择与 C^* 模型相同，但 D^* 模型中各层材料是自由叠合的，而 C^* 模型中各层材料是粘合的。

煤矿生产实践告诉我们，石门揭煤巷道前方煤岩体的接合形式或是自由叠合的，或是紧密粘合的……。所以， B^* 、 C^* 模型分别用以模拟煤层和顶、底板岩石处于粘合状态等情况，而 D^* 模型用以模拟煤层和顶、底板岩石处于非粘合状态等情况，通过分析 B^* 、 C^* 、 D^* 模型的实验结果，从而说明其与石门揭煤动力现象发生的关系。

二、配制模型光弹材料及性能测定

由文献 [18] [19]，可知固化剂含量的变化对光弹材料在常温下的弹性模量无明显影响，但是，随着固化剂含量的增加，光弹材料的冻结弹性模量值却随之增大。因此，利用改变固化剂在环氧树脂中的含量来制备各种光弹材料。

实验中选用的固化剂是失水苹果酸干，环氧树脂型号是 618^{*}。经过多次配方试验，最后确定用表 1-1 中的两种配比方案来配制各模型所需的光弹材料。

在配制上述光弹材料的同时，还分别按同样的配比浇注了厚度为 8mm 的板材作光弹材

表1-1 光弹材料配比

方 案 · 序 号	材 料 名 称	环氧树脂:失水苹果酸干	模 拟 地 层
I	2*	100:20	煤层
	5*'	100:36.17	顶板 1
	6*'	100:41.12	底板 1
II	2*	100:20	煤层
	3*	100:25	底板 2
	4*	100:30	顶板 1
	5*	100:38.5	顶板 2
	6*	100:41.5	底板 1

料试件之用,以测定各光弹材料的光学-力学性能。为了保证模型光弹材料与试件光弹材料的性能相同,实验中让两者的制造过程完全相同。

将上述试件材料制成7个直径 $D=44\text{mm}$, 厚度 $h=7\text{mm}$ 的圆盘试件,它们分别代表 2*、3*、4*、5*、6*、5*'、6*' 光弹材料。然后,在冻结箱中测定这7种光弹材料的热光曲线、临界温度、冻结温度。其中冻结条纹值 f 和冻结弹性模量 E_T 的计算公式分别为:

$$f = \frac{8p}{\pi Dn} \quad (1-28)$$

$$E_T = \frac{(8-\pi)p}{2\pi h \cdot \Delta D} \quad (1-29)$$

式中: p 、 D 、 h 分别为试件的冻结载荷、直径以及厚度; n 为圆盘试件中心处的等差线级数; ΔD 为圆盘试件水平直径的改变值。

本实验中各种配比值的光弹材料性能测算结果列在表1-2中。

由表1-1和表1-2,可知两种配比方案中的冻结弹模比值基本上与前(1-2)、(1-6)式相同。即

$$E_{5*'}:E_{2*}:E_{6*'} = 2.933:1.00:3.303 \quad (1-30)$$

$$E_{5*}:E_{4*}:E_{2*}:E_{6*}:E_{3*} = 3.95:1.69:1.0:4.883:1.533 \quad (1-31)$$

其弹性模量相似系数 C_E 也可由式(1-1)和表1-2计算求得。即

$$C_{E1} = C_{E2} = \frac{0.40 \times 10^5}{98.6} \approx 406 \quad (1-32)$$

表1-2 光弹材料性能

光弹材料名称 (序号)	冻结条纹值 f (kg/cm)	冻结弹模值 E_T (kg/cm ²)	临界温度 T_0 (°C)	冻结温度 $T_{\text{冻}}$ (°C)
2*	0.325	98.6	70	130
3*	0.346	151.2	85	130
4*	0.364	167.0	95	130
5*	0.378	389.6	110	130
6*	0.389	481.0	120	130
5*'	0.378	289.2	125	150
6*'	0.383	325.68	130	150

