

国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目

煤炭地下气化过程 稳定性及控制技术

梁杰 著

中国矿业大学出版社

国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目

煤炭地下气化过程稳定性及控制技术

梁 杰 著

中国矿业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

煤炭地下气化过程稳定性及控制技术/梁杰著. —徐州: 中国矿业大学出版社, 2002.7

ISBN 7-81070-562-8

I. 煤... II. 梁... III. 煤炭—地下气化—气化过程—过程控制 IV. TD844

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 049968 号

书 名 煤炭地下气化过程稳定性及控制技术
著 者 梁 杰
责任编辑 高 专 王晓玲
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)
印 刷 北京科技印刷厂
经 销 新华书店
开 本 787×1092 1/16 印张 10 字数 240 千字
版次印次 2002 年 10 月第 1 版 2002 年 10 月第 1 次印刷
印 数 3000 册
定 价 38.00 元
(图书出现印装质量问题, 本社负责调换)

内 容 提 要

本书是作者对所承担的国家高技术研究发展计划(863计划)及近十六年来从事煤炭地下气化研究工作所取得的研究成果的总结。作者在理论分析、数值模拟、室内试验和现场试验的基础上,系统地研究了煤炭地下气化过程稳定性及控制技术。确定了地下气化反应体系中独立反应方程,并分析了煤炭地下气化过程的物理化学特性及影响因素,依此建立了煤炭地下气化过程的数学模型;在急倾斜煤层条件下进行了数值计算,从而揭示了该过程温度场和浓度场的分布状态和发展趋势。通过现场试验,进一步研究了急倾斜煤层气化过程的规律,并提出了长通道、大断面、推进式气化炉结构和四种稳定控制工艺,建立了地下气化过程状态参数采集系统和灰色预测模型。在上述研究工作的基础上,建立了烟分析模型,对急倾斜煤层气化过程和所采取的控制工艺进行了热力学评价。

本书可供从事煤炭地下气化、燃气工程、煤化工、能源科学与工程的教学、科研人员以及煤炭转化与利用、新能源开发和洁净煤技术开发方面的工程技术人员使用,也可作为相关专业的本科生和研究生的教学用书。

ABSTRACT

This book is a summary of the state hi-tech research and development project, 863 project, the author has been undertaking and all the findings he has obtained of underground coal gasification (UCG) in the past sixteen years. Based on theoretical analysis, numerical simulation, laboratory experiment, and field test, the stability and controlling technology of underground coal gasification process is systematically studied in this book. The independent reaction equations of UCG reaction system are determined at first, and the physicochemical character and influence factors of UCG process are also analysed, then a mathematical model for UCG process is established. Under the condition of steep coal seam, the model is calculated. The results show the distribution and development of its temperature field and Concentration field. Through field tests, the principle of underground gasification in steep coal seam is further studied. Four Stable controlling techniques and a long-tunnellarge-section forward gasifier are put forward. A sampling system and a grey model are established to predict the state parameters of UCG process. Finally, a exergie analysis model is established to evaluate the underground gasification process in steep coal seam and the controlling techniques used.

The book is tentatively designed as a reference book for those who involves themselves in UCG, fuel gas engineering, coal chemical industry, energy resource science, coal conversion and utilization, and clean coal techniques, and as a textbook for undergraduate and graduate students majoring in related areas of UCG.

前 言

中国是以煤为主要能源的国家，在一次商品能源中煤占 70% 以上，资源条件决定了在今后相当长的时间内，煤炭在中国一次能源结构中占据不可替代的重要地位。但传统的煤炭开采、运输和使用方式所造成的资源浪费和生态环境的破坏是不容忽视的，地面塌陷，大量的地下水流失和向大气排放二氧化碳、烟尘和硫化物等，已经给一些地区的生态环境构成了较大的威胁。同时受井工采煤技术水平的限制，约 50% 的煤炭资源被遗弃在井下，造成了大量煤炭资源浪费，据不完全统计，我国目前老矿井遗弃的煤炭资源在 300 亿 t 以上。为了解决这些问题，必须刻不容缓地改变传统的煤炭生产和消费方式，发展洁净、高效的煤炭生产和利用技术。这对于保障我国能源供应的安全，保证国民经济和社会持续、稳定、健康地发展都有着十分重要的意义。

