

COMBUSTION OF PULVERISED COAL

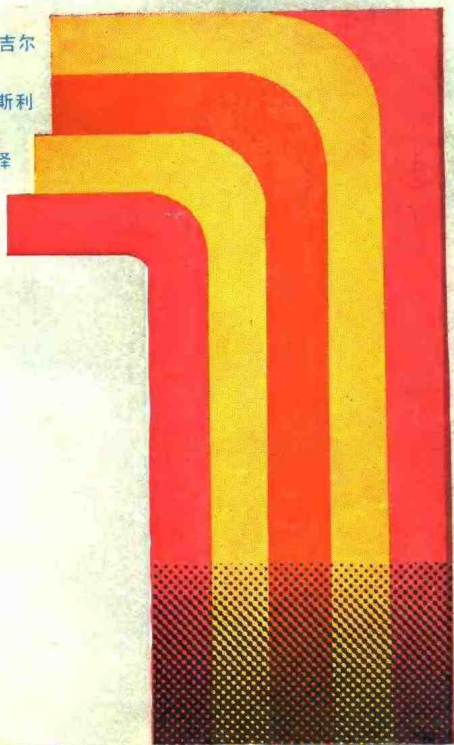
煤粉燃烧

(英) M.A.菲尔德 D.W.吉尔

B.B.摩根 P.G.W.霍克斯利

章明川 许方洁 许传凯译

水利电力出版社



内 容 提 要

本书全面介绍了与煤粉燃烧过程有关的各种物理、化学现象的基本原理和计算方法。全书共分8章,包括燃烧过程概论、流动燃烧和混合、传热、热解、挥发分的燃烧、炭颗粒的反应速率、柱状流动中悬浮煤粉颗粒群的等温燃烧、燃烧室的数学模型;作为本书附录的20篇专题论述,详细考证了已有的各种实验数据,以及所采用的各种假设或结论的可靠程度。

本书在实验数据处理及编写技巧上均有较高的水平,被认为是煤粉燃烧研究方面的经典著作之一。

本书可供从事电力、化工、冶金工业动力方面的工程技术人员、科学工作者、高等院校有关专业的师生阅读参考。

M.A.FIELD D.W.GILL

B.B.MORGAN

P.G.W.HAWKSLEY

COMBUSTION OF PULVERISED COAL

INSTITUTE OF ENERGY 1983

煤 粉 燃 烧

(英) M.A.菲尔德 D.W.吉尔 B.B.摩根 P.G.W.霍克斯利

章明川 许方清 许传凯译

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路4号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 22.25印张 496千字

1989年3月第一版 1989年3月北京第一次印刷

印数0001—2770册 定价14.25元

ISBN 7-120-00584-7/TK·09

译者的话

第二次世界大战以后,在世界范围内燃烧理论的研究主要沿着两个不同的方向发展。一是研究在严格控制的反应条件下强化燃烧的途径,主要为发展火箭和太空技术服务。另一则是围绕着常规燃烧方式,为提高燃烧效率、节约燃料所作的努力。后一工作从40年代后期开始,在大约30年的时间内,主要在英国两个国立研究院——英国煤炭利用研究院(BCURA)和英国钢铁研究院(BISRA)的参与下得到了迅速的发展,取得了构成该领域理论骨架的重要研究成果。

本书是英国煤炭利用研究院(BCURA)在总结了当时工业发达国家煤粉燃烧的理论 and 实验方面所取得的主要研究成果的基础上写成的,于1967年初次问世,1974年发行了第二版。以后由于英国国营机构调整及人材外流等原因,英国煤炭利用研究院(BCURA)被解散,因此本书没有能进一步再版。但由于本书学术方面的水平以及各国读者的需要,英国能源协会(Institute of Energy)于1983年对本书组织了一次重印。

虽然我国的动力燃料一直以煤炭为主,但过去对于煤粉燃烧所涉及的各种基本的物理、化学过程的研究工作却做得不多。有关煤粉燃烧理论和实验室研究的书籍,无论是专著还是译文在国内都较少见。前几年,我们三人分别在美国“麻省理工学院”、“福斯特惠勒公司研究中心”及荷兰“国际火焰研究基金会Ijmuiden研究所”进修时,由于工作需要和这些单位的专家学者的推荐,先后阅读了本书的大部分章节,并深深地被其所吸引。

