

The Coupled Thermo-mechanical
Characteristics of Coal
and Their Application

煤的热力耦合特性 及其应用

万志军 冯子军 著



科学出版社

煤的热力耦合特性及其应用

万志军 冯子军 著

国家自然科学基金项目 (51074164)

教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目 (NCET-10-0770) 联合资助

江苏省“333 工程”科研项目 (BRA2010133)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是一部系统介绍煤在热力耦合作用下的物理力学特性及其应用的著作。内容主要包括热力耦合作用下煤的热解产气规律,煤的热变形与破坏特征、蠕变特征,煤的热物理力学参数演化特征、煤热破裂过程的声发射特征以及热解产气对煤的力学行为和物理力学特性的影响等,并介绍了煤的这些特性在煤炭地下气化和褐煤原位注热开采方面的初步应用。热力耦合作用下煤的力学行为与物理力学特性极为复杂,本书在这方面作了初步探索,以期引起相关研究领域同行的共鸣。

本书可供采矿、化工、安全及能源科研与管理部门广大科研工作者和高等院校研究生等参考。

图书在版编目(CIP)数据

煤的热力耦合特性及其应用/万志军,冯子军著. —北京:科学出版社,2014.1

ISBN 978-7-03-039287-9

I. ①煤… II. ①万… ②冯… III. ①煤岩-热力学-耦合-研究 IV. ①P618.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第296153号

责任编辑:胡凯 曾佳佳 冀 勳/责任校对:韩 杨

责任印制:肖 兴/封面设计:许 瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014年1月第一次印刷 印张:10

字数:200 000

定价:56.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

随着人类社会的发展,深部资源能源开发工程已进入人们的视野,人们迫切需要了解深部岩体的特性。岩石力学的发展是伴随着试验机的发展而逐步发展、成长和成熟的。随着刚性试验机原理的发现和刚性试验机的诞生,围压三轴试验机、真三轴试验机、高温高压三轴试验机等的研制成功以及与之相关的大量试验研究,许多鲜为人知的岩石特性逐渐得以揭示,并大大推动了岩石力学学科的发展,使其成为对国民经济有重要影响的新兴学科。现代高温高压岩石力学主要针对地壳内部埋藏较深的花岗岩、大理岩等硬岩开展高温高压条件下岩石的物理力学特性实验研究,为人们了解、认识、研究地球内部结构、构造及动力学过程提供了有力的工具。煤炭是世界重要的化石能源,在我国长期占据一次能源构成的70%以上。煤作为一种特殊的有机岩石,其高温变形破坏特征与常温条件下有很大的不同,其热力耦合特性的研究对于煤炭地下气化等先进采矿方法具有重要的理论意义和应用价值,而目前国内外在这方面的研究却非常匮乏。

煤炭地下气化、煤炭原位注热开采以及煤炭地下直接液化都是只提取煤中含能组分,而将灰渣等污染物留在地下的先进采矿方法,是煤炭洁净利用技术体系的重要发展方向。经过多年的研究开发,煤炭地下气化技术得到很大发展,但目前仍处于试验阶段,还有很多问题需要研究解决。而这些问题的解决离不开煤体在温度和压力耦合(热力耦合)作用下的耦合特性的研究,包括煤体在热力耦合作用下的变形破坏特征、流变特征,变形模量等物理力学参数的温度效应以及煤的热解产气对其热物理力学特性的影响规律等。

在中国矿业大学“211工程”资助下,本书作者所在团队在赵阳升教授带领下,自主研制了“600℃ 20MN 伺服控制高温高压岩体三轴试验机”。依托此平台,在国家自然科学基金项目及教育部、江苏省人才基金资助下,开展了一系列有关煤体高温高压力学行为和热物理特性试验研究工作,并初步应用于工程实际。本书是对研究成果的阶段性总结,主要围绕以下几个方面展开论述。

(1) 热力耦合作用下煤的变形和破坏特征。主要包括高温三轴应力条件下煤的热变形特征、蠕变特征;煤的热破裂临界温度、煤破裂后的渗透性变化特征;煤的破坏模式等力学行为。

