

煤炭地下气化 渗流燃烧方法研究

[国家自然科学基金资助项目]

杨兰和 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

Study on Seepage-Flow Combustion in Underground Coal Gasification

责任编辑 宋党育 封面设计 肖新生



ISBN 7-81070-411-7



9 787810 704113 >

ISBN 7-81070-411-7 / TD-44 定价: 32.00 元

煤炭地下气化 渗流燃烧方法研究

**Study on Seepage-Flow Combustion
in Underground Coal Gasification**

〔国家自然科学基金资助项目〕

杨兰和 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining & Technology Press

内容提要

本书是作者对所承担的国家自然科学基金资助项目及近十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。作者主要采用实验室模型实验和理论分析方法,运用煤炭地下气化、传热传质、燃烧流体力学及热爆炸理论,对煤炭地下气化温控爆破渗流燃烧技术进行了全面深入的研究。在热爆炸实验、爆破漏斗实验和煤炭地下气化温控爆破渗流燃烧室内实验的基础上,研究了热爆炸临界温度预测模型、临界温度与影响因素之间的关系及爆破动力作用,分析了温控特征参数之间的相互关系、药卷热爆炸时空特点、煤气质量与爆松作用的关系及动态温度场的分布和变化规律。在上述工作的基础上,对燃烧气化煤层火焰工作面的移动速度、非线性动态温度场、气体非线性渗流及对流扩散分别进行了计算和三维数值模拟。本书的研究成果证明了将温控爆破方法应用于倾斜、缓倾斜或近水平煤层地下气化过程的可行性和可靠性,必将为煤炭地下气化产业化的形成和发展,提供理论指导和科学依据,具有重要的理论意义和实际应用价值。

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参考,也可作为相关专业的本科生和研究生的教学参考书。

责任编辑 宋党育
责任校对 崔永春

图书在版编目(CIP)数据

煤炭地下气化渗流燃烧方法研究/杨兰和著. —徐州:中国矿业大学出版社,2001.9

ISBN 7-81070-411-7

I. 煤… II. 杨… III. 煤炭—地下气化—渗流—燃烧研究 IV. TD84

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第06864号

中国矿业大学出版社出版发行

(江苏徐州 邮政编码 221008)

江苏徐州新华印刷厂印刷 新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 9.75 字数 231 千字

2001年9月第1版 2001年9月第1次印刷

印数 1~1000册 定价 32.00元

前 言

在我国的一次能源结构中,煤炭的比重在70%以上,其独特的资源条件,决定了煤炭在我国能源消费结构中不可替代的战略地位。但是,受一次能源结构的长期制约和采掘、冶炼业集中开发的影响,传统的煤炭开采和加工业,已经显现出“夕阳”效应。大批产煤区出现了采煤漏水、土地塌陷、水土流失等环境恶化的倾向。洗煤炼焦业长达十余年的鼎盛发展,在创造经济效益的同时,也遗存着令人堪忧的环境“劣迹”:水源污染严重,烟尘排放加剧,大气中悬浮微粒几十倍乃至上百倍地严重超标。传统的采煤工艺和燃煤方式所造成的直接后果不仅日趋严重,而且范围还在迅速扩大。人民群众的生存环境面临着极大的威胁。

煤炭产业作为国民经济重要的基础产业,承担着既要为国家经济发展提供足够的能源,又要义不容辞地保护生态环境的双重重任。

煤炭地下气化(Underground Coal Gasification)就是将地下的煤炭进行有控制燃烧,通过煤的热作用及化学作用而产生可燃气体的过程。这一过程将建井、采煤、地面气化三大工艺合而为一,为多学科开发能源及化工原料的新技术,因而具有安全性好、投资少、效率高、污染少等优点。

为了使煤炭工业摆脱目前所处的困境,必须发展新型的回收煤炭资源的技术,而煤炭地下气化则是一条最佳的途径。在报废矿井中进行地下气化,可回收被遗弃在地下的大量煤炭资源,大大提高煤炭资源的利用率,符合我国煤炭资源利用的现状。煤炭地下气化产生的煤气,经地面净化处理后,不仅可以作为燃料直接用于发电、民用和工业生产,而且还可以作为化工原料气和提取纯氢。氢气是冶金工业、电子工业、化学工业、航天工业及电力工业的重要原料,又是当今人类最理想的清洁能源。所以,煤炭地下气化在技术上可行、在经济上合理,它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技术,必将成为我国洁净煤技术研究的重要领域。