我们回国时正值国家“六五”计划中期,我们所在单位——水利电力部西安热工研究所承担了“煤粉燃烧特性的试验研究”等国家重点攻关项目,本书遂成为我们工作中的一本主要参考书籍。在本所同事及其它单位同行的鼓励下,我们决定将此书译成中文。

本书包括了煤粉燃烧所涉及的流动与混合、传热、热解、挥发分的燃烧、炭的表面反应、燃烧过程的数学模型等各个方面的内容。每一章均从基本的物理、化学现象及其实验结果出发,通过严格的论证及恰如其分的简化,给出该过程实用的数学描述方法。最后,各分散章节的内容被统一到燃烧室的数学模型一章,作为本书的结尾。本书整体构思合理,分章数据处理严谨,特别是作为本书附录的20篇专题论述给使用本书的科学工作者在实际应用上带来了极大的方便。

为了克服本书成书较早所带来的不足,我们以“代译后记”的形式收入了国际著名燃烧学家、美国杨伯翰大学L.D.Smoot教授为国际燃烧协会第18届年会撰写的一篇综述文章——“煤粉扩散火焰:通过模型的展望”,作为本书的一个补充。Smoot教授在充分肯定本书的基础上,对本书出版后十余年来这一领域研究成果的新发展作了概括的介绍。

本书第1、2章及附录A~G由许传凯同志译出,第3~5章及附录H~Q由许方洁同志译出,第6~8章、附录R~U及Smoot教授的综述由章明川同志译出。在相互校阅

的基础上，最后全书统稿由章明川同志完成。

水利电力部科技司邱长清高级工程师、清华大学徐旭常教授、西安交通大学许晋源教授为翻译本书作了积极的推荐，在此表示深切的谢意。

由于译者在专业理论及外语水平方面的限制，翻译中的错误及不妥之处在所难免，敬希读者批评指正。

译 者

1987年9月25日于北京

序

在英国和其它国家中所使用的煤，大部分是在各种不同大小和型式的设备中烧掉的。因此，在一个煤炭利用研究院中，大部分研究工作与煤的燃烧经济性和有效性有关是很自然的事。

1963年春天，英国煤炭利用研究院 (British Coal Utilisation Research Association——BCURA) 的工作人员详细地考虑了未来几年中的研究计划，特别是某些应当优先考虑的课题。关于目前人们所关心的煤粉燃烧问题，当时提出并在后被研究院理事会采纳的建议是，研究工作应着重在下列三个方面：

第一，应当加强有关煤粉颗粒的燃烧反应和热解反应机理的基础性试验研究。

第二，应当提供一种专门设计的试验装置来研究煤粉火焰，从而能保证对燃烧、空气动力学和传热现象进行系统的研究。

上述两方面工作中的第一方面已经完成，第二方面即对大型煤粉火焰的研究现正在全力进行。

第三，应当使BCURA的研究人员明确其它部门的研究人员已经完成了哪些工作，以及哪些是BCURA尚未开展但将会被证明是有前途的研究领域。这就需要对有关煤的燃烧和火焰及与此密切相关的煤粉燃烧系统的空气动力学和传热模型的文献进行深入的研究。这样，就使我们能更好地评价上述的两项试验研究计划所得结果的实际重要性。通过上述三方面计划的结合，希望开发出用于燃烧过程预测的数学模型。现已朝着这个方向迈出了第一步。

亲眼目睹本书的开始编写及其发展的各个阶段，使我深感愉快和深受教益，希望读者们能从本书严谨的文字中获益。

英国煤炭利用研究院理事长

Donald Hicks

1967年8月

作者前言

本书的目的是综述为建立煤粉燃烧室的数学模型所需的背景材料。为使内容尽量具有建设性和连贯性，有关煤粉燃烧室的文献都按本书的目的进行检验而决定取舍，而且所列的参考文献都是最必需的。本书已远远超出了单纯综述的范畴，因为书中对已有的理论进行了实质性的扩展。读者将会看到，许多内容放在了附录中——全书共有20篇附录。正文中只收入附录的主要结论，这样做是希望更集中地讨论最基本的内容。

我们完全没有讨论燃烧的工程技术问题，但我们也避免过分抽象的处理，办法是采用了一些典型的数值并用图表来显示各种参数的定量效应。

虽然书中的讨论集中于煤粉的燃烧，但很多论题是与气体和液体燃料的燃烧有关的。我们甚至期望第二章中关于气体射流混合和第三章中关于传热的综述将对不在燃烧领域中工作的研究人员有所帮助。

