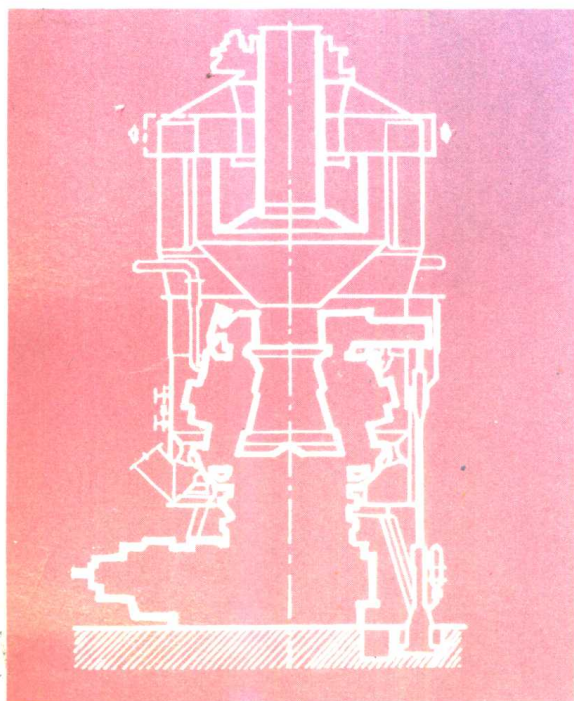


制粉系统设计与运行

贾鸿祥 主编



水利电力出版社

制粉系统设计与运行

贾鸿祥 主编

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书讲述了制粉系统及其主要部件的工作原理、设计计算方法及运行。全书共分七章，主要内容包括电厂锅炉用煤的磨制特性和煤粉的主要性质；给煤、给粉、输粉和煤粉分离设备；低速钢球磨煤机、中速磨煤机和风扇磨煤机及其制粉系统；制粉系统热力计算和空气动力计算；制粉系统及其主要部件的运行等。

本书可供电力部门、火力发电厂及有关科研和设计单位的工程技术人员阅读和参考，也可作为高等学校电厂热能动力、热能工程等专业的选修课教材。

制粉系统设计与运行

贾鸿祥 主编

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

北京市朝阳区小红门印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 8.375印张 221千字

1995年5月第一版 1995年5月北京第一次印刷

印数 0001--2630册

ISBN 7-120-02353-5/TK·340

定价 10.90元

前 言

本书是作者在多次讲授该课的基础上，总结教学实践，吸收国内外有关研究、设计院所的最新科研成果编写的。全书详细地论述了电站煤粉锅炉制粉系统的设计计算方法和运行实践的诸多问题；是国内第一本全面阐述制粉系统理论与实践的科技书，也可作为电厂热能动力专业选修课教材。

本书由西安交通大学贾鸿祥副教授主编(编写第二、三、四、五、七章)，山东工业大学符柔则副教授参编(编写第一、六章)。

本书由山东工业大学张梦珠教授主审。在审稿过程中对书稿提出了宝贵意见，编者根据主审的建议对原稿作了适当的修改和补充。在此对张梦珠教授致以深切的谢意。

在本书编写过程中，得到东北电力学院袁荣泉教授的大力帮助，西安热工研究所张安国、赵仲琥高级工程师和许传凯副总工程师（教授级高工）提供了大量最新资料，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

1994. 11

EAC 26/174 04

目 录

前 言

第一章 煤的磨制特性	1
第一节 电厂用煤特性及分类	1
第二节 煤的可磨性指数	7
第三节 煤的磨损指数	12
第四节 煤粉的主要性质	17
第二章 给煤、给粉、输粉和煤粉分离设备	24
第一节 给煤、给粉和输粉设备	24
第二节 钢球磨煤机配用的粗粉分离器	36
第三节 钢球磨煤机配用的细粉分离器	54
第四节 中速磨煤机配用的分离器	60
第五节 风扇磨煤机配用的分离器	67
第三章 钢球磨煤机及其制粉系统	72
第一节 钢球磨煤机的应用	72
第二节 钢球磨煤机的工作特性	79
第三节 钢球磨煤机制粉系统	90
第四节 钢球磨煤机出力和消耗功率的计算	104
第五节 钢球磨煤机的选型	114
第四章 中速磨煤机及其制粉系统	118
第一节 中速磨煤机的工作原理及应用	118
第二节 中速磨煤机制粉系统	125
第三节 中速磨煤机类型的选择	131
第四节 中速磨煤机配置台数和裕量的选择	138
第五节 中速磨煤机的选型	140
第五章 风扇磨煤机及其制粉系统	164
第一节 风扇磨煤机的类型及其适用范围	164
第二节 风扇磨煤机制粉系统	169