煤炭地下气化（Underground Coal Gasification，UCG）就是将处于地下的煤炭进行有控制地燃烧，通过对煤的热作用及化学作用而产生可燃气体的过程。这一过程集建井、采煤、地面气化三大工艺为一体，抛弃了庞大、笨重的采煤设备和地面气化设备，变传统的物理采煤为化学采煤，因而具有安全性好、投资少、效率高、污染少等优点，深受世界各国的重视，被誉为第二代采煤方法。1979 年联合国“世界煤炭远景会议”明确指出，发展煤炭地下气化是世界煤炭开采的研究方向之一，是从根本上解决传统开采方法存在的一系列技术和环境问题的重要途径。

煤炭地下气化不仅可以回收老矿井遗弃的煤炭资源，而且可以用于开采井工难以开采的或开采经济性、安全性差的薄煤层、深部煤层和“三下”压煤，以及高硫、高灰、高瓦斯煤层等。煤炭地下气化过程燃烧的灰渣留在地下，大大减少了地表塌陷量，无固体废物排放，因此煤炭地下气化减少了对地表的环境破坏。地下气化出口煤气可以集中净化，脱除其中的焦油、硫和粉尘等有害物，从而得到洁净的煤气。该煤气不仅可以作为燃料用于民用、发电（包括联合循环发电）、工业锅炉燃烧，而且还可以作为原料气生产合成氨、甲醇、二甲醚、汽油、柴油等或用于提取纯氢。因此，煤炭地下气化技术将环境保护的重点放在源头，而非末端治理，是一项符合可持续发展需要的环境友好的绿色技术，并且具有显著的经济效益和社会效益，必将成为我国洁净煤技术研究的重要领域。

作者于 1985 年开始涉及煤炭地下气化研究工作，筹建了煤炭地下气化专业实验室，先后完成了多次室内模型试验，积累了大量有价值的实验数据，为煤炭地下气化现场试验生产提供了可靠的工艺参数。作为主要技术负责人，1987 年完成了江苏省“七五”攻关项目——徐州马庄煤矿煤炭地下气化试验；1995 年完成了国家“八五”重点科技攻关项

目——徐州新河二号井煤炭地下气化半工业性试验；1997年完成了河北省重点科技攻关项目——唐山刘庄煤矿煤炭地下气化工业性试验；2000年9月完成了“山东新汶孙村煤矿煤炭地下气化技术研究与应用”项目，并进行了民用及内燃机发电。根据多年的研究结果，作者认为，煤炭地下气化与地面气化的基本原理是一致的，其不同点在于：

(1) 地面固定床气化（与地下气化过程类似）是在相对均匀的小煤块（相对均匀的竖直渗流床）中进行的，且气化边界无质量交换，而地下气化过程中由于煤层不规则的冒落，形成了不均匀的大尺度煤块的水平渗流床，气化区边界是有质量交换的煤层，实际上它将地面燃烧、气化、焦化过程合而为一，因而比地面气化更具有复杂性。

(2) 地面固定床气化氧化区、还原区、干馏干燥区相对位置不变，通过料层移动（加煤、排渣）来保持气化过程的连续；而地下气化过程中料层（煤层）不能移动，而是通过气化工作面的移动来保持气化过程的连续。

