

高等学校教学用书

冶金燃气

542.7

冶金工业出版社

前 言

本书是根据1982年冶金高等院校教材会议制订的教材规划编写的，主要供煤化工专业作为教学用书，也可供冶金、热能专业及与燃气能源有关的工程技术人员参考。

全书共七章，内容包括：高炉煤气、转炉煤气、煤气化煤气、天然气、液化石油气及直立炉干馏煤气等的制取原理，生产过程和主要设备的构造及影响其产量与质量的因素；钢铁冶金企业的煤气平衡、煤气输送、调节、贮存和安全技术。考虑到炼焦煤气的生产、净化等内容已在炼焦化学工艺中叙述，本书仅就影响煤气组成和产量的因素进行综合分析。对天然气及液化石油气只作扼要介绍。本书适用于40学时教学。

本书系统地阐述了本学科的基本理论和基础知识，内容比较丰富，层次分明，系统性强，反映出国内燃气的现状，介绍了国内外一些新技术和发展的动向。

该书初稿于1983年初完成，后经武汉钢铁学院焦化专业三届学生试用。1985年初召开了审稿会，参加审稿会的有武汉钢铁设计研究院、鞍山钢铁学院、河北矿冶学院、鞍山焦化耐火设计研究院、武汉钢铁学院等单位有关同志。根据审稿会的意见，编者对全书作了修改。本书得到了武汉钢铁设计研究院潘华珊、徐平洋，鞍山焦化耐火设计研究院张孔祥，鞍山冶金热能研究所冯安祖，武汉钢铁公司燃气厂邹明森及武汉钢铁学院焦化教研室的同志的支持与帮助，在此表示衷心的感谢。由于编者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，希读者批评指正。

编者

1985年10月

目 录

第一章 冶金企业的副产煤气	1
第一节 高炉煤气	1
第二节 焦炉煤气	16
第三节 转炉煤气	21
第二章 煤气化的基本过程及物理化学基础	30
第一节 气化的基本过程	30
第二节 气化过程的化学反应	32
第三节 气化反应的动力学基础	39
第三章 发生炉煤气	47
第一节 空气煤气、水煤气和混合发生炉煤气	47
第二节 混合发生炉煤气的各项气化指标	53
第三节 气化用固体燃料的要求	58
第四节 气化过程的计算	61
第五节 发生炉构造	68
第六节 混合煤气发生站	74
第四章 其它气化方法	78
第一节 移动床加压气化	78
第二节 小颗粒燃料的流化床气化	88
第三节 粉煤气流床气化	94
第四节 气化方法的比较与选择	99
第五章 天然气与其它燃气	103
第一节 天然气	103
第二节 液化石油气	107
第三节 连续式直立炭化炉煤气	110
第六章 冶金企业的煤气平衡	114
第一节 煤气用户的特性	114
第二节 煤气供应原则	118
第三节 煤气平衡的编制	120
第七章 煤气的输配、调节、贮存和安全技术	126
第一节 煤气管道及其附属设备	126
第二节 煤气混合站和加压站	131
第三节 煤气管网压力的波动与调节	135
第四节 煤气贮气柜	139
第五节 煤气安全技术	143
主要参考资料	148

第一章 冶金企业的副产煤气

高炉煤气、焦炉煤气和转炉煤气是冶金生产中的主要气体燃料，以高炉煤气和焦炉煤气应用最为广泛，它们在燃料平衡中占有很重要的地位，高炉煤气和焦炉煤气所提供的热量通常占钢铁联合企业总热量收入的80%以上。

第一节 高 炉 煤 气

高炉煤气是高炉炼铁的副产品，主要可燃成分为CO，H₂和CH₄的含量很少，有大量的N₂及CO₂，所以它的热值低，一般只有3000~3800千焦/标米³。

高炉是冶金生产中燃料的巨大消费者，高炉燃料的热量约有60%转移到高炉煤气中，高炉每消耗1吨焦炭约可产生3000~4000米³的高炉煤气。充分有效地利用高炉煤气，对降低吨钢能耗和节约燃料有重大意义。在冶金生产中，高炉煤气的主要用户是热风炉、焦炉、蒸气锅炉，还可与焦炉煤气混合使用于平炉及其它加热炉等。

高炉煤气的理论燃烧温度约为1350~1450℃，在多数情况下必须将空气和煤气预热来提高它的燃烧温度，才能满足用户的要求。高炉煤气从高炉出来时，含有大量粉尘，约为15~80克/米³或更多，在使用前必须经过除尘处理。

