



燃烧与节能技术

许立信 张淑谦 童忠良 • 等编著

非外借



化学工业出版社

燃烧与节能技术

许立信 张淑谦 童忠良 ● 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

全书介绍了燃烧与节能技术概述、燃烧理论、环境与能源、大气污染和燃料燃烧的关系、燃烧化石燃料与大气温室效应的关系、氮氧化物(NO_x)生成机理与影响因素、脉冲燃烧技术等;介绍了燃烧设备定义、燃烧设备分类、燃烧炉设备、燃烧器装置、燃烧辅助装置、节能燃烧新技术、复合旋流燃烧器的稳燃机理和应用实例、新一代燃烧器设计实例、空压机余热利用与节能、热处理连续炉设计工艺控制方法、城市居民燃烧设备与节能技术、生物质颗粒机/燃烧机等内容。还重点对煤粉高效洁净燃烧技术及应用、工业余热利用技术、工业垃圾气化熔融焚烧炉燃烧技术等内容及对上述生产的工艺流程及特点进行了叙述,重点分析了上述生产的工业节能减排现状以及工业的节能理论与方法、节能与减排等方面内容。

本书适合全国节能减排标准化技术专业、城市燃气工程专业、环境工程专业、热能及工程热物理等热工类有关专业的师生参考,也可供从事高效节能与低污染燃烧技术研究及产品开发的科学工作者、工程技术人员及管理人员参考,还可供火电厂、锅炉厂、动力车间、化肥厂、水泥厂、有关设计院、研究所从事流化床锅炉和工业窑炉设计、制造、运行和研究等方面的工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

燃烧与节能技术/许立信等编著. —北京:化学工业出版社,
2018.7
ISBN 978-7-122-32042-1

I. ①燃… II. ①许… III. ①燃烧设备-节能 IV. ①TK16

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 082587 号

责任编辑:夏叶清

文字编辑:余纪军

责任校对:王 静

装帧设计:关 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:三河市航远印刷有限公司

装 订:三河市瞰发装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张17 字数335千字 2018年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:98.00 元

版权所有 违者必究

前言

《燃烧与节能技术》围绕国家节能减排政策以及工业与信息化部颁布的《各行业节能减排先进适用技术指南》，重点对天然气燃烧、煤粉高效洁净燃烧、玻璃工业燃烧、陶瓷工业燃烧、冶金工业燃烧、工业余热利用与燃烧节能技术、工业垃圾气化熔融焚烧炉与燃烧节能技术展开分析论述，为读者提供一本实用的工业节能减排方面的参考书。

全书共分五章。介绍了燃烧与节能技术概述、燃烧理论、环境与能源、大气污染和燃料燃烧的关系、燃烧化石燃料与大气温室效应的关系、氮氧化物(NO_x)生成机理与影响因素、脉冲燃烧技术等；燃烧设备与装置及其节能燃烧新技术，介绍了燃烧设备定义、燃烧设备分类、燃烧炉设备、燃烧器装置、燃烧辅助装置、节能燃烧新技术、复合旋流燃烧器的稳燃机理和应用实例、新一代燃烧器设计实例、空压机余热利用与节能、热处理连续炉设计工艺控制方法、城市居民燃烧设备与节能技术、生物质颗粒机/燃烧机等内容。重点对煤粉高效洁净燃烧技术及应用、工业余热利用技术、工业垃圾气化熔融焚烧炉燃烧技术等内容及上述生产的工艺流程和特点进行了叙述。详细分析了上述生产的工艺流程及特点，重点分析了上述生产的工业节能减排现状以及工业节能与减排理论与方法等内容。

本书内容全面，联系实际，可操作性强，编写重点突出，层次分明，释义准确，资料翔实。本书适合作为全国节能减排标准化技术专业、城市燃气工程专业、环境工程专业、热能及工程热物理等热工类有关专业的大学生、研究生的教学参考书，也可供从事高效节能与低污染燃烧技术研究及产品开发的科学工作者、工程技术人员及管理人员参考。也可作为热能工程、工程热物理、采暖通风专业学生的参考书，还可供火电厂、锅炉厂、动力车间、化肥厂、水泥厂、有关设计院、研究所从事流化床锅炉和工业窑炉设计、制造、运行和研究等方面的工程技术人员阅读参考。

