

DIANZHAN GUOLU MEIFEN
ZHIBEI YU JISUAN

电站锅炉煤粉 制备与计算

张安国 梁辉 / 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DIANZHAN GUOLU MEIFEN
ZHIBEI YU JISUAN

电站锅炉煤粉 制备与计算

张安国 梁辉 / 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是对几十年来我国电站锅炉制粉系统的磨煤机及其主要部件的性能设计、试验、防爆等工作中的研究成果全面系统的总结,目的是为广大电站锅炉制粉系统的技术人员提供一个经实践检验行之有效的、完整的技术读物,为提高电站锅炉制粉系统的设计、运行、试验的水平而服务。

本书共分十章,主要内容有煤和煤粉特性、磨煤机类型及性能、制粉系统类型及性能、磨煤机及制粉系统的选择、磨煤机性能参数计算和台数确定、制粉系统热力计算、制粉系统的空气动力计算、制粉系统及磨煤机性能试验、制粉系统防爆技术措施、计算例题。

本书介绍了火力发电厂锅炉制粉系统及磨煤机的选型、性能参数计算、性能试验和防爆设计的方法,适用于相关容量等级的燃煤锅炉制粉系统的设计及性能检测,可供设计、科研、运行单位技术人员及大专院校相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电站锅炉煤粉制备与计算/张安国,梁辉编著. —北京:中国电力出版社,2010.8

ISBN 978-7-5123-0611-0

I. ①电… II. ①张… ②梁… III. ①火电厂-锅炉-燃煤制粉系统 IV. ①TM621.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第123914号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011年2月第一版 2011年2月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 16.25印张 397千字

印数0001—3000册 定价36.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

序

笔者有幸在本书正式出版前,有机会学习了全书的内容,不仅有一种先读为快的兴奋,更为西安热工研究院教授级高工张安国先生及其同仁,把几十年来对电站锅炉制粉系统的研究、试验及现场实践的丰硕成果和心得,编著成本书奉献给广大读者而深受鼓舞。

根据笔者对本书知识体系的理解和思考,全书有三个十分突出的特色,借此有限的篇幅和文字与广大读者共享。

(1) 系统性和完整性。半个多世纪以来,我国在电站锅炉制粉系统和设备的设计制造、研究开发及运行上,取得了多方面的研究成果和实践经验。可以说,本书是国内第一本全面、完整、系统总结提升上述成果的专著。

书中内容十分充实饱满,从燃煤制粉的基本特性,磨煤机的种类、结构特点、运行特性,制粉系统的选择,热力和阻力计算方法,系统及主要部件的性能测试,以及系统的防爆及安全等特殊问题,都做了详尽的介绍和阐述。

为了帮助读者理解和对技术问题的分析,书中在容易混淆的地方,都做了“计算示例”。第九章还专门写了“制粉系统爆炸案例分析”。特别在书末还专门编写了“计算实例”一章,对读者有重要的启示作用。

(2) 实践性。本书特别注重与我国电站锅炉制粉系统的实际结合,突出体现了实践性特色。联系实际,用科学实验数据支撑,是本书生命力的根源。凡是我国生产制造的磨煤机型号系列、电厂实际运行的各种制粉系统及设备,甚至国外最新研发的新型高加载力 MPS 型中速磨煤机专利等,书中都有很好的介绍。

书中对一些重要的经验数据或公式的推荐,都经过了实践的检验才予以认可。如煤粉细度 R_{90} ,过去用 $R_{90}=4+0.5nV_{daf}$ 来确定,后经过对比性试验研究和技术经济比较,本书现推荐用 $R_{90}=0.5nV_{daf}$,具有更好的节能效果和更高的综合经济效益。

本书还对我国现行制粉系统设计计算中的不足提出了进一步试验、探索和研究的建议。如近些年,由于粗粉分离器结构的改进使钢球磨煤机的实际出力高于计算出力 40%~70%;对高水分的烟煤,现行 HP 型中速磨煤机出力计算中对水分的修正不足,以致造成实际出力低于计算出力的情况。

(3) 实用性。制粉系统及磨煤机出力计算、热力计算和阻力计算的公式非常繁复,本书在简化计算、确保准确度的原则下,对气固两相流摩擦阻力及局部阻力系数中的浓度修正系数 K_μ ,从模糊统计学的观点出发,统一简化为 $K_\mu=2.5$ 。经现场测试,简化后的计算结果与实测结果的偏差控制在 5% 以内。又如,对风扇磨煤机热力计算中的三介质炉烟特性参数(如密度、质量份额……)进行了改进性简化,并在第十章中进行了对比性计算,偏差同样

控制在 5% 以内。

笔者深信，本书的出版不仅给广大读者及从事电站锅炉制粉系统及设备设计制造、运行操作、科学研究及管理的同仁们，提供一本优秀的技术读物，更将促进我国在该领域的科技水平有一个新的发展和突破，为最终制定一套中国特色的制粉系统及设备的“标准方法”而奋斗。