作者于1990年开始涉足煤炭地下气化研究工作;1991~1993年完成了七次实验室模型实验,积累了大量有价值的实验数据,为后续在现场煤炭地下气化试验,提供了可靠的工艺参数;1994年3月~1995年1月和1996年5月~1997年11月以主要参加者的身份分别完成了国家“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和唐山刘庄煤矿煤炭地下气化工业性试验。它们均通过国家级技术专家鉴定,各种试验指标均达到国际领先水平。根据我国煤炭赋存条件的特点,在废弃的矿井中,倾斜、缓倾斜或近水平煤层占有相当大的比例。在坚实的煤层中,不具备靠重力作用自动向气化通道内填充块煤的条件。由于煤层的渗透率很低,气化剂仅限于在贯通通道内流动,因而不能提供有效燃烧气化所需要的大反应表面面积,也就不可能形成渗流燃烧的气化条件,这样,就势必影响气化过程的连续稳定生产及煤气质量的提高。有鉴于此,作者提出了煤炭地下气化温控爆破渗流燃烧方法,即基于热爆炸理论,利用气化炉自身的温度有控制地引爆药卷,从而产生尽可能多的爆破松动裂隙,形成可移动的渗流燃烧火焰工作面。1993~1996年作者在余力教授的指

导下完成了博士学位论文《煤炭地下气化温控爆破渗流燃烧技术的研究》。1999年作者申请的研究项目——“煤炭地下气化温控爆破渗流燃烧控制参数及变化规律研究”，得到国家自然科学基金资助。在研究过程中采用实验室模型实验和理论分析的研究方法，体现出不同相关学科之间的相互渗透、交叉和融合。在总结国家自然科学基金资助项目研究成果的基础上，作者又通过参加多项相关的科研课题，不断研究而充实了书稿内容，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温控爆破渗流燃烧方法研究的目的、意义，国内外研究概况及发展趋势，地下气化数学模拟研究现状、主要内容和研究路线；第二章介绍了热爆炸实验的基本原理、实验设计、方法和结论，建立了热爆炸临界温度预测模型，在爆破漏斗实验结果的基础上，进行了爆破动力作用分析；第三章为本书的核心，重点研究了煤炭地下气化温控爆破渗流燃烧模型实验方法。阐述了煤炭地下气化的基本理论，介绍了模型实验台的结构、爆破参数设计和实验系统，在实验数据的整理与分析过程中，引入了描述高温温控爆破特征的温控特征参数——温控温度、温控时间及温控距离。分析了燃烧气化煤层温度场的动态变化规律和火焰工作面的移动速度；第四章介绍了气化煤层三维非线性非稳定温度场数学模型的建立方法、模型参数的选取，并对计算结果进行了分析与讨论。推导并建立了火焰工作面移动速度数学函数表达式，并通过模型和现场试验数据，验证了其正确性；第五章研究了煤炭地下气化气体渗流运动特征，介绍了气化煤层流体三维非稳定非线性渗流数学模型的建立和求解方法；第六章分析了在煤炭地下气化过程中气体对流扩散的特征，推导并建立了三维非线性非稳定对流扩散微分方程和数学模型，介绍了数学模型的求解方法，并对计算结果进行了分析与讨论；第七章为主要结论。

在本书的写作和先期研究中，得到中国矿业大学余力教授的指导和帮助。建筑工程学院梁杰博士、陈宽德博士、陈启辉博士及王家廉高级工程师在实验室模型实验过程中给予了大力帮助。理学院力学系李毅副教授、建筑工程学院92级毕森林同学及岳丰田副教授在模型实验数据采集与整理方面给予了大力支持。中国矿业大学能源科学与工程学院蒋曙光博士和现代教育技术中心侯效礼同志在数值模拟方面给予了热情指导。作者还承蒙中国矿业大学能源科学与工程学院姜学云教授和机电与材料工程学院丁国玺教授提供了许多有价值的资料。在此，作者谨向以上同志表示衷心的感谢！