没有许多人的热心帮助是不可能写成本书的。我们首先要对我们的同事们，特别是H.F.Ferguson先生、D.R.Gregory先生、E.M.Robb小姐、C.A.Robertson先生和L.C.S.Mansfield先生表示感谢，他们为本书收集了大量的材料，并对某些专题进行了分析和评价。

其次我们要感谢S.Badzioch先生，他准备了热解这一章的主要部分；感谢R.F.Littlejohn先生，他撰写了煤中矿物成分分布和不同类型碳质材料的性质范围的有关附录。最后我们要感谢S.A.Mahood小姐，她耐心地承担了艰苦的打字工作，一遍又一遍地准确地打完了全书。

D.B.Spalding教授（Imperial College——帝国理工学院）、N.Y.Kirov教授（University of New South Wales——新南威尔士大学）、A.G.Roberts先生（BCURA 工艺发展部）和G.G.Thurlow先生（BCURA锅炉分部）审核了本书的初稿，他们尖锐的但有益的评论使本书更精练。最后I.G.C.Dryden博士（BCURA情报出版主任）仔细阅读了全文并提出许多改进的建议。Dryden博士和M.Griffith小姐将本书最终整理成册并付印。作者还要感谢C.Vickers太太，她为本书制作了插图。

最后我们要感谢D.Hicks先生（BCURA理事长），他极仔细地看过好几份初稿，他的精辟的评论对成书的各个阶段都有极大的帮助。

英国煤炭利用研究院

M.A.Field

D.W.Gill

B.B.Morgan

P.G.W.Hawksley

1967年8月

前 注

每一章和每一个附录所用的符号只适用于该章或该附录，它们列于每章或每一附录的末尾。所用符号的数目不足以构成一个能适用于全书的符号系统，因此要记住同一符号在不同的地方可能有不同的含义。

书中的数据和计算均采用公制。但大气压常被用作压力单位，因为在目前出版的图表中许多热力学平衡数据仍采用这一单位^①。1大气压等于760torr, 1.013bar, 0.1013MN/m², 1.033kgf/cm²和14.7psi。

虽然本书的书名为《煤粉燃烧 (Combustion of pulverised Coal)》，但书中大部分仍采用更为惯用的“粉状燃料——pulverised fuel”，因为在成书时这一惯用术语更为通用^②。

参考资料中所列国际火焰研究基金会 (International Flame Research Foundation) 的未发表的报告是得到该会同意的，并为此深表谢意。对于同意复制他们发表的图的机关和个人也一并表示感谢，这些机关和个人的名字列在每一幅图下的参考条目中。

① 本书翻译时保留了原书的热量单位cal，按国际单位制应采用J，1cal=4.187J。此外，在一般情况下本书不强调查量与质量的严格区别。除以g或kg为计量单位(如密度g/cm³、比表面cm²/g)时译为质量外，其它情况，特别是在无因次值(如失重率%、燃尽率%)中，仍保留原书的量值的含义——译者注。

② 在译稿中“Pulverised fuel”除指粉状煤粉及其它粉状燃料外，已全部译作“煤粉”与此类似，书中与碳、炭有关的术语译为：carbon——碳，化学元素；carbon particle——碳颗粒，泛指含碳物质而强调其颗粒特性，如粒径、外表面等；char——炭，特指煤热解(或部分热解)所形成的固体物质；char residue——炭渣，强调由热解过程所决定的固形残渣的特性，如多孔隙、内表面等，并多有热解已结束之意；fixed carbon——固定碳，工业分析挥发分试验结束后所得的不包括灰分在内的固体残留物，涉及燃尽时亦与炭渣混用；coke——焦炭，特指高膨胀性煤的碳化过程(炼焦工艺)产物。

此外，本书翻译时保留了原书中一些与我国用法不尽相同的数学符号，其含义说明如下：≈ 近似等于；~ 大致可取，多用在数量级上相等的意义；∝ 仅表示正比，没有数量上是相等或否定的概念——译者注。

