

MEITAN ZHUANHUA YU MEI HUAGONG

现代煤炭转化与煤化工 新技术新工艺实用全书

主 编 廖汉湘



安徽文化音像出版社

封面设计 岳国雲

ISBN 7-88413-393-8



9 787884 133932 >

ISBN 7-88413-393-8
精装四卷 定价：980.00元

现代煤炭转化与煤化工 新技术新工艺实用全书

主 编 廖汉湘

(第二卷)

安徽文化音像出版社

目 录

第一篇 现代煤炭转化与煤化工总论

第一章 煤的组成和性质	(3)
第一节 成煤作用	(3)
第二节 煤岩学基础	(8)
第三节 煤的化学组成	(25)
第四节 煤的主要物理性质	(37)
第五节 煤的化学性质	(49)
第六节 煤的工艺性质	(51)
第七节 煤的分析、鉴定方法和标准	(66)
第八节 动力煤的合理配合	(70)
第二章 我国煤炭资源及煤质特征	(74)
第一节 中国分大区、分省(市、区)分煤种的储量	(74)
第二节 中国不同时代煤的煤质特征	(79)
第三节 不同类别煤的煤质特征	(92)
第四节 中国煤的主要质量特征	(103)
第五节 我国煤炭资源的特点及分级	(108)
第六节 煤的岩相组成与特性及其分类	(113)
第七节 中国煤炭质量分级标准	(129)
第八节 各种工业用煤质量指标	(135)
第三章 现代煤炭转化与煤化工发展概况	(143)

- 第一节 现代煤炭转化与煤化工技术概述····· (143)
- 第二节 现代煤化工发展模式简介····· (161)

第二篇 煤的洗选、加工技术与工艺

- 第一章 煤的洗选技术与工艺····· (171)
- 第一节 选煤的概念、分类及现状····· (171)
- 第二节 跳汰选煤····· (174)
- 第三节 浮游选煤····· (181)
- 第四节 湿法选煤工艺流程····· (188)
- 第五节 重介质旋流器选煤工艺流程····· (193)
- 第六节 重介质旋流器选煤自动化····· (214)
- 第七节 流态化分离技术····· (241)
- 第八节 选后产品的脱水和煤泥水处理····· (280)
- 第九节 煤的燃前脱硫····· (283)
- 第二章 型煤制造技术与工艺····· (289)
- 第一节 型煤技术发展现状····· (289)
- 第二节 型煤分类及其质量····· (292)
- 第三节 粉煤成型机理····· (298)
- 第四节 型煤黏结剂和添加剂····· (300)
- 第五节 型煤生产工艺及主要设备····· (303)
- 第六节 工业型煤····· (310)
- 第七节 民用型煤····· (319)
- 第三章 水煤浆制备技术与工艺····· (323)
- 第一节 水煤浆技术概论····· (323)
- 第二节 水煤浆处理剂····· (358)
- 第三节 高浓度水煤浆制备技术与工艺····· (389)
- 第四节 煤泥水煤浆技术····· (425)
- 第五节 主要设备····· (443)

第三篇 煤的燃烧原理、技术与设备

第一章 煤的燃烧原理·····	(467)
第一节 煤燃烧的化学平衡·····	(467)
第二节 燃烧动力学·····	(470)
第三节 煤炭燃烧过程的计算·····	(509)
第二章 流化床燃烧技术·····	(520)
第一节 流化床燃烧的特点·····	(520)
第二节 流化床燃烧机理·····	(521)
第三节 流化床中煤粒的燃烧过程·····	(528)
第四节 循环流化床锅炉的燃烧区域·····	(531)
第五节 影响流化床燃烧的主要因素·····	(533)
第六节 炉膛内燃烧份额和一、二次风的分配·····	(537)
第七节 流化床燃烧污染物排放控制·····	(539)
第三章 煤的燃烧设备·····	(559)
第一节 燃烧设备·····	(559)
第二节 结渣、积灰、外部腐蚀与磨损·····	(603)