由于著者水平有限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2001年2月于徐州

主要符号表

P ——渗透压力, Pa; 孔壁冲击波最大初始压力, Pa	T_b ——热爆炸临界温度, C
T ——温度, C; 周期, ms	T_c ——炸药 DSC(或 DTA)曲线特征温度, C
μ ——动力粘度, kg/(m·s); 热交换系数, W/(m ² ·K)	P_c, P_w ——孔壁压力峰值, Pa
k ——渗透率, um ² ; 爆轰气体多方指数, 1.4~3	P_0 ——大气压力, Pa
R ——半径, m; 化学反应引起的浓度变化, %; 普适气体常数, J/(mol·K)	P_F ——C-J 爆压, Pa
C ——浓度, m ³ /s	ν ——运动粘度, m ² /s; 空气多方指数, 1.4
ρ ——密度, kg/m ³	ρ_w ——装药密度, kg/m ³
c_p ——质量等压热容, J/(kg·K); 纵波波速, m/s	V^* ——药包比热容, J/(kg·K)
c_v ——质量定容热容, J/(kg·K)	ρ_c ——冲击波波阵面上的介质密度, kg/m ³
λ ——煤的导热系数, W/(m·K); 波长, μ m; 阻力系数; 侧压系数	L_c ——装药长度, m
λ_T ——总导热系数, W/(m·K)	L_a ——空气柱长度, m
v ——流速, m/s; 火焰工作面的移动速度, m/s	n ——压力增大倍数; 孔隙度, %; 实验指数
M ——分子量	D ——炸药爆速, m/s
H ——高度, m; 压头, Pa; 温度, C	η ——不耦合系数
K ——化学反应速度常数; 抗压强度动载提高系数; 渗透率, um ²	ω ——修正系数
Ω ——反应系统占据的空间区域; 气流源项, m ³	ρ_m ——介质密度, kg/m ³
θ ——无量纲温度; 温度, C	D_c ——介质中冲击波的传播速度, m/s
T_0 ——参考温度, C; 煤的着火温度, C	U_c ——冲击波波阵面上质点的移动速度, m/s
E ——活化能, J/mol	U_r ——粉碎区界面上介质质点的移动速度, m/s
ΔE ——单位质量介质内能的变化, J/kg	\bar{r} ——比例距离
Q ——化学反应热, J	P_x, P_d ——孔壁初始冲击压力, Pa
A ——指前因子, 1/s	P_H ——炸药的爆轰压力, Pa
a ——炸药分解深度系数; 加速度, m/s ²	r_b ——炮孔半径, m
$f(a)$ ——微分形式的热分解反应机理函数	R_0 ——粉碎区半径, m
q_1 ——单位时间内 1 mol 炸药因热分解而放出的热量, J/(mol·s)	R_c ——压坏区半径, m
q_2 ——单位时间内因传热由反应区通过器壁向周围环境散失的热量, J/(mol·s)	R_T ——裂隙区半径, m
β ——传热系数, W/(m ² ·K); 介质颗粒形状系数	α ——应力波衰减指数
	S_c ——单轴静态抗压强度, MPa
	S_{cd} ——动态抗压强度, MPa
	S_T ——静态抗拉强度, MPa
	S_{Td} ——动态抗拉强度, MPa
	x ——位移, μ m

q_v ——热源的发热率, $W/(m^3 \cdot s)$
 θ_0 ——周围气体温度, C
 λ_1 ——水泥层的导热系数, $W/(m \cdot K)$
 m ——质流量, $kg/(s \cdot m^2)$
 φ ——燃烧比率
 T_1 ——煤层燃烧前温度, C
 T_2 ——最高燃烧温度, C
 ξ_0 ——煤粒半径, m
 d ——燃烧断面当量直径, m
 ζ ——供氧量, m^3/s
 Q_0 ——氧的发热量, J/m^3
 J ——水力梯度
 q ——比流量
 H_1 ——已知压头函数, Pa
 S_s ——与孔隙率有关的常数
 S_1 ——渗流域的第一类边界面
 S_2 ——渗流域的第二类边界面

g —— S_2 上的流量, m^3/s ; 重力加速度, m/s^2
 C_0 ——实验常数
 I_1 ——分子扩散流密度, $kg/(m^2 \cdot S)$
 k_1 ——热扩散因子
 k_2 ——压强扩散因子
 D_d ——分子扩散系数, m^2/s
 I_2 ——气体对流传移密度, $kg/(m^2 \cdot S)$
 D_T ——紊流扩散系数, m^2/s
 I_3 ——紊流扩散流密度, $kg/(m^2 \cdot S)$
 Re ——气体运动的雷诺数
 n' ——实验指数
 P_0 ——标准压力(系指 1 个大气压)
 T_L ——弯曲率
 α_L ——纵向弥散度, m^2/s
 α_T ——横向弥散度, m^2/s
 N_u ——努谢尔特扩散准则

目 录

1 绪论	1
1.1 研究煤炭地下气化温控爆破渗流燃烧方法和目的和意义	1
1.2 国内外研究概况及发展趋势	2
1.2.1 原子能爆破煤层法	2
1.2.2 化学液爆破煤层法	2
1.2.3 炸药爆破煤层法	3
1.3 地下气化数学模拟研究现状评述	4
1.3.1 析空区扩展模型	5
1.3.2 气化通道形状模型	5
1.3.3 温控场模型	6
1.3.4 煤气质量模型	6
1.3.5 氧气浓度扩散模型	6

