

钢铁冶金新技术丛书

煤气化 新技术与原理

COAL GASIFICATION
TECHNOLOGY AND PRINCIPLE

郭占成 公旭中 著



科学出版社

钢铁冶金新技术丛书

煤气化新技术与原理

Coal Gasification Technology and Principle

郭占成 公旭中 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书共5章。第1章,重点介绍煤焦化过程的基础科学问题,为后续的煤气返回脱硫脱硝过程、共气化过程、催化燃烧过程提供必要基础知识。第2章,重点介绍煤焦化和燃烧过程中返回还原性气体,实现焦炭脱硫、烟气脱硝的过程,提出了焦化和燃烧过程中原位固体脱硫、气体脱硝技术。第3章,重点介绍了煤与天然气/焦炉煤气共气化的技术基础,提出了利用小高炉作为共气化反应器的构想,并进行了共气化原理分析。第4章,重点介绍了煤与重质油共气化的可行性、热态模拟及动力学,并阐述了煤与重质油共气化参数对合成气生成规律的影响。第5章,重点介绍了催化强化粉煤燃烧过程及两相流反应器内煤粉燃烧动力学。

本书可供煤化工与钢铁冶金专业及相关技术领域科技工作者、大学教师和研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

煤气化新技术与原理=Coal Gasification Technology and Principle/郭占成,公旭中著. —北京:科学出版社,2016

(钢铁冶金新技术丛书)

ISBN 978-7-03-041032-0

I. ①煤… II. ①郭…②公… III. ①煤气化—研究 IV. ①TQ54

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第125366号

责任编辑:吴凡洁 孙静惠/责任校对:刘亚琦

责任印制:阎磊/封面设计:耕者设计工作室

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>

北京源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年6月第一版 开本:720×1000 B5

2014年6月第一次印刷 印张:26 1/4

字数:510 000

定价:118.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



《钢铁冶金新技术丛书》编委会

主任：周国治（中国科学院院士、北京科技大学教授）

副主任：张欣欣（北京科技大学校长、教授）

编委：包燕平（钢铁冶金新技术国家重点实验室教授）

成国光（钢铁冶金新技术国家重点实验室教授）

陈伟庆（钢铁冶金新技术国家重点实验室教授）

郭占成（钢铁冶金新技术国家重点实验室教授）

李晶（钢铁冶金新技术国家重点实验室教授）

刘青（钢铁冶金新技术国家重点实验室教授）

焦树强（钢铁冶金新技术国家重点实验室教授）

薛庆国（钢铁冶金新技术国家重点实验室教授）

王静松（钢铁冶金新技术国家重点实验室教授）

《钢铁冶金新技术丛书》序

钢铁工业是我国国民经济建设和发展的支柱产业，但存在着巨大的节能减排压力、严重的铁矿资源短缺以及迫切的高端产品生产技术需求。要解决这些我国钢铁工业可持续发展所面临的问题，在国家产业政策调整与引导的同时，必须加强基础理论研究与创新技术研发，开发具有自主知识产权的新工艺、新技术，推动钢铁产业技术进步。2011年10月，科学技术部批准依托北京科技大学建立“钢铁冶金新技术国家重点实验室”。钢铁冶金新技术国家重点实验室以国家重大需求为导向，紧密围绕碳素能源高效转化、冶金资源高效利用、高端钢铁材料高效生产等关乎我国钢铁工业可持续发展的基础理论和关键新工艺、新技术开展系统深入的科学技术研究。实验室坚持有组织的科学研究与自由探索相结合、基础研究与技术创新并重、长期目标与短期目标兼顾的原则，针对高温过程冶金物理化学、能量高效转换与链接、铁矿资源高效利用、钢的纯净化及夹杂物控制四个方向开展科学技术基础研究，力争通过基础理论的突破，在复杂矿资源综合利用、节能减排、洁净钢高效冶炼等关键技术建立工业技术原理，并通过产学研结合开发新工艺、新技术、新装备。