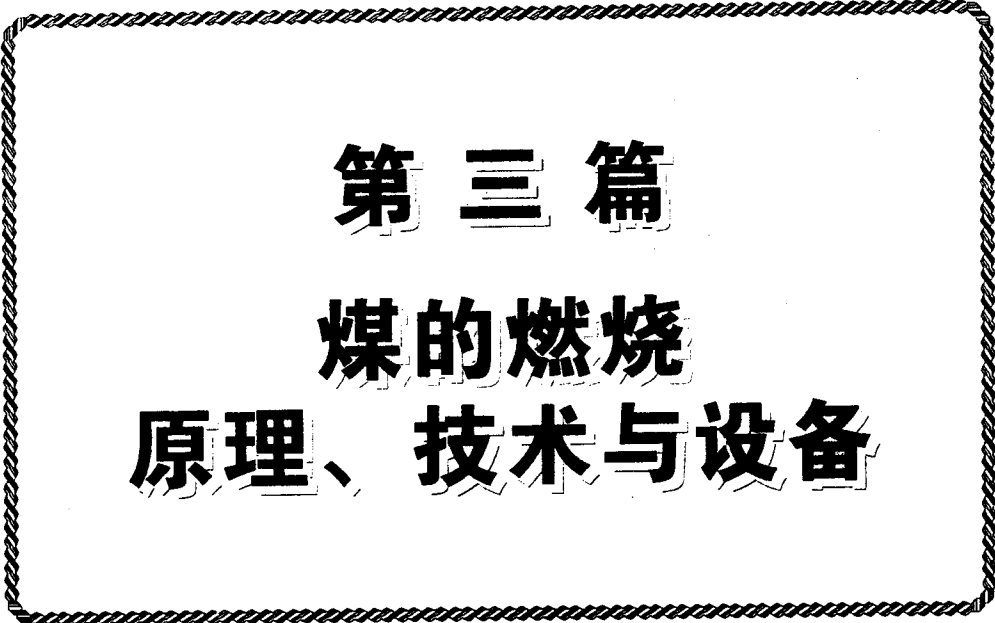
第四篇 煤炭焦化技术与工艺

第一章 煤炭热解技术与工艺·····	(611)
第一节 概 述·····	(611)
第二节 煤的热解动力学·····	(613)
第三节 热解方法·····	(616)
第四节 热解产物及其利用·····	(626)
第二章 煤炭焦化技术与工艺·····	(638)
第一节 炼焦理论·····	(638)
第二节 炼焦用煤的工艺性质评价方法·····	(640)

第三节	配煤炼焦技术·····	(643)
第四节	炼焦新技术·····	(648)
第五节	型焦技术·····	(658)
第六节	焦 炉·····	(669)
第七节	焦炭的种类及性质·····	(674)
第八节	炼焦技术的发展与展望·····	(680)
第九节	各种炼焦技术经济评价·····	(688)
第三章	煤焦油及其深加工技术与工艺 ·····	(691)
第一节	煤焦油的生成和性质·····	(691)
第二节	煤焦油主要加工产品的性质及用途·····	(692)
第三节	煤焦油加工前的准备·····	(710)
第四节	煤焦油蒸馏·····	(713)
第五节	粗酚的提取和精制·····	(723)
第六节	粗吡啶的精制·····	(732)
第七节	古马隆-茛树脂的制取·····	(734)
第八节	工业萘和精萘的制取·····	(739)
第九节	洗油的加工精制·····	(744)
第十节	粗萘的制取及加工·····	(746)
第十一节	沥青加工·····	(748)
第四章	焦炉煤气及其利用技术与工艺 ·····	(753)
第一节	概 述·····	(753)
第二节	焦炉煤气(荒)凝冷却、加压及电捕焦油·····	(755)
第三节	焦炉煤气脱硫·····	(757)
第四节	焦炉煤气中氨的回收·····	(761)
第五节	焦炉煤气终冷和洗萘·····	(766)
第六节	粗苯回收·····	(769)
第七节	酚回收·····	(775)
第八节	焦炉煤气利用·····	(786)