第一部分 模型实验

2 爆破实验研究与理论分析	10
2.1 热爆炸实验	10
2.1.1 热爆炸原理	10
2.1.2 实验设计	11
2.1.3 实验方法	12
2.1.4 实验数据整理	13
2.1.5 实验结果	13
2.2 热爆炸临界温度的数值计算	19
2.2.1 数学模型	19
2.2.2 特征参数的选定	21
2.2.3 计算结构讨论	21
2.3 爆破漏斗实验	23
2.3.1 实验条件	23
2.3.2 实验方法	23
2.3.3 实验结果评述	25
2.4 爆破动力作用分析	26
2.4.1 爆炸冲击波初始参数	26
2.4.2 介质爆破破坏分区	29
2.4.3 计算结果分析	31

2.5	小结	31
3	煤炭地下气化温控爆破渗流燃烧模型实验研究	33
3.1	煤炭地下气化基本原理	33
3.2	实验台结构	34
3.3	爆破参数设计	35
3.4	实验系统	37
3.4.1	测温系统	37
3.4.2	爆破监测系统	37
3.4.3	物探监测系统	38
3.4.4	气体组分监测系统	38
3.4.5	供排气系统	38
3.4.6	冷态试验	39
3.5	实验数据的整理与分析	40
3.5.1	温控温度、温控时间及温控距离	40
3.5.2	爆振测试与处理	41
3.5.3	温控特征参数	50
3.5.4	温度场的动态变化规律	51
3.5.5	煤气组分、热值及还原率	63
3.5.6	气体压力的变化特点	67
3.5.7	火焰工作面的探测	69
3.5.8	气化空间的分区特征	76
3.6	小结	77

第二部分 煤炭地下气化数学模型

4	气化煤层动态温度场及火焰工作面移动速度的研究	80
4.1	温度场数学模型的建立	80
4.1.1	微分方程	80
4.1.2	边界条件	81
4.2	模型参数	82
4.3	动态温度场的数值计算	83
4.4	火焰工作面移动速度的计算	88
4.4.1	数学模型	88
4.4.2	计算结果	93
4.4.3	分析与讨论	93
4.5	小结	94
5	地下气化气体流动三维非稳定非线性渗流数值模拟	96
5.1	引言	96

5.2	渗透实验系统及实验方法	96
5.2.1	实验系统	96
5.2.2	实验方法	97
5.2.3	实验结果分析	98
5.3	地下气化气体渗流运动特征	98
5.4	地下气化流体三维非稳定非线性渗流数学模型的建立	100
5.4.1	渗流运动的微分方程	100
5.4.2	定解条件	101
5.5	三维渗流数学模型的数值解法	101
5.6	主要参数的设定	104
5.7	计算结果分析与讨论	106
5.8	小结	109
6	地下气化气体三维非稳定对流扩散数值模拟	110
6.1	地下气化气体对流扩散特征	110
6.2	三维非稳定对流扩散微分方程的推导	112
6.3	三维非稳定对流扩散数学模型	113
6.4	三维非稳定对流扩散模型的数值解法	114
6.4.1	网格剖分及基函数的确定	115
6.4.2	平面上游加权多单元均衡方法	116
6.4.3	三维上游加权多单元均衡方法	117
6.4.4	积分公式的推导	120
6.4.5	权系数的确定	126
6.5	参数的确定	127
6.6	计算结果分析与讨论	129
6.7	小结	132
7	结论	134
	参考文献	137

1 绪 论

1.1 研究煤炭地下气化温控爆破渗流燃烧方法的目的是和意义

煤炭地下气化(Underground Coal Gasification),就是将地下的煤进行有控制燃烧,通过煤的热作用和化学作用而产生可燃气体的过程。这一过程,将建井、采煤、地面气化三大工艺合而为一,是一项多学科开发能源及化工原料的新技术,具有安全性好、投资少、效率高、污染少、效益高等优点。

中国是以煤炭为主要能源的国家,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。我国原煤产量的95%是井工开采的。就目前我国煤炭资源的利用率来讲,由于长期沿用传统井工采煤方法的原因,回采率只有50%左右(仅就统配煤矿而言),即是说“采一半丢一半”^[1]。这样,势必导致大量矿井衰老报废速度加快,使不计其数的煤炭资源遗弃在地下。若如此发展下去,作为煤炭资源大国的中国发生煤炭能源的供应紧张状况也是不可避免的。另一方面,煤炭在开采、运输和使用过程中给生态环境造成的破坏也是不容忽视的,地面塌陷、污染和流失大量地下水,向大气排放大量烟尘、硫化物、二氧化碳及氮氧化物等有害气体等等,已经对一些地区的生态环境构成了较大的威胁^[2]。为了解决这一问题,必须发展洁净煤技术,而煤炭地下气化技术可以说是一条最佳的途径。况且,在报废矿井中进行地下气化,可回收被遗弃在地下的大量煤炭资源,大大提高煤炭资源的利用率,亦适合我国煤炭资源利用的现状。煤炭地下气化产生的煤气,经地面净化处理后,不仅可作为燃料直接用于发电、民用或工业生产,而且还可以作为化工原料气和提取纯氢(地下水煤气中H₂含量在40%以上)。氢气是冶金工业、电子工业、化学工业、航空航天工业和电力工业的重要原料,氢能又是当今人类最理想的清洁能源^[3]。所以,煤炭地下气化在技术上是可行的,在经济上是合理的。它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技术,必将成为我国洁净煤技术的重要研究领域。