钢铁冶金新技术国家重点实验室成立以来已取得了一批重要成果，例如，在熔渣结构与物性预报方面，提出了以新一代几何模型为代表的一系列计算复杂熔体物理化学性质的理论方法和模型，并被广泛应用到相图计算、热力学数据提取、熔体物性计算和预报等领域，并形成了以“周模型”命名的理论体系，取得了国际领先的基础理论研究成果；在洁净钢和夹杂物控制方面，通过钢-渣-夹杂物等多元多相反应热力学与动力学的系统研究，掌握了钢中O、S等杂质去除和夹杂物调控的机理，利用氧化物冶金技术改善钢的组织结构，开发新型洁净化生产装备，提出特殊钢洁净化生产新技术，研究成果应用于高品质汽车用钢、管线钢、轴承钢、弹簧钢、帘线钢等的生产；在冶金粉尘循环利用方面，揭示了各类冶金粉尘的矿物学结构特征及碳热还原过程中K、Na、Zn、Pb的分离、富集行为，突破了转底炉处理冶金粉尘若干关键工程技术，解决了冶金富钾粉尘分离提取氯化钾的关键工艺技术，建立了转底炉处理冶金粉尘和富钾粉尘生产氯化钾的示范工程，推动了我国钢铁冶金粉尘循环利用技术的发展；在节能方面，研发了电炉炼钢复合吹炼技术，发明了电炉炼钢集束射流技术，研究成果广泛应用于电炉炼钢工艺中，实现了电炉炼钢高效率、低能耗的冶炼过程。此外，针对全氧高炉炼铁、冶金过程二氧化碳资源化利用、钒钛磁铁矿资源综合利用、钢渣资源化

利用等基础理论研究和技术研发也取得了重要进展。

《钢铁冶金新技术丛书》本着“百花齐放、百家争鸣”的出版方针和“探索、创新、求实”的科学精神，将钢铁冶金新技术国家重点实验室的一些专题研究成果介绍给读者，以期对提高钢铁冶金学科的前沿理论水平、提升自主创新能力、培养钢铁冶金领域创新人才、促进钢铁工业技术发展贡献力量。



钢铁冶金新技术国家重点实验室学术委员会主任

中国工程院副院长、院士

2014年6月15日

前 言

在一次能源消费中，煤炭是我国的主要能源。一方面它为我们的生活和工农业生产提供了方便廉价能源，另一方面给我们的环境带来了严重危害。新型煤化工技术无疑是解决环境污染的最佳途径。煤气化是煤化工行业的龙头技术，是新型煤化工技术的核心之一。它不但为“碳一”化学提供原料——合成气，而且经过分离与变换能够为各类冶金过程提供一氧化碳和氢气等还原剂，更重要的是煤气化技术实现了煤的大规模清洁转化与利用。

煤气化技术一直是煤科学与煤化工领域的重点，其主要原因：第一，煤气中有害物质容易脱除和控制，从而使得煤气化技术成为煤转化过程污染源头控制的根本技术；第二，能够实现煤产地规模化、整体化转化，同时联产多种形式的能源，如气化联产发电、气化联产氢气等；第三，能够提供一种基础的化工原料——合成气，同时其经过转换也能成为优良的冶金工业还原剂和热能，应该指出的是，气基还原剂对新型冶金工艺和设备提供了重要保障；第四，清洁煤气便于远距离输送，能够实现能源与化工原料的地域互补。因此，煤气化技术具有开发和应用潜力。