(3) 地面气化炉炉膛截面积是不变的，而地下气化过程中因煤层冒落和燃烧，气化通道截面积不断发生变化。

与地面气化的不同点，正是煤炭地下气化过程共有的技术难点，它决定了煤炭地下气化过程的稳定性。为此，多年来，作者一直坚持煤炭地下气化过程稳定性及控制技术的研究。1993年~1997年在余力教授的指导下，完成了博士学位论文《急倾斜煤层地下气化过程稳定性及控制技术的研究》。2001年作者申请的项目——煤炭地下气化稳定控制技术的研究，获得国家高技术研究发展计划（863计划）资助。通过理论分析、实验室模型实验研究，取得了阶段性成果，充实了书稿。在此基础上，几易其稿，著成此书。

全书共分七章：第一章介绍了煤炭地下气化过程稳定性及控制技术研究的的目的、意义，国内外研究概况，并提出本书的研究内容和技术路线。第二章阐述了煤炭地下气化过程化学特性和物理特性，以及影响煤炭地下气化过程稳定性的因素；推导出地下气化燃烧反应的速率表达式，并提出了地下气化过程中热阻力的存在，推导出热阻力的大小取决于无因次加热数，热阻力的存在使气化剂质流量减少。第三章介绍了煤炭地下气化过程传热传质的基本规律，建立了两种类型气化通道气化过程传热传质耦合控制方程组，并建立了一个非稳态非线性气相流动方程。