(2) 热力耦合作用下煤的物理力学参数的温度效应。主要包括高温三轴应力条件下煤的物理力学参数,如渗透率、变形模量、热膨胀系数等的变化特性。

(3) 热力耦合作用下煤产气对其热物理力学特性的影响规律。主要包括热力

耦合作用下产气显著的烟煤和产气较少的无烟煤的热解产气规律及热物理力学特性, 热解产气对煤的热物理力学特性的影响, 以及热力耦合作用下煤的热物理力学耦合特性的机制。

(4) 热力耦合作用下煤体破裂的声发射特征。主要包括煤体在高温高压下破裂时的声发射特征, 以及热力耦合作用下煤体热破裂的影响因素分析等。

(5) 煤的热力耦合特性的工程应用。主要包括煤的热力耦合特性研究成果在煤炭地下气化和煤炭原位注热开采的初步应用, 涉及煤炭地下气化和煤炭原位注热开采采场温度场特征、应力分布特征、位移场特征以及气化采场矿山压力显现特征等。

本书研究工作得到国家自然科学基金项目(51074164)、教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目(NCET-10-0770)、江苏省“333工程”科研项目(BRA2010133)的联合资助, 特此致谢。赵阳升教授开辟和领导了本领域的研究工作, 本书研究内容的完成离不开他的大力支持。项目试验工作除了需要投入大量财力和物力, 还需要投入大量人力, 成果是课题组多年共同努力的结果, 研究生董付科、周长冰、李根威、张源、王冲、刘渝、马进功、贺中海、国峰、张博、朱成坦、杜广立、黄玉成、刘建明等在实验方面做了大量艰苦的工作, 尤其是博士研究生周长冰协助作者带领课题组开展项目研究工作, 为项目的顺利完成作出了重要贡献, 在此一并表示感谢。

本书编写分工情况: 前言、第1章、第2章由万志军完成; 第3章到第6章由冯子军完成, 第7章由万志军、冯子军共同完成, 万志军负责统稿。

煤作为有机岩石, 在高温高压下发生复杂的物理变化和化学反应, 其热物理特征及力学行为极为复杂, 有关煤的高温高压试验工作的难度也极大。本书在煤的热力耦合特性及其应用方面只是作了初步探索, 无论是研究的深度还是广度均显不足, 权作抛砖引玉, 恳请同行专家学者及广大读者批评指正, 您的宝贵意见和建议无疑是鼓励作者进一步做好工作的真知灼见。

作 者

2013年9月于徐州

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与研究意义	1
1.2 煤的热力耦合特性研究现状	2
1.3 本书主要内容	6
第 2 章 煤的热力耦合实验设备及测试系统	7
2.1 试验机主要功能与技术参数	8
2.2 试验机的构成	9
2.3 实验测试系统	13
2.4 试验机研制中的技术难点	16
第 3 章 煤体热力耦合热解产气规律	27
3.1 概述	27
3.2 实验方法	29
3.3 煤体热力耦合产气规律及气体成分	30
3.4 气煤和无烟煤热解产气规律对比分析	41
第 4 章 煤体热力耦合变形特征	42
4.1 概述	42
4.2 实验方法	43
4.3 煤体热力耦合热变形特征	45
4.4 煤体热力耦合蠕变特征	59
第 5 章 煤体热力耦合力学参数演化特征	70
5.1 概述	70
5.2 实验方法	71
5.3 煤体热力耦合弹性模量演化特征	72
5.4 煤体热力耦合线性热膨胀系数演化特征	75
5.5 热解产气对煤体物理力学特性的影响	78
第 6 章 煤体热力耦合破坏特征	82
6.1 概述	82
6.2 岩石热破裂检测技术	82
6.3 实验方法	84

6.4	煤样渗透率随温度变化规律·····	87
6.5	升温过程中煤体的声发射特征·····	94
第7章	煤的热力耦合特性的工程应用·····	107
7.1	概述·····	107
7.2	煤炭地下气化工程应用·····	107
7.3	褐煤原位注热开采油气及提质改性工程应用·····	130
参考文献	·····	146