我国煤炭地下气化半工业性和工业性试验均取得了引人注目的成功。它标志着煤炭地下气化这一新型的回收被遗弃在地下的煤炭资源的工艺技术向商业化全面推广应用迈出了可喜的一大步。然而,无论是半工业性还是工业性试验,均是在急倾斜爆层或倾角大于45°的煤层中进行的。在煤层燃烧气化过程中,实体煤位于气化通道的上方,在高温作用下煤体膨胀碎裂后,靠自重作用不断充填于气化通道之内,使通道底部堆满松散块煤而形成渗流燃烧的气化条件^[4],这样容易使煤炭地下气化试验获得成功。

徐州新河二号井煤炭地下气化半工业性试验,经过多年实验室和现场的技术准备,克服了重重困难,于1994年3月23日一次点火成功。25日正式产气,产气量为2000~4000 m³/h,煤气热值为5.02~12.56 MJ/m³。在试验中,连续稳定产气99天^[5]。此次煤炭地下气

化试验煤层倾角为 $68^{\circ}\sim 80^{\circ}$,煤层平均厚 3.8 m ,气化通道长 168 m 、断面为 4 m^2 ,是目前世界上最大的一座煤炭地下气化炉^[6]。长通道、大断面、两阶段气化工工艺直接成功地应用于煤炭地下气化,在地下气化历史上尚属首次,达到了世界先进水平。

我国煤层赋存条件多样,缓倾斜(倾角在 25° 以下)、倾斜(倾角为 $25^{\circ}\sim 45^{\circ}$)和急倾斜(倾角在 45° 以上)煤层储量所占比例分别为 86.3% 、 10.1% 和 3.6% ^[7]。我国的衰老报废矿井较多,据统计:1953~1989年间就报废了297处矿井,1990~2020年间将有244处矿井报废^[8]。根据我国煤层赋存条件的特点,在废弃的煤炭资源中,倾斜、缓倾斜或近水平煤层占相当大的比例。如果用气化方法回收这些倾角小于 45° 的煤炭资源,则不具备靠重力作用自动向气化通道内填充碎煤的条件,即相当于是于在坚实的煤层中进行气化。在燃烧初期,燃烧空间的长度小于初步直接顶板垮落步距^[9],即是说,当矿山压力能够将煤层压碎之前,将不会出现块煤(或碎煤)靠自动冒落进入气化通道的现象。由于煤层的渗透率很低,约为 $10\sim 100\mu\text{m}^2$ ^[10,11],气化剂仅限于在贯通通道内流动,因而不能提供有效燃烧气化所需要的大反应面积,也就不能形成渗流燃烧的气化条件,这样势必影响气化过程的连续稳定生产和煤气质量的提高。

鉴于上述在倾斜煤层中进行地下气化所遇到的具体问题,作者提出了煤炭地下气化温控爆破渗流燃烧的技术工艺,即采用温控爆破方法,将较硬的煤层在气化过程初期加以疏松,使其产生更多裂隙并使局部煤体松动冒落,在气化通道底部形成块煤区,从而极大改善气化剂的渗透性。这样,不仅可以最大限度地增大气化剂与固体煤之间的反应比表面积,而且又不会使气化通道堵死,因而加强了氧化—还原作用。于是便可在气化通道内形成可移动的渗流燃烧的火焰工作面,从而保证气化过程的连续和稳定。

因此可以说,温控爆破渗流燃烧技术是水平、缓倾斜及倾斜煤层地下气化成败的关键,是确保长期、稳产、高产中高热值煤气的根本技术途径。

温控爆破渗流燃烧技术的研究成功,可为实现我国绝大多数衰老报废矿井的煤炭地下气化、回收大量被遗弃的煤炭资源提供可靠的技术支持。鉴于此,本书主要从实验室模型实验和理论分析两方面,对温控爆破方法进行系统研究,为现场进一步推广应用该项技术提供必要的温控参数和理论依据。