第三节	S型风扇磨煤机的选型计算	181
第四节	风扇磨煤机及其制粉系统的运行问题	187
第六章	制粉系统热力计算	193
第一节	干燥剂量 g_1 的计算	193
第二节	干燥剂初温 t_1 的计算	196
第三节	干燥剂组成成分的计算	201
第四节	制粉系统末端干燥剂含湿量及露点计算	205
第五节	煤粉与一次风混合物温度的计算	209
第六节	制粉系统主要管道流量的计算	210
第七节	制粉系统热力计算程序	219
第七章	制粉系统的空气动力计算	222
第一节	管道的阻力	222
第二节	制粉系统部件的阻力	233
第三节	制粉系统的阻力	245
第四节	制粉系统输粉管道中风粉的均匀分配	248
参考文献		258

第一章 煤的磨制特性

第一节 电厂用煤特性及分类

一、我国电厂用煤概况

我国发电用煤量占全国原煤耗量的 $1/4$ 左右，居工业用煤的首位。

电站锅炉是按一定的煤种和煤质特性设计制造的。煤质特性主要是煤的发热量、固定碳、挥发分、灰分、水分、硫分以及灰的组成和灰的熔融特性等。此外还包括煤的可磨性指数和磨损指数。煤种不同，锅炉的炉型、结构、燃烧器及燃烧系统的型式也不相同。甚至燃料输送系统、有关辅机和附属设备的选型与煤的这些特性也有密切的关系。不同煤种的煤质特性差异是很明显的，即使是同一类煤，随产区、矿点、开采年份和深度不同，其低位发热量、灰分含量的变化范围也是比较大的。实际用煤中有的电厂还掺入各类洗中煤、洗矸煤等劣质燃料，使煤质的变化幅度更加扩大。

由于我国发电用煤种类繁多，煤矿星罗棋布，煤矿、电厂和运输各方面的协调工作十分困难。长期以来，无论是锅炉制造部门在设计煤种选择上，或是煤炭部门的产、运、销各环节以至电厂配煤掺烧等方面，均存在着不同程度的被动性。

实际煤种与设计煤种的差异或煤质劣化，都会对锅炉运行的安全性和经济性带来很大的影响。为解决由于煤质不符合要求而引起的锅炉出力降低、投油量增大、结渣、磨损等一系列问题，迫使电厂对锅炉设备进行程度不同的更新、改造，设备完善工作花费了大量的人力和资金。

因发电用煤品种的广泛，急需建立一个能确切评价发电用煤的分类标准，使其作为新建电厂设计，已投产电厂技术改造，煤

矿产区制订工业用煤标准,煤炭资源用途评价,煤炭分配、调运及煤炭开发、加工规划,以至商品煤按质计价的依据。

二、发电用煤分类

我国现行煤炭分类方法是以干燥无灰基(可燃基)挥发分的产率,和最大胶质层厚度作为分类标准的。该方法主要是根据炼焦工业的需要而制定的。按现行分析方法,将1g干燥煤粉试样,隔绝空气在900℃下加热7min,热分解析出的汽态及气态物质的质量百分比即为挥发分产率;最大胶质层厚度表示煤的结焦性,它越大,结焦性越强。此分类方法对发电用煤并不完全合适。如贫煤和瘦煤,最大胶质层厚度是不同的,但对于煤粉燃烧过程来说,二者几乎没有什么差别。同样,弱粘煤和不粘煤、气煤和肥煤,在燃烧特性上差别也不大。因此,对于发电用煤来说,目前的分类方法在烟煤范围内分得过细;而在无烟煤、褐煤范围内,又显得过于笼统。此外一些对锅炉燃烧过程有重要影响的特性,却没有作为分类指标。