2010 年 9 月于西安交通大学能源馆

前 言

近几十年来,我国在电站锅炉制粉系统的磨煤机及其主要部件的制造、性能设计、运行、试验方面的工作取得了丰硕的科研成果。20 世纪七八十年代,我国相继从国外引进了磨煤机技术,在运行中出现了实际运行出力与计算结果相差较大,甚至磨煤机出力满足不了锅炉负荷需要的情况,我国试验研究单位与制造、运行部门紧密结合,在设备的性能设计方面做了较大的技术改进,提高了设备的安全经济运行水平。与上述问题有关的“火电厂磨煤机合理选型设计研究”课题曾获得 1990 年国家科技进步二等奖;我国对制粉系统的主要部件静态挡板式粗粉分离器的结构展开了较多的研究工作,目前我国挡板式粗粉分离器的结构性能(防堵、煤粉均匀性等性能)已走在世界的前列;在制粉系统试验中,我国在带粉气流的测量、煤粉取样技术上独具特色,具有简便、准确度较高的特点。

本书对我国制粉系统设计、运行、试验方面丰富的科研成果进行了总结,以期为制粉系统的设计、运行、试验技术进一步提高作出贡献。

21 世纪初,我国曾出版电站锅炉制粉系统有关性能设计、选型、试验的标准,是对我国制粉系统的性能设计、试验的经验总结。这些标准是 DL/T 5145—2002《火力发电厂制粉系统设计计算技术规定》、DL/T 466—2004《电站磨煤机及制粉系统选型导则》、DL/T 467—2004《电站磨煤机及制粉系统性能试验》。本书对这三项标准加以汇总、修订和扩展,目的是能将电站锅炉制粉系统完整、详细、实用的技术进行总结并呈献给读者。在汇总和修订中,将原标准的编写说明有机地融入正文内,使读者在阅读过程中更容易理解和对照;在修订的基础上根据当前的科技水平进行扩展,充实大量信息;同时增加了计算例题,以便读者在理解和应用计算方法时有例可循,少走弯路;为了促进磨煤机及制粉系统技术的发展,对书中所介绍的部分计算方法展开了讨论,以使对磨煤机和制粉系统有兴趣并致力于该技术研究的研究者有所启示,推动该项技术的发展。

本书在编写时,对上述三项标准的一些技术问题进行了修正。DL/T 466—2004 中煤粉爆炸性指数的计算来源于苏联热工研究院的研究成果,但原文章中热量单位使用的是 kcal,而我国使用标准热量单位 kJ,原标准未能加以转换。本书将原公式中的单位转换成标准热量单位,并按我国的煤质数据重新进行了煤质爆炸性指数的计算和分类。由于 DL/T 5145—2002 热力计算部分关于风扇磨煤机三介质干燥时的炉烟的质量、密度、质量份额计算的过程较为复杂,不利于理解,因此,本书参照苏联的计算方法在正文部分列出了较为简便的计算公式,对原标准中的错误部分进行了修正后放在附录以便对比。在对风扇磨煤机三介质干燥例题进行计算时,同时按这两种方法进行了计算对比,两种方法计算结果一致。DL/T 5145—2002 在空气动力计算部分,对管路局部阻力计算中的煤粉浓度修正系数,采

用的是试验台得出的数据；但是煤粉浓度修正系数随管件的形状不同差别较大，对所有形状的管路进行试验是不现实的，这对计算带来了困难。因此，本书在编写时增加了苏联在阻力计算中对煤粉浓度修正系数所采取的方法（即模糊算法），对摩擦阻力和局部阻力采用统一的煤粉浓度修正系数（ $K_{\mu}=2.5$ ）。在阻力计算例题中对这两种方法进行了计算对比，两种方法的结果接近，并与实测阻力的误差都在5%以内。

本书收集了磨煤机的最新资料。新型高加载力 MPS 型磨煤机（MPS-HP-II 型磨煤机）的专利技术自 20 世纪 90 年代引进以来在我国得到了较快推广，本书征得专利权拥有者的同意，列入了其参数计算方法；根据制造厂提供的资料，对 BBD 型磨煤机的系列性能参数进行了修改和增补；对中速磨煤机出力计算中的旋转分离器对出力计算的影响，以及高水分烟煤和褐煤对 MPS 型磨煤机、HP 型磨煤机的出力计算的影响问题进行了专题研究。

本书所列出的磨煤机类型及其计算方法（包括磨煤机的出力计算、热平衡计算、空气动力计算）是经过我国实践考验的，其中 MPS 型中速磨煤机和 FM(S) 型风扇磨煤机的出力计算方法根据我国煤质情况对国外专利方法做了修正，并作为行业标准通过。但是关于钢球磨煤机和双进双出钢球磨煤机的出力问题，以及钢球的尺寸、配比和钢球装载量等问题等还有待研究。这些问题的解决对大幅度降低钢球磨煤机和双进双出钢球磨煤机的磨煤电耗至关重要。另外，随着我国节能降耗政策的深入贯彻，新的制粉设备还会不断在我国出现，有待我们继续研究和总结。

在本书编写过程中，长春发电设备有限公司李战国、金英淑，上海重型机器有限公司佟成功、张林，沈阳重型机器有限公司乔德润、尚培树等同仁提供了磨煤机最新的资料，在此表示感谢。