本书在编著过程中得到中国标准化研究院、中国计量科学研究院、中国冶金科

工集团建筑研究总院环境保护研究设计院、中国节能协会、中国金属学会、中国资源综合利用协会、中国钢铁协会、北京工业大学传热强化与过程节能教育部重点实验室及传热与能源利用北京市重点实验室、国家环境保护燃煤工业锅炉节能与污染控制工程技术中心、中国标准化研究院资环分院/全国节能减排标准化技术联盟、北京神雾热能技术公司等单位领导、专家、学者的帮助。

本书由许立信（第三章），张淑谦（第二、第四章第三~十二节、第五章），童忠良（第一、四章第一、二节）等编著。另外潘崇超研究员、房庆教授、王纯教授、钱雷教授、萧泽强、余召辉、吴道洪、陈庆敏等均为本书提供相关资料及审稿。本书参考和引用中国环境科学学会环境工程分会、中国金属学会环境保护专业委员会、中国有色金属工业协会、冶金环境保护综合利用信息网等出版的刊物、论文集相关资料；参考了大量国内外公开发表的论文、专利等资料。编著者对这些论文、专著的作者及其所在单位表示衷心感谢。周绍忠、韦光南、董春霞、陈婷、范雪峰、刘晖、褚友涵、李一泓、陈羽、高洋、王瑜、高新、方芳、黄雪艳、周雯、董桂霞、范立红、来金梅、吴宝兴、李力等同志为本书的资料收集和编写付出了大量精力，在此一并致谢！由于水平所限，书中不妥之处在所难免，敬请专家、读者指正。

编著者

2017年10月于北京

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 燃烧与节能技术概述	1
一、概述	1
二、富氧燃烧技术与节能关系	1
第二节 燃烧理论	2
一、理论燃烧温度定义	2
二、燃烧理论解决的问题	2
三、质量作用定律	3
四、阿累尼乌斯定律	4
五、影响化学反应速率的因素	5
第三节 氮氧化物生成机理与影响因素	7
一、燃烧过程中 NO_x 生成过程	7
二、热力型 NO_x 的形成机理	10
三、快速型 NO_x	10
四、燃料型 NO_x	11
五、部分预混燃烧（本生燃烧） NO_x 的生成特性	11
六、扩散火焰 NO_x 的生成特性	11
第四节 脉冲燃烧技术	12
一、脉冲燃烧的必要性	12
二、脉冲燃烧控制的原理和优势	12
三、脉冲燃烧控制技术的应用	13
四、脉冲燃烧控制技术的评价	15

第二章 燃烧设备及其节能燃烧新技术 16

第一节 概述	16
一、辉焰燃烧	16
二、燃气燃烧器结构分析与特点	19
三、燃气燃烧器断气保护装置	20
四、富氧燃烧器	20
第二节 燃烧炉设备	22
一、概述	22
二、技术参数	23
三、操作方法	23
四、安全操作规程	24
第三节 燃烧器装置	25
一、燃烧器定义	25
二、燃料种类	25
三、燃烧器分类	25
四、高调节比燃烧器	26
五、机组集空气源热泵及商用热泵	28
第四节 燃烧辅助装置	32
一、膜法富氧原理	32
二、锅炉的辅助设备	32
三、锅炉热效率分析	32
四、富氧助燃装置节能效果及其特点	33
五、成功案例	34
第五节 节能燃烧新技术与设备	35
一、管式加热炉的结构与特点	35
二、管式炉烘炉方案	35
三、管式炉烘炉的注意事项	38
四、管式炉烘炉后的检查	38
五、工业电炉及实验电炉	38
六、可控气氛炉的特点	45
七、管式电阻炉	45
第六节 超细粉体煅烧炉及其他炉	46

一、超细粉体煅烧炉	46
二、真空气氛炉及其他炉	47
第七节 空压机余热利用与节能	55
一、空压机余热回收的原理	55
二、空压机余热回收的理论基础	56
三、空压机余热回收的作用	56
四、改善空压机的余热处理	57
五、空压机热回收系统应用场合	58
六、空压机余热回收利用效益	59
七、空压机余热回收系统节能原理	61
八、余热回收机	63
九、电厂的汽轮机节能	64
第八节 旋流式燃烧器	65
一、旋流式燃烧器的工作原理	65
二、复合旋流燃烧器的机理	66
三、旋流式燃烧器的类型	67
四、旋转气流特性	69
五、预作用系统	70
六、安装使用说明	71
七、复合旋流燃烧器的设计	72
第九节 新一代燃烧器设计	74
一、用同步 CFD 设计新一代 Eclipse Linnox 燃烧器	74
二、燃烧气体和空气混合的重要性	74
三、燃料和空气混合变化的设计方法	75
四、集成 CAD 的应用	75
五、气体混合仿真的准则	75
六、现实案例	76

