

煤的燃烧理论与技术

原著 [波] J. Zelkowski

翻译 袁钧卢 张佩芳

校译 高晋生

华东化工学院出版社

责任编辑 沈瑞祥
责任校对 潘乃琦

煤的燃烧理论与技术

Mei de Ranshao Lilun yu Jishu

原著 [波] J. Zelkowski

翻译 袁钧卢 张佩芳

校译 高晋生

华东化工学院出版社出版

(上海市梅陇路 130 号)

新华书店上海发行所发行

商务印书馆上海印刷厂印刷

开本 850×1168 印张 10.375 字数 279 千字

1990 年 11 月第 1 版 1990 年 11 月第 1 次印刷

印数 1-2000 册

ISBN 7-5628-0110-X/TQ·11

定价: 2.50 元

内 容 提 要

煤是中国的主要能源，提高煤的热能利用率是一项重大课题。

本书作者根据自己和他人的研究成果，论述了提高煤的热能利用率的燃烧理论和技术。全书分三部分，第一部分为煤的基本性质；第二部分为煤的燃烧理论基础；第三部分为燃烧技术，围绕燃烧着火点和火焰稳定性等介绍了工业锅炉，特别是粉煤燃烧器的开发和设计，并介绍了一些先进的工业装置。同时还论述了烟气中二氧化硫和氮氧化物的来源和降低其含量的措施。文内附有许多有用的图表。

本书可作为大专院校煤化工、动力、锅炉、工程热物理、热能工程等相关专业的教学参考书，也可供从事动力、锅炉等设计研究工作的工程技术人员参考。

译者的话

众所周知,煤是我国的主要能源,年产量已近十亿吨,占能源消费总量的75%,占我国工业燃料的72%,民用燃料的92%。目前在煤利用方面的主要问题是热效率低和环境污染严重。毫无疑问,本书的翻译出版将有助于我国煤炭燃烧技术的开发和进步。

本书作者Zelkowski,是波兰籍联邦德国教授,大学毕业后长期在华沙能源研究所从事煤燃烧研究工作,在联邦德国克劳斯塔尔工业大学进修期间获得工学博士学位,又在该国电业部门工作数年,积累了不少有关燃煤工业锅炉方面的实践经验,1987年应聘担任克劳斯塔尔工业大学化工和燃料研究所教授。

本书共分三部分:第一部分介绍煤的基本性质,有助于读者更全面地认识燃烧用煤;第二部分为煤燃烧的理论基础,这是燃烧技术开发和燃烧器工程设计的前提,介绍了迄今为止的研究工作,并提出了自己的见解;第三部分为燃烧技术,围绕燃烧着火点和火焰稳定性等问题介绍了工业锅炉,特别是粉煤燃烧器的开发和设计,并讨论了烟气中二氧化硫和氮氧化物的来源和降低其含量的措施等。书中有大量图表,信息量很大,可供国内专业工程技术人员借鉴。

由于译者水平有限,译文虽几经校对,发现并纠正了一些原文中的印刷错误,但疏漏仍在所难免,恳请读者和专家们指正。书中的符号及下标均为德文,译者很难把它们统统改为通用形式,读者可查符号一览表。请广大读者原谅。

译者
1989年8月

目 录

0 绪论	(1)
1 燃料用煤	(2)
1.1 煤是世界上最重要的燃料	(2)
1.2 煤的形成和岩相组成	(3)
1.3 煤化度和成煤系数	(7)
1.4 煤的分类	(10)
1.5 煤的结构、化学组成和基准换算系数	(11)
1.5.1 可燃物质	(14)
1.5.2 不可燃物质	(16)
1.5.3 挥发分和固定碳	(17)
1.5.4 平均煤样	(22)
1.6 煤的物理性质	(23)
1.6.1 密度	(23)
1.6.2 视密度	(25)
1.6.3 堆积密度、堆积角度和堆积能力	(26)
1.6.4 煤的可磨性	(27)
1.6.5 煤机械粉碎后的粒度分布	(29)
1.6.6 比热容和热导率	(34)
1.6.7 快速脱气的反应热	(35)
1.7 煤的发热量	(37)
1.7.1 恒容高位发热量(燃烧热)和恒容低位发热量(热值)	(37)
1.7.2 挥发分和固定碳的发热量	(38)
1.7.3 标准煤的发热量	(41)
1.7.4 贮存方式对煤的发热量的影响	(41)
1.8 煤的反应动力学性质	(42)
1.9 燃烧空气消耗量和烟气生成量	(46)
2 煤燃烧的理论基础	(47)