我国著名锅炉专家、原西安交通大学校长徐通模教授审阅了本书，提出了宝贵的意见，并为本书作序，在此表示由衷的感谢。

本书由张安国、梁辉编著。第一、二、三、四、五、七、八、十章及附录 A 由张安国编著，第六、九章及附录 B 由梁辉编著。全书由张安国统稿。

本书尽管力求准确，但也难免百密一疏，错误之处，望读者见谅并不吝赐教。

作者

2010 年 9 月

目 录

序

前言

第一章 煤和煤粉特性	1
第一节 煤的特性.....	1
第二节 煤粉的特性.....	7
第三节 煤和煤粉的水分、密度、比热容	16
第四节 设计原始数据	19
第二章 磨煤机类型及性能	21
第一节 磨煤机类型	21
第二节 磨煤机性能比较	48
第三章 制粉系统类型及性能	50
第一节 制粉系统类型	50
第二节 制粉系统性能比较	61
第四章 磨煤机及制粉系统的选择	62
第一节 选择原则	62
第二节 不同煤质条件下推荐的磨煤机及制粉系统类型	63
第三节 磨煤机及制粉系统的选择	64
第五章 磨煤机性能参数计算和台数确定	65
第一节 性能参数	65
第二节 性能参数计算	65
第三节 磨煤机台数的选择.....	104
第六章 制粉系统热力计算	105
第一节 概述.....	105
第二节 始端干燥剂.....	106
第三节 热平衡.....	113
第四节 干燥剂的比热容、质量份额和终温.....	120
第五节 终端干燥剂.....	126
第六节 干燥管.....	133
第七节 制粉系统风机容量.....	134
第七章 制粉系统的空气动力计算	136
第一节 基本规定.....	136

第二节	空气动力计算	139
第八章	制粉系统及磨煤机性能试验	166
第一节	概述	166
第二节	制粉系统及磨煤机的性能要求	166
第三节	试验项目、内容要求及测点布置	168
第四节	试验的组织	179
第五节	测量方法	188
第六节	误差分析及测量准确度的检验	208
第九章	制粉系统防爆技术措施	210
第一节	防爆设计原则	210
第二节	防爆辅助系统	211
第三节	制粉系统防爆	211
第四节	防爆技术要求	214
第五节	制粉系统爆炸案例分析	217
第十章	计算例题	219
第一节	风扇磨煤机热平衡计算（二介质干燥）	219
第二节	风扇磨煤机热平衡计算（三介质干燥）	222
第三节	中速磨煤机（MPS 型磨煤机）热平衡计算	233
第四节	风扇磨煤机选型计算	235
第五节	中速磨煤机选型计算	235
第六节	磨煤机送粉管阻力计算	236
附录 A	常用单位换算关系及发热量的换算	241
附录 B	DL/T 5145—2002 中的制粉系统热力计算方法	244
参考文献		250

第一章 煤和煤粉特性

第一节 煤的特性

一、煤的可磨性

煤的可磨性 (grindability of coal) 是指煤在被研磨时破碎的难易程度, 用可磨性指数表示。

可磨性指数是将相同质量的煤样在消耗相同的能量下进行磨粉 (同样磨粉的时间或磨煤机转数), 所得到的煤粉细度与标准煤的煤粉细度的对数比而得到的。根据煤的破碎理论, 煤粉细度与磨粉时间之间具有如下关系

$$R_x = 100e^{-(A_x k_x t)^p} \quad (1-1)$$

$$A_x = k_0 x^n P$$

式中 R_x —— x 粒径的煤粉细度, %;
 k_x ——反映燃料研磨性质的系数;
 t ——研磨时间;
 p ——指数, 取决于设备的性质;
 A_x ——常数;
 k_0 ——考虑研磨设备特性的系数;
 x ——粒径;
 n ——煤粉均匀性指数;
 P ——单位质量被研磨燃料的功率。

将式 (1-1) 两边取对数, 得到

$$\ln R_x = \ln 100 - (A_x k_x t)^p \quad (1-2)$$

或 $(A_x k_x t)^p = \ln(100/R_x) \quad (1-3)$

$$A_x k_x t = [\ln(100/R_x)]^{1/p} \quad (1-4)$$

将标准煤和试验煤取同样粒径, 在同一研磨设备和相同研磨时间下 (A_x 和 t 相同) 进行磨制, 可磨性指数 k_x 可按式 (1-5) 求得, 即

$$k_x = \left[\frac{\ln \frac{100}{R_x}}{\ln \frac{100}{R_b}} \right]^{\frac{1}{p}} \quad (1-5)$$

式中 R_b ——标准煤的煤粉细度。

根据式 (1-5) 求得的可磨性指数有哈氏可磨性指数 HGI 和 VTI 可磨性指数 K_{VTI} 。 K_{VTI} 用于钢球磨煤机的出力计算, HGI 用于除钢球磨煤机以外所有磨煤机的出力计算。