目 录

译者的话

序

作者前言

前注

第1章 燃烧过程概论 1

第1节 煤粉燃烧 1

第2节 燃烧产物、成分与火焰温度 3

第3节 热平衡、着火与熄火 7

1.3.1 能量平衡和热平衡 7

1.3.2 热平衡状态的稳定性 10

1.3.3 着火与熄火 10

1.3.4 不等温燃烧室 12

第4节 燃烧室的数学模型 12

1.4.1 混合箱模型 13

1.4.2 柱塞流动模型 13

1.4.3 二维模型 15

1.4.4 简化流动模型网络 16

第5节 其余各章概要 16

符号 17

参考文献 17

第2章 流动谱型和混合 18

第1节 导言 18

第2节 燃烧室内的流动谱型 20

2.2.1 管式炉膛 20

2.2.2 水管锅炉炉膛 21

第3节 停留时间分布 21

2.3.1 理论 21

2.3.2 水管锅炉中停留时间的分布 24

第4节 射流的一般特性 24

2.4.1 流动的理论分析 25

2.4.2 Prandtl的混合长度理论 25

2.4.3 轴向速度衰减 26

2.4.4 轴向扩散系数 27

2.4.5	其它的紊流射流理论	28
2.4.6	紊流射流的发展	28
2.4.7	轴对称自由射流中旋涡扩散的估算	29
2.4.8	旋涡扩散在煤粉火焰数学模拟中的重要性	30
2.4.9	小结	30
第5节	自由射流	31
2.5.1	平面射流	31
2.5.2	圆形射流	33
2.5.3	圆环形射流及同轴射流	37
2.5.4	浮力的影响	38
第6节	喷入流动流体中的射流	38
2.6.1	同向流动	39
2.6.2	相交流动	39
第7节	受限射流	42
2.7.1	回流	42
2.7.2	受限射流内速度和浓度的轴向发展	45
第8节	射流系	47
第9节	旋转射流	47
2.9.1	圆形旋转射流	48
2.9.2	环形旋转射流	52
第10节	含尘射流	54
第11节	燃烧射流	56
第12节	小结	59
符号		59
参考文献		61
第3章	传热	63
第1节	引言	63
第2节	辐射传热	64
3.2.1	基本概念	65
3.2.2	用于均匀等温包壳的关系式	72
3.2.3	非均匀、非等温燃烧室的计算方法	76
3.2.4	散射介质中的传热	85
第3节	对流传热	90
3.3.1	流体和壁面之间的传热	91
3.3.2	燃烧室内的传热	93
第4节	传热计算的实例	93
3.4.1	无对流传热时的管状燃烧室	94
3.4.2	壳式锅炉	98
3.4.3	水管锅炉	101

3.4.4 高强度燃烧室	102
第5节 在着火前区域中反应物的加热	104
3.5.1 着火的热力理论	105
3.5.2 着火距离的测量	110
第6节 总结和结论	116
符号	117
参考文献	120
第4章 热解	121
第1节 引言	121
第2节 缓慢热解	122
第3节 快速热解	125
4.3.1 概述	125
4.3.2 以往的工作	125
4.3.3 BCURA 未发表的工作	128
4.3.4 颗粒尺寸的变化	132
第4节 几种可能的热解机理	132
第5节 研究结果在煤粉燃烧中的应用	134
符号	135
参考文献	136
第5章 挥发分的燃烧	137
第1节 引言	137
第2节 挥发分的组成	137
第3节 挥发分的燃烧	138
5.3.1 当化学反应的时间可以忽略时挥发分和氧气的燃烧时间	139
5.3.2 挥发分燃烧时化学反应时间的计算	140
5.3.3 碳黑的形成和燃烧	141
第4节 小结	144
符号	144
参考文献	144
第6章 碳颗粒的反应速率	145
第1节 引言	145
第2节 球形颗粒燃烧的简化模型	147
6.2.1 热平衡	150
6.2.2 各种变量对氧化反应速率的影响	153
第3节 一氧化碳氧化过程对颗粒反应速率的重要性	156
6.3.1 一氧化碳生成后的燃烧	157
6.3.2 结论	159
第4节 二氧化碳、水蒸汽与碳颗粒的反应对燃烧的影响	159
第5节 在煤粉火焰燃烧中的应用	161