2.1 脱气、着火和燃烧中的物理过程	(47)
2.1.1 脱气	(48)
2.1.2 挥发分的着火和燃烧	(49)
2.1.3 固定碳的燃烧	(50)
2.1.4 粉煤-空气混合物的着火	(51)
2.2 脱气和燃烧动力学的研究方法	(51)
2.2.1 脱气强度	(52)
2.2.2 着火和燃烧	(58)
2.3 固体碳燃烧的两个基本问题	(68)
2.3.1 扩散区或动力区	(68)
2.3.2 先生成一氧化碳还是直接生成二氧化碳	(70)
2.3.3 Traustel 定义的煤的比反应活性	(73)
2.4 煤燃烧的理论	(73)
2.4.1 脱气和燃烧的速度	(73)
2.4.2 影响煤燃烧速度的主要因素	(76)
2.4.3 Arrhenius 函数	(77)
2.4.4 非等温脱气	(78)
2.4.5 脱气动力学常数的计算	(80)
2.4.6 着火参数:着火时间、温度和着火时的脱气程度	(84)
2.4.7 挥发分和固定碳燃烧的等温反应	(89)
2.4.8 粉煤-气体混合物的着火与燃烧	(90)
2.4.9 煤燃烧的数学模型	(93)
2.4.10 热稳定燃烧和热不稳定燃烧	(95)
2.4.11 Nusselt 燃烧扩散理论	(96)
2.4.12 化学反应和分子扩散对燃烧的影响	(101)
2.4.13 粒度和反应活性对燃烧特性和燃烧温度的影响	(105)
2.4.14 不同粒度的固体碳生成一氧化碳和二氧化碳条件下燃尽 程度的计算	(108)
2.4.15 小颗粒煤结焦热的测定	(109)
2.4.16 单颗粒的着火和燃烧模型	(111)
2.4.17 单颗粒煤着火和燃烧的简化计算举例	(112)
2.5 粉煤火焰的数学模型	(120)
2.5.1 火焰数学模型的建立	(123)
2.5.2 粉煤火焰模型举例	(125)

3 煤的燃烧技术	(131)
3.1 固定床炉	(134)
3.1.1 固定床炉炉型	(134)
3.1.2 链条炉中的燃烧过程	(136)
3.1.3 链条炉的燃烧工艺特征	(138)
3.2 沸腾床燃烧	(146)
3.2.1 工艺原理	(147)
3.2.2 工业应用实例	(154)
3.2.3 沸腾炉工况	(158)
3.2.4 灰渣与除尘	(161)
3.3 煤粉炉	(161)
3.3.1 粉煤燃烧工艺	(163)
3.3.2 煤粉炉炉型	(169)
3.3.3 煤粉炉主要部件及其在煤燃烧时的作用	(181)
3.3.4 磨煤机	(183)
3.3.5 粉煤输送系统	(190)
3.3.6 粉煤燃烧器	(197)
3.3.7 直流式燃烧器的重要特征	(201)
3.3.8 直流式燃烧器组的高度、烧嘴区域负荷及火焰温度	(203)
3.3.9 旋流式燃烧器的重要特征	(208)
3.3.10 炉膛	(217)
3.3.11 炉膛尺寸	(219)
3.3.12 切圆炉中的流动状况	(223)
3.4 结渣与污染	(228)
3.4.1 燃料无机成分在炉膛中的转化	(233)
3.4.2 结渣机理	(235)
3.4.3 煤灰化学组成对结渣的影响	(237)
3.4.4 某些物理参数对结渣的影响	(241)
3.4.5 燃烧条件对燃烧残渣的影响	(249)
3.4.6 煤结渣性指数与测定方法(间接法)	(251)
3.4.7 测定结渣性的直接方法	(262)
3.5 燃烧过程中有害物质的生成及其减少的可能性	(267)
3.5.1 硫氧化物的生成	(269)
3.5.2 减少硫排放的一级措施	(271)