可磨性指数 HGI 和 K_{VTI} 可近似用式 (1-6) 进行换算, 即

$$K_{VTI} = 0.0149HGI + 0.32 \tag{1-6}$$

但在进行磨煤机的出力计算时, 应以实测的可磨性数据为准。

图 1-1 所示为哈氏可磨性指数 HGI (哈德格罗夫可磨性指数)、VTI 可磨性指数 K_{VTI} (苏联热工研究院制定) 和 ZKTI 可磨性指数 K_{ZKTI} (苏联汽轮机锅炉研究院制定) 的换算关系。

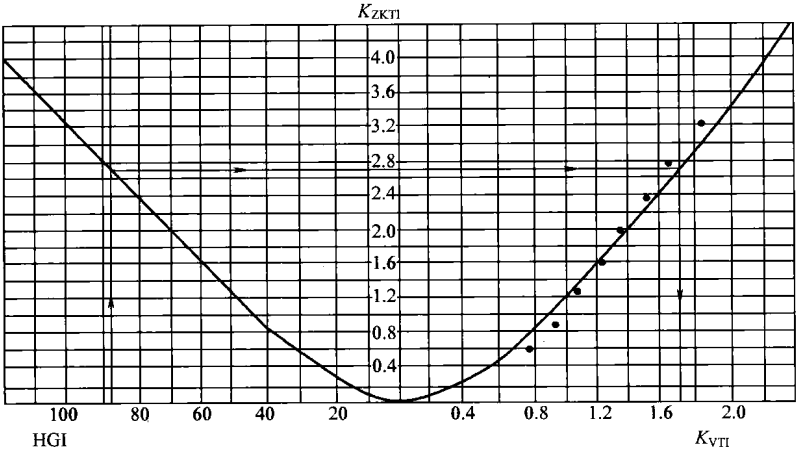


图 1-1 哈氏可磨性指数 HGI、VTI 可磨性指数 K_{VTI} 和 ZKTI 可磨性指数 K_{ZKTI} 的换算关系

混煤的可磨性宜实测, 当没有实测值时, 也可按加权平均的办法估算, 即

$$K_x = r_1 K_{x,1} + r_2 K_{x,2} \tag{1-7}$$

式中 r_1 、 r_2 ——煤种 1 和煤种 2 在混煤中所占的质量份额;

$K_{x,1}$ 、 $K_{x,2}$ ——煤种 1 和煤种 2 的可磨性指数。

二、煤的试验室可磨性和工作燃料可磨性

煤的可磨性数据是在试验室的条件下 (风干的煤样以及在特定的试验仪器和常温条件下) 测得的, 即试验室可磨性 (gridability of laboratory test)。

在运行条件下, 通常煤的水分和干燥气体的温度会对煤在运行状况下的可磨性产生影响。水分和温度对工作燃料可磨性 (gridability of as-received coal) 的影响因煤种的不同而有所差异。烟煤、无烟煤的可磨性随着原煤全水分的增加而下降; 褐煤的可磨性随着原煤全水分的增加呈复杂的变化关系。 $V_{daf} < 30\%$ 的褐煤其可磨性随着原煤全水分的增加大部分呈下降的趋势, 而 $V_{daf} > 30\%$ 的褐煤其可磨性随着原煤全水分的增加大部分呈上升的趋势。

烟煤、无烟煤的可磨性随温度的变化不明显; 褐煤的可磨性随着温度的变化关系较复杂。 $V_{daf} < 30\%$ 的褐煤其可磨性随着温度的增加呈抛物线上升, 而 $V_{daf} > 30\%$ 的褐煤其可磨性随着温度的增加呈 N 形上升的趋势。不同的煤种在温度上升的过程中可磨性变化的幅度也不同。因此, 磨煤机磨制褐煤时的出力不能套用烟煤、无烟煤的出力计算曲线, 而必须采用试磨或经验的计算方法。

三、煤的磨损特性

煤的磨损特性 (abrasiveness of coal) 是指煤在被破碎时对研磨件磨损的强弱程度, 用磨损指数表示。

我国电站锅炉制粉系统设计所需的煤的磨损特性按 DL/T 465—2007《煤的冲刷磨损指数试验方法》进行测定, 得到煤的冲刷磨损指数 K_c 。这是在一台冲刷磨损试验设备上测得的。将试验煤破碎成同样的粒径, 在冲刷磨损试验机中得到破碎以后的煤粉细度和磨损片磨损量的关系, 在同样的煤粉细度下, 试验煤的磨损片磨损量和标准煤的磨损片磨损量之比得到煤的冲刷磨损指数 K_c 。

必要时 (对外联系时) 还可按 GB/T 15458—2006《煤的磨损指数测定方法》测得的磨损指数 AI 作为参考。这是在一台旋转试验设备上, 利用旋转的磨损片和固定的外壳之间的挤压产生的磨损量计算得到磨损指数 AI。在长期的运行实践中, 通过对这两种磨损指数的比较, 认为煤的冲刷磨损指数 K_c 较能反映磨煤机研磨件 (包括中速磨煤机、风扇磨煤机和钢球磨煤机) 在不同煤种下的研磨状况, 而磨损指数 AI 和冲刷磨损指数 K_c 的关系只能是大致呈线性关系, 没有规律性。原因是冲刷磨损试验设备具有细粉分离设备, 接近实际磨煤机的制粉系统状况, 而按 GB/T 15458—2006 测得的磨损指数 AI 是在一台封闭的设备中进行的, 研磨中的细粉得不到分离, 会对研磨片的磨损产生不符合实际的影响。