1.2 国内外研究概况及发展趋势

在倾斜煤层中进行气化,应用新的技术工艺使煤层松动、形成均匀的裂缝,以利于燃烧气化,俄罗斯和美国等国家早在五六十年代就曾做过不同爆破方法的种种尝试^[12]。

1.2.1 原子能爆破煤层法

1967年,美国提出了利用原子能爆破地下煤层,使煤层疏松以增加透气性,从而造成煤气发生炉的计划。原定于1969年完成,计划在怀俄明矿区实施。该矿区赋存200亿t煤,埋深 $300\sim 700\text{ m}$,属特厚烟煤层。据计算:在厚度 70 m 、埋深 700 m 的煤层中,用5万t级原子能爆炸,其破碎带半径约 42 m 、高 210 m ,周围龟裂带半径 100 m ,破碎岩石约200万t,其中煤50万t。所获得的低热值煤气及液态产品,如果在地面上提高其品位,然后经过管道输送给市场用户,那么,其热值即相当于150万桶石油。

1.2.2 化学液爆破煤层法

苏联在20世纪50年代曾尝试用化学液爆破煤层法以增加煤层的透气性,进行过多次

试验但均未获得成功。

美国曾提出过一种更好的近似炸药的水力爆破技术,用以使煤层分裂,在煤层中形成很均匀的渗透裂隙,以提高气流与煤的接触面积。目前尚未见到其现场试验的报道。

使用液体炸药能渗透到煤层的各个部位,然后使液体爆炸,这样,可使一定范围内的气化煤层破碎。一般对混合液体炸药的性能是有要求的:在平常情况下,不爆炸且安全,在一定的输送压力下可以注入到煤层中。这种液体炸药必须具备下列条件:

- (1) 在整个准备期间不敏感,经得住处理和用泵抽送;
- (2) 输送到气化煤层的适当部位时,应当很充分灵敏地进行爆炸,并且能够完全有效地传播震动波;
- (3) 具有良好的炸裂性能或破碎能力;
- (4) 物化性质和粘性应尽可能单纯,能被各种类型的煤所容纳;
- (5) 临界直径(渗透失效直径)应尽可能小,使其能在煤层形成“毛细管”带,这样爆炸后能够使煤层形成很均匀的裂缝和碎块。

美国曾研制过一种 Sprengel 型(真空型)混合液体炸药。它由两种成分组成的,而每一种组分本身并没有爆炸性,仅仅是在混合之后才会产生爆炸。改变液体的组成可获得不同的性能,如改变液体的粘性,使其能够更有效地渗透到煤层中去。

60 年代初期,美国使用凝胶炸药在水力破裂液中进行了现场试验,使爆破效果得到了进一步改善。这种技术先是向气化煤层中注水,然后送入含有高密度凝胶剂的爆炸液产生冲击波,借助不可压缩水的传播作用将冲击波压力穿透煤层而使煤层破碎。

俄罗斯研究过用脉动水(pulsed water enfusion)注入技术来炸裂贯通,即将一种高威力炸药放在充满水和密封的钻孔中,炸药的火焰产生的高压冲击波由水传给煤层而使煤层破裂。脉动水的注入随着炸药爆炸而不断进行。

另一种破裂技术,是在两个钻孔间由电力贯通所形成的通道上注入液体炸药,俄罗斯已将其成功地运用于油层以增加其渗透性。

美国于 60 年代末在现场进行过混合爆炸液和水力压裂法联合试验,取得了初步成效。

为了节约投资和简化工艺,美国在 70 年代中期曾使用所谓最新的化学液——液态氨、氢氧化钠以及胺等用以破裂煤层。从地面经过钻孔将化学液压入气化煤层的原生孔隙或裂隙中,使煤层膨胀、裂隙扩大而增加煤层透气性。因为氨水不仅是廉价的溶液,而且煤本身就含有氨,所以在地下气化过程中,作为副产品可以得到大量氨液。

美国曾经做过预算,用氨液破裂煤层的方法,每一吨煤约需 100 磅化学粉碎剂,通过钻孔向煤层鼓风,将氨水从煤层中排出到地面而加以回收,回收率可达 99%。

1.2.3 炸药爆破煤层法

1975 年,美国在波德河流域(赫克里克)进行煤炭地下气化过程中,实施了用炸药爆破煤层的破裂方案。破裂试验(赫克里克 I 号)在深 38 m、厚 7.6 m 的煤层中进行,两包炸药在相距 7 m 的煤层底部同时爆炸。鼓风后取出的岩心检查表明,在煤层底部附近发生了广泛的破裂,其最终结果是在煤层顶部形成了渗透性很高的气流通道。气化试验进行了 11 天,共气化了破裂煤层约 1000 t 煤中的 130 t。试验过程中,气体组成、热值以及氧气利用率全部相当稳定,如图 1-1 所示。