三、光弹模型的主要制造工艺

由前可知,我们选择了 B^* 、 C^* 、 D^* 模型来模拟石门揭煤巷道。考虑到各个模型几何形状和几何尺寸等的差异性,故其制造工艺也有不同。

1. C^* 光弹模型的制造工艺

此光弹模型采用三种光弹材料。由于模型中煤层顶、底板材料较厚,故使用套模成型方法制造。即首先按设计的模型制作木模,由木模制成石膏模,再通过石膏模浇注所需形状的光弹材料。

制造木模要考虑恰当的取模斜度,木模表面的光洁度应提高。作好的木模见图1-3。

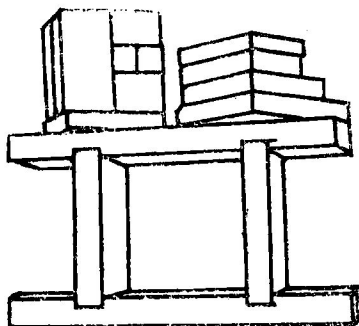


图1-3 木模图

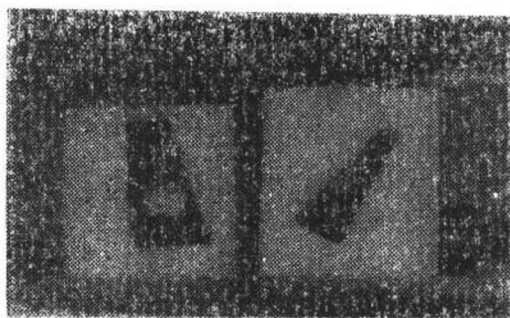


图1-4 石膏模具(照片)

石膏模具用模型石膏制造,分别用以模拟煤层顶、底板岩石。制好的石膏模具如图1-4。由于煤层的厚度较小,故用浇注板材的方法制造。石膏模具所用的脱模剂配方如下:

硅橡胶:正硅酸乙脂:二丁基二月硅酸锡=100:3:2 (1-33)

浇注光弹材料之前,先分别算出各模型所需光弹材料的总重量,环氧树脂和固化剂的分别重量。然后将石膏模具等置于烘箱中,在 $55\sim 65^{\circ}\text{C}$ 温度范围内浇注光弹材料。笔者是以表1-1中固化剂含量最低的 2° 材料开始逐渐浇注的。

考虑到 C^* 光弹模型中各层材料的厚度大,所以,采用二次固化法对模型中各层光弹材料进行固化。其固化曲线分别见图1-5和图1-6。经过二次固化后的光弹模型块见图1-7。

然后,将经过二次固化的光弹材料粘合成一个整体,再作机械精加工,使之成为所需精度的变弹模光弹模型。其模型粘结剂的配方如下:

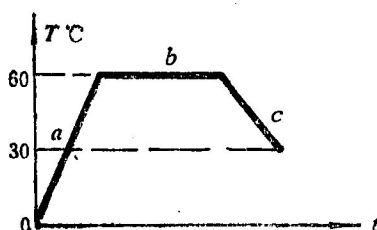


图1-5 第一次固化曲线(C^* 、 D^*)

$a=10^{\circ}\text{C}/\text{h}$; $b=40\text{h}$;
 $c=5^{\circ}\text{C}/\text{h}$

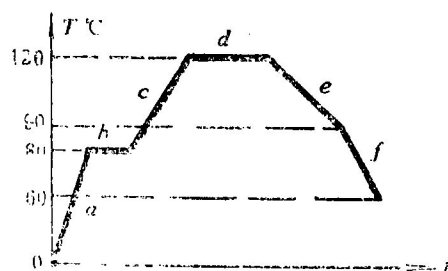


图1-6 第二次固化曲线(C^* 、 D^*)

$a=5^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{C}/\text{h}$; $b=24\text{h}$; $c=5^{\circ}\text{C}/\text{h}$;
 $d=25\text{h}$; $e=3^{\circ}\text{C}/\text{h}$; $f=6^{\circ}\text{C}/\text{h}$