3.5.3	氮氧化物的生成	(273)
3.5.4	燃料氮转化为 NO 的转化率	(276)
3.5.5	与 NO 生成有关的煤的燃烧特点	(279)
3.5.6	燃烧温度和空气过剩系数对煤中氮转化为 NO 的转化率的影响	(283)
3.5.7	NO 在碳上的分解	(288)
3.5.8	分段燃烧对燃料氮转化为 NO 转化率的影响	(289)
3.5.9	燃煤时 NO _x 的排放	(290)
3.5.10	燃烧工艺上减少 NO 生成的可能性	(292)
3.6	煤燃烧的进一步发展	(293)
符号表		(295)
参考文献		(300)
附录 1	煤质分析方法概述	(311)
附录 2	煤燃烧实用计算方法(附实例)	(314)
附录 3	煤燃烧计算所需的一些数据	(319)

0 绪 论

煤的燃烧是由一系列的物理和化学过程组成的，其影响因素首先是煤本身的性质，其次是燃烧的工艺参数。

影响燃烧的煤性质有：发热量、挥发分、灰分、水分和化学组成，此外还有岩相组成、结渣性、灰沾污性和反应活性等。

从工程技术角度看，燃烧是一个用于产生热量的过程。燃烧反应器的设计和操作必须与燃烧所需要的物理和化学条件相符。

本书由三部分组成，第一部分介绍影响燃烧的各种煤的性质。在计算过程中碰到缺少一些必要的数值时，只能采用统计法确定的近似值代替；第二部分论述煤燃烧的物理过程和基础理论，介绍测定煤化学反应活性的现代方法以及如何从理论上分析、观察燃烧过程，以便读者更好地理解已有的理论计算方法；第三部分介绍燃烧技术，描述不同的燃烧类型及有关问题。除固定床、沸腾床外，对气流床将作重点介绍，包括粉煤燃烧的流体力学、喷嘴的设计、结渣的原因及机理等。希望对设计和操作人员有参考价值。

本书的结尾是关于污染大气的 NO_x 和 SO_x 的形成和如何降低排放量等。最后还对燃烧技术的研究和发展方向进行了概述。

为方便读者使用本书中介绍的计算公式和图表，在附录里列出了运算实例和计算所需的数据。

1 燃料用煤

1.1 煤是世界上最重要的燃料

地球上燃料的储量至今尚未完全探明,但无可置疑,固体燃料占大部分。地球上的矿物能源中 60% 的可采储量和 82% 的估计储量是煤(见表 1)。

表 1 矿物能源的储量(单位 10^{15} J)

矿物能源	估计储量	可采储量
煤	316311883.3	20312810.8
石油	61980624.2	11184746.2
铀(235)	4525640	1035000
合计	382818147.5	33422557.0

目前世界的煤炭储量列于表 2。

表 2 世界煤炭储量(以标准煤计)

煤种	估计储量 亿吨	探明储量		可采储量	
		亿吨	%	亿吨	%
褐煤		1730	16	1110	16
其他褐煤		1130	11	930	13
硬煤①		7750	73	4880	71
合计	110000	10610	100	6870	100

① 指无烟煤和烟煤。

大部分的煤分布在北纬 30° 以上的地区。66% 的可采储量集中在美国、苏联和中国,其余的 34% 分布在欧洲(20%),澳大利亚(5%)、印度(2%)和非洲(4%),其他地区只占总量的 3% (见表 3)。

表B 可采煤炭储量的分布

国家或地区	可采储量 亿吨标准煤	%
美国	1909	27.7
苏联	1655	24.1
中国	990	14.4
西欧	905	13.2
东欧	464	6.7
澳大利亚	365	5.3
非洲	253	3.7
其他	334	4.9
合计	6875	100.0

波兰硬煤的储量估计为 1400 亿吨标准煤(下同), 其中可采储量为 200~240 亿吨, 大部分在西里西亚地区。褐煤的估计储量为 108 亿吨, 可采储量 36 亿吨^[1,2]。

联邦德国硬煤的估计储量为 2470 亿吨, 可采储量 350 亿吨, 褐煤的估计储量为 150 亿吨, 可采储量为 87 亿吨。

全世界迄今为止已开采和消耗掉的煤合计约为 1400 亿吨^[3], 即占可采储量的 20% 左右, 对估计储量讲仅占 1.3%。所以对主要的产煤国来说, 可开采的煤仍旧很丰富。以联邦德国的褐煤开采为例, 以年产 1.2 亿吨计, 还可继续开采 300 年。