第1章 绪 论

1.1 研究背景与研究意义

地下矿产资源开采过程中,涉及高温高压岩石力学的领域,主要有深部煤炭资源的化学方法开采、高温岩体地热开采和深部油气开采等(赵阳升等,2008a)。这些工程领域的研究往往不同于固体地球科学(尤其是地球物理学),后者一般以地球内部物质结构、组成和物理化学性质为研究内容(王绳祖,1995a;金振民,1997),而地下深部矿产资源的开采既要研究工程岩体的变形行为和机制,从而保证工程岩体的稳定性,又要面临常温-高温和低压-高压的多场耦合环境。这些方面是工程岩石力学和高温高压岩石力学共同研究的内容,属于这两个学科的交叉研究领域,本书把这一研究领域所属的分支学科暂称为“高温高压工程岩石力学”。由于地层深部复杂的温压环境和物理力学过程很难直接观测,高温高压工程岩石力学的研究也主要依赖于高温高压实验技术来模拟地球内部这些复杂的环境和过程。

自20世纪60年代初开始发展起来的现代高温高压岩石力学实验和理论为人们了解、认识、研究地球内部结构、构造及动力学过程提供了一种有力的工具。与一般工程力学相比,高温高压岩石力学主要针对的是地球内部更大时空尺度和温压范围固体介质的变形过程,它的研究拓展了人类对于岩石变形、破坏、失稳全过程的认识,从而有可能为高温高压工程岩石力学的进一步深入研究提供借鉴和线索(王绳祖,1988,1995a,1995b)。前人关于高温高压岩石力学的研究大多是针对地壳内部埋藏较深的花岗岩、大理岩等硬岩进行高温高压下的物理力学特性实验研究。

我国化石能源中,煤炭的储量相对丰富,而石油和天然气则相对贫乏,能源的天然禀赋特征决定了煤炭长期占据我国一次能源的绝对优势地位(70%以上)。但我国的煤炭生产和加工利用方式相对粗放,传统的煤炭开采和加工方法不仅造成资源的浪费,而且产生了比较严重的环境问题。要从根本上改变这种情况,必须改变传统采矿观念,从源头上引入绿色开采理念。煤炭地下气化技术或者煤炭地下直接液化技术等先进的化学采矿方法,既可解决采矿中的环境问题,也可为我国国民经济发展提供宝贵的清洁的油气能源,是绿色开采的重要技术支撑。煤炭地下气化是将位于地下的煤炭进行有控制的燃烧,通过对煤的热作用及化学作用产生可燃气体的一种采矿方法。该方法是集建井、采煤、气化工艺为一体的多

学科开发流态洁净能源与化工原料的新技术, 被誉为第二代采煤方法 (余力, 1995)。赵阳升等 (2005)、冯增朝等 (2009) 提出煤炭原位注热开采方法, 向埋藏于地下的煤层注入高温蒸汽将煤层加热并热解, 直接采收热解气和焦油, 为煤炭的清洁开采提供了新的思路和方法。美国在煤炭地下直接液化方面进行过一些探索, 采用溶剂使原煤就地液化, 是一种将煤的开采和初步加工相结合的综合采矿方法。无论是煤炭地下气化还是煤炭原位注热开采, 抑或是煤炭地下直接液化, 其实质都是只提取煤中含能组分, 而将灰渣等污染物留在地下, 具有安全性高、效率高、投资省、污染少等优点, 是先进的采矿方法, 也是煤炭洁净利用技术体系的重要发展方向, 因而受到世界各国的普遍重视并竞相投入资金研究开发 (徐跃等, 1994; 杨兰和, 2001b)。

煤炭地下气化、煤炭原位注热开采以及煤炭地下直接液化都是对处于原始应力状态下的煤层进行热加工的过程, 是一个复杂的多相介质多场耦合问题, 涉及热流固耦合及化学作用 (万志军, 2006)。煤是以植物遗体为主转变而成的, 是一种极不均一的有机岩石 (王生维等, 1995), 在受压和加热过程中, 其物理结构会发生显著变化, 煤的变形、破坏等行为以及热传导系数、变形模量、热膨胀系数、渗透性等热物理力学特性将随之发生显著变化。这些力学行为和热物理力学性质的改变对于煤炭地下气化采场温度场与“三带”分布变化特征, 气化工作面的推进速度, 水蒸气、氧气和煤气在煤层内的流动特征, 溶剂与液化产物在煤层中的流动状况等都将产生直接而明显的影响 (徐跃等, 1994; 杨兰和, 2001b; 万志军, 2006), 而这些都是亟待解决的技术难题。