第五篇 煤炭气化技术与工艺

第一章 煤炭气化概述	(791)
第一节 煤炭气化的意义与工艺性质	(791)
第二节 煤的气化技术和性质	(799)
第三节 煤炭气化的反应原理	(816)
第四节 煤炭气化技术分类	(839)
第二章 常压固定床气化技术与工艺	(845)
第一节 概 述	(845)
第二节 固定床气化对煤质量的要求	(847)
第三节 发生炉煤气	(849)
第四节 两段炉制气	(867)
第五节 间歇法气化工艺	(871)
第六节 型煤制气	(887)
第七节 气化过程节能综述	(895)
第八节 富氧连续气化	(900)
第三章 碎煤固定层加压气化技术与工艺	(916)
第一节 概 述	(916)
第二节 加压气化原理与气化过程计算	(918)
第三节 加压气化操作条件及主要气化指标	(933)
第四节 鲁奇加压气化炉炉型构造及工艺流程	(941)
第五节 碎煤加压气化炉的操作控制	(960)



第三篇

煤的燃烧

原理、技术与设备

第一章 煤的燃烧原理

煤的成分包含了许多种元素，其中碳的含量最大，其次是氢、氧、氮和硫等元素，再其次则是组成灰分的一些微量元素。煤的燃烧过程，其实质就是煤中这些元素发生剧烈的氧化反应的过程，其中最主要的则是碳的燃烧，并且伴有挥发分的燃烧。其产物主要是二氧化碳和水，其次是硫和氮的氧化物及其他污染物。研究煤的燃烧原理，就是研究这些元素氧化反应的热力学和动力学。

第一节 煤燃烧的化学平衡

碳元素是煤中主要成分，煤燃烧的最主要目的就是使碳完全燃烧生成 CO_2 ，最大限度地释放热量。但由于燃烧条件的差异，有时最终还会产生微量的 CO ，形成不完全燃烧，影响燃烧效率。其他元素如 N 、 S 等，虽然数量很少，但它们燃烧后的产物是 NO 、 NO_2 、 SO_2 、 SO_3 。这些产物对环境会产生严重污染。因此，从化学热力学的观点分析，研究 CO/CO_2 、 NO/NO_2 、 SO_2/SO_3 的平衡是相当重要的。

一、 CO/CO_2 的平衡

煤燃烧时，煤中的碳（固体）和一次产物一氧化碳可能发生如下七种化学反应。

与 O_2 的反应，反应方程式和标准摩尔焓变如表 1-1 所示。

与 CO_2 的反应，反应方程式和标准摩尔焓变如表 1-2 所示。

表 1-1 碳、一氧化碳与 O_2 的反应的标准摩尔焓变

编号	反应方程式	标准摩尔焓变 $\Delta H_{0m} (298\text{K}) / (\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$
1	$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$	-393.30
2	$\text{C} + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{CO}$	-111.29
3	$\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{CO}_2$	-282.00

第三篇 煤的燃烧原理、技术与设备

表 1-2 碳与 CO₂ 的反应的标准摩尔焓变

反应编号	反应方程	标准摩尔焓变 ΔH_{0m} (298K) / (kJ·mol ⁻¹)
4	$C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$	+ 170.71

与 H₂O (气体) 的反应, 反应方程式和标准摩尔焓变如表 1-3 所示。

表 1-3 碳、一氧化碳与 H₂O 的反应的标准摩尔焓变

反应编号	反应方程式	标准摩尔焓变 ΔH_{0m} (298K) / (kJ·mol ⁻¹)
5	$C + H_2O \rightleftharpoons CO_2$	+ 130.12
6	$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$	- 40.58

与 H₂ 的反应, 反应方程式和标准摩尔焓变如表 1-4 所示。

表 1-4 碳与 H₂ 的反应的标准摩尔焓变

反应编号	反应方程式	标准摩尔焓变 ΔH_{0m} (298K) / (kJ·mol ⁻¹)
7	$C + 2H_2 \rightleftharpoons CH_4$	- 74.89