为了能更合理地利用煤炭,为运行锅炉配给质量适宜的煤种,并严格按照不同煤质等级进行新机组设计和现有机组的技术改造,使电厂能获得较大的技术经济效益和社会效益,西安热工研究所和北京煤化学研究院,共同提出了我国发电煤粉锅炉用煤分类标准GB7562—87(VAMST),如表1-1。

该国标是以煤的干燥无灰基挥发分 V_{daf} 、干燥基灰分 A_d 、收到基水分 M_{ar} 、干燥基全硫 $S_{d,t}$ 和灰熔融性软化温度 ST 作为主要的分类指标,以收到基低位发热量 $Q_{ar,net,p}$ 作为 V_{daf} 和 ST 的辅助分类指标。因 $Q_{ar,net,p}$ 是 V_{daf} 、 A_d 、 M_{ar} 、 $S_{d,t}$ 的函数,所以 $Q_{ar,net,p}$ 是一个综合指标。其数值大小标志着燃烧过程炉内温度水平的高低。表1-1中各分类指标 V 、 A 、 M 、 S 、 ST (即挥发分、灰分、水分、硫分、灰熔融性软化温度)等级的划分,是根据锅炉燃烧安全、经济性等方面的现场统计资料和非常规的煤质特性实验室指标数据,通过有序量最优化分割法计算,并结合经验确定的。

表 1-1 发电煤粉锅炉用煤我国分类标准 (VAMST) *

分类指标	煤种名称	等级	代号	分 级 界 限	辅助分类指标限值	鉴 定 方 法
挥发分 V_{daf} ①	超低挥发分无烟煤	特级	V_0	$\leq 6.5\%$	$Q_{ar, net, p} > 23 \text{ MJ/kg}$	煤的工业分析方法 (GB212—77) 煤的发热量测定方法 (GB213—87)
	低挥发分无烟煤	1级	V_1	$> 6.5\% \sim 9\%$	$Q_{ar, net, p} > 20.9 \text{ MJ/kg}$	
	低中挥发分贫瘦煤	2级	V_2	$> 9\% \sim 19\%$	$Q_{ar, net, p} > 18.4 \text{ MJ/kg}$	
	中挥发分烟煤	3级	V_3	$> 19\% \sim 27\%$	$Q_{ar, net, p} > 16.3 \text{ MJ/kg}$	
	中高挥发分烟煤	4级	V_4	$> 27\% \sim 40\%$	$Q_{ar, net, p} > 15.5 \text{ MJ/kg}$	
	高挥发分烟褐煤	5级	V_5	$> 40\%$	$Q_{ar, net, p} > 11.7 \text{ MJ/kg}$	
灰 分 $A_d (A^s)$ ②	常灰分煤	1级	A_1	$\leq 34\% (\leq 7)$		煤的工业分析方法 (GB212—77)
	高灰分煤	2级	A_2	$> 34\% \sim 45\% (> 7 \sim 13)$		
	超高灰分煤	3级	A_3	$> 45\% (> 13)$		
表面水分 M_t	常水分煤	1级	M_1	$\leq 8\%$		煤中全水分的测定方法 (GB211—84) 煤的工业分析方法 (GB212—77)
	高水分煤	2级	M_2	$> 8\% \sim 12\%$	$V_{daf} \leq 40\%$	
	超高水分煤	3级	M_3	$> 12\%$		