煤作为一种特殊的有机岩石, 其高温变形破坏特征与花岗岩等火成岩和砂岩等沉积岩以及大理岩等变质岩均有很大不同 (王生维等, 1995)。目前国内外在这方面的研究不多, 尤其对大尺寸试样的实验研究更少。煤炭地下气化、煤炭原位注热开采以及煤炭地下直接液化都是煤炭在地下深处高温环境下发生复杂的物理化学变化, 煤体在热力耦合作用下的变形破坏特征、蠕变特征, 变形模量、热膨胀系数等物理力学参数的温度效应等, 以及煤的热解产气对其热物理力学特性的影响规律等的研究, 将为煤炭地下气化、煤炭原位注热开采与直接液化的工程实践提供研究基础, 对其推广应用必将产生积极影响, 也是对高温高压岩石力学理论的补充和完善。

1.2 煤的热力耦合特性研究现状

1.2.1 煤的热力耦合变形和破坏特征

国内外学者对常规条件 (单轴、三轴) 下煤的变形与破坏特征进行了大量的

试验与理论分析。常温条件下煤岩的单轴实验研究表明(闫立宏等, 2001; 刘宝琛等, 1983; Liu et al., 1981; 杨永杰, 2006), 煤的变形破坏过程分为四个阶段, 分别是弹性及压密阶段、线弹性阶段、脆性破坏阶段、破裂发展阶段。刘宝琛等(1983)还给出了煤变形破坏的力学模型。孟召平等(2006)利用超声-时间动态测试方法系统地分析了煤岩动弹性力学参数, 同时测试了煤岩的静态力学参数, 研究表明: 煤岩的动弹性模量大于其静弹性模量, 而动泊松比小于其静泊松比, 单轴抗压和抗拉强度与其纵波或横波波速之间呈正相关关系。

申卫兵等(2000)研究了三轴条件下4种变质程度共6种煤阶煤岩的力学参数, 结果表明: 煤岩杨氏模量和抗压强度随有效围压的增加而增加, 并通过曲线拟合给出了杨氏模量随煤岩埋深的变化关系式。傅雪海等(2002)研究了多相介质煤岩的力学特性, 结果表明: 自然状态下的煤样弹性模量、抗压强度和体积压缩系数大于水饱和状态下的, 水饱和状态下的又大于气、水介质下的; 体积发生膨胀, 煤体强度和机械能降低, 随着气、水介质的排出, 煤基质发生收缩, 煤体强度提高, 泊松比减小, 煤储层渗透率得到改善。苏承东等(2006)研究了不同应力路径条件下煤样的变形和强度特征, 结果表明: 煤样在围压作用下裂隙闭合后利用摩擦仍可以承载, 并且所有煤样峰前变形特性基本一致。三轴卸围压试验峰值处出现屈服平台, 与常规三轴试验相比峰后塑性明显增强, 煤样破坏时的轴向应变受常规三轴压缩全程应力-应变曲线控制。常规三轴压缩和三轴卸围压试验的峰值强度与围压均呈线性关系, 围压影响系数基本相同, 内摩擦角能够表征材料力学性质, 与加载方式没有关系, 但相同围压下三轴卸围压时试样的承载能力比常规三轴加载时明显偏低, 表明煤样经历较高轴向载荷作用后存在局部损伤。葛修润等(1999)利用与CT机配套的专用加载设备, 进行了煤岩的三轴和单轴荷载作用下破坏全过程的细观损伤演化规律实验, 观察了各断面裂纹的萌生、分叉、发展、断裂、卸载全过程的图像变化, 从细观尺度研究了煤岩的破坏机制。结果表明: 煤岩试件初始损伤分布和损伤演化是不均匀的。吴立新等(1996)通过对煤样进行流变实验, 并结合显微煤组分及微观损伤图像分析, 研究认为: 煤的流变系数低于岩石材料, 且煤的单轴抗压强度与煤的显微组分含量和微观损伤密切相关。关于煤变形机制, 曹运兴(1989, 1992)、苏现波等(2003)、Paterson(1978)分别从脆性、脆-韧性、韧性等角度进行了研究, 并给出了微观识别标志。

煤作为一种特殊的有机岩石, 在高温作用下会发生复杂的物理变化和化学反应, 随之而来的是其高温变形破坏特征与常温条件下有很大的不同, 而目前国内外在这方面的研究却非常匮乏。

周建勋等(1993, 1994, 1999)、Bustin等(1986)、姜波等(1997, 1998)、刘俊来等(2005)研究了煤的高温变形特征。研究认为: 煤的变形特性与无机类