不断增长的能源需求意味着, 所有的现有常规能源终究会被耗尽, 煤也不能例外。不过在很长时间内, 它仍然是发电的主要燃料和生产焦炭与煤气的原料。

1.2 煤的形成和岩相组成

煤的形成是一个十分复杂的过程, 至少可分两个阶段^[4~12]: 泥炭化阶段和煤化阶段。前者主要是生物化学过程, 后者是物理和化学过程。

泥炭是在常温和常压条件下通过植物体的沉积而形成的。泥

表 4 褐煤和烟煤的显微组分

褐 煤		烟 煤	
显微组分组	显微组分	显微组分组	显微组分
Huminite 腐植组	Textinite 木质结构体 Ulmite 腐木质体 Attrinite 细粒体 Densinite 密屑体 Gelinite 凝胶体 Corphuminite 团块腐 植体	Vitrinite 镜质组	Telinite 结构镜质体 Collinite 无结构镜质体 Vitrodetrinite 碎屑镜 质体
Liptinite 稳定组	Sporinite 孢子体 Cutinite 角质体 Resinite 树脂体 Suberinite 木栓质体 Alginite 藻质体 Liptodetrinite 壳屑体 Chlorophyllinite 叶绿体	Exinite 稳定组	Sporinite 孢子体 Cutinite 角质体 Resinite 树脂体 Alginite 藻质体 Liptodetrinite 壳屑体
Inertinite 惰质组	Fusinite 丝质体 Semifusinite 半丝质体 Macrinite 粗粒体 Sclerotinite 菌类体 Inertodetrinite 惰屑体	Inertinite 惰质组	Micrinite 细粒体 Macrinite 粗粒体 Semifusinite 半丝质体 Fusinite 丝质体 Inertodetrinite 惰屑体

煤下沉后逐渐转变为褐煤。褐煤是成煤过程中的初级产物，它在更深的地层中受高温高压作用，就逐渐经亮硬煤进一步转化为烟煤和无烟煤。

与之相反，有一种学说认为褐煤和硬煤的形成是两种不同的过程，前者为还原过程而后者为氧化过程。

利用显微镜可观察到不同的煤岩组分。表 4 是褐煤和烟煤的岩相分类。各煤岩组分分别对应于不同的成煤植物体和泥炭形成的条件。同一牌号的不同煤样中的同种显微组分尽管互有区别，但都有相同的反射率，这也意味着具有相似的化学成分和工艺性质。

煤岩显微组分的性质

腐植组是褐煤中的一个显微组分，在一定程度上保留了原有的植物体结构。主要组成是腐植质如木质素、纤维素、未变的(木质结构体)和已变的(腐木质体)植物细胞壁，呈细颗粒、泡沫状和多孔的细粒体、木屑体以及沉析出的凝胶体。腐植组具有较高的密度，它是烟煤镜质组的前身。

稳定组主要由孢子体、木栓层、角质膜和树脂体等组成，其特点是比其他岩相组分的密度低、挥发分产率高(经常在80%以上)。

惰质组是褐煤中反射率较强的部分，包括反光能力很强的细胞壁、保持木质细胞结构的丝质体和半丝质体以及粗粒体等，后者虽无细胞结构，但因为密度高、孔隙少而容易反光。

值得一提的是某些显微组分还含有矿物杂质，例如：在丝质体中含有碳酸盐、硫酸盐、石英和高岭土等，在粗粒体中含有粘土等。

烟煤中的显微组分也可分为三类：

镜质组与褐煤中的腐植组相仿，由尚可辨认出原始植物细胞结构的结构镜质体和已完全失去原始植物细胞结构的无结构镜质体等组成。镜质组的反射率随煤化程度增加而增加，因此常用作衡量煤化程度或变质程度的指标。它的密度在 $1.2\sim 1.8\text{g/cm}^3$ 之间，碳含量在77~96%，挥发分介于2~45%。

壳质组与褐煤中的稳定组相似，其特点也是密度较低而挥发分较高。

惰质组与褐煤中的惰质组基本相同，其特点是无细胞结构的粗粒体和碎屑惰质体含量较高。

煤宏观上的光泽通常是煤质是否致密的象征。表面暗淡则是因为多孔，故这种煤容易吸水也容易脱气。“亮煤”和“暗煤”是工艺中使用的概念。若与显微组分相联系的话，只有壳质组含量低的镜质组煤可统称为亮煤，反之，各种显微组分的均匀混合物或壳质组与惰质组的均匀混合物则称为暗煤。