作者的科研团队经过在煤化工领域十几年的研究积累，初步形成了三个煤气化新技术原理：第一，煤转化过程还原气返回脱硫脱硝技术；第二，煤与其他能源共气化技术；第三，催化强化粉煤燃烧节能减排技术。这些技术与煤气化技术有着千丝万缕的关联，煤气化过程首先经历热解环节，热解气是一种良好的富氢能源；煤与富氢能源共转化可生成成分可调的合成气，而煤燃烧过程则可以认为是一种极端条件下，能量完全以热的形式释放的气化过程。因此本书以煤焦化（热解）—气化—燃烧过程为主线，以三个共性技术为主体内容，将作者的科研团队在煤气化领域的一些研究成果进行总结、归纳、凝练，形成了以下几个关键科技问题：①脱硫、脱硝与煤气化过程的耦合原理；②煤与其他能源共气化过程中的能量和物质协同机制；③粉煤催化燃烧原理与强化方法。基于三个关键问题，希望本书的内容能为新型煤气化技术的开发提供必要的理论基础及启发与思考。

本书内容，主要是作者过去研究工作的总结和见解，以供读者参考。作者水

平有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

借本书的出版，感谢为本书内容做出重要贡献的科研工作者，他们是：王志研究员、唐惠庆副研究员、宋学平博士、欧阳朝斌博士、付志新博士、陈彦广博士、公旭中博士、刘军利硕士、黄孝文硕士、王申祥硕士、张卉硕士、李振刚硕士。

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Gong Xuzhong' (公旭中), written in a cursive style.

2014年5月4日

目 录

《钢铁冶金新技术丛书》序

前言

第 1 章 煤焦化技术基础	1
1.1 均匀温度分布条件下煤/半焦的膨胀与收缩.....	1
1.1.1 均匀温度分布下焦化过程模拟	2
1.1.2 煤的形态对体积膨胀与收缩特性的影响	4
1.1.3 煤的形态对热解开始温度的影响	6
1.1.4 挥发分含量对体积膨胀收缩率的影响	7
1.1.5 最大体积膨胀率、收缩率与密度、粒度的关系	8
1.1.6 煤的形态对焦化后期焦炭结构与形貌的影响	9
1.1.7 煤的形态影响膨胀与收缩特性的讨论	10
1.2 梯度温度分布条件下煤/半焦的膨胀与收缩	10
1.2.1 梯度温度分布下焦化过程模拟	11
1.2.2 升温速率、堆密度对煤料柱梯度温度的影响	13
1.2.3 焦化时间对煤料柱径向收缩率的影响	15
1.2.4 煤料柱径向收缩值与中心温度的关系	15
1.2.5 煤料柱径向收缩值与梯度温度的关系	16
1.3 焦化过程半焦孔隙结构演变规律.....	18
1.3.1 半焦制备与表征	18
1.3.2 半焦孔隙率变化规律	20
1.3.3 比表面积变化规律	21
1.3.4 累积孔体积变化规律	22
1.3.5 孔径分布变化规律	25
1.3.6 半焦的表面结构	27
1.4 半焦/焦炭孔隙结构的分形特征	28
1.4.1 孔结构分形特征模型的建立	29
1.4.2 半焦孔隙体积分形维数的确定	30
1.4.3 半焦孔隙体积分形维数随焦化温度的变化.....	33
1.4.4 半焦孔隙体积分形维数随径向位置的变化.....	35
1.4.5 气体流动过程中的半焦/焦炭介质透气性	35