岩石有着很大的差异,煤级和气体是影响煤构造变形的关键因素,温度是影响煤的强度和变形行为的一个重要因素。随着温度的升高,煤的强度相应降低,变形更容易发生。气体对煤的强度性质具有十分重要的影响,气体的存在导致煤强度的下降,促使煤层强烈构造变形与流变的关键因素是煤中气体的大量存在。马占国等(2005)利用MTS 810 伺服试验系统和环境箱将煤样加热到最高温度300℃,在不同的温度点进行单轴压缩实验,结果表明煤在高温下的破坏形态和在常温下有明显区别。

1.2.2 煤的热力耦合力学参数的温度效应

已有的研究大多是关注煤在常规条件下力学参数随围压、加载路径的变化(闫立宏等,2001;刘宝琛等,1983;申卫兵等,2000;苏承东等,2006),三轴条件下,煤的抗压强度随围压的增加而增加。

热力耦合作用下,已有的对煤力学参数的温度效应研究仅限于温度对煤强度的影响(周建勋等,1994;Bustin et al., 1986;姜波等,1997,1998)。研究表明:随温度的升高,煤的强度均相应降低;产生相同的应变,在低温条件下需要更大的差异应力;中煤级表现出的规律性比较强,但高煤级由于受围压的影响,规律性较复杂。高温下,煤的塑性蠕变增强,说明了温度的升高将导致煤的力学行为由脆性向延性转变。

马占国等(2005)通过加温单轴压缩实验,对煤的强度和弹性模量随温度变化进行研究。结果表明:随温度的升高,25~50℃,煤的强度和弹性模量呈减小趋势,应变呈增加趋势;50~100℃,煤的强度和弹性模量呈减小趋势,应变呈减小趋势;100~200℃,煤的强度和弹性模量呈增加趋势,应变呈增加趋势;200~300℃,煤的强度和弹性模量呈减小趋势,应变呈增加趋势。

顾毓沁(1990)采用激光脉冲加热方法成功测量了我国多个矿区煤的导温系数、比热容、导热系数。测试结果表明,室温下,煤的导温系数为 $3.3 \times 10^{-8} \sim 2.3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$,比热容为 $1.2 \sim 7.2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,导热系数为 $0.1 \sim 0.9 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,且随温度升高($<700\text{K}$)略有变化。

1.2.3 煤的热力耦合产气及其对物理力学特性的影响

周建勋等(1994)、姜波等(1998)对比分析了产气煤样和不产气煤样的应力-应变曲线,得出如下结论:气体的存在导致煤强度的明显下降,并对煤力学性质产生十分重要的影响;大量气体的存在不仅促使煤强度的急剧下降,而且还能引起煤的强烈碎裂细化,从而有利于流变的发生。

煤在高温、高压下产生气体并不是偶然现象,因而不同煤级在何种条件下会释放气体以及气体释放后对煤的物理性质的影响等问题是一个值得深入探讨的课题。因为掌握不同煤级煤的变形及其与气体产生之间的关系,了解气体聚集和释放的条件,结合矿井构造变形和发育规律的研究,就有可能对瓦斯突出这一灾难性事故进行预测和预报(姜波等,1998)。

1.2.4 煤的热力耦合变形破坏的声发射特征

Shkuratinik 等(2004, 2005)分别对煤样进行单轴和三轴压缩试验,研究煤样在单轴和三轴压缩全过程中声发射的变化规律,得出煤样应力-应变全程曲线与声发射特性的对应关系。Shkuratinik 等(2006)研究了无烟煤在循环载荷作用下声发射记忆效应,Voznesenskii 等(2005)研究了在煤样变形峰值前后声发射事件相关系数,认为在变形峰值前和变形峰值瞬间相关系数存在正负差异,而变形峰值后相关系数均为负值。

万志军(1997)提出了岩石声发射源的激振模型,研究了具有冲击倾向性的煤岩试样单轴压缩时的声发射常规参数(振铃计数、振幅)变化特征以及频谱特征,力求找寻可用于冲击矿压预测预报的声发射敏感参数和指标。

邹银辉(2004)利用煤岩损伤理论和煤岩材料的固有缺陷分布特征,推导了煤岩破坏过程中的声发射理论模型,建立了岩石声发射率与应变过程、加载、速率、材料均质度、初始损伤、材料固有特性等的理论关系。