符号	162
参考文献	163
第7章 柱塞流动中悬浮煤粉颗粒群的等温燃烧	164
第1节 引言	164
第2节 燃烧模式	164
第3节 氧浓度沿火焰长度的变化	166
7.3.1 过量空气对单一粒径悬浮颗粒群燃尽时间的影响	168
第4节 在柱塞流动中不均匀粒径悬浮颗粒群燃尽速率的计算	169
第5节 典型煤粉悬浮颗粒群在等温柱塞流动中的计算燃烧速率	173
7.5.1 与单一粒径计算结果的比较	173
7.5.2 燃烧模式的影响	174
7.5.3 表面反应速率系数的影响——扩散控制准则	174
7.5.4 燃烧机理因子的影响	175
7.5.5 研磨细度及膨胀的影响	176
7.5.6 过量空气的影响	177
第6节 对增压燃烧室中超高温燃烧过程的特殊考虑	177
7.6.1 压力对反应速率的影响	177
7.6.2 压力对反应机理的影响	178
7.6.3 热解失重量的增加	178
第7节 理论与实验系统的比较	179
7.7.1 工作温度低于2000K的系统	179
7.7.2 超高温运行的实验系统	180
第8节 扩展到更复杂的燃烧系统	181
符号	181
参考文献	182
第8章 燃烧室的数学模型	183
第1节 引言	183
第2节 数学模型的建立	183
第3节 一些已有的数学模型	184
8.3.1 流场与混合的假定	184
8.3.2 传热的假定	186
8.3.3 反应动力学	187
8.3.4 模型的应用	187
第4节 向更完善的模型前进	188
第5节 基本数据方面的空缺	189
符号	190
参考文献	190
附录A 煤粉细度	191

(A1) Rosin-Rammler公式	191
(A2) 典型的煤粉细度	193
附录B 煤粉中矿物质和灰分的分布	196
附录C 火焰温度的计算	197
附录D 水管锅炉炉膛的类型	208
(D1) 下射式火焰炉膛	208
(D2) 墙式燃烧炉膛	208
(D3) 角式燃烧炉膛	209
附录E 水管锅炉炉膛模型内停留时间分布的研究	210
(E1) Peirce和Thring (1957) 的研究	210
(E2) Blanchard (1964) 的研究	210
附录F 浮升射流轨迹分析式的推导	212
附录G 煤粉燃烧室的辐射特性值	215
(G1) 煤、炭和灰粒	215
(G1.1) 含碳固体颗粒的复数折射指数	215
(G1.2) 煤和炭颗粒的辐射效率因子	217
(G1.3) 煤和炭悬浮体的吸收系数	219
(G2) 碳黑颗粒	221
(G2.1) 碳黑颗粒的辐射效率因子	221
(G2.2) 碳黑悬浮体的吸收系数	221
(G3) 烟气	223
(G4) 燃烧室壁面	226
(G5) 火焰辐射的测量值	226
(G5.1) Sherman (1934a)	227
(G5.2) Ijmuiden No.2燃烧室	228
附录H 在相对运动中气体和颗粒之间的传热和传质	234
(H1) 对斯托克斯流的理论分析	235
(H2) 当颗粒的雷诺数低于100时传热、传质速率的测量	238
(H3) 结论	239
附录I 非连续介质中颗粒向外的传热和传质	242
附录J 被加热时煤颗粒内部的温度梯度	245
附录K 燃料颗粒的温度按指数规律上升时, 其热解速度的理论关系式	247
附录L 当氧通过惰性气体的扩散起控制作用时, 挥发分的燃烧时间	251
附录M 一氧化碳的燃烧速度	253
附录N 在煤粉火焰中形成的碳黑量的估算	257
附录P 碳和氧的表面反应速率	260
(P1) 传质效应的消除	260

(P2) 属于传质控制型反应的一些测量结果	261
(P3) 可以得到表面反应速率系数计算值的一些测量工作	264
(P4) 表面反应速率系数的最佳估算	272
附录Q 扩散传质速度	275
(Q1) 双组分扩散系数	276
(Q2) 热扩散	277
附录R 细小碳颗粒的燃尽时间	278
附录S 用于燃烧研究的碳质固体的某些特性	283
(S1) 各种燃料的比较	287
附录T 柱塞流动型煤粉燃烧系统的实验数据	289
(T1) 无烟煤试验	289
(T2) 烟煤试验	292
(T3) 小结	296
附录U BCURA煤粉火焰试验装置燃烧数学模型描述	298
(U1) 燃烧室和颗粒燃烧的基本特性	298
(U2) 数学模型的概述	299
(U2.1) 模型的目的	299
(U2.2) 流场与混合的假定	299
(U2.3) 传热的假定	300
(U2.4) 反应速率的假定	300
(U2.5) 模型的完整性	300
(U3) 模型的基本方程	300
(U3.1) 碳颗粒的消耗速率	300
(U3.2) 氧浓度	301
(U3.3) 时间和距离的关系	303
(U3.4) 火焰温度	303
(U4) 求解方法和所需要的数据	306
(U5) 计算	310
(U5.1) 步长与代表粒度分布的组分数目	310
(U5.2) 反应速率参数的影响	312
(U5.3) 颗粒尺寸的影响	316
(U5.4) 两个模型的比较	316
(U5.5) 计算结果小结	317
代译后记——	
煤粉扩散火焰：通过模型的展望	321