任何一种炸药都有其本身的热感度。在一定的热能作用下,当达到其热爆点时,炸药

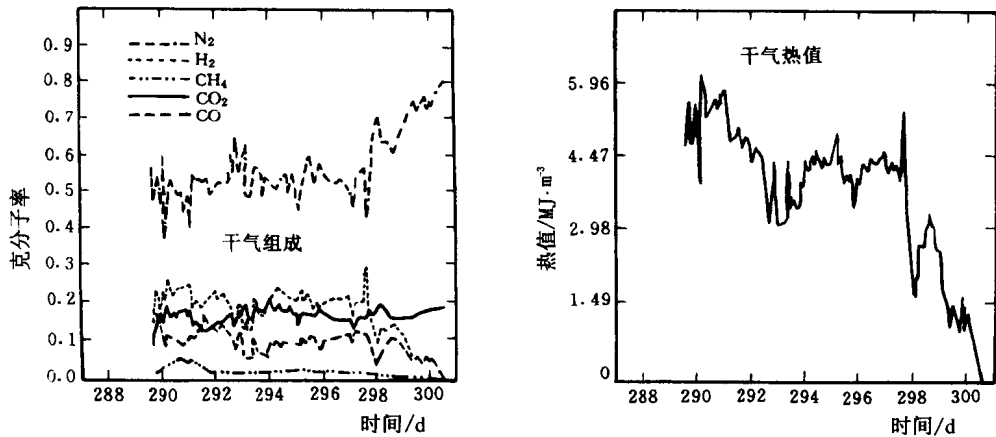


图 1-1 赫克里克 I 号试验的干气组成和热值

即可自行爆炸。文献[13]、[14]正是将炸药的这一性能成功地应用于实践之中并产生了良好经济效果的报道。譬如，新疆乌鲁木齐市南新铁合金有限公司，一座 1800 kVA 型炼制硅铁合金的电炉，由于矿石质量问题以及其他原因，经常造成炉内硅铁合金凝结，铁水停滞，影响生产的顺利进行。该公司采用疏通爆破法对高温凝结体进行了爆破破碎，短时间就恢复了生产。在爆破过程中，导火索不是用人工点燃而是用炉温自行引燃的，引燃的导火索再起爆雷管。药卷结构如图 1-2 所示。

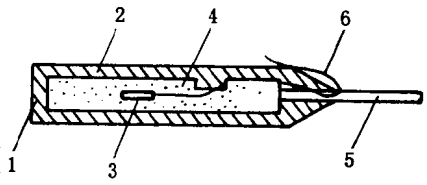


图 1-2 药卷结构示意图

- 1——石棉布；2——钢管；3——火雷管；
- 4——炸药；5——钢筋；6——导火索

上例说明，只要设计合理，用温度来自行引爆炸药或雷管是完全可行的。本文模型实验拟用雷管爆松煤

层，而雷管的引爆则依靠燃烧气化过程中煤层介层的热传递作用^[15]。这样，人们对于温控爆破和煤层介层动态温度场变化规律的认识与研究便提出了更高的要求。

1.3 地下气化数学模拟研究现状评述

世界主要产煤国家——俄罗斯、美国、英国、德国、法国、日本、波兰、比利时以及印度等，除了对地下气化技术进行实验室研究和现场试验外，各国还对煤炭地下气化过程进行了数学模拟，并已建立了许多数学模型。将这些模型的计算结果与现场试验所取得的数据相比较表明，只要获得准确的化学动力学数据，数学模型就有可能定量地预测煤炭地下气化过程的发展及其结果。

迄今为止，所建立的数学模型基本上都是以能量守恒定律为基础的，按其性能的不同可以划分为整体性模型和原则性模型。整体性模型描述一个平衡方程组系统，而原则性模型则通过相似法对过程进行简化^[16]。根据数学模型的具体结构及其最终计算结果，还可以将其分为析空区扩展模型、产出煤气质量模型以及气化炉内温度场模型。

但是，由于地下气化炉是一个整体系统，各种模型所涉及的变量基本上是不同的，只不过建立模型时的侧重点不同而需要进行不同的基本假设。因此，其最终计算结果对一些参数

较准确,而对另外一些参数则较粗糙,有时甚至还会是错误的。例如,有的模型能够较准确地计算出气化炉的温度场和碳的消耗量,但却不一定能正确地计算出通道的形状^[17]。

本书主要介绍以下几种不同类型的数学模型。

1.3.1 析空区扩展模型

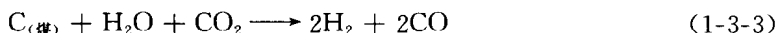
索斯尼斯等人^[18,19]建立了一个三维轴对称模型,描述煤炭地下气化过程中析空区的扩展,该模型把析空区划分成四个不同区域:灰渣区、焦炭区、碎岩区和空白区。在地下气化过程中,这些区域的大小是不断变化的。