王恩元等(2004)、聂百胜等(2002)研究了煤体破裂声发射的频谱特征,结果表明,随着载荷及变形破裂过程的增强,声发射信号增强,主频带增高,煤体声发射的频谱特征变化与煤体变形破裂过程密切相关。

综上所述,已有对煤的物理力学性质的研究主要是在常温、单轴或三轴条件下进行的,在高温高压下的研究报道甚少。另外,限于实验设备等条件,文献报道的研究均采用小试件,一般直径为20mm,长度为40mm,较大的直径为50mm,长度为100mm;有的采用粉煤制作试样,尚未见采用大尺寸煤样进行热物理力学耦合特性实验研究的报道,尤其是对煤的力学参数如杨氏模量、泊松比、热膨胀系数等的温度效应的研究尚未见报道。煤炭地下气化、煤炭原位注热开采和煤炭地下直接液化都是在原始应力状态下加热发生的,如能对原位状态下的煤样进行热物理力学耦合特性的研究,其研究结果无疑是符合实际情况的。但现场的温压实验至少在目前和未来可预见的时间内是不可能实现的,在这种情况下,采用大尺寸煤样的实验结果显然比采用小试件的实验结果更加接近实际情况,而且能够实现。

1.3 本书主要内容

在中国矿业大学“211 工程”资助下，作者所在团队自主研制了“600℃ 20MN 伺服控制高温高压岩体三轴试验机”，依托此平台，开展了有关煤体高温高压力学行为和热物理特性试验研究工作，并初步应用于工程实际。本书即是研究成果的系统总结和汇集，主要围绕以下内容展开叙述。

1) 热力耦合作用下煤的变形和破坏特征

高温三轴应力条件下煤的热变形特征、蠕变特征；煤的热破裂临界温度、破裂后的渗透性变化特征；煤的破坏模式等力学行为。

2) 热力耦合作用下煤的物理力学参数的温度效应

高温三轴应力条件下煤的物理力学参数如渗透率、变形模量、热膨胀系数等随温度的变化特性等。

3) 热力耦合作用下煤产气对其热物理力学特性的影响规律

热力耦合作用下产气显著的烟煤和产气较少的无烟煤的热解产气规律及热物理力学特性，热解产气对煤的热物理力学特性的影响规律，以及热力耦合作用下煤的热物理力学耦合特性变化的机制。

4) 热力耦合作用下煤破裂声发射特征

煤样在高温高压下破裂时的声发射特征；高温高压下煤样破坏特征，以及热力耦合作用下煤热破裂的影响因素分析等。

5) 煤的热力耦合特性的工程应用

煤的热力耦合特性研究成果在煤炭地下气化和煤炭原位注热开采的初步应用，涉及煤炭地下气化及煤炭原位注热开采采场温度场特征、应力分布特征、位移场特征以及气化采场矿山压力显现特征等。

第2章 煤的热力耦合实验设备及测试系统

伴随着试验机的发展,岩石力学从材料力学中独立出来,并逐步发展、成长和成熟。早期岩石力学的试验完全依赖普通材料试验机,随着刚性试验机原理的发现和刚性试验机的诞生(Vutukuri et al., 1974),围压三轴试验机(陶振宇, 1981;冶金部长沙矿冶研究所岩石力学研究组, 1976)、真三轴试验机(仪)(张金铸等, 1979)、高温高压三轴试验机(任爱华, 1988;石泽全等, 1990; Tan et al., 1983)及大型真三轴试验机等的研制成功,以及与之相关的大量试验研究,许多鲜为人知的岩石特性逐渐得以揭示,并大大推动了岩石力学学科的发展,使其成为对国民经济有重要影响的新兴学科(赵阳升等, 2008a)。

随着人类社会的发展,深部资源能源开发工程正加速进入人们的视野,迫切需要了解深部岩体的特性(国家自然科学基金委员会工程与材料科学部, 2006;万志军, 2006),例如:石油钻井的深度已超过 8000m,高温岩体地热资源开采深度可达 5000m 以上,金属矿山开采深度超过 3000m,煤炭地下气化与井下火灾温度达 1000℃,而目前国内外已知的高温高压试验机,尽管温度和压力都很高,但试样尺寸普遍非常小,且功能相对单一,仅可以进行变形特性和弹性波等地球物理方面的研究,尚难以提供与人类工程活动相关的岩体性态。为此,中国矿业大学历经多年,自主研制了“600℃ 20MN 伺服控制高温高压岩体三轴试验机”(图 2-1)。该试验机是在中国矿业大学“211 工程”重点建设项目资助下完