第1章 燃烧过程概论

第1节 煤粉燃烧

煤粉燃料最重要的用途莫过于产生高温高压蒸汽，用来发电。在英国，燃煤电厂发出的电力约占全部发电量的85%，而其中的3/4由煤粉燃烧方式产生。煤粉燃料的另一个重要用途是作为水泥生产中的热源，每年消耗煤炭约300万t，而发电厂每年消耗煤炭约4700万t。与这些用途相比，其它方面所消耗的煤粉燃料是微不足道的。

煤粉燃料是煤经过破碎和研磨而成的细微粉末，它可以悬浮在空气流中被喷进燃烧室，在数秒钟或更短的时间内燃尽。附录A详细地讨论了煤粉颗粒的大小，这里要说明的主要是，平均粒径一般为 $30\sim 70\mu\text{m}$ ($1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$)；但在一煤粉群内，颗粒尺寸的分布范围不可避免地是很宽的；对于一个典型的煤粉群来讲，尽管平均颗粒尺寸可以是 $50\mu\text{m}$ ，但也许会有10%重量的颗粒小于 $10\mu\text{m}$ ，10%重量的颗粒大于 $100\mu\text{m}$ 。当考虑煤粉的燃烧速度时，必须记住其宽筛分这一特点。

电厂所燃用的煤种成分常常是变化的，工业分析挥发分可以低到2%，或者高达50%。不过，在英国的燃料煤中，至少有4/5的煤挥发分在30%~45%之间。灰分也会有些变化，但是几乎所有发电用煤的灰分都在16%~24%之间。附录B讨论了这些矿物质在煤粉中的分布情况。

燃烧室的大小、形状和总体特性与特定的用途有关。虽然要讨论的大多数问题与所有的煤粉燃烧室都有关系，但是特殊工艺过程的用途和限制条件常会导致完全不同的设计，每一设计的问题也是各不相同的。特别要提出的是两种类型的燃烧室：目前电厂常用的水管锅炉以及磁流体发电(MHD)所需的高温燃烧室。虽然磁流体发电还有许多实际问题必须要解决，但是由于这种系统在理论上可以提高效率，所以引起了人们特别的关注。

为了解水管锅炉的应用条件和可能改进的方向，就必须对整个电力生产过程作一些介绍。这里介绍的仅仅是一些基本知识，至于更加详细的讨论可以参阅诸如《现代电厂实践》(CEGB, 1963)等书。常规电厂用蒸汽轮机发电，锅炉产生出大约 550°C 、2000磅/英寸²压力的过热蒸汽，这就必须燃烧燃料，并将其产生的热量传递给锅炉管子中的水和蒸汽。因此，燃烧室实际上也必须是一个热交换器。

现代的水管锅炉是一个很大的矩形箱体，大约有30英尺见方和100英尺高，炉壁完全由水管或汽管构成，并受到火焰辐射的加热。从炉膛出来的烟气温度仍然很高，大约为 1100°C ；当烟气通过以后各级受热面时，残余的热量以对流换热的方式被吸收。

人们可能会提出两个问题：能否进一步提高效率，燃烧室能否造得更小一些，以便减少投资费用。

在一个现代化的电厂里，燃烧过程本身的效率是很高的，烟气或灰渣中的残余未燃尽物，可望低于燃料的2%，这里仅有一线改进的余地。从燃烧烟气到产生过热蒸汽的换热过程效率大约为90%，从燃烧产物中吸收更多的热量是很困难的。废弃的热量与空气预热器出口处烟气的数量、成分及温度有关。这一温度受到烟气中所含三氧化硫的限制，如果烟气温度降低到大约160℃以下，所形成的硫酸就会腐蚀空气预热器的传热板。排烟的成分决定于煤种和运行工况，除了可将完全不必要的水蒸汽含量保持到最低以外，再没有改进的余地。当煤种和燃煤量一定时，排烟量与供给燃烧室内煤燃烧的空气量有关。对于一种好的商品煤，每千克煤的化学当量空气量约为10kg，这就确定了排烟量的下限值。但是，实际加入的过量空气可能高达40%，这就是说，湿排烟量几乎比理论上的下限值高40%。若在理论空气量下算得排烟热损失为8%，那么在40%过量空气时，热损失就是11%。因此，减少过量空气可以使效率从89%增加到92%，这虽然是个小数，但却是值得节省的。