第三章 煤粉高效洁净燃烧 79

第一节 概述	79
一、洁净煤技术的发展	79
二、煤粉高效洁净燃烧技术及烟气净化技术现状	79
三、煤粉锅炉燃烧技术与实现清洁供暖	81

第二节 煤粉高效洁净技术/燃烧与节能	83
一、概述	83
二、技术工艺	83
三、开发应用	84
第三节 煤粉低尘燃烧与节能	84
一、技术改造的必要性	85
二、低尘燃烧技术	85
三、技术革新与改进	86
四、技术革新评价	87
第四节 中小型锅炉燃烧煤粉的节能	87
一、新型高效节能环保煤粉锅炉的技术优势	87
二、高效煤粉工业锅炉	89
三、高效煤粉锅炉	91
第五节 工业锅炉燃烧系统及其控制与锅炉混煤器	93
一、概述	93
二、混煤器原理简介	96
三、锅炉混煤器简介	98
四、锅炉混煤器分层给煤器燃烧工况	100
第六节 循环流化床燃烧技术	102
一、概述	102
二、技术发展	103
三、技术	104
四、效率	105
第四章 工业余热利用技术	108
第一节 概述	108
一、定义	108
二、工业余热供热	108
三、工业余热供热应用	110
四、工业余热回收利用	111
五、工业余热资源分类	114
六、工业余热的利用设备	115
第二节 工业余热利用	118

一、工业余热成为新增热能与节能	118
二、高炉冲渣水余热利用技术	121
第三节 工业锅炉余热利用	124
一、概述	124
二、工业锅炉烟气余热回收	124
三、钢铁工业余热回收利用	125
四、工业锅炉余热利用的技术应用	126
五、余热锅炉辅助设备及其他	128
六、大容量燃煤锅炉烟气余热利用方案示例	129
第四节 工业热炉烟气余热发电技术与节能	130
一、概述	130
二、烟气余热发电改造前状况	130
三、余热发电改造方案	131
四、装机方案	131
五、工艺流程	131
六、余热发电技术改造重点和难点的烟气参数测量	132
七、锅炉清灰方式选择	132
第五节 燃烧器	133
一、概述	133
二、工业燃烧器	134
三、民用燃烧器	134
四、氧气助燃燃烧器	135
五、电站锅炉（燃烧器）	136
六、燃油燃烧器	137
七、气体燃烧器	137
八、国内市场	139
九、日常保养	139
第六节 蜂窝型蓄热室传热过程的数值模拟及热工特性	140
一、概述	140
二、数值模拟	140
三、计算结果及分析	142
四、评价	144
第七节 高温空气燃烧技术的研究与应用	144
一、概述	144