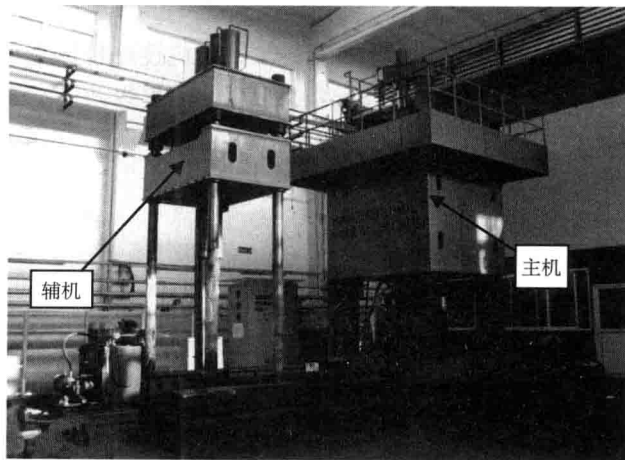


图 2-1 600℃ 20MN 伺服控制高温高压岩体三轴试验机

成的,是国内外已知唯一的可应用于多种研究领域的多功能专用实验设备。

2.1 试验机主要功能与技术参数

2.1.1 主要功能

600℃ 20MN 伺服控制高温高压岩体三轴试验机主要用于探索深部采矿、煤炭地下直接液化与气化、地热开采、煤层气开采、深部油气开采、废料处置、矿山安全、建筑安全等极为广泛的工程领域的深刻的科学规律与自然现象,为能源与资源开发提供原创性的思路与研究方向。主要研究功能如下:

(1) 研究高温高压下或常温下,岩体变形特性、强度特性、固流热耦合特性、流变特性、渗透特性、热传导特性。

(2) 研究热与应力复合作用下,固体矿物(煤、油母页岩等)相变、熔融、传热传质,液化、气化,化学反应等特性与规律。

(3) 研究高温高压下,岩体变形与钻机具的相互作用,水力压裂规律等。

在赵阳升教授的领导下,以该试验机为主要研究平台,在多项国家自然科学基金项目及教育部、江苏省人才基金项目资助下,课题组围绕热力耦合作用下的煤岩体变形行为和特征、破坏模式、热破裂特征及其细观机制、热解产气规律及研究成果在煤炭地下气化和煤炭原位注热开采的应用等方面开展长期的系统研究,取得了可喜的研究成果。

2.1.2 主要技术参数

考虑到深部资源能源开发工程的需要,本试验机设计目标是可开展接近工业级的试验研究工作,因此对试验机的压力、温度、刚度以及测试系统等均提出了很高的要求,具体技术参数和性能如下:

(1) 轴压公称力: 10 000kN;

(2) 侧压公称力: 10 000kN;

(3) 试件最大轴向应力 318MPa,最大侧向固体传压压力 250MPa,最大孔隙压压力 250MPa;

(4) 试件尺寸: $\phi 200\text{mm} \times 400\text{mm}$;

(5) 钻机最大行程 450mm,施加静压 200kN,回转扭矩 500N·m;

(6) 试件最高加热稳定温度 600℃;

(7) 轴向压力和侧向压力保压时间为 360h 以上,轴压力、侧压力波动不大于 $\pm 0.3\%$;

(8) 高温三轴压力室具有高精度的温度稳定控制功能, 温度控制灵敏度不大于 $\pm 0.3\%$;

(9) 应力、变形、进出水口孔隙压、温度、钻机扭矩等参数全自动采集;

(10) 试验机总体刚度不小于 $9 \times 10^{10} \text{ N/m}$ 。

2.2 试验机的构成

试验机总体上分为主机加载系统、高温三轴压力室及温控系统、辅机装料系统以及测试系统四大系统。主机加载系统是实验的力源机构, 高温三轴压力室及温控系统是放置煤/岩试样的机构, 同时产生设定的试样温度和应力环境, 辅机装料系统是专门用于高温三轴压力室内煤/岩试件安装的设备, 而测试系统则是用于实验过程中煤/岩样的温度、载荷、变形以及渗透率、声发射等的测试(万志军, 2009)。