1.5	煤催化热解半焦结构演变规律	37
1.5.1	无烟煤催化热解过程 TG-FTIR 分析	38
1.5.2	无烟煤催化热解半焦孔与表面结构	40
1.5.3	无烟煤催化热解半焦化学结构	41
1.5.4	煤催化热解动力学	46
1.5.5	不同煤种的催化热解反应性	48
	参考文献	51
第2章	还原性气体返回脱硫脱硝技术	56
2.1	焦炭中硫存在形式与空间分布	56
2.1.1	焦化过程模拟	58
2.1.2	焦炭中各种形态硫的空间分布	59
2.1.3	焦炭中硫的 XPS 分析	61
2.1.4	结焦室宽度对焦炭硫含量的影响	62
2.2	焦化过程部分焦炉煤气返回脱硫	63
2.2.1	焦化过程部分煤气返回焦炭脱硫	63
2.2.2	焦化过程还原气返回脱硫规律	64
2.2.3	高硫煤焦化过程还原气返回脱硫	66
2.2.4	炼焦用混合煤脱硫规律	76
2.2.5	焦化过程煤气返回的脱硫机理	78
2.2.6	焦化过程返回煤气参数优化	80
2.2.7	焦炉内气体分布数值模拟	84
2.3	焦炉煤气焦化过程返回脱硫甲烷裂解作用	93
2.3.1	焦炭反应性及反应后强度	93
2.3.2	焦化过程返回甲烷	95
2.3.3	焦炭性能的演变规律	96
2.3.4	焦炭结构的演变规律	100
2.3.5	气体返回和甲烷裂解对炉温及工艺过程的影响	104
2.4	热解气还原脱除烟气中 NO_x	107
2.4.1	热解气还原烟气脱硝模拟	107
2.4.2	还原气氛下热解气组分还原 NO 均相反应	108
2.4.3	氧化气氛下热解气组分还原 NO_x 均相反应	111
2.4.4	金属氧化物对热解气组分还原 NO 的催化作用	116
2.4.5	烧结矿对 NO_x 脱除反应的作用规律	119
2.5	解耦燃烧与烟气返回脱硝	125
2.5.1	实验原料、装置与方法	125

2.5.2 焦炭还原 NO_x 的作用规律	128
2.5.3 解耦燃烧与烟气返回降低 NO_x 排放	136
参考文献	140
第3章 煤与天然气/焦炉煤气共气化技术	145
3.1 煤与天然气共气化原理	145
3.1.1 合成气制备技术	145
3.1.2 煤与天然气共气化技术原理	146
3.1.3 煤与天然气共气化工艺流程	147
3.1.4 煤与天然气共气化炉	147
3.1.5 煤与天然气共气化反应过程	148
3.1.6 合成气制备炉内的温度控制	148
3.1.7 煤与天然气共气化的特点	148
3.2 煤与天然气共气化温度	150
3.2.1 合成气出口温度	150
3.2.2 下部火焰区温度的控制	153
3.2.3 最高火焰温度理论值	154
3.3 煤与天然气共气化模拟研究	160
3.3.1 煤与天然气共气化过程模拟	160
3.3.2 煤与天然气共气化炉的操作效率	166
3.3.3 煤与天然气共气化反应过程	171
3.4 煤与天然气共气化示范研究	175
3.4.1 共气化热态示范	176
3.4.2 高温火焰区温度分布	179
3.4.3 合成气有效成分	185
3.4.4 煤种对甲烷和水蒸气转化率的影响	191
3.5 焦炭和煤灰对甲烷裂解催化作用	193
3.5.1 焦炭对甲烷裂解催化作用	193
3.5.2 煤灰对甲烷裂解催化作用	197
3.5.3 反应器器壁对甲烷裂解反应的影响	200
3.6 煤与天然气共气化热力学与动力学	200
3.6.1 煤与天然气共气化的物料衡算	200
3.6.2 煤与天然气共气化的平衡	206
3.6.3 共气化热力学模拟结果	210
3.6.4 煤与天然气共气化过程动力学	213
3.6.5 共气化动力学模拟	220