第四章介绍了煤炭地下气化过程数值模拟方法与模型试验；建立了急倾斜煤层地下气化过程数学模型，并对控制方程组进行了离散和求解；测定了气化反应动力学参数，并对计算结果和模型试验结果进行了分析和讨论，从而指出了空气连续气化和两阶段气化过程温度场和浓度场的分布规律。第五章介绍了煤炭地下气化现场试验，设计了长通道、大断面、推进式煤炭地下气化炉，研究了空气连续气化过程和两阶段气化工艺的火焰工作面移动速度、气化通道平均空气动力学阻力系数及燃烧区的范围。第六章介绍了煤炭地下气化过程稳定控制工艺及控制系统的设计，建立了煤炭地下气化过程参数灰色预测模型。第七章介绍了煤炭地下气化过程焓分析，建立了煤炭地下气化原料及产品的焓值计算模型，对煤炭地下气化过程进行了综合焓平衡分析，并指出了降低焓损的途径。

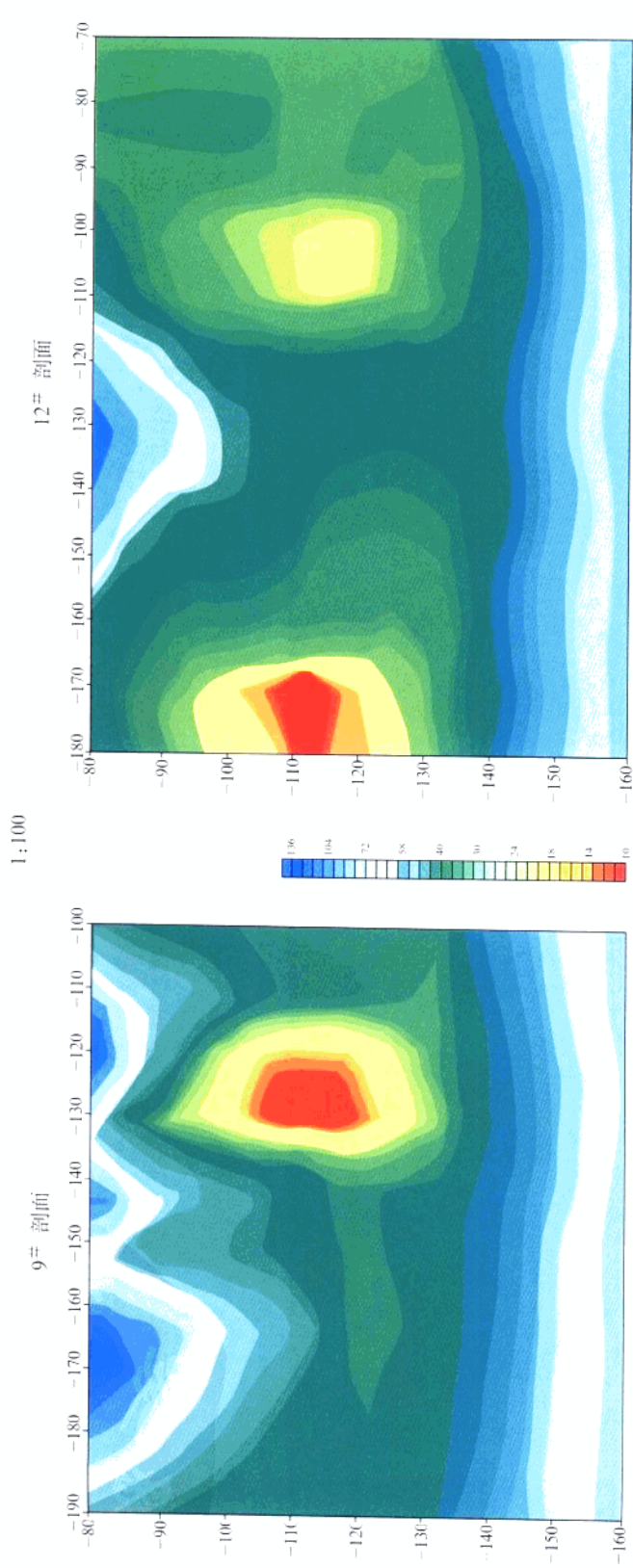
在本书的写作和研究过程中，得到了中国矿业大学余力教授的悉心指导和帮助。美国Lawrence Livermore National Laboratory 化学工程部 Charles B. Thorsness 教授和 D. Y. Wang 博士在数学模型建立和现场试验方面给予了指导；中国矿业大学周世宇院士、中国市政工程华北设计研究院、《煤气与热力》主编项友谦教授级高级工程师、国土资源部物