续表

分类指标	煤种名称	等级	代号	分 级 界 限	辅助分类指标限值	鉴 定 方 法
全水分 M_t	常水分煤	1级	M_1	$\leq 22\%$	$V_{daf} > 40\%$	煤中全水分的测定方法 (GB211—84) 煤的工业分析方法 (GB212—77)
	高水分煤	2级	M_2	$> 22\% \sim 40\%$		
	超高水分煤	3级	M_3	$> 40\%$		
全硫 $S_{d,t}(S_t^1)^{③}$	低硫煤	1级	S_1	$\leq 1\% (\leq 0.2)$		煤中全硫的测定方法 (GB214—83)
	中硫煤	2级	S_2	$> 1\% \sim 2.8\% (\sim 0.2 \sim 0.55)$		
	高硫煤	3级	S_3	$> 2.8\% (> 0.55)$		
煤灰熔融性 软化温度 ST	不结渣煤	1级	ST_1	$> 1350^\circ\text{C}$	$Q_{ar,net,p} > 12.6\text{MJ/kg}$	煤灰熔融性的测定方法 (GB219—74) 煤的发热量测定方法 (GB213—87)
	易结渣煤	2级	ST_2	不 限	$Q_{ar,net,p} \leq 12.6\text{MJ/kg}$	
				$\leq 1350^\circ\text{C}$	$Q_{ar,net,p} > 12.6\text{MJ/kg}$	

* 煤的采样按商品煤采样方法 (GB475—83)；煤样缩制按煤样的制备方法 (GB474—83)。

① $Q_{ar,net,p}$ 低于下限时应归入 V_{daf} 数值较低的 1 级。

② $A^z = 4.1816 A_{ar} / Q_{ar,net,p}$ ， $Q_{ar,net,p}$ 的单位为 MJ/kg。

③ $S_t^1 = 4.1816 S_{ar} / Q_{ar,net,p}$ ， $Q_{ar,net,p}$ 的单位为 MJ/kg。

1. 煤着火、燃烧特征指标的确定

煤的着火、燃烧特征指标是发电用煤的首要分类指标。近年来表征煤燃烧特性的非常规实验室指标有：煤的燃烧分布曲线、着火温度 t_i 、可燃性指数 C ，及美国FW公司提出的反应指数 R 、法国燃料动力研究所的熄火温度等。其中无论是静态的或是动态的，均属规范性较强的指标，在使用上尚有一定的局限性。为把这些非常规实验室着火、燃烧特征指标反映到煤的固有特性——变质程度上去，曾对煤的干燥无灰基挥发分 V_{daf} 和上述非常规指标进行相关分析。结果表明，在一定的煤质灰分范围内， V_{daf} 确能表征煤的着火、燃烧特性。为了正确地划分煤的类别，用数理统计上的最优分割法，求得各 V_{daf} 等级界限值的最优解。

这样分割出的 V_{daf} 等级与单纯挥发分产率，在概念上有所不同。前者实际上是一个包括了全部实验室非常规着火特征指标和现场锅炉燃烧特性在内的综合性着火燃烧特征指标。

炉内燃烧稳定性不仅取决于煤质挥发分，而且还与灰分和水分有关。原煤灰分和水分增加，发热量降低，理论燃烧温度下降，直接影响燃烧稳定性。研究认为，综合煤质灰分、水分对着火、燃烧的影响，以反映炉内温度水平的 $Q_{ar, net, p}$ 作为 V_{daf} 的辅助分类指标是恰当的。

2. 燃煤灰分、水分和硫分的划分界限

煤中灰分、水分和硫分均属煤中有害杂质，且变化范围较大，在很大程度上决定于成煤过程和煤炭产运过程中外来因素的影响。它们不仅影响锅炉本体和尾部受热面的结构布置、材质选择，而且还对锅炉辅助系统设计和运行有直接的影响。在评价灰分、水分和硫分对锅炉的影响时，应以相对发热量的折算值来考虑。

根据大量的统计资料，利用最优分割法，并结合电厂运行实践，按灰分将发电用煤划分为三个等级。其中常灰分煤和高灰分煤，这二级主要区别在运行经济性方面。当锅炉燃用超高灰分煤时，除运行经济性大幅度下降外，锅炉辅助系统和对流受热面的磨损，事故率及运行维护工作量等都显著增加。

燃煤折算水分直接影响炉内辐射和对流受热面的设计尺寸和两者的比例。燃煤外在水分直接影响输煤及制粉系统的设计和运行。对变质程度较高的煤种 ($V_{daf} \leq 40\%$)，若根据表面水分确定为常水分煤，则输煤系统一般来说运行正常；高水分煤将会发生原煤斗、落煤管堵煤现象，若为直吹式制粉系统，则直接威胁运行安全性。超高水分煤，一般电厂几乎无法直接使用。