以上七种化学反应的压力平衡常数 K_p 如表 1-5 所示。

表 1-5 碳、一氧化碳反应的压力平衡常数 lgK_p

温度/K	反应 1	反应 2	反应 3	反应 4	反应 5	反应 6	反应 7
300	+ 68.67	+ 23.93	+ 44.74	- 20.81	- 15.86	+ 4.95	+ 8.82
400	+ 51.54	+ 19.13	+ 32.41	- 13.28	10.11	+ 3.17	+ 5.49
500	+ 41.26	+ 16.26	+ 25.00	- 8.74	- 6.63	+ 2.11	+ 3.43
600	+ 24.40	+ 14.34	+ 20.06	- 5.72	- 4.29	+ 1.43	+ 2.00
700	+ 29.50	+ 12.96	+ 16.54	- 3.58	2.62	+ 0.96	+ 0.95
800	+ 25.83	+ 11.93	+ 13.89	- 1.97	- 1.36	+ 0.61	- 0.15
900	+ 22.97	+ 11.13	+ 11.84	- 0.71	- 0.37	+ 0.34	- 0.49
1000	+ 20.68	+ 10.48	+ 10.20	+ 0.28	+ 0.42	+ 0.14	- 1.01
1100	+ 18.80	+ 9.94	+ 8.86	+ 1.08	+ 1.06	- 0.02	- 1.43
1200	+ 17.24	+ 9.50	+ 7.74	+ 1.76	+ 1.60	- 0.16	1.79
1300	+ 15.92	+ 9.12	+ 6.80	+ 2.32	+ 2.06	- 0.26	- 2.10
1400	+ 14.78	+ 8.79	+ 5.99	+ 2.80	+ 2.44	- 0.36	2.36
4000	+ 5.14	+ 5.84	- 0.70	—	—	—	—

当燃料与空气完全均匀混合，反应达到平衡时，已经从理论上证明，煤燃烧时 CO/CO₂ 的数值符合关系式：

$$\text{CO}/\text{CO}_2 = 10^{3.4} e^{-12400/RT}$$

但是，在煤的实际燃烧过程中，燃料与空气不可能达到完全均匀混合，燃烧室的温度场既不均匀也不稳定，加之燃烧产物在燃烧室的停留时间一般都比较短，很难达到平衡状态，该式的实际使用价值受到很大限制。直到目前为止，煤的实际燃烧过程中产生的 CO 组分还是以实测为准。要用理论计算来解决 CO 组分还有许多工作要做，诸如：燃烧室温度场的求解，燃烧动力学的影响，湍流扩散和分子扩散的影响等等，而且这些影响是相互耦合的，目前还有很大难度。

二、SO₂/SO₃ 的平衡

煤燃烧所产生的硫的氧化物 SO₂ 和 SO₃ 和煤中硫的含量、灰的成分、燃烧温度、燃烧的过量空气系数及燃烧产物在燃烧室的停留时间等都有关系。灰分中的碱性氧化物 K₂O, Na₂O, CaO, MgO 等能捕捉煤中的部分硫，对 SO₂ 和 SO₃ 的形成有相当大的影响。过量空气系数越大，温度越高，停留时间越长，火焰中原子氧的浓度越大，SO₃ 的生成量就越多。在一般情况下，SO₂/SO₃ 的值受过量空气系数和温度的影响更为敏感，在不同温度、不同过量空气系数下，SO₃ 的转化率可参见表 1-6。

表 1-6 烟道气中 SO₂ 转化成 SO₃ 的率数值

温度/℃	过量空气系数			
	1.1	1.05	1.01	1.001
	转化率 $[P_{\text{SO}_3} / (P_{\text{SO}_2} + P_{\text{SO}_3})] / \%$			
427	97.1	96.1	91.7	77.9
527	81.2	75.8	58.7	31.1
627	47.0	39.1	22.6	8.5
727	20.0	15.3	7.6	2.55
827	8.2	6.1	2.87	0.93
927	3.7	2.7	1.25	0.40
1027	1.34	1.33	0.61	0.20
1127	1.01	0.73	0.33	0.11
1227	0.60	0.43	0.20	0.06