参考文献	223
第 4 章 煤与重质油共气化技术	228
4.1 煤与重质油共气化原理	228
4.1.1 煤与重质油共气化技术原理	228
4.1.2 煤与重质油共气化工艺与传统工艺	229
4.1.3 煤与重质油共气化过程	230
4.1.4 煤与重质油共气化热力学	232
4.1.5 煤与原油共气化模拟	236
4.1.6 操作参数对出口气体组成的影响	238
4.1.7 操作参数对裂解结焦生成物的影响	248
4.2 煤与渣油共气化规律	252
4.2.1 渣油的化学组成和结构	253
4.2.2 操作条件对出口气体组成的影响	254
4.2.3 裂解生成液体成分	268
4.2.4 操作参数对结焦生成物的影响	269
4.2.5 结焦生成物反应性	271
4.2.6 原料转化率	274
4.3 煤与重质油共气化热态模拟	275
4.3.1 操作参数对火焰区温度及出口气体组成的影响	275
4.3.2 操作参数对结焦生成物的影响	278
4.4 煤与重质油共气化动力学	278
4.4.1 重质油热裂解集总动力学模型的构建	279
4.4.2 重质油热裂解七集总动力学模型的建立	283
4.4.3 胜利常压渣油热裂解七集总动力学模型	288
4.4.4 煤与重质油共气化动力学	291
参考文献	295
第 5 章 煤催化燃烧节能减排技术	299
5.1 煤氧两相流燃烧反应特性	299
5.1.1 煤氧两相流燃烧反应模拟	299
5.1.2 煤非催化燃烧动力学	303
5.1.3 燃烧参数对煤氧两相流燃烧特性的影响	306
5.2 煤粉催化燃烧反应性	325
5.2.1 催化剂对煤粉燃烧的影响	326
5.2.2 煤质特征对催化燃烧的影响	334
5.2.3 燃烧工艺对催化燃烧的影响	340

5.3 无烟煤催化燃烧效率	345
5.3.1 参比 DTA 与常规 DTA	347
5.3.2 燃烧效率评价方法	348
5.3.3 RDTA 和 DTA 分析	350
5.3.4 煤催化燃烧过程 CO ₂ 和 CO 的释放	353
5.3.5 煤灰中碳含量	355
5.3.6 褐煤与烟煤的催化燃烧效率	358
5.4 无烟煤催化燃烧机理	360
5.4.1 碳材料催化燃烧机理	360
5.4.2 煤催化燃烧燃点降低机理	361
5.4.3 无烟煤催化燃烧动力学	370
5.5 半焦催化燃烧反应性	372
5.5.1 热解前后加入催化剂的半焦燃烧反应性	372
5.5.2 酸洗催化热解半焦与非催化热解半焦燃烧反应性	374
5.5.3 热解条件对半焦催化燃烧反应性的影响	376
5.6 焦炭催化燃烧脱硝	378
5.6.1 负载催化剂焦炭燃烧脱硝	379
5.6.2 负载碱金属类催化剂焦炭燃烧排放 NO _x 规律	381
5.6.3 负载碱土类催化剂焦炭燃烧排放 NO _x 规律	384
5.6.4 负载 Fe 氧化物催化剂焦炭燃烧排放 NO _x 规律	389
5.6.5 负载稀土类催化剂焦炭燃烧排放 NO _x 规律	391
5.7 煤催化燃烧过程实现节能减排机理	395
5.7.1 煤粉催化燃烧反应性提高机理	396
5.7.2 煤催化燃烧技术节能减排机理	397
5.7.3 水在催化燃烧过程中的作用	398
参考文献	398

第 1 章 煤焦化技术基础

1.1 均匀温度分布条件下煤/半焦的膨胀与收缩

煤在热解过程中伴随着一系列复杂的物理变化和化学反应的进行会出现膨胀与收缩现象。在炼焦工业中，煤/半焦的膨胀收缩特性对焦炉炉墙压力、焦炭结构和性质等都有很大影响，膨胀与收缩特性会因升温速率、煤堆密度及煤料存在状态等因素的不同而呈现出差别。

了解煤/半焦的收缩与升温速率、煤堆密度、煤种及煤料颗粒大小有什么关系，焦炭柱何时发生收缩等问题，能为解决焦化过程中存在的工程问题奠定基础。在实验室中，完全按照工业生产的比例研究上述问题是困难的，但通过模拟实际炼焦过程解决上述问题是可行的。炼焦中的煤料是经过选煤技术，把不同煤种的煤按照一定的比例配合而成的。煤料是经过碾磨的，由不同粒度大小的颗粒组成的，其中直径小于 0.3mm 的占 80%^①。这样一个颗粒群体的收缩行为其实是由很多个单一颗粒的收缩行为共同体现的。因而首先研究单一煤颗粒或小尺寸煤在热解过程中的膨胀与收缩特性，能够为描述颗粒群体的热解特性提供指导。