对低变质程度的煤种 ($V_{daf} > 40\%$)，表面水分对输煤系统堵煤的影响不是很突出。而燃煤全水分 M_t 的大小，影响制粉系统的干燥出力和干燥剂的选择，故按 M_t 的大小将煤分成三个级别。

根据燃煤电厂煤质折算硫分与实测烟气酸露点之间的关系，对折算硫分进行最优分割。由最优分割点结合电厂运行经验，将发电用煤按硫分也划分为三个级别。

3. 煤灰沾污、结渣特征指标

表征煤灰沾污、结渣的性质，传统上用灰熔融性变形温度 DT 、灰熔融性软化温度 ST 和灰熔融性液化温度 FT 来表示。其中 DT 往往不易测准。当 $FT > 1500^\circ\text{C}$ 时，因试验设备限制，经常测不到具体数值。为便于简化，我国发电用煤的煤灰熔融性多以 ST 表示。从总体上说，形成炉内沾污、结渣是煤灰特性与炉内温度水平综合影响的结果。从煤质特性来说，燃煤发热量大体上能反映出炉内温度水平。由大量的统计资料，确定了 ST 、 $Q_{ar,net,p}$ 的划分界限。发现随 $Q_{ar,net,p}$ 的增加，形成结渣的煤灰 ST 界限值亦相应增加。相反，若 $Q_{ar,net,p}$ 较低，则炉内温度水平较低，即使 ST 很低，也不会引起结渣。因此，国家标准中以煤灰 ST 作为判别炉内沾污、结渣程度的特征指标，并以 $Q_{ar,net,p}$ 作为辅助分类指标。

VAMST 发电用煤分类标准，给锅炉结构设计和设备选择提供了依据。如各灰分等级所相应的锅炉燃烧器、受热面、制粉、吹灰系统设计原则；各水分等级所相应的输煤、制粉系统设计原则；各硫分等级所相应的空气预热器设计原则；各灰熔融性等级

所相应的燃烧器、炉膛、吹灰、输煤系统设计原则等都是与发电用煤分类标准密切相关的。

第二节 煤的可磨性指数

一、煤的磨制机理

煤是一种脆性物质，在机械力的作用下可以被粉碎成煤粉。磨煤机内的煤被磨成粉主要有三种作用形式，即撞击、碾磨和压碎，如图1-1所示。不同的磨煤机内，其制粉方式可能是其中的一种、两种或三种兼有。

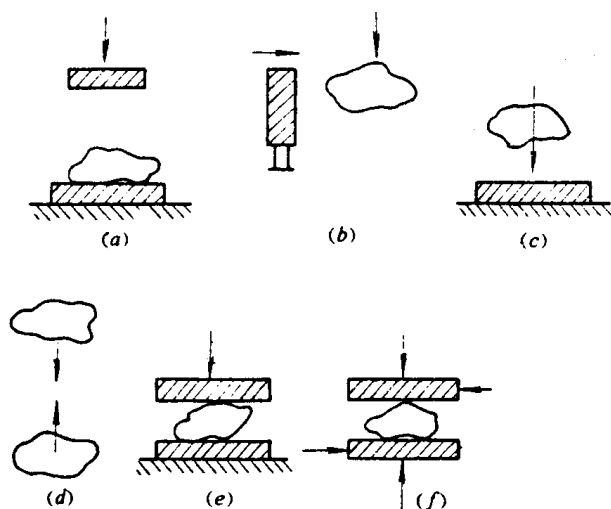


图 1-1 磨制煤粉工作原理

(a), (b), (c) 磨煤部件与煤块相互撞击; (d) 运动的煤块相互撞击; (e) 压碎; (f) 碾磨

利用压碎方法来磨制煤时，煤块被夹持在两个磨煤部件的表面间，在外力作用下煤块由于内应力的增大而被压碎。碾磨是依靠煤块与运动的磨煤部件间的摩擦力，同时在磨煤部件上施加压力而使煤被粉碎。