三、NO/NO₂ 的平衡

煤燃烧时 NO_x 的逸出比 SO_x 的逸出更为复杂，煤中所有的硫均可认为氧化成 SO₂ 或 SO₃，而形成 NO_x 的氮大约有 80% 来自燃料，另外 20% 左右来自空气。可分成温度型 NO_x、快速温度型 NO 和燃料型 NO，在实际燃烧中，NO 和 N 的平衡很难达到，NO 的生成反应要到相当晚才进行，所以更多受到反应动力学的控制。在氧气浓度大，燃料又比较稀的预混合火焰中，符合关系式：

$$d[\text{NO}]/dt = 3 \times 10^{26} [\text{N}_2] [\text{O}_2] e^{-54200/RT}$$

式中 [NO]，[N₂]，[O₂] —— NO，N₂，O₂ 的浓度，(mol/m³)。

可见 NO_x 的形成率与热力学平衡关系不大，主要受燃烧温度、燃烧的过量空气系数及燃烧产物在燃烧室的停留时间等因素的影响。尤其是停留时间，由于煤粒不可能在瞬间达到化学热力学平衡，因此，美国的 Fields 等人引入了热平衡的概念，结合化学动力学因素，能更有效预测 NO_x 形成率的规律。NO_x 的形成率与燃烧温度、燃烧的过量空气系数及燃烧产物在燃烧室的停留时间等因素的关系将在本篇第四章中加以介绍。

第二节 燃烧动力学

一、化学反应的反应速率方程

1. 化学反应的反应速率

(1) 反应速率的表达方法 化学反应的反应速率 v_B (能源及动力类学科常称为化学反应的反应速度 ω) 一般定义为：单位时间单位体积内反应组分的变化量。又可定义为：单位体积内反应进度随时间的变化率。在气固两相反应中则定义为单位时间，单位面积上反应组分的变化量。

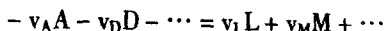
在气体同相反应中反应速率 v_B 的定义式可写作：

$$v_B = \left| \frac{1}{V} \left(\frac{dn_B}{dt} \right) \right| \quad (1-1)$$

由于 $dn_B/V = [B]$ ，[B] 表示任一组分 B 的浓度，因此上式又可写作：

$$v_B = \frac{d[B]}{dt} \quad (\text{B 为产物}), \text{ 或 } v_B = - \frac{d[B]}{dt} \quad (\text{B 为反应物}) \quad (1-2)$$

对于任意反应 $0 = \sum_B \nu_B B$ 可以写成如下化学计量式：



$$\text{所以 } v = v_A / (-v_A) = v_D / (-v_A) = v_L / v_L = v_M / v_M = \dots = \frac{d[B]}{v_B dt} \quad (1-3)$$

可见反应速率可以用任一组分的变化率表示，它们在数值上可能是各不相同的，但必然符合式(1-3)。所以表示反应速率时必须表明是以哪种组分为基准的。式(1-3)中的 v 称为系统的反应速率，它是一个惟一值。

在气固两相反应中反应速率 K_s^B 的定义式可写作：

$$K_s^B = \frac{1}{S} \left(\frac{dn_B}{dt} \right) \quad (1-4)$$

煤燃烧时，B物质既可以选碳，也可以是助燃的氧。

以上计算反应速率时所用到的量浓度现在统一规定为摩尔浓度 (mol/L)，并且都是正值，以前浓度采用的有分子浓度、质量浓度、摩尔浓度或相对浓度。不同浓度表示法其数值是不同的，但它们有一定的换算关系。