在文献中常有关于南北半球烟煤具有不同燃烧特性的论述

(如南非和澳大利亚的煤)。这是由于煤岩组分不同而引起的^[8]。

显微镜下也可观察到存在于煤中的矿物杂质，一般分布于裂隙、空腔或煤质之中。

从烟煤显微组分的分析可见，每种显微组分的挥发分都随煤化程度而变化(见 1.3 和图 1)。

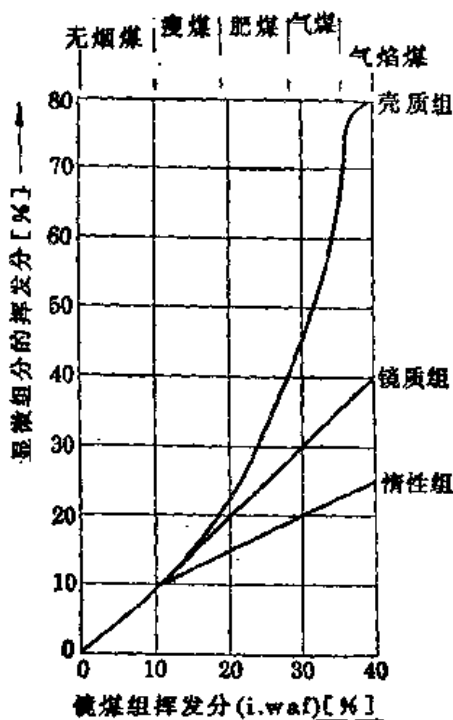


图 1 不同煤种显微组分的挥发分产率

以气焰煤为例，壳质组的挥发分产率是镜质组的两倍，而惰性质组又比镜质组低 30%。不同显微组分的影响随煤化程度增加而减小。对无烟煤讲，三者之间已没有区别。由此可知，只有在煤的岩相组成相近的条件下才能通过挥发分比较煤化程度。两种煤的挥发分产率相同时，煤化程度不一定相同，有可能具有不同的燃烧性能。因此不仅仅是挥发分，而且显微组分和煤化程度都是决定煤燃烧性能的重要因素。

在实际应用中往往是对混合煤样进行评价。为此，单靠混合煤样的挥发分数据是不够的，还必须分析煤的岩相组成。但是在进行热工计算和工程分析时很少考虑显微组成和燃烧过程之间的关系，总是把煤假设为具有一定化学组成、水分、灰分和发热量的均质燃料。本书也沿用这种假设。

在煤燃烧的第一阶段放出的热量对整个过程中具有重大意义，因此除煤的发热量外还要把挥发分的发热量作为重要性质而加以研究(见表 5)。

表5 燃烧用煤性质(Teyssler 分类法^[18])

物 质	性 质	指 标 ^①
原料煤	物 理	水分 灰分 (1) 堆积角度 可磨性 (2) 密度 (3) 比热容 结焦热 (4) 导热性 (4)
	量热性	发热量 (2) 着火性 爆炸性 (4)
可燃物	量热性	发热量 (1) 挥发分发热量 (4)
	反应动力学	燃烧时间 (4) 活化能和频率因子 (4)
	其 他	挥发分产率 (1) 固定碳产率 化学组成 (2) 焦油产率 (3) 岩相组成 (4)
灰		化学组成 (2)
	热物理	相变温度 (3) 粘度 (4)
	其 他	结渣性 (4) 磨蚀性 (4)

①(1) 表示必须测定并已有标准方法;

(2) 表示经常测定,作为(1)的补充;

(3) 表示只有在特殊情况下才测定;

(4) 表示极少测定,只能在特殊的专业实验室才能测定。

1.3 煤化度和成煤系数

煤化度这里是指干燥无灰基煤的碳含量。煤的碳含量一般是通过煤在空气或氧气中燃烧生成的二氧化碳进行测定的。如煤中

存在碳酸盐,它受热分解也产生二氧化碳,将使结果偏高,故应予校正。如果煤的灰分或碳酸盐含量很少,则后一影响可以忽略。

固体燃料可用干燥无灰基碳含量($C_{d,wa}$, %)分类:

木材	50%
泥炭	55%~64%
软褐煤	64%~74%
硬(亮)褐煤	74%~78%
烟煤	76%~94%

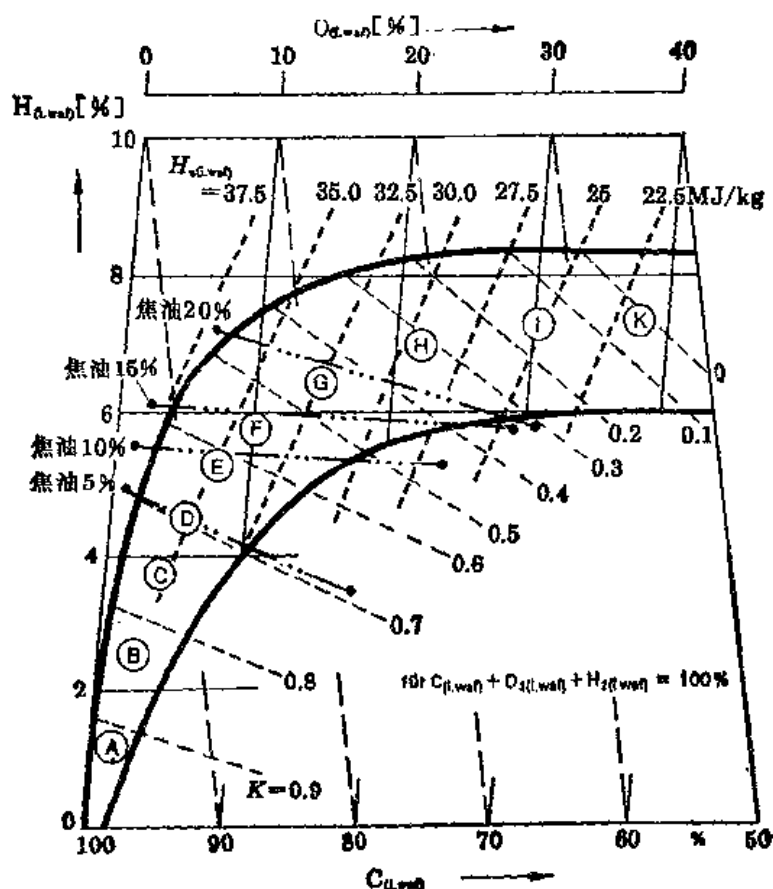


图2 固体燃料分类(K 为煤化程度指数)

A—石墨; B—无烟煤; C—瘦煤; D—肥煤; E—硬质煤;
F—气焰煤; G—硬褐煤; H—软褐煤; I—泥炭; K—木材

表 6 硬煤国际分类

组别(根据粘性确定)		指数(任选一种)		第一位数代表类别号		第二位数代表组号		罗号数字代表煤种的统计类别		亚组别(根据结焦性确定)		
组号	膨胀序数	罗膨胀指数	罗膨胀指数	第一位数	第二位数	第一位数	第二位数	第一位数	第二位数	亚组号	指数(任选一种)	
3	>4	>45		334 V _A	43b V _B	535 V _C	635 V _D			5	>140	
				333 V _A	433 V _B	533 V _C	633 V _D	733		4	>50~140	
				332 V _A	432 V _B	532 V _C	632 V _D	732	832	3	>0~50	
				323 V _A	423 V _B	523 V _C	623 V _D	723	823	2	≤0	
2	2 $\frac{1}{2}$ ~4	20~45		322 V _A	422 V _B	522 V _C	622 V _D	722	822	3	>0~50	
				321 V _A	421 V _B	521 V _C	621 V _D	721	821	2	≤0	
1	1~3	5~20		312 V _A	412 V _B	512 V _C	612 V _D	712	812	1	只收缩	
				311 V _A	411 V _B	511 V _C	611 V _D	711	811	2	≤0	
0	0~ $\frac{1}{2}$	0~5		300 V _A	400 V _B	500 V _C	600 V _D	700	800	1	只收缩	
				300 V _A	400 V _B	500 V _C	600 V _D	700	800	0	只收缩	
确定类别的指数		挥发分, (干燥无灰基)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		发热量 kJ/kg (恒湿无灰基, (30°C, 湿度 96%))	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
			>3~10	>10~14	>14~20	>20~28	>28~33	>33~38	>38~43	>43~48	>48~53	>53~58
			>3~6.5	>6.5~10	>10~14	>14~20	>20~28	>28~33	>33~38	>38~43	>43~48	>48~53
			>6.5~10	>10~14	>14~20	>20~28	>28~33	>33~38	>38~43	>43~48	>48~53	>53~58

注: 332a 挥发分 >14%~16%, 332b 挥发分 >16%~18%。

注: 332a 挥发分 >14%~16%, 332b 挥发分 >16%~20%。

确定类别的指数