高速锤击式磨煤机和风扇磨煤机中，撞击破碎是主要方式，

当然煤粒在磨煤部件表面上的碾磨作用也是存在的。中速磨煤机中，主要利用压碎和碾磨。

低速钢球磨煤机，大块煤是由落下钢球撞击而被破碎的，细的研磨作用是在钢球之间，或钢球与护甲之间进行的。

二、煤的可磨性指数

煤被磨碎成煤粉的难易程度取决于煤本身的特性。各种煤的机械强度不同，脆性不同，可磨性就不同。为了表征煤被磨成煤粉的难易程度，提出了可磨性指数的概念。不同于水分、灰分或发热量，这一系数不是煤的一项固有特性，而是只代表煤在一特制设备上，将煤磨成煤粉的相对难易程度。

把煤磨碎成煤粉需对煤做功。煤的可磨性指数，是指在空干状态下，将标准煤样和被测煤样，由相同粒度磨碎到相同细度所消耗的能量之比。可磨性指数可用下式表示

$$K_{km} = \frac{E_b}{E_x} \quad (1-1)$$

式中 E_b ——磨制标准煤样所消耗的能量；

E_x ——磨制被测煤样所消耗的能量。

可磨性指数是无量纲的物理量。其数值大表示该煤容易破碎成粉，单位耗能少；而数值小则相反。

上述定义中的相同粒度、相同细度实际上是难以实现的，因此有必要将定义的形式进行转化。

煤被研磨的过程，也是煤产生新的自由表面的过程。Rittinger破碎定律指出：研磨物料所消耗的功与新增的表面积成正比

$$W = W_A S \quad (1-2)$$

式中 W ——研磨所消耗的功；

W_A ——产生单位新表面积所需的功；

S ——研磨后新增的表面积。

如果将磨制后的煤粉表面积，近似的认为是新增的表面积。根据煤粉颗粒的分布规律，经过理论换算得到研磨后新增的表面

积和 $\left(\ln \frac{100}{R}\right)^{\frac{1}{p}}$ 成比例。这里 R 是煤样在规定孔径筛上的筛余量， p 为研磨机的特性系数。因此，研磨所消耗的功与 $\left(\ln \frac{100}{R}\right)^{\frac{1}{p}}$ 成比例。

在消耗一定能量的条件下，把质量相同、由规定相同粒度的不同煤样磨制成煤粉，若煤粉细度越细，即 R 值越小，表示该煤种越容易被粉碎，则可磨性指数就越大，反之亦然。如果保持磨制煤粉消耗的能量不变，根据磨制后被测煤样和标准煤样的煤粉细度，也可确定可磨性指数

$$K_{km} = \left(\frac{\ln \frac{100}{R_x}}{\ln \frac{100}{R_b}} \right)^{\frac{1}{p}} \quad (1-3)$$

式中 R_x ——被测煤样煤粉在规定孔径筛上的筛余量，%；

R_b ——标准煤样煤粉在规定孔径筛上的筛余量，%。

实验室测定煤样可磨性指数的仪器设备，就是根据上述原理设计的。

三、Hardgrove 法

测定煤的可磨性指数有各种不同的方法，但基本原理是一样的。除原苏联及东欧某些国家外，世界上普遍采用 Hardgrove 法，简称哈氏法。我国于 1981 年制订了 GB2565—81《煤的可磨性试验方法》，此试验方法即 Hardgrove 法。

测定哈氏可磨性指数，是将 50g 一定粒度的空气干燥煤样，放入标准中速球磨机，即哈氏可磨性试验仪（俗称哈氏磨）中旋转 60 转进行破碎。施加在钢球上的总作用力为 284 N。而后将所得煤粉进行筛分。根据筛分余量的多少，可按下式计算哈氏可磨性指数 HGI ：