煤的磨损性和煤的冲刷磨损指数 K_c 的关系见表 1-1。

表 1-1 煤的磨损性和煤的冲刷磨损指数 K_c 的关系

煤的冲刷磨损指数 K_c	磨损性	煤的冲刷磨损指数 K_c	磨损性
<1.0	轻微	3.5~5.0	很强
1.0~2.0	不强	>5.0	极强
2.0~3.5	较强		

煤的磨损性和煤的磨损指数 AI 的关系见表 1-2。

表 1-2 煤的磨损性和煤的磨损指数 AI 的关系

煤的磨损指数 AI (mg/kg)	磨损性	煤的磨损指数 AI (mg/kg)	磨损性
<30	轻微	61~80	很强
31~60	较强	>80	极强

在未取得煤的磨损指数的情况下, 煤的磨损性也可按灰的成分粗略判别:

(1) 如果灰中 SiO_2 含量小于 40%, 则磨损性属轻微; SiO_2 含量大于 40%, 则难以判别。

(2) 如果 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 2.0$ 时, 则磨损性在较强以下; $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 2.0$, 则难以判别。

(3) 如果灰中石英的含量小于 6%~7%, 则磨损性在不强以下; 如果灰中石英的含量大于 6%~7%, 则磨损性难以判别。灰中石英的含量计算如下

$$(\text{SiO}_2)_q = (\text{SiO}_2)_t - 1.5(\text{Al}_2\text{O}_3) \quad (1-8)$$

式中 $(\text{SiO}_2)_q$ ——灰中石英含量, %;

$(\text{SiO}_2)_t$ ——灰中 SiO_2 含量, %;

(Al_2O_3) ——灰中 Al_2O_3 含量, %。

煤的磨损性与煤中的石英 (quartz) 和黄铁矿 (pyrite) 的含量有关, 这两种矿物的磨

损性都很强，但石英更甚。因为煤中石英通常以单粒呈现，且粒粗；而黄铁矿往往混杂在软质黏土和煤中。据原英国中央发电局试验，黄铁矿的磨损性约为石英的 30%，但中国大多数煤中石英的含量均不高，四川南部、贵州西部、福建的某些煤田的煤有较高的石英含量。

煤中石英和黄铁矿的含量也可由 X 光衍射分析来大致确定。

试验表明，若煤中的石英含量低于 0.5%~0.7%，则属低磨损性；高于 1.9%~2.4%，则属高磨损性。

四、煤的黏结性

由于水分的存在，在散状物料颗粒之间及物料颗粒和料仓壁之间会形成毛细力，使颗粒之间或颗粒与料仓壁之间因毛细力和机械冲击力等作用而产生黏结。物料黏结性能的好坏采用成球性指数来评价。成球性指数计算公式为

$$K_c = \omega_f / (\omega_m - \omega_f) \quad (1-9)$$

式中 K_c ——成球性指数；

ω_f ——最大分子水，%；

ω_m ——最大毛细水，%。

成球性指数 K_c 综合反映了细粒物料的天然性质（颗粒表面的亲水性、颗粒形状及结构状态，如粒度组成、孔隙率等）对物料黏结性强弱的影响。

煤的黏结性（caking character of coal）和煤的矿物组成、粒度组成、颗粒形貌及机械强度性能有关。煤中蒙脱石、多水高岭石含量越高，煤的黏结性越强；煤的粒度越细，煤的黏结性越强；多棱角的针状、片状颗粒越多，煤的黏结性越强；煤的机械强度越低，煤的黏结性越强。