对于煤的膨胀与收缩现象，Strezov 等^[1-4]利用单颗粒反应器研究了不同颗粒大小的单一煤粒在快速加热过程中的膨胀特性。顾金凤^[5]用型块收缩仪研究了直径为 10mm、压样压力为 25MPa 的型煤在炭化过程中的膨胀与收缩特性。Nomura 和 Ari-ma^[6,7]利用高为 600mm、长为 600mm、宽为 400mm 的移动墙加热炉研究了炭化过程中炼焦压力、径向和纵向收缩间的关系，证实在焦化后期最大炼焦压力消失后煤柱开始发生收缩，最终径向收缩量为 2~5mm，挥发分增加 10%，收缩值将增加 1.6mm；而当焦饼自身重力大于焦饼与炉墙间的向上分压力时，煤柱开始发生纵向收缩，纵向收缩发生越晚其收缩值越小。Alvarez 等^[8]利用不锈钢坩埚研究了 42 种质量为 80g 的不同煤样的热塑性与半焦收缩特性的关系，发现软化温度低于 430℃ 的煤，其收缩值大于 10mm，而软化温度高于 440℃，其收缩值低于 10mm；最大流动温度和再固化温度与半焦收缩呈现非线性趋势，再固化温度大于 485℃ 的煤样，其收缩值相差较大，从 -20mm 到 8mm 都有分布。但是，以往研究煤膨胀收缩的实验装置受其自身装置及机械性能的影响，不能再现煤膨胀与收缩的过程行为，不易根据实验情况合理选取测量点，同时实验条件和实验目的不同，因而所得结论有一定的前提限制。

① 本书中如不特别指出，固体、液体的百分数指质量分数，气体的百分数指体积分数。

本节将设计能够在线观测过程行为和在线采集过程图像的加热炉和带有可移动标尺的加热炉，分别研究均匀温度分布条件下和梯度温度分布条件下煤/半焦的膨胀收缩特性。采用实时在线图像采集可以重现过程行为特性，使过程可视化，从而可以观测到直观、形象的膨胀收缩过程，可以提高对煤在加热过程中其膨胀收缩特性及煤焦形态变化的认识，利用计算机图像处理技术可以方便准确地得到所需数据；设计带有可移动标尺的加热炉能够方便地定量测量收缩值。

以三种单种煤为原料，分别制成不同形态的两种煤样品：粉料压制而成的不同密度的型煤和原煤煤块磨制而成的不同粒度大小的块状煤。采用能够在线观测过程行为和在线采集过程图像的加热炉，在均匀温度分布条件下重点考察煤样密度、粒度、煤质等因素对煤热解过程中的膨胀与收缩特性的影响。在以上基础上，采用1500g实际炼焦用混合煤，并设计带有可移动标尺的加热炉，进一步研究在梯度温度分布条件下焦炭柱径向收缩与焦化室中心温度、升温速率、煤料密度间的关系。

1.1.1 均匀温度分布下焦化过程模拟

1. 实验原料

实验用煤选为三种单种煤，标记为A、B和C。分别制成两种形态下的煤样：一种是在常温常压下先磨制成粉末状（ $<0.05\text{mm}$ ），然后利用压样机分别压制不同密度的粉压煤（ A_1 、 B_1 、 C_1 ），每个粉压煤的质量相同；另一种是由原煤煤块分别磨制而成的不同粒度大小的单颗粒块状煤（ A_2 、 B_2 、 C_2 ）。为了减小同一煤种间由于煤自身所存在的差异对实验结果的影响，每种实验煤样的原料均选用同一煤种的同一整块煤。煤样的各物性数据见表1-1，各煤样品的具体几何尺寸见表1-2。