二、HTAC 技术原理与技术特性 145

三、HTAC 技术成果 146

四、HTAC 技术成果与推广应用的社会效益 146

五、HTAC 对推动技术进步和科学发展的作用 147

六、HTAC 技术国内外比较及尚待解决的问题 147

第八节 燃气电厂锅炉及燃气供热锅炉与余热利用 149

一、燃气发电厂结构 149

二、燃气发电厂生产流程及系统 149

三、燃气发电厂辅机部分 150

四、余热锅炉 152

五、电厂余热利用解决方案 153

六、燃气发电厂节能减排与余热利用 154

七、燃煤锅炉低温余热利用技术应用 156

第九节 火电行业节能减排技术综合评价方法 159

一、概述 159

二、评估指标体系 161

三、实例研究 162

四、火电行业节能减排技术的评估 164

第十节 新型离心式空压机余热回收利用解决方案 164

一、离心机冷却系统现状 165

二、离心机改造解决方案 165

三、离心机余热回收行业应用 166

四、空气压缩机能耗分析 166

五、空压站节能案示例 170

六、能效管理的空压机余热回收优势 174

第十一节 余热余压技术与余热利用 176

一、概述 176

二、原理 176

三、余热余压技术利用 176

四、窑筒体余热回收利用示例 179

五、钢铁工业余热余压回收利用 181

第十二节 工业窑炉节能技术及余热利用 185

一、概述 185

二、工业窑炉的分类与简介 187

三、工业窑炉的节能技术途径	189
四、工业窑炉的余热利用与通用节能技术	191
五、工业窑炉节能技术应用实例	192

第五章 工业垃圾气化熔融焚烧炉燃烧技术 196

第一节 工业垃圾气化熔融焚烧节能技术	196
一、概述	196
二、分类	196
三、工艺特点	197
第二节 废弃物热解气化工工艺与节能技术	198
一、概述	198
二、热解气化技术主要特点与优点	199
三、热解气化装置简介	202
第三节 直接气化熔融焚烧炉及其焚烧工艺	204
一、概述	204
二、氧气顶吹式工业垃圾直接气化熔融焚烧炉与焚烧工艺	205
三、侧吹式工业垃圾直接气化熔融焚烧炉与焚烧工艺	207
四、密闭式无害化工业垃圾直接还原气化熔融焚烧炉与焚烧工艺	213
第四节 垃圾焚烧发电技术工程实例	214
一、国产化炉排的垃圾焚烧发电	214
二、FE 炉排炉（垃圾焚烧发电）二次回流技术	216
三、马丁逆推式炉排垃圾焚烧发电厂工程	216
四、化学工业区资源利用法垃圾焚烧炉工程实例	217
五、天津双港垃圾焚烧发电综合利用工程实例	221
第五节 气化熔融焚烧炉成套设备	222
一、概述	222
二、氧气顶底复合吹式工业垃圾直接气化熔融焚烧成套设备	223
三、回转窑式工业垃圾直接气化熔融焚烧成套设备	223
四、NKK 式工业垃圾直接气化熔融焚烧成套设备	224
五、等离子体式工业垃圾直接气化熔融焚烧成套设备	225
六、高炉型工业垃圾直接气化熔融焚烧成套设备	226
七、竖井炉式工业垃圾直接气化熔融焚烧成套设备	228
第六节 再循环利用与垃圾焚烧炉成套设备	228

一、工业除尘处理袋式除尘器成套设备	228
二、填埋气焚烧火炬成套设备	229
三、处理垃圾焚烧炉成套设备	230
四、不可回收类可燃物焚烧余热利用系统及处理设备	231
第七节 常见飞灰熔融处理成套设备	232
一、概述	232
二、燃料式熔融炉	233
三、电力式熔融炉	234
第八节 垃圾焚烧发电技术	236
一、垃圾处理方法概述	236
二、垃圾焚烧技术概述	238
三、循环流化床垃圾焚烧技术的特点	240
四、循环流化床垃圾焚烧技术的发展方向	242
第九节 回转窑焚烧机理和应用	242
一、回转窑焚烧机理	242
二、回转窑焚烧炉的特点	243
三、回转窑焚烧的三种焚烧方法	243
四、回转窑焚烧三种热工流程	244
五、三种组合匹配分析与比较	245
六、回转窑焚烧危险废弃物的应用	247
七、垃圾焚烧技术及带热解的回转窑技术	250
第十节 回转式焚烧窑废物处理应用示例	252
一、概述	252
二、基本原理	252
三、技术关键	253
四、主要技术指标及条件	255
五、烟气回收及利用	255

附录 余热术语	256
----------------------	------------

参考文献	258
-------------------	------------

第一章

绪 论

第一节 燃烧与节能技术概述

一、概述

通常空气中氧的含量为 20.93%、氮为 78.1%，还有少量的惰性气体等。在昆明地区，空气中氧的含量约为 20.8%。在燃烧过程中只有占空气总量约 1/5 的氧参与燃烧，而占空气总量约 4/5 的氮和其他惰性气体非但不助燃，反而将随烟气带走大量的热能。一般人们把含氧量大于 21% 的空气叫做富氧空气。富氧空气参与燃烧给燃烧提供了足够的氧气，使可燃物充分燃烧，减少了固体不完全燃烧的排放，减少了氮和其他惰性气体随烟气带走的热能。富氧燃烧节能装置将具有明显的节能和环保效应。