探研究所吕国印高级工程师在理论研究方面给予了大力帮助；原徐州矿务局黄国民教授级高级工程师、顾则仁高级工程师和唐山刘庄煤矿贺广祥矿长、安文华高级工程师及两矿广大职工在现场试验中给予了大力支持；中国矿业大学陈宽德、杨兰和、余学东、陈启辉、郭楚文、岳丰田及原特凿教研室的老师们给予了帮助。在此，作者谨向以上同志表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2002年9月于北京

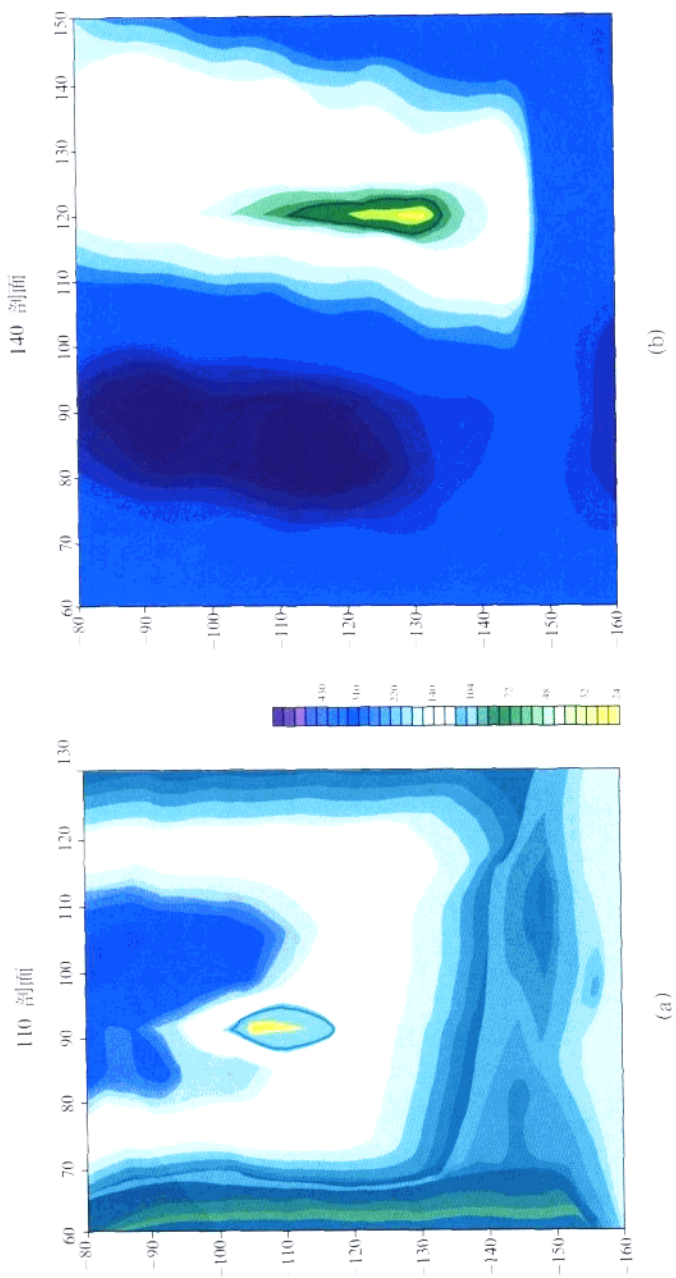


(a)

(b)

彩图1 唐山刘庄研煤区地下气化燃烧区沿气通道剖面TEM电阻率断面图

1:1000



彩图2 唐山刘庄矿煤炭地下气化燃烧区横剖面TEM电阻率断面图

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 煤炭地下气化研究综述	(1)
1.1.1 数学模型	(4)
1.1.2 地下气化炉结构	(7)
1.1.3 气化控制工艺	(8)
1.2 本书研究内容和技术路线	(9)
1.3 本章小结	(10)
2 煤炭地下气化过程的物理化学特性及影响因素	(11)
2.1 煤炭地下气化原理及气化过程独立反应方程	(11)
2.2 煤炭地下气化过程化学反应特性	(14)
2.2.1 氧化区燃烧反应速度	(14)
2.2.2 还原区化学反应特性	(17)
2.2.3 干馏干燥区和煤层区干燥与热解特性	(19)
2.3 煤炭地下气化过程的物理特性	(21)
2.3.1 两种类型的气化反应通道	(21)
2.3.2 热阻力	(22)
2.4 影响煤炭地下气化过程稳定性的因素	(26)
2.4.1 气化炉温度场和鼓风速度	(26)
2.4.2 空气动力学条件和气化炉结构	(27)
2.4.3 气化通道长度	(27)
2.4.4 水进入速率	(27)
2.5 本章小结	(28)
3 煤炭地下气化过程传热、传质规律	(29)
3.1 自由通道气化过程传热、传质耦合方程组	(29)
3.1.1 基本方程组	(29)
3.1.2 初始及边界条件分析	(34)
3.2 渗滤通道气化过程传热、传质耦合方程组	(35)
3.2.1 基本方程组	(35)
3.2.2 方程组的封闭性和一致性	(38)
3.3 干燥和热解的模型化	(39)
3.3.1 湿煤区	(40)
3.3.2 干煤区(热解区)	(40)