模型采用可压缩的达西定律描述气流在灰渣区内的流动:

$$\frac{\partial p^2}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p^2}{\partial r} \right) + \frac{2RT\mu}{k} \Omega = 0 \quad (1-3-1)$$

式中 Ω ——气流源项。

模型假定:析空区的扩展是由下述三个化学反应所控制的:



该模型计算出的析空区体积与洛基山 1[#] 现场试验结果进行了对比(图 1-3),从图 1-3 中可以看出,计算结果与实验结果基本一致。

1.3.2 气化通道形状模型

埃德加等人^[20]所建立的模型假定气化通道是圆柱形的,并认为碳与氧气的燃烧反应均匀地发生在通道表面上,反应速度常数 K 与燃烧速度 V 成正比,则碳的消耗方程如下:

$$\frac{d(R^2VC)}{dz} = -2RKC \quad (1-3-5)$$

式中 z ——沿通道方向的距离;

C ——氧气的浓度;

R ——通道半径。

上式积分后可得:

$$C = C_0 \exp(-2k_0 z / V_0 R_0) \quad (1-3-6)$$

上式中,下标“0”表示各个量的初始值。

如果进一步假定通道的缓慢扩展是一准静态的,则有

$$\frac{dR}{dt} = MKC / \rho \quad (1-3-7)$$

其中 ρ ——煤的密度;

M ——煤的分子量。

将上述各式积分,即可求得通道半径沿轴向的变化:

$$R = R_0^2 + \frac{M}{\rho} K_0 R_0 C_0 t \exp(-2k_0 z / V_0 R_0) \quad (1-3-8)$$

从式(1-3-8)中可以明显看出,该模型所得出的通道半径随时间的变化关系是不适当

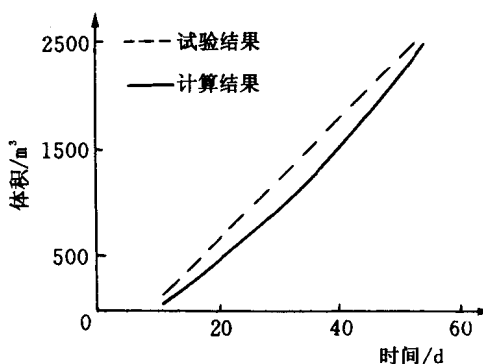


图 1-3 析空区体积的比较

的,因为式中最后一项随着时间的延长有无限增大的趋势。这可能是由于模型中没有考虑燃烧区的移动所造成的。

1.3.3 温度场模型

文献[17]、[21]、[22]假定实验室气化炉模型是一个长方形箱体,模拟的是地下急倾斜煤层,将气化炉煤层简化为二维模型,即认为煤层在厚度方向上的温度没有变化。两个侧面与岩层之间的热交换,用一个负的热源来描述,并且假设这一热损失与当地的温度成正比。

于是,煤层内的温度场数学模型为:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) - KT = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1-3-9)$$

式中 T ——煤的温度;

ρ ——煤的密度;

c_p ——煤的质量定压热容;

λ ——煤的导热系数。

采用有限差分法对上式进行了求解,计算值与实验值基本吻合。

1.3.4 煤气质量模型

索斯尼斯等人对渗透性堆积床的一维达西流动进行了研究,建立了一个比较完整的模型^[23]。该模型所考虑的化学反应比较全面,包括煤的燃烧、 CO_2 的还原、水煤气的变换、煤的热解以及 CO 等的燃烧,共 11 个化学反应。该模型假定上述大部分反应是由化学平衡控制的,热解反应和氧化反应则是不可逆的,而 CO 等可燃气体的燃烧速度为无穷大。在此基础上,建立了准稳态的气相组分质量守恒方程:

$$\frac{dC_i}{dx} = \frac{1}{V}(-C_i \frac{dv}{dx} + R_i) \quad (1-3-10)$$

式中 C_i ——气相各组分的浓度;

V ——混合气体的流速;

R_i ——由于化学反应而引起的第 i 种组分的浓度变化。

气相动量守恒方程可用达西定律来代替:

$$\frac{d\rho}{dx} = -v\rho/R \quad (1-3-11)$$

将质量守恒方程、动量守恒方程与能量守恒方程联立,即可求出各组分的浓度。

利用上述模型对一个 1.6 m 长的气化炉进行数值模拟,从计算结果与实验结果比较来看,二者基本一致。

1.3.5 氧气浓度扩散模型

文献[24]建立了一个描述通道内氧气扩散过程的数学模型,该模型假设气化通道为矩形截面,根据费克第二定律,导出通道内气流稳态对流扩散方程为:

$$V \frac{\partial C}{\partial z} = D(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}) \quad (1-3-12)$$

式中 V ——气流的速度;

D ——氧气的扩散系数;

C ——氧气浓度;

z ——通道的轴向距离。