大多数现代发电厂的效率在30%和40%之间，在很大程度上是由于热力机械固有的热力学性质的限制：汽轮机的效率很低，所以使电厂的效率降到如此低的程度。尽管已超出了本书的范围，但值得指出的是，采用更高的蒸汽温度是能够提高汽轮机效率的，因为现有蒸汽温度为550℃左右，远远低于烟气所能加热到的蒸汽温度。从燃烧的观点看，这是不成问题的；蒸汽温度的限制实际上决定于制造管子和其它部件的材料。正因为发电过程中这一环节的低效率导致了磁流体物理学（MHD）的研究，这将在本节的后面加以讨论。

由此，关于效率可以得出如下的结论：在改善燃烧的完全程度方面，已没有多少潜力可挖，但是采用减少过量空气的方法提高一点效率，在理论上是可能的。这就要求改进燃烧室的设计，使得既能减少空气量，又能达到完全燃烧。

至于燃烧设备的投资，主要与燃烧室的大小有关，那么能否在一个比较小的燃烧室内烧掉同样多的燃料呢？这里必须记住燃烧室具有燃烧和热交换的双重作用，对于现在建造中的大型机组，燃烧室的大小更多地受热交换所必须的表面积的控制，而不是受燃料燃烧所需容积的控制。对于小型机组，由于表面积相对于容积来讲比较大，就不一定是这样。很重要的一个实际问题是，烟气在进入对流受热面管束以前，必须靠炉壁水冷壁的辐射吸热使温度降低到灰渣有可能在管子表面沉积并烧结的温度以下，这一温度大约为1100℃。在设计燃烧室时，这个实际问题至少与完全燃烧的要求同样重要。

因为燃烧速度几乎总是随着煤粉细度的增加，或过量空气的增加而增加的；而在传热方面，除了提高火焰的辐射率以外，就没有其它办法来提高传热速度。因此，有时甚至可以说，燃烧是没有问题的，主要是一个传热问题。但是，使用更多的过量空气要降低效率，如果把煤磨得更细，就要增加磨煤机，消耗更多的磨煤电力。因此，传热并不是与整个发电过程有关的唯一要考虑的问题，而只是在初投资方面要考虑的主要问题。倘若要把烟气温度降低到1100℃，燃烧室内传热需要的表面积是一定的话，那么燃烧室的设计应当使煤粉颗粒在炉内的停留时间尽可能长一些，以便减少过量空气和降低磨煤成本。但由于传热问题，不能期望更好地燃烧就能减小燃烧室的尺寸。

总之，除非在传热方面有所突破，不能期望通过燃烧性能的改进来大幅度降低现有设

计的水管锅炉的成本。此外，由于减少过量空气在理论上可以使效率增加百分之几，这里虽然仅仅是个小数，但是如果减少过量空气而又不降低燃烧效率，那么能够节省一点也是值得的。

磁流体发电燃烧室的作用和限制条件完全不同，磁流体发电和所有发电机的原理都相同，那就是，当一个导体在一磁场中运动时，在它的内部将感应出电动势。在磁流体发电装置内，这个导体就是添加了电离物质使之导电的燃烧烟气本身。

Coombe (1964) 已经阐述了磁流体发电的一般原理，Badzioch (1964) 专门论述了粉状燃料的磁流体发电问题。

由于磁流体系统要求烟气具有很高的导电性，使它的应用受到了限制，活化燃烧产物的导电性与温度的关系极大，温度一旦低于 2000°C ，它的导电性可能就太低了。燃烧室必须产生温度非常高的气体，也许应高达 2700°C ，使磁流体发电通道能利用 2700°C 到 2000°C 之间的气体。在磁流体发电装置之后，希望有一普通的蒸汽发生系统，以便利用它的排气。这一工艺流程的总效率大约可达50%，而普通发电系统的最高效率为40%。

为了达到这样高的温度，要把燃烧所需要的空气预热到尽可能高的温度，应当尽可能地减少燃烧室的各种热损失，并且必须以尽可能少的空气来保证燃料的燃烧。为了减少辐射热损失，必须缩小燃烧室的表面积，但必须有足够大的容积，使燃料能真正完全地燃烧，燃烧室的最佳尺寸应该使辐射热损失和未燃尽燃料的总损失最小。