最大分子水和最大毛细水的测定按下述方法求得：

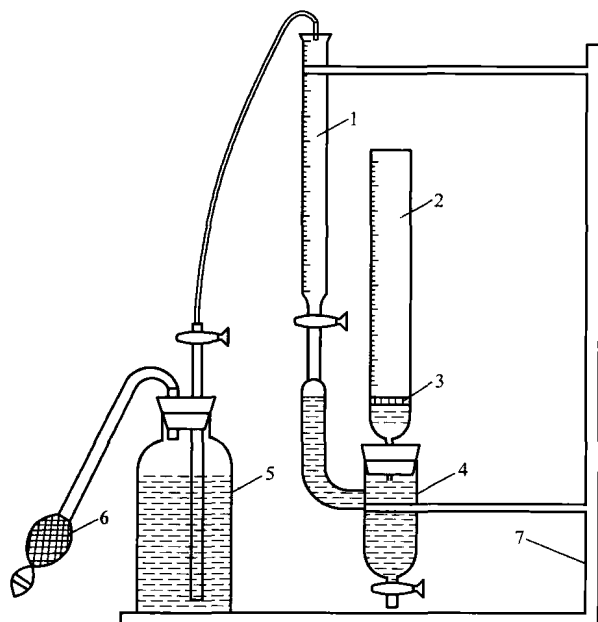


图 1-2 最大毛细水的测定装置及原理

1—滴定管；2—玻璃装料器；3—筛板；4—储水器；

5—水瓶；6—打气球；7—支架

(1) 最大分子水的测定。按照 GB 474—2008《煤样的制备方法》规定的原则，将燃料磨制成 0~3mm 的颗粒，缩分后取 500g（称准到 1g）试样，加水湿润到饱和状态（过量水湿润 2h），然后放入 $\phi 60\text{mm}$ 的压模（底部和上部放 20 层滤纸），采用 $6.55 \times 10^6 \text{ Pa}$ 压力加压 5h，以挤出多余的毛细水和自由水，然后称重。烘干至恒重后再称重，按式（1-10）计算最大分子水，即

$$\omega_f = (1 - \theta/A) \times 100 \quad (1-10)$$

式中 θ ——压制的湿料烘干后质量，kg；

A ——湿料压制后的质量，kg。

允许差：平行样相对偏差为 5%。

(2) 最大毛细水的测定。最大毛细水的测定装置及原理如图 1-2 所示。

按照 GB 474—2008 规定的原则，将燃料磨制成 0~3mm 的颗粒，缩分后

取空气干燥状态的 500g (称准到 1g) 试样装入装料器中, 预先将水装入储水器中并使水平面与筛板上表面平, 煤样装入后水将自动吸入煤样中。水吸入煤样中后, 储水器中的水平面降低, 开启滴定管旋塞, 让水进入储水器并使储水器中水与筛板上表面平齐。根据滴定管可计量吸入煤样的水量。根据式 (1-11) 计算最大毛细水, 即

$$\omega_m = b_x / (b_y + b_x) \times 100 \quad (1-11)$$

式中 b_x ——总吸水量, kg;

b_y ——装入装料器中的干燥煤样质量, kg。

允许差: 平行样相对偏差小于 5%。

煤的黏结性能和成球性指数 K_c 的关系见表 1-3。

表 1-3 煤的黏结性能和成球性指数 K_c 的关系

成球性指数 K_c	煤的黏结性能	成球性指数 K_c	煤的黏结性能
<0.2	无黏结性	0.60~0.80	强黏结性
0.2~0.35	弱黏结性	>0.80	特强黏结性
0.35~0.60	中等黏结性		

五、煤的摩擦角、煤的堆积角

煤的摩擦角 (friction angle of coal) 分为外摩擦角和内摩擦角。外摩擦角是指物料置于水平的平板上, 平板的一端下降至开始运动时平板与水平面的夹角。为了使煤能顺利流动, 实际料壁与水平面的夹角应比外摩擦角大 $5^\circ \sim 10^\circ$ 。它是计算料仓几何容积的重要参数。内摩擦角 (陷落角) 是指物料在陷落过程中其自由表面与水平面所能形成的最小夹角。它是计算料仓容积的重要参数。

煤的堆积角 (collective angle of coal) 是指煤在下泻时所形成料堆的斜面与水平面的夹角 (也称安息角)。它也是煤的黏结性的重要参数, 是设计磨煤机入口斜角的重要依据。

外摩擦角、内摩擦角、堆积角的测定方法如下:

(1) 按照 GB 475—2008《商品煤样人工采取方法》的规定采取原煤样。不同粒级煤的取样质量应符合表 1-4 的要求。

表 1-4 不同粒级煤的取样质量

最大粒度 (mm)	最小质量 (kg)	最大粒度 (mm)	最小质量 (kg)
>100	150	50	60
100	120	25	30

(2) 外摩擦角的测定。用一块钢板 (30cm×64cm), 使其一端铰接固定, 而另一端可借助细绳牵引使其自由升降 (如图 1-3 所示)。将一定量的煤样置于钢板上, 使煤样在钢板上等高堆满, 煤层高度为 50mm。将钢板缓慢下降, 直到物料开始滑落为止。此时测量其倾斜角即为外摩擦角 φ , 重复四次取其平均值, 即

$$\varphi = \arcsin(h_1 - h_2)/L \quad (1-12)$$

式中 φ ——外摩擦角, $^\circ$;

h_1 ——铰接点距水平面的距离, m;

h_2 ——平板下端距水平面的距离, m;

L ——钢板长度, m。

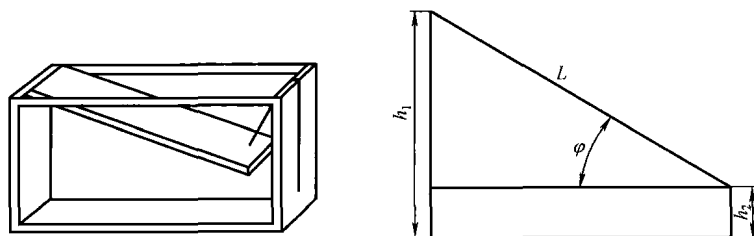


图 1-3 外摩擦角测定原理

(3) 堆积角的测定。堆积角是指散状物料自料堆顶部向下倾泻, 并使其沿斜面下滑, 当斜面与水平面的夹角达到最大时所对应的夹角为堆积角 (或安息角)。堆积角又分静堆积角和动堆积角, 物料在静止平面上所形成的堆积角为静堆积角 α_j ; 而物料在运动的平面上所形成的堆积角为动堆积角 α_d , 它与平面的运动速度有关, 一般 $\alpha_d = (0.65 \sim 0.80)\alpha_j$ 。