2.2.1 主机加载系统

主机加载系统主要由三大部分构成。

其一是主机框架, 见图 2-1。采用四柱立式结构, 加压方式为“下顶式”, 即压头由下往上移动对试样加压。主机轴向公称压力为 $10\,000 \text{ kN}$, 侧向公称压力为 $10\,000 \text{ kN}$ 。试验机整体刚度不低于 $9 \times 10^{10} \text{ N/m}$, 满足刚性试验机的要求。

其二是液压系统, 是主机动力的来源, 见图 2-2。采用 3 台泵产生压力, 泵站工作压力为 25 MPa 。为了达到伺服控制的目的, 采用德国 MOGO 公司生产的精密比例伺服阀, 精密伺服控制产生轴向压力和侧向压力的缸体的动作。

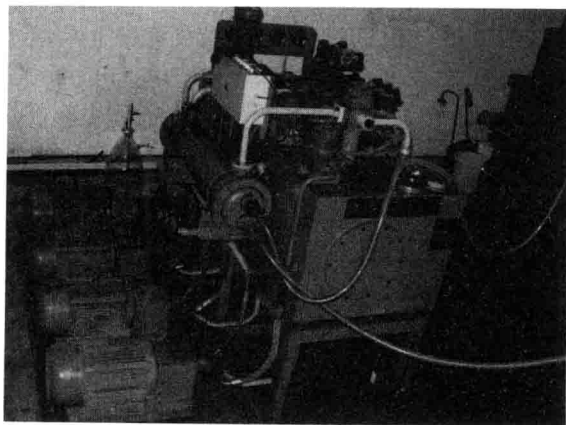


图 2-2 主机液压系统

其三是主控制台，主机动作的主要操作均在此完成，见图 2-3。采用计算机控制与控制台按钮控制相结合的操作方式。其中实验的控制由电脑程序自动控制，而主机压头的调试动作、托料缸动作等由按钮操作完成。轴向压力与侧向压力各自独立加载，加载方式有：恒载荷加载、恒载荷速率加载、恒位移加载、恒位移速率加载、锯齿波加载等。加载参数可根据需要任意设定。

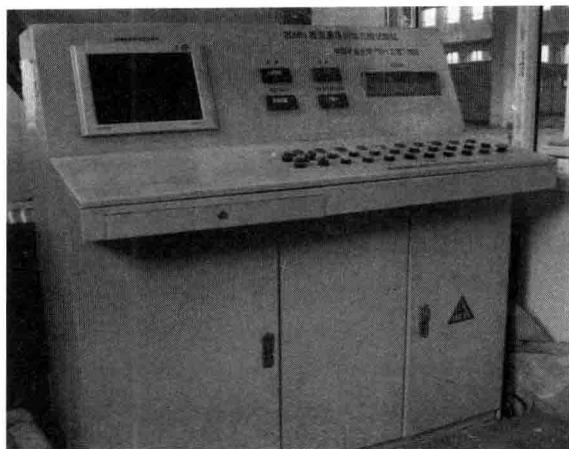


图 2-3 主控制台

2.2.2 高温三轴压力室

高温三轴压力室及温控系统是设备的核心部件之一，是产生实验所需温压环境的重要机构，见图 2-4。

图 2-5 为高温高压三轴试验机压力室的结构剖面图。高温三轴压力室呈厚壁圆筒状，采用热塑模具钢（H13）内外缩套结构，外径 1060mm，内径 300mm，高 1100mm。轴向加载采取“上顶式”，主机压头向上移动，推动轴压头和下压头向试样传递压力；侧压由围压头向上移动推动围压套和叶蜡石粉，向盐环传递压力产生。轴向压力和侧向压力由两个独立的液压缸施加，可以根据试验需要随意设定。选取电阻合金片包裹试样的内加热方式，电流的流经路径为：温控柜（低电压高电流）→电极压头→上压头→电阻合金片→下压头→轴压头→围压套→主机围压头→温控柜。

图 2-6 为高温三轴压力室内腔体 1/4 剖面图。包裹试样的材料依次为：紫铜皮、云母纸、电阻合金片和云母纸。紫铜皮在围压作用下紧贴试样，能够封闭试样表面的裂隙。内层云母纸一是用来隔绝紫铜皮与电阻合金片的接触，二是可以