变压吸附富氧技术是近年发展得非常适合各种锅炉、窑炉做助燃用途的高新技术，它具有流程简单、体积小、自身能耗低、使用寿命长、投资较少等特点，被工业发达国家称之为“资源的创造性技术”。

二、富氧燃烧技术与节能关系

助燃空气中氧浓度越高，燃料燃烧越完全，但富氧浓度太高，会导致火焰温度太高而降低炉膛受热面的寿命，同时制氧投资等费用增高，综合效益反而下降，因此国内外研究均表明，助燃空气富氧浓度在 21% 的空气才叫做富氧空气。

① 据测试，氧含量增加 4%~5%，火焰温度可升高 200~300℃。火焰温度的升高，促进整个炉膛温度的上升，炉膛内受热物质更容易获得热量，热效率大幅

提高。

② 燃料在空气中燃烧与在纯氧中的燃烧速率相差甚大，如氢气在空气中的燃烧速率为 280cm/s ，在纯氧中为 1175cm/s ，是在空气中的 4.2 倍，天然气则高达 10.7 倍。富氧燃烧节能装置可以使燃烧强度提高、燃烧速率加快，从而获得较好的热传导，使燃料燃烧得更完全。

③ 燃料的燃点温度不是一个常数，它与燃烧状况、受热速率、富氧用量、环境温度等密切相关，如 CO 在空气中燃点为 609°C ，在纯氧中仅 388°C ，所以用富氧助燃能降低燃料燃点、提高火焰强度、减小火焰尺寸、增加释放热量等。

④ 用普通空气助燃，约 $4/5$ 的氮气不但不参与助燃，还要带走大量的热量。一般氧浓度每增加 1%，烟气量约下降 $2\%\sim 4.5\%$ ，可见氧浓度上升能提高燃烧效率。

⑤ 用普通空气助燃，当炉膛温度为 1300°C 时，其可利用的热量为 42%；而用 26% 的富氧空气助燃时，可利用热量为 56%，热量利用率可增加 14%。

⑥ 排烟温度每降低 $12\sim 15^\circ\text{C}$ ，可降低排烟热损失约 1%。用富氧代替空气助燃，富氧燃烧节能装置可减少一次风量，从而降低了空气的过剩系数，减少了排烟量，也降低了排烟热损失。

富氧燃烧技术是以氧含量高于 21% 的富氧气体作为助燃气体的一种高效强化燃烧技术。其特点是助燃空气量和燃烧废气量都有所减少，燃烧反应速度加快，局部火焰温度提高，这就有效地提高了熔窑的热效率，增大了熔化率。

第二节 燃烧理论

一、理论燃烧温度定义

燃料在定容或定压下燃烧时，其产生的热量常分为两个部分：一部分传给周围环境；另一部分使燃烧产物加热，温度升高。传给外界的热量越少，燃烧产物的温度越高。当传给外界的热量为零，即实现绝热的完全燃烧时，燃烧产物的温度达到最大值，这时燃烧产物所达到的温度称为绝热燃烧温度或理论燃烧温度。此处的完全燃烧包括两方面的含义：一方面是指燃料被氧化至最高价氧化物，即充分燃烧；另一方面是指燃料的燃烧率为 100%。比如冶金中，炭在燃烧带内的燃烧是一个绝热过程，也就是说炭燃烧氧化成 CO 所放出的热量全部用以加热所形成的煤气，所形成的燃烧。

二、燃烧理论解决的问题

为了了解认识燃烧过程的本质，掌握燃烧过程的主要规律，以便控制燃烧过程

的各个阶段,使其按照人们要求的速度进行,燃烧理论解决的问题如下。

① 判断各种燃料的着火可能性,分析影响着火的内因条件与外因条件以及着火过程基本原理,保证燃料进入炉内后尽快稳定地着火,保证燃烧过程顺利进行。

② 研究如何提高燃料的燃烧速率,使一定量的燃料在有限的空间和时间内尽快燃烧,分析影响燃烧速率的内因条件与外因条件,以及燃尽过程的基本原理,提出加速燃烧反应、提高燃烧效率的途径。