例如原来以分子浓度表示的反应速率为 $v_{B,N} = dNB/dt$ ，那么很明显，这里的 NB 是 B 物质的分子浓度，单位为 (1/L³)。摩尔浓度表示的反应速率为 $v_{B,c} = dcB/dt$ ，这里的 c_B 是 B 物质的摩尔浓度，单位为 (mol/m³)。质量浓度表示的反应速率为 $v_{B,m} = dmB/dt$ ，这里的 m_B 是 B 物质的质量浓度，单位为 (kg/L³)。它们之间的相互转换关系为：

$$v_B = v_{B,c} \quad v_{B,N} = N_0 v_{B,c}$$

式中 N_0 ——阿伏加德罗常数。

$$v_{B,m} = M_B v_{B,N}$$

式中 M_B ——摩尔质量数。

(2) 质量作用定律 基元反应的速率方程比较简单，通常都符合经验规律——质量作用定律，即反应速率与各反应物浓度幂的乘积成正比，各浓度的方次为化学反应方程式中相应组分的化学计量数的绝对值。对于基元反应：



速率方程可表示为：

$$v = k [A]^\alpha [B]^\beta \dots$$

式中， k 为速率常数 (对复合反应 k 称为速率系数)，是一个有量纲的量，并且其量纲随 $(\alpha + \beta + \dots)$ 数值的变化而变化。 $\alpha, \beta \dots$ 为反应系数，也就是基元反应的计量数，一定是正整数。但对于复合反应，也可以以同样的形式表示，但 $\alpha, \beta \dots$ 可以是整数、分数、零或负数。

令：
$$n = \alpha + \beta + \dots$$

式中， n 称为反应的级数，而 $\alpha, \beta \dots$ 则称为反应的分级数。对于复合反应， n 可以是整数、分数、零、负数，它是由实验数据归纳成速率方程而得到的经验常数。但对于基元反应， n 必定是整数。

(3) 阿累尼乌斯定律 阿累尼乌斯对不同温度下的等温反应过程进行了大量实验研究，发现反应速率常数与温度有如下定量关系：

$$k = k_0 \exp(-E/RT) \quad (1-5)$$

式中， $-E/RT$ 的分子分母都是能量单位，所以指数项本身无量纲。 E 是该化学反应的活化能。因为化学反应必须打破旧的化学键，建立新化学键，而打破旧的化学键必须克服原子或原子团之间的引力，建立新化学键又必须克服原子或原子团之间的斥力。这些力越大，所需要的能量就越多，而只具有反应物平均能量的普通分子不足以克服这些力的作用，只有那些具有较高能量水平的活化分子才能克服这些力的作用。这两个能量差就称为该化学反应的活化能 E 。可见，反应物分子必须先吸收能量 E ，才能达到活化状态，使旧化学键断裂并且建立新键，变成产物分子，完成化学反应。对大多数复合反应，也符合阿累尼乌斯定律，复合反应总反应的活化能称为表观活化能。一般表观活化能是复合反应中某一基元反应的活化能，也有一些复合反应的表观活化能是各基元反应活化能的代数和。如总反应 $2\text{NO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}_2$ ，是由基元反应① $2\text{NO} \rightleftharpoons \text{N}_2\text{O}_2$ 和基元反应② $\text{O}_2 + \text{N}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_2$ 组成，并且总反应和两个基元反应都符合阿累尼乌斯定律，若以 k_1, k_2 表示两个基元反应正反应的速率常数， k_{-1} 表示基元反应①逆反应的速率常数， k 表示总的速率系数，那么 $k = k_1 k_2 / k_{-1}$ 。以 $E_a, E_{a,1}, E_{a,2}, e_{a,-1}$ 表示总反应和各基元反应的活化能，那么 $E_a = E_{a,1} + E_{a,2} - E_{a,-1}$ 。式中 k_0 是频率因子，表示温度无限高时的速率常（系）数，它是空间因子、双分子碰撞概率及系统内分子总数的乘积。