水管锅炉和磁流体燃烧室是燃烧室设计的两个极端。在水管锅炉设计中，要获得最高的热交换能力；而在磁流体燃烧室中，却要使热交换降低到最小。其它各种粉状燃料燃烧室，诸如旋风炉、炼钢平炉、水泥窑和壳式锅炉等，都有它们自己的特殊设计要求；对所有这些燃烧室，特别是对于那些尚处于设计阶段的非常规燃烧室，都希望能够计算出多方面的燃烧性状。

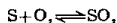
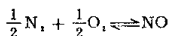
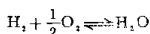
根据输入热量及通过壁面的热损失，希望能够计算出燃烧产物的温度和成分，燃烧室运行的工况范围，壁面的投射热流和燃烧室出口处燃料的燃尽程度；以及诸如过量空气、煤种、煤粉细度、空气温度、流动形态和烟气再循环量等参数对它们的影响。

在这一章内，将尽可能概括地研究这些问题，依次讨论燃烧产物的成分和温度；燃烧室运行的工况范围，阐明着火和熄火的概念；最后讨论燃烧室的数学模型。在以后的章节中，还要十分详细地讨论上述有关问题。

第 2 节 燃烧产物、成分与火焰温度

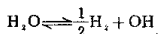
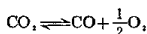
煤是由碳、氢、氧、氮、硫以及很少量的其它元素所组成的，典型的无机物质成分大约是碳80%~90%、氢4%~5%、氧5%~10%、氮1.5%~2%和有机硫1%。当煤在足量的氧气中燃烧时，碳生成二氧化碳，氢气生成水，释放出来的氧气参加燃烧，减少所需供给的燃烧空气量，部分氮气燃烧生成一氧化氮，硫转变成二氧化硫。因此，可得：

● 该处指用添加剂的方法增加燃烧产物的导电性。——译者注。



这些是煤在炉内燃烧时的主要最终产物。煤燃烧产物的成分决定于这些反应的平衡常数。假如在反应器内有足够长的停留时间，当正向反应速度（在上述方程中从左到右）等于逆向反应速度（从右到左）时，将达到一种近于热力学平衡的状态。在实际系统中，因为正向反应的速度太慢，所需时间远远超出燃料在反应器内的停留时间，这种热力学平衡状态是不会达到的。但无论如何，如能知道经过无限长停留时间以后燃烧产物的最终成分也是很有用的，现在讨论的目的就是要研究这一热力学平衡问题。

这些反应的平衡常数与温度有关。在这种情况下，温度增加对正向反应有利。如果没有其它反应的话，温度越高，燃烧产物越接近于只含有 CO_2 、 H_2O 、 NO 和 SO_2 。但是，也发现有如下各种分解反应：



所以，燃烧产物也包含 CO 、 H_2 和 OH ，以及原子态的氢、氧和氮；但是，只有大约在 2000°C 以上的温度下，才有 H 和 O ，在 3000°C 以上时才有 N 。

除了这些主要的氧化和分解反应以外，还会有形成其它化合物的反应，如生成 CH_4 、 NH_3 、 C_2N_2 、 HCN 、 SO_3 等的反应。

从原子组成（ C 、 H 、 O 、 N 、 S 在燃料和燃烧空气中的相对比例）和在一定温度下有关反应的平衡常数，可以计算出任一给定温度下燃烧产物的成分（如见Gaydon & Wolfhard, 1953）。在代数学上，这是个解一组联立方程的问题；因为要解出和燃烧烟气中成分数目一样多的方程，这是很费时的。例如，上面所列的四个氧化反应和五个分解反应，以及在最高温度下碳的蒸发，燃烧烟气中总共就有14个组分（ C 、 H 、 O 、 N 、 S 、 CO_2 、 H_2O 、 NO 、 SO_2 、 CO 、 OH 、 H_2 、 O_2 、 N_2 ）。因此，在这种情况下，计算成分需要求解含有14个未知数的联立方程（它们由9个反应速度方程，4个说明原子组成的方程—— C/O 、 H/O 、 N/O 、 S/O ，和一个总压力方程组成）。

因为成分计算决定于初始选择的那些可能存在而又需要考虑的气体组分，所以从某种程度上说是带有随意性的。通常的做法是，先列出一组最容易产生的物质，并假设任何被忽