静堆积角的测定方法如下:

1) 选择一块水平地面, 选取足够质量的试样, 在保持落距 2~5cm 的条件下, 慢慢分层堆积, 直至煤堆的斜面与水平面的夹角达到最大。

2) 选择 4 个均分斜面, 用直尺贴紧其中一个斜面, 用量角仪 (如图 1-4 所示) 的一边贴紧直尺, 让量角仪的指针自由下垂, 待指针稳定以后, 读取所测角度值。用同样的方法测量其他三个斜面的角度, 取其算术平均值 (取整数)。

3) 按 1) 和 2) 的方法重复测定一次。

4) 两次测定的堆积角误差应小于或等于 1° , 否则重新测定, 取两次测定的平均值。

(4) 内摩擦角 (陷落角) 的测定。内摩擦角是指散状或块状物料在陷落过程中, 其自由表面与水平面所能形成的最小夹角, 采用陷落法测定的原理, 如图 1-5 所示。圆形容器尺寸为: $D=1500\text{mm}$, $H=1000\text{mm}$, $d=200\text{mm}$ 。物料自底部开孔处 (圆孔直径 d) 排出, 使其上部陷落, 形成的倾斜面与水平面的夹角为陷落角 φ , 可用式 (1-13) 计算, 重复 4 次取其平均值, 即

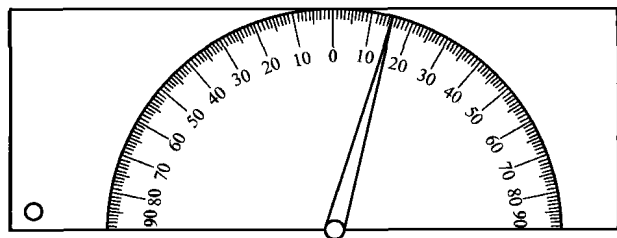


图 1-4 量角仪

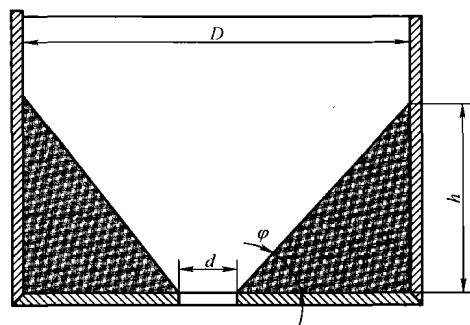


图 1-5 内摩擦角测定原理

$$\varphi = \arctan^{-1} [2h / (D - d)] \quad (1-13)$$

式中 φ ——陷落角, $^\circ$;

h ——料堆高, m;

D ——料堆外径, m;

d ——圆孔陷落孔直径, m。

成球性指数、摩擦角和堆积角都属于煤的黏结特性, 对它们的分析是进行煤的输送设计时所必需的。在电力行业中过去没有关于煤的输送性能指标, 因此在煤的水分控制上没有明确的目标, 煤斗和磨煤机入口角度的设计也较盲目, 造成一些电厂运行中煤斗和磨煤机入口的堵煤。

第二节 煤 粉 的 特 性

一、煤粉的爆炸性

煤粉的爆炸过程是悬浮在空气中的煤粉的强烈燃烧过程。

判断煤粉的爆炸性 (explosivity of pulverized coal) 的分类准则是爆炸性指数 K_d 。它是考虑燃料的活性 (可燃挥发分的含量及其热值) 以及燃料中的惰性 (燃料中灰分和固定碳的含量) 的综合影响的结果。煤粉的爆炸性指数 K_d 按式 (1-14) 计算, 即

$$K_d = \frac{V_d}{V_{\text{vol, que}}} \quad (1-14)$$

$$V_{\text{vol, que}} = \frac{V_{\text{vol}} \left(1 + \frac{100 - V_d}{V_d} \right)}{100 + V_{\text{vol}} \frac{100 - V_d}{V_d}} \times 100 \quad (1-15)$$

$$V_{\text{vol}} = (1260 / Q_{\text{vol}}) \times 100 \quad (1-16)$$

$$Q_{\text{vol}} = (Q_{\text{net, v, daf}} - 7850 \times 4.18 \text{FC}_{\text{daf}}) / V_{\text{daf}} \quad (1-17)$$

$$\text{FC}_{\text{daf}} = 1 - V_{\text{daf}} \quad (1-18)$$

式中 K_d ——煤粉的爆炸性指数;

V_d ——煤的干燥基挥发分, %;

$V_{\text{vol, que}}$ ——考虑灰和固定碳时燃烧所需可燃挥发分的下限, %, 按式 (1-15) 计算;