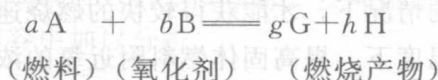
③ 燃烧理论来源于生产实践和科学试验,反过来又指示出燃烧技术进步与发展的方向。

三、质量作用定律

1. 概述

燃烧是一种发光发热的化学反应。燃烧速率可以用化学反应速率来表示。

在等温条件下,化学反应速率可用质量作用定律表示。即反应速率一般可用单位时间、单位体积内烧掉燃料量或消耗掉的氧量来表示。可用下面的式子表示炉内的燃烧反应:



化学反应速率可用正向反应速率表示,也可用逆向反应速率来表示。

2. 质量作用定律的意义

1867年,挪威化学家C. M. 古尔德贝格和P. 瓦格根据化学反应的速率与参加反应的活性质量(就是指分压强或浓度或摩尔分数)成正比的关系提出质量作用定律。理想气体混合物在恒温恒压下进行化学反应达到平衡状态时,参加反应的每一种气体的分压强 p_{0i} 或浓度 C_{0i} 与系统的压强和温度间应满足其关系。

1879年古尔德贝格和瓦格根据分子碰撞理论导出了质量作用定律,并指出分子碰撞仅仅有一部分导致反应。他们称平衡态为“可移动平衡态”。其后,化学家们利用一系列气态反应验证了质量作用定律。

(1) 适用范围 质量作用定律不仅适用于气体,也适用于稀溶液。如果除了气体和稀溶液以外,还有纯固体参加反应,则因为纯相的化学势只依赖于温度和压强,故在前二式的左端并不包含有关纯相的因子,仍然只需写出气体(或溶质)的分压强或浓度的乘积即可,就好像固体根本不存在一样。事实上,固体的存在只影响平衡常数对温度和压强的依赖关系。

(2) 作用意义 根据质量作用定律,可以确定化学反应中各反应物和生成物

的活性质量之间的联系。它在化学平衡学说中具有重要的意义。

质量作用定律说明了参加反应物质的浓度对化学反应速率的影响。

其意义是：对于均相反应，在一定温度下，化学反应速率与参加反应各反应物的浓度乘积成正比，而各反应物浓度的方次等于化学反应式中相应的反应系数。

由于燃烧是复杂的物理化学过程，燃烧速率的快慢，取决于：

- ① 可燃物与氧的化学反应速率；
- ② 氧和可燃物的接触混合速率。

前者称化学反应速率，也称化学条件；后者称物理混合速率，也称物理条件。

化学反应速率与反应空间的压力、温度、反应物质浓度有关，且成正比。例如，锅炉的实际燃烧中，影响化学反应速率的主要因素是炉内温度，炉温高，化学反应速率快。

燃烧速率除与化学反应速率有关外，还取决于气流向碳粒表面输送氧气的快慢，即物理混合速率。而物理混合速率取决于空气与燃料的相对速率、气流扰动情况、扩散速率等。

化学反应速率、物理混合速率是相互关联的，对燃烧速率均起制约作用。例如，高温条件下应有较高的化学反应速率，但若物理混合速率低，氧气浓度下降，可燃物得不到充足的氧气供应，结果燃烧速率也必然下降。因此，只有在化学条件和物理条件都比较适应的情况下，才能获得较快的燃烧速率。

上述说明，在一定温度下，提高固体燃料附近氧的浓度，就能提高化学反应速率。反应速率越高，燃料所需的燃尽时间就越短。上述关系只反映了化学反应速率与参加反应物浓度的关系。事实上，反应速率不仅与反应物浓度有关，更重要的是与参加反应的物质本身有关，具体地说，与煤或其他燃料的性质有关。化学反应速率与燃料性质及温度的关系可用阿累尼乌斯定律表示。

四、阿累尼乌斯定律

在实际燃烧过程中，由于燃料与氧化物（空气）是按一定比例连续供给的，当混合十分均匀时，可以认为燃烧反应是在反应物质浓度不变的条件下进行的。这时，化学反应速率与燃料性质及温度的关系为：

$$k = k_0 e^{(-E/RT)}$$

式中 k_0 ——相当于单位浓度中，反应物质分子间的碰撞频率及有效碰撞次数的系数；

E ——反应活化能；

R ——通用气体常数；

T ——反应温度；

k ——反应速度常数（浓度不变）。

阿累尼乌斯定律说明了燃料本身的“活性”与反应温度对化学反应速率的影响