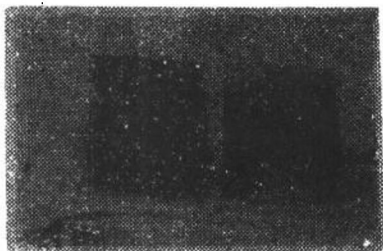


图1-7 光弹模型块 (照片)

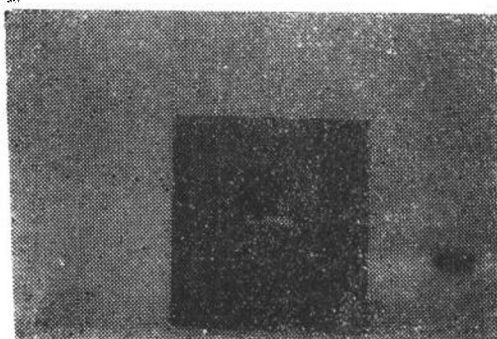


图1-8 C^* 、 D^* 变弹模光弹模型 (照片)

环氧树脂:乙二酸:邻苯二甲酸二丁脂=100:6:8

(1-34)

制造好的 C^* 光弹模型如图1-8所示。

2. B^* 光弹模型的制造工艺

B^* 模型用五种光弹材料制造,其主要制造工序有:模具选择,脱膜剂配制,浇注光弹材料,光弹材料固化,各层材料的粘结及机械精加工。模具用玻璃夹具装置,浇注板材时要考虑充分的加工余量。因为 B^* 模型中各层光弹材料厚度比 C^* 模型中各层材料厚度要小些,故确定光弹材料的总固化时间要短些。于是,所采用的固化曲线分别见图1-9和图1-10。

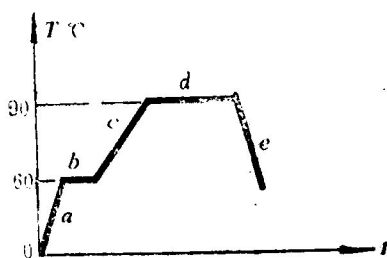


图1-9 第一次固化曲线(B^*)

a— 10°C/h ; b—8h; c— 5°C/h ;
d—10h; e— 5°C/h

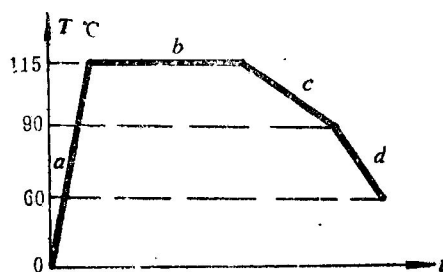


图1-10 第二次固化曲线(B^*)

a— $10\sim 15^{\circ}\text{C/h}$; b—8h;
c— 4°C/h ; d— $5\sim 7^{\circ}\text{C/h}$

其余制造工序与 C^* 光弹模型相同。

制造好的 B^* 光弹模型如图1-11所示。

3. D^* 光弹模型的制造工艺

此模型的制造工艺过程与 C^* 模型相同,但各层光弹材料不需要用粘结剂粘合成一个整体。

做好的 D^* 光弹模型可参考图1-8。

四、冻结加载方法

B^* 、 C^* 、 D^* 光弹模型的载荷和边界条件如前所述,它是进行冻结加载的基础。

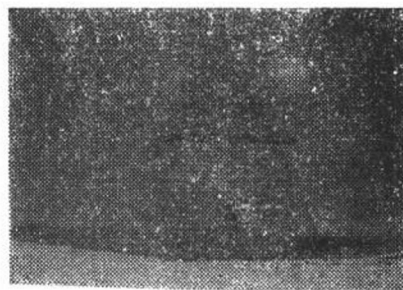


图1-11 B^* 变弹模光弹模型 (照片)