3.4 本章小结	(42)
4 煤炭地下气化过程数值模拟与模型试验	(43)
4.1 急倾斜煤层地下气化过程数学模型	(43)
4.1.1 气化通道渗流气化场模型	(44)
4.1.2 煤层温度场及干馏煤气流动场模型	(45)
4.2 控制方程的离散和求解	(46)
4.2.1 控制方程和求解区域的离散方法	(47)
4.2.2 气化通道一维场控制方程的离散	(48)
4.2.3 煤层中二维场控制方程的离散	(49)
4.2.4 模型求解的程序设计与编制	(51)
4.3 气化反应动力学参数的测定及其他计算参数的确定	(53)
4.3.1 气化反应动力学参数的测定	(53)
4.3.2 煤层渗透率测定	(56)
4.3.3 换热系数的确定	(57)
4.4 急倾斜煤层地下气化过程数值模拟结果的模型试验验证	(58)
4.4.1 空气煤气生产过程模型试验和数值模拟	(59)
4.4.2 两阶段气化过程模型试验和数值模拟	(66)
4.5 本章小结	(72)
5 煤炭地下气化现场试验研究	(73)
5.1 长通道、大断面、推进式地下气化炉及其试验系统	(73)
5.1.1 气化通道长度和断面的确定	(74)
5.1.2 辅助孔及辅助通道设计	(75)
5.1.3 地面系统及参数测点布置	(77)
5.2 空气连续气化过程试验研究	(79)
5.2.1 气化炉预热	(79)
5.2.2 初始稳定产气	(80)
5.2.3 基本稳定产气	(83)
5.2.4 连续稳定产气	(85)
5.3 空气连续气化过程的一般规律	(88)
5.3.1 火焰工作面移动速度	(88)
5.3.2 气化通道平均有效断面	(89)
5.3.3 气化通道平均空气动力学阻力系数	(91)
5.3.4 鼓风强度对气化过程稳定性的影响	(92)
5.4 两阶段气化工艺的试验研究	(93)
5.4.1 地下水煤气的组成和热值	(93)
5.4.2 气化工作面长度及其移动速度的测定	(94)

5.5 燃烧范围的探测.....	(97)
5.6 本章小结	(101)
6 煤炭地下气化过程稳定控制工艺的研究及控制系统设计.....	(103)
6.1 煤炭地下气化过程稳定控制工艺	(103)
6.1.1 辅助通道供风气化	(103)
6.1.2 压抽相结合供风气化	(104)
6.1.3 反向供风气化	(105)
6.1.4 双火源气化	(106)
6.2 测控系统设计	(108)
6.2.1 参数采集及反馈控制系统设计	(109)
6.2.2 地下气化过程参数灰色预测模型	(112)
6.3 本章小结	(117)
7 煤炭地下气化过程焓分析	(119)
7.1 地下气化原料及产品的焓值计算模型	(119)
7.1.1 固态物质——煤	(120)
7.1.2 混合气体——出口煤气	(121)
7.1.3 具有相变物质——焦油	(121)
7.1.4 热损失焓及焓	(122)
7.1.5 焓效率	(122)
7.2 地下气化过程的物料平衡和热平衡	(123)
7.2.1 物料平衡	(123)
7.2.2 热量平衡	(126)
7.3 煤炭地下气化过程综合焓平衡	(128)
7.3.1 湿空气焓	(128)
7.3.2 出口煤气焓	(128)
7.3.3 焦油焓	(129)
7.3.4 固体燃料焓	(130)
7.3.5 外来水焓	(130)
7.4 降低焓损的途径	(132)
7.4.1 燃烧不可逆焓损	(132)
7.4.2 传热不可逆焓损	(132)
7.5 本章小结	(133)
结论	(134)
附录：主要符号表	(137)
参考文献.....	(139)