V_{vol} ——不考虑灰和固定碳时燃烧所需可燃挥发分的下限, %, 按式 (1-16) 计算;

Q_{vol} ——挥发分的热值, kJ/kg, 按式 (1-17) 计算;

$Q_{\text{net, v, daf}}$ ——煤的干燥无灰基低位发热量, kJ/kg;

FC_{daf} ——煤的干燥无灰基固定碳含量, 按式 (1-18) 计算;

V_{daf} ——煤的干燥无灰基挥发分, %。

例 1-1 某电厂燃煤煤质分析如下: $V_{\text{daf}}=16\%$, $A_d=32.26\%$, $V_d=10.84\%$, $Q_{\text{net, v, daf}}=33\,000\text{kJ/kg}$ 。试计算煤粉的爆炸性指数 K_d 。

解 (1) 煤的干燥无灰基固定碳含量: $\text{FC}_{\text{daf}}=1-0.16=0.84$;

(2) 挥发分的热值: $Q_{\text{vol}}=(33\,000-7850 \times 4.18 \times 0.84)/0.16=33\,981.75\text{ (kJ/kg)}$;

(3) 不考虑灰和固定碳时燃烧所需可燃挥发分的下限: $V_{\text{vol}}=(1260/33\,981.75) \times 100\%=3.708\%$;

(4) 考虑灰和固定碳时燃烧所需可燃挥发分的下限, 则

$$V_{\text{vol, que}} = \frac{3.708 \left(1 + \frac{100 - 10.84}{10.84} \right)}{100 + 3.708 \times \frac{100 - 10.84}{10.84}} \times 100\% = 26.2\%$$

(5) 煤粉的爆炸性指数: $K_d = 10.84/26.2 = 0.414$ 。

我国一些电厂煤粉的爆炸性指数 K_d 见表 1-5。

表 1-5 我国一些电厂煤粉的爆炸性指数 K_d

序号	电厂	煤种	M_t (%)	V_{daf} (%)	$Q_{\text{net, ar}}$ (MJ/kg)	A_{ar} (%)	A_d (%)	V_d (%)	$Q_{\text{net, daf}}$ (MJ/kg)	K_d	IT_m (°C)
1	平圩	烟煤	10	35~37	20~23	24~28	28.9	25.6	33.6	2.01	580
2	哈三	烟煤	7.0	35~37	20.5~24.5	21~28	26.3	26.5	32.9	2.04	—
3	石洞口二厂	烟煤	7.0	33~36	23~25	7~13	10.8	30.8	28.9	1.83	560~570
4	北仑港	烟煤	10.0	33~37	23~24	12~23	19.4	28.2	32.4	2.20	550~600
5	沙角 C	烟煤	7.0	30~38	23~24	7~18	13.4	29.4	29.2	1.73	550~600
6	吴泾	烟煤	16.45	35~37	21~23	8~14	13.2	31.2	30.3	2.21	540
7	外高桥	烟煤	16.45	32~36	21~24	8~14	13.2	29.5	31.0	2.11	580
8	沙角 A	烟煤	8.00	33~35	21~24	18~24	22.8	26.3	31.7	1.82	610
9	秦皇岛	烟煤	12.00	34~36	19~22	24~32	31.8	23.9	34.2	1.85	—
10	嘉兴	烟煤	14.00	35~37	22~24	8~13	12.2	31.6	30.5	2.31	550
11	珠江	烟煤	11.69	32~36	20~23	14~22	20.4	27.1	30.6	1.73	550~600
12	妈湾	烟煤	9.61	32~36	20~24	13~30	23.8	25.9	31.9	1.80	550~610
13	铁岭	烟煤	13.57	38~42	17~23	33~37	40.5	23.8	38.9	2.34	530
14	三门峡	烟煤	3.60	24~32	17~23	20~29	25.4	21.6	27.8	0.72	670
15	首阳山	烟煤	13.89	32~38	19~21	25~32	33.1	23.4	34.7	1.84	595~620
16	曲靖	烟煤	11.76	26~32	19~20	28~31	33.4	19.3	33.2	1.17	—
17	邹县	烟煤	11.67	38~42	21~24	16~22	21.5	31.4	32.5	2.72	590
18	靖远	烟煤	9.75	28~33	21~24	16~22	21.1	24.1	31.6	1.51	580
19	常熟	烟煤	6.84	28~35	20~22	19~24	23.1	24.2	29.4	1.21	600
20	望亭	烟煤	7.00	23~27	20~22	23~26	26.3	18.4	30.7	0.80	690
21	福州	烟煤	9.61	31~35	22~24	14~20	18.8	26.8	31.3	1.81	580
22	大连	烟煤	9.61	31~34	22~24	15~20	19.4	26.2	31.6	1.78	580
23	德州	贫煤	7.03	11~16	20~24	24~27	27.4	9.8	32.6	0.33	790
24	石门	贫煤	8.33	14~18	17.5~22	27~37	34.9	10.4	33.0	0.38	—
25	潍坊	贫煤	6.00	14~17	21~23	22~28	26.6	11.4	31.9	0.38	—