2. 影响化学反应进行速率的因素

(1) 活化能对反应速率的影响 由阿累尼乌斯定律可知，活化能是衡量物质反应能力的主要参数，它对反应系数的影响呈指数规律，所以活化能稍有变化，反应的速率系数会有巨大的改变。活化能越小，反应的阻力就越小，反应物分子越容易达到活化状态，反应速率就越快。一般煤的活化能在几十到几百千焦每摩尔的数量级，它并不是单纯的物质性质，还和燃烧的方式有关。若煤的活化能变化 10% 左右，根据反应温度的不同，反应的速率系数可变化几倍、几十倍、甚至几万倍。而原子、原子团和离子之间的反应，不需要克服旧化学键的引力，活化能很小，反应可以在瞬间完成。在煤燃烧时加入少量氢气或水蒸气有利于增加氢离子、氧离子、氢氧根离子的浓度，减小活化能，提高煤的燃烧速率。煤燃烧反应中，活化能数值的测定可由热天平进行。目前世界上有两种处理方法：其一是把煤燃烧当作一个完整的反应，则只有一个活化能。另一种方法是把煤燃烧分为热分解和碳燃烧两个反应，有两个不同的活化能。由于活化能测定时，到目前为止还无法把扩散、内部反应、挥发分析出和碳燃烧的影响完全分离开，实测数据实际上是很分散的。活化能数值大致如表 1-7 所示。

(2) 温度对反应速率的影响 和活化能对反应速率的影响相似，温度对反应速率的影响是指对速率系数的影响。同时，两者都处在指数的位置上，所以影响都是十分强烈的。所不同的是：活化能处于分子上，而温度则在分母上，所以影响方向正好相反。即活化能增大时，反应速率系数减小，而温度增高时，反应速率系数增大。对阿累尼乌斯定律取对数可得：

表 1-7 煤燃烧反应的活化能/ (kJ/mol)

反应	无烟煤、贫煤	烟煤	褐煤
煤燃烧	91.1 ~ 146.5	76.3 ~ 134.5	75.2 ~ 105.3
热分解	91.0 ~ 118.3	53.5 ~ 78.6	35.3 ~ 56.2
碳燃烧	122.8 ~ 159.6	98.8 ~ 148.5	81.6 ~ 109.5

$$d \ln k / dT = E / RT^2 \quad (1-6)$$

积分则可得:

$$\ln (k_2 - k_1) = - \frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (1-7)$$

式 (1-6) 表明 $\ln k$ 随 T 的变化率与活化能 E 成正比。即活化能越大, 随温度升高, 反应速率系数增大得越快, 也就是说, 活化能越大则反应速率系数对温度越敏感。若同时存在几个反应, 高温对活化能大的反应有利, 而低温则对活化能小的反应有利。对于同一个反应, 由于 $\ln k$ 随 T 的变化率与温度 T 的平方成反比, 所以在低温段对温度更敏感些。另外, 吸热反应的活化能一般大于放热反应的活化能。 CO_2 的还原反应是吸热反应, 它的活化能大于碳燃烧的活化能 (约 2.2 倍), 所以 CO_2 的还原反应要到燃烧后期温度较高时、氧气浓度降低而二氧化碳浓度升高时才有明显的反应速率。而当已知活化能、某一温度 T_1 下的反应速率系数时, 可由式 (1-7) 求出任一温度 T_2 的反应速率系数。由阿累尼乌斯定律可得图 1-1 所示的曲线。

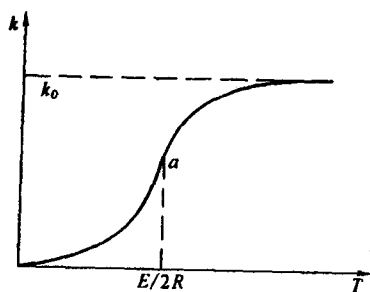


图 1-1 阿累尼乌斯定律的指数曲线

由图可见: 该曲线有一拐点, 对阿累尼乌斯定律求导二次, 令二阶导数为零, 得到拐点的温度为 $E/2R$, 通常拐点温度为 $2500 \sim 25000\text{K}$ 。

(3) 浓度对反应速率的影响 在等温条件下, 反应速率系数为一定值, 由质量作用定律可以明显看出, 反应速率正比于任一反应物浓度的计量数次方, 当几种反应物浓度相当时, 反应速率对计量数大的反应物浓度更敏感, 而当几种反应物浓度相差较大时, 则对浓度小的组分更敏感些。除各反应物浓度本身对反应速率有影响外, 几种反应物的