Contents

1	Introduction	(1)
1.1	Summarization of UCG researches	(1)
1.1.1	Mathematical model	(4)
1.1.2	Structure of underground gasifier	(7)
1.1.3	Controlling technologies	(8)
1.2	Contents and technical routine of the study	(9)
1.3	Brief summary	(10)
2	Physicochemical character and influence factors of UCG process	(11)
2.1	UCG principle & independent reaction equation	(11)
2.2	Chemical reaction character of UCG process	(14)
2.2.1	Combustion velocity in oxidation zone	(14)
2.2.2	Chemical reaction character in reduction zone	(17)
2.2.3	Dry and distillation of coal seam	(19)
2.3	Physical character of UCG process	(21)
2.3.1	Two-type of reaction tunnel	(21)
2.3.2	Heat resistance	(22)
2.4	Influence factors of UCG stability	(26)
2.4.1	Gasifier temperature and blasting velocity	(26)
2.4.2	Air dynamic condition and gasifier structure	(27)
2.4.3	Length of gasification tunnel	(27)
2.4.4	Velocity of water pouring	(27)
2.5	Brief summary	(28)
3	Heat and mass transfer regularity of UCG process	(29)
3.1	Coupling equations of heat and mass transfer in free tunnel	(29)
3.1.1	Fundamental equation group	(29)
3.1.2	Initial and boundary conditions	(34)
3.2	Coupling equations of heat and mass transfer in percolation tunnel	(35)
3.2.1	Fundamental equation group	(35)
3.2.2	Close and uniform property	(38)
3.3	Model of dry and distillation	(39)
3.3.1	Wet coal zone	(40)
3.3.2	Dry coal zone (Distillation)	(40)

3.4	Brief summary	(42)
4	Numerical simulation and model test of UCG process	(43)
4.1	Mathematic model of UCG in steep coal seam	(43)
4.1.1	Model of percolation gasification	(44)
4.1.2	Model of coal seam temperature field and gas flow	(45)
4.2	Discretion and solution of controlling equations	(46)
4.2.1	Controlling equations and discretion method	(47)
4.2.2	Discretion of one-dimensional controlling equation	(48)
4.2.3	Discretion of two-dimensional controlling equation of coal seam	(49)
4.2.4	Design of calculation program	(51)
4.3	Determination of reaction dynamic parameters and other parameters	(53)
4.3.1	Determination of reaction dynamic parameters	(53)
4.3.2	Measurement of penetration rate of coal seam	(56)
4.3.3	Selection of heat-exchange coefficient	(57)
4.4	Numerical simulation of UCG process in steep coal seam and validation	(58)
4.4.1	Model test and numerical simulation of air successive gasification	(59)
4.4.2	Model test and numerical simulation of two-stage gasification	(66)
4.5	Brief summary	(72)
5	Field test study of UCG	(73)
5.1	Long-tunnel, large-section, forward gasifier and the test system	(73)
5.1.1	Determination of tunnel length and section area	(74)
5.1.2	Design of auxiliary bore hole and tunnel	(75)
5.1.3	Display of ground systems and monitoring points	(77)
5.2	Study on air successive gasification test	(79)
5.2.1	Preheating of the gasifier	(79)
5.2.2	Initial stable gas production	(80)
5.2.3	Basic stable gas production	(83)
5.2.4	Successive gas production	(85)
5.3	Regularity of air successive gasification process	(88)
5.3.1	Moving velocity of fire face	(88)
5.3.2	Average efficient section of gasification tunnel	(89)
5.3.3	Average air dynamic resistance coefficient	(91)
5.3.4	Influence of blast intensity on stability	(92)
5.4	Study on two-stage gasification test	(93)
5.4.1	Composition and heat value of UCG water gas	(93)
5.4.2	Detection of gasification face length and moving velocity	(94)

5.5	Exploration of combustion range	(97)
5.6	Brief summary	(101)
6	Study on stable controlling technologies of UCG and design of monitoring system	(103)
6.1	Stable controlling technologies of UCG process	(103)
6.1.1	Air blast with auxiliary tunnel	(103)
6.1.2	Compressing & pumping	(104)
6.1.3	Reverse air blast	(105)
6.1.4	Double-fire gasification	(106)
6.2	Design of monitoring system	(108)
6.2.1	Parameters sampling and controlling system design	(109)
6.2.2	Grey prediction model of UCG parameters	(112)
6.3	Brief summary	(117)
7	Exergie analysis of UCG process	(119)
7.1	Model of exergie calculation of raw material and product in UCG	(119)
7.1.1	Solid material-coal	(120)
7.1.2	Gas mixture-outlet gas	(121)
7.1.3	Phase changeable material-tar	(121)
7.1.4	Exergie from heat loss	(122)
7.1.5	Exergie efficiency	(122)
7.2	Material and heat balance of UCG process	(123)
7.2.1	Material balance	(123)
7.2.2	Heat balance	(126)
7.3	Exergie balance of UCG process	(128)
7.3.1	Exergie of warm air	(128)
7.3.2	Exergie of outelt gas	(128)
7.3.3	Exergie of tar	(129)
7.3.4	Exergie of solid fuel	(130)
7.3.5	Exergie of external water	(130)
7.4	Approches of exergie loss reduction	(132)
7.4.1	Irreversible exergie loss of combustion	(132)
7.4.2	Irreversible exergie loss of heat transfer	(132)
7.5	Brief summary	(133)
	Conclusions	(134)
	Appendix: table of main signs	(137)
	References	(139)