$$HGI = 13 + 6.93 G_{71} \quad (1-4)$$

式中 G_{71} ——通过孔径为 0.071 mm 筛的试样质量，g。

哈氏可磨性测定仪如图1-2所示。

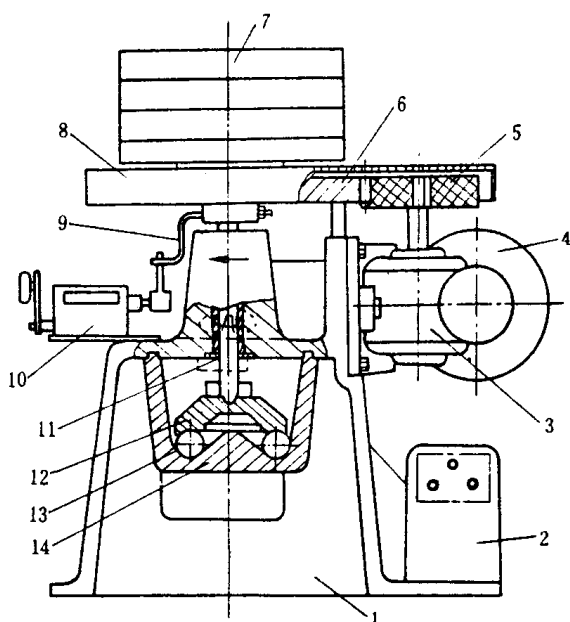


图 1-2 哈氏可磨性测定仪

- 1—机座；2—电气控制盒；3—蜗轮盒；4—电动机；5—小齿轮；
6—大齿轮；7—重块；8—护罩；9—拔杆；10—计数器；11—主轴；
12—研磨环；13—钢球；14—研磨碗

电动机通过蜗轮蜗杆和一对齿轮减速，带动主轴和研磨环以20r/min速度运转。研磨环驱动研磨碗内的8个钢球转动，钢球直径为25.4mm。

四、ВТИ法

ВТИ法为全苏热工研究所制定的测量煤的可磨性指数的方法。

哈氏法只适用于原始组织比较均匀的煤种，如无烟煤和部分烟煤。对于夹杂有黄铁矿、矽石或砂子的煤种，用哈氏磨测定的可磨性指数，只在一定条件下才有效。对于这类煤种，最好用500~1000kg煤样在研磨原理与大型磨煤机研磨原理相同的试验磨上进行试磨，根据试磨结果来判断煤的破碎性能和可磨性指数

等。

即使用哈氏法测定无烟煤和烟煤，也只是哈氏可磨性指数在30~100内，测定结果才比较稳定。对特大及特小哈氏可磨性指数的煤样，其测定结果的可靠性往往较差。

在70年代以前，我国测定可磨性指数多用原苏联全苏热工研究所提出的方法。该可磨性指数以 K_{km}^{BTI} 表示。该法采用瓷质滚筒式球磨机破碎煤样，由于设备笨重，操作不便等，我国已很少采用。1984年苏联重新制定了BTI可磨性测定方法，且定为国家标准（ГОСТ15489—84）。新方法改进了测定装置，简化了煤样制备，缩短了测定时间。适用于褐煤、烟煤、无烟煤、可燃页岩等。

原苏联标准规定：以顿巴斯无烟煤屑为标准煤样，该样品经6min或540r研磨以后，其 $R_{90}=69.6\%$ ，即式（1-3）中的 R_b 值。研磨机特性系数 P 值为1.20。于是被测煤样的可磨性指数 K_{km}^{BTI} 的数值可按下式计算

$$K_{km}^{BTI} = 2.32 \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0.83} \quad (1-5)$$

式中 R_{90} ——试验煤样磨制后在90 μm 筛子上筛余量，%。

试验中，取50g粒度为1.25~3.2mm的空气干燥煤样，在体积为1.3L的钢鼓内磨制6min，然后筛分测定煤粉细度 R_{90} ，按式（1-5）即可确定被测煤样的可磨性指数。

西安热工研究所借鉴了苏联测定装置的主要参数，研制出KM-88型BTI可磨性测定仪。它对无烟煤、烟煤、褐煤及可燃页岩具有广泛的适应性。实验数据与若干电厂磨煤机实际可磨性相吻合。

五、不同测试方法可磨性指数间的关系

哈氏可磨性指数与BTI可磨性指数之间，常用下列公式进行互换

$$K_{km}^{BTI} = 0.0034 (HGI)^{1.25} + 0.61 \quad (1-6)$$