表 1-1 煤的工业分析与元素分析

煤样	工业分析 (ad)				元素分析 (daf)				
	M	V	FC	A	C	H	N	O ^a	S
A	1.09	25.87	60.93	12.11	80.46	4.62	1.74	12.58	0.60
B	0.85	25.21	58.67	15.27	78.63	5.12	1.62	14.11	0.52
C	1.27	13.39	65.24	20.10	84.33	4.65	1.84	8.70	0.48

煤样	奥-阿膨胀参数					吉泽勒 (Gieseler) 流动参数		
	$t_1/^\circ\text{C}$	$t_2/^\circ\text{C}$	$t_3/^\circ\text{C}$	$a/\%$	$b/\%$	$t_1/^\circ\text{C}$	$t_2/^\circ\text{C}$	$t_3/^\circ\text{C}$
A	368	407	467	31	244	376	446	478
B	360	420	468	28	226	372	436	462
C	380	426	470	20	63	388	463	482

注：M. 水分；V. 挥发分；FC. 固定碳；A. 灰分；C. 碳；H. 氢；N. 氮；O. 氧；S. 硫；ad. 空气干燥基；daf. 可燃基；本书后同。 a . 最大收缩度； b . 膨胀度。

a. 本书的氧含量均为差减法获得。

表 1-2 实验样品几何尺寸 [直径×高/(mm·mm)]

A ₁	B ₁	C ₁	A ₂	B ₂	C ₂
20.5×14.3	20.5×14.0	20.5×14.2	20.0×10.8	19.0×10.0	19.0×10.3
20.5×13.2	20.5×13.0	20.5×13.1	10.3×10.2	10.8×10.2	10.4×10.0
20.5×12.3	20.0×12.1	20.5×12.0	6.0×5.3	6.0×5.7	6.0×6.0
—	—	—	2.0×1.9	2.2×2.2	2.2×2.2

2. 实验装置及膨胀收缩值计算方法

实验装置如图 1-1 所示^[9]，炉管一侧安装有可以实时在线采集过程图像的数码相机。将煤样置入加热炉中心恒温区内，通过调节炉管另一侧背光灯的光强控制器，使得数码相机能够采集到清晰的过程图像。在氩气环境下程序控制升温至 1000℃，300~500℃ 阶段升温速率设定为 1.5℃/min，其余阶段为 3℃/min。煤样品在加热炉中按给定的温度升温加热时将发生膨胀和收缩，在加热过程中选择合适的温度点利用数码摄像机对煤样品进行实时在线图像采集。

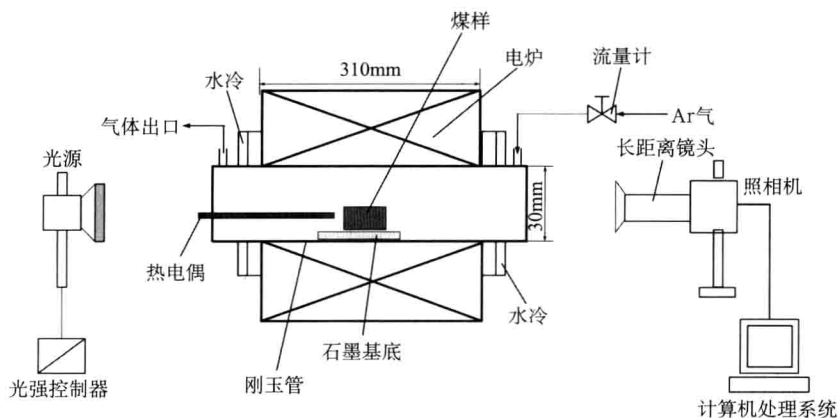


图 1-1 实验装置示意图

图 1-2 所示是实验过程中采集到的煤热解过程图像，利用计算机图像处理技术处理过程图像得到该温度下煤样的线性膨胀和收缩值，然后通过如下计算及换算方法得到体积膨胀收缩率