1 绪 论

1.1 煤炭地下气化研究综述

煤炭地下气化就是将处于地下的煤炭直接进行有控制地燃烧,通过对煤的热作用及化学作用而产生可燃气体的过程。该过程集建井、采煤、地面气化三大工艺为一体,变传统的物理采煤为化学采煤,省去了庞大的煤炭开采、运输、洗选、气化等工艺的设备,因而具有安全性好、投资少、效益高、污染少等优点,深受世界各国的重视,被誉为第二代采煤方法。1979年联合国“世界煤炭远景会议”明确指出,煤炭地下气化(Underground Coal Gasification,简称UCG)是从根本上解决传统开采和使用方法存在的一系列技术和环境问题的重要途径。为此,世界各国相继投入大量的人力和物力进行研究和开发,取得了丰硕的成果。我国煤炭地下气化研究也由半工业性试验、工业性试验逐步走向了工业化生产。

前苏联是世界上进行地下气化现场试验最早的国家,也是地下气化工业应用成功的惟一国家。1932年在顿巴斯建立了世界上第一座有井式气化站,为探讨气化方法,1932年到1961年间相继建设了5座地下气化站,到20世纪60年代末已建站27座。统计到1965年,共烧掉1500万t煤,生产300亿 m^3 低热值煤气,所生产的煤气用于发电或工业锅炉燃烧。在技术研究上可分为三个方向:

(1) 地下气化方法类型:前苏联早期使用“有井式”,后逐渐过渡至“无井式”。“有井式”气化利用老的竖井和巷道,减少建气化炉的投资,可回采旧矿井残留在地下的煤柱(废物利用),气化通道大,容易形成规模生产,气化成本低。但其缺点是:老巷道气体易泄露,影响气压气量以及安全生产,避免不了井下作业,劳动量大,不够安全。而“无井式”气化,建炉工艺简单,建设周期短(一般1年~2年),可用于深部及水下煤层气化,但由于气化通道窄小(因钻孔直径一般为200mm~300mm,钻孔间距一般为15m~50m,最大为150m),影响出气量,钻探成本高,煤气生产成本高。

(2) 气化剂的选择:气化剂的选择取决于煤气的用途和煤气的技术经济指标,从技术上,煤炭地面气化所用的气化剂(空气、氧气与蒸汽、富氧与蒸汽等)都可以用于煤炭地下气化。前苏联与美国对上述气化剂都进行了不少的试验,并取得了很有价值的成果。

(3) 地下气化的控制方法:影响地下气化工艺的因素很多(包括煤层的地质构造、围岩变化、气化范围位置不断变化等),因而要采取一定的控制措施。简单的做法是在每个进风管和出气管上都安装压力表、温度计、流量计。根据上述测量参数综合分析地下气化炉状况,用阀门来控制压风量、煤气产量,以达到控制气化炉温度和煤气热值的目的。

前苏联煤炭地下气化技术,走过了60多年的历程,从20世纪30年代初开始试验,至40年代工业试验阶段,第二次世界大战期间停止了试验,50年代末恢复试验并逐步形成较大规模的工业化生产。应该说,前苏联煤炭地下气化技术发展至今,工艺技术已基本