$$R_v = \frac{V_t - V_0}{V_0} \times 100\% \quad (1.1)$$

$$V_t = \frac{\pi}{4} D_t^2 H_t \quad (1.2)$$

$$V_0 = \frac{\pi}{4} D_0^2 H_0 \quad (1.3)$$

式中, R_v 为体积膨胀收缩率 (%) ; D_t 、 H_t 和 V_t 分别为任意温度下样品直径、高度和体积的计算机像素值 ; D_0 、 H_0 和 V_0 分别为加热前样品直径、高度和体积的计算机像素值。

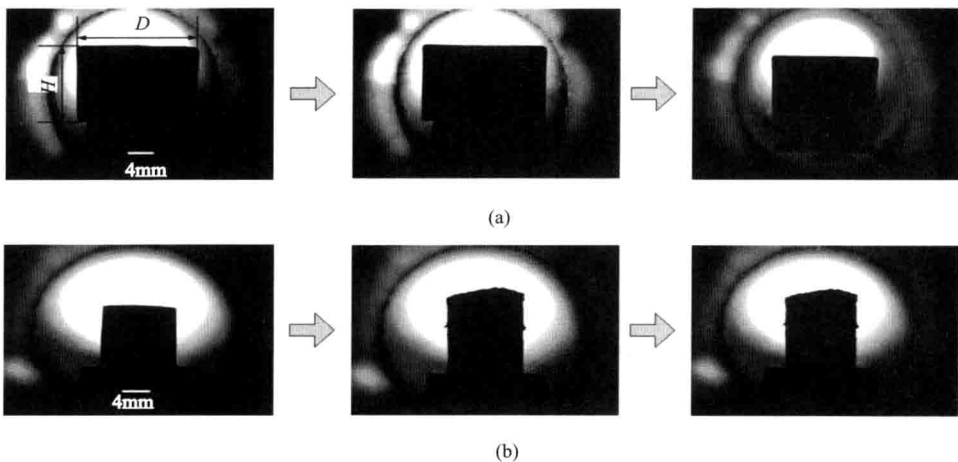


图 1-2 煤样热解过程中瞬时图像
(a) 型煤 ; (b) 天然块煤

1.1.2 煤的形态对体积膨胀与收缩特性的影响

体积膨胀收缩率是某一温度时的体积膨胀收缩值与加热前初始体积的比值。由型煤制成的不同密度型煤的体积膨胀与收缩曲线如图 1-3 所示, 由原煤煤块磨制成的不同粒度大小的块状煤的体积膨胀与收缩曲线如图 1-4 所示。从图 1-3 中可以看到, 型煤的体积收缩率随着密度的增大而减小。不同煤种、不同密度的型煤的最大体积膨胀率小于 5% ; 煤 A_1 、 B_1 在 $400 \sim 600^\circ\text{C}$ 发生收缩的速度较快, 在 600°C 时体积收缩率已达 20% , 在 1000°C 时收缩率达到 33% ~ 38% ; 而煤 C_1 在 600°C 时的收缩率约 15% , 1000°C 时收缩率达到 32% ~ 33% 。从表 1-1 中的奥-阿膨胀数据也可以看出, 煤样 A、B 的最大收缩度 (a , %) 和膨胀度 (b , %) 都高于煤样 C。

与相关文献^[5,10]报道的一致, 煤在收缩阶段会出现两个收缩高峰阶段, 从图 1-3 中曲线的斜率可以看出本实验型煤在 $450 \sim 550^\circ\text{C}$ 收缩最为明显, 为第一收缩高峰阶段 ; 随后在 $650 \sim 800^\circ\text{C}$ 出现第二次收缩高峰, 随着热解过程进入末期, 其收缩也逐渐趋于稳定。从图 1-4 中可看到块状煤也会出现两个收缩阶段, 与型