由于高炉煤气中可燃成分CO含量不到30%，故燃烧速度慢、火焰长，若用于焦炉加热可使高向加热均匀，适当降低了燃烧室温度，故只要高炉煤气量稳定，含尘量低于15毫克/标米³，焦炉炉体和设备比较严密，就应尽量用于焦炉加热，以节约焦炉煤气供炼钢、轧钢、烧结、民用或化肥生产，有利于综合利用和平衡冶金企业内部的热能。使用煤气时应特别注意防止CO的中毒事故。

一、高炉煤气的生成

在现代高炉内，由风口吹入的热风，进入焦炭回旋区使焦炭燃烧、生成大量的CO，鼓风所带入的水蒸气也很快分解成H₂和CO，因此，在炉缸处所形成的煤气除CO、N₂外还有少量的H₂。煤气在上升过程中其组成、煤气量不断发生变化（图1-1）。煤气由下向上沿着料柱间隙进入滴下区（或滴熔带）、软化半融区（或熔融带），煤气中CO量逐渐增加，这是因为铁、锰、硅、磷等的氧化物直接还原生成一部分CO（ $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$ ，

$\text{SiO}_2 + 2\text{C} = \text{Si} + 2\text{CO}$ ， $\text{MnO} + \text{C} = \text{Mn} + \text{CO}$ ， $\frac{1}{2}\text{P}_2\text{O}_5 + \frac{5}{2}\text{C} = \text{P} + \frac{5}{2}\text{CO}$ ），同时，部分碳酸盐分解放出的CO₂与碳作用生成CO，在软化半融区上部及块状区煤气中CO含量逐渐降低，而CO₂逐渐增加，这主要是铁矿石的间接还原消耗一部分CO而生成CO₂，另一部分CO₂则是碳酸盐分解生成的，此时总煤气量（体积）有所增加。

H₂在上升过程中，部分参加了还原，含量渐趋减少，但在炉料水分（特别是结晶水）较多时，由于水煤气反应生成H₂，会增加煤气中的H₂含量。

CH₄在高炉内生成量不多（一部分来自焦炭的挥发分，部分是由煤气中的氢与炭作用而生成），一般在煤气中的相对含量变化不大，全焦冶炼时，炉顶煤气CH₄只有0.2~

0.5%。

煤气中 N_2 的体积基本不变，只是煤气量增加时，相对含量有所降低。

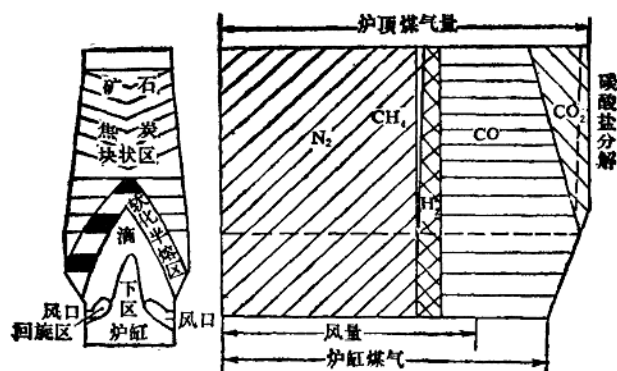


图 1-1 沿高炉高度煤气组成的变化

二、影响高炉煤气成分和含尘量的因素

1 高炉煤气成分受到下列因素的影响

(1) 燃料消耗量：炼制单位生铁燃料消耗量增加时，加入高炉内的碳素到达风口前燃烧的数量也相对增加，消耗的风量增加，进入煤气中的 N_2 的总量也相应增加， CO 与 CO_2 总含量则相应地降低。由于碳素的增加，直接还原生成的 CO 量增加，间接还原生成的 CO_2 在煤气中的总量相对减少。反之，燃料消耗量减少时， CO 与 CO_2 的总量和 CO_2 将增加， $CO_2/(CO_2 + CO)$ 之比增加。

(2) 熔剂消耗量：熔剂加入量增加，由于碳酸盐的分解煤气中 CO_2 增多， CO 与 CO_2 总含量升高， N_2 的含量相对降低。

(3) 直接还原度 (FeO 由碳直接还原的铁量与高炉内还原的总铁量之比)：在其它条件不变时（如焦比），直接还原度增加，煤气中 CO 增多， CO_2 减少。但由于直接还原消耗了部分碳，因而到达风口前燃烧的碳量减少，所需的风量也相对减少，煤气中 N_2 的含量相应降低，故 CO 与 CO_2 总含量相对升高。

(4) 铁矿石的性质：铁氧化物的价数越高，在还原过程中所需的 CO 量就越多，因此 CO 转变成 CO_2 将越多。即熔炼 Fe_2O_3 时，煤气中 CO_2 的含量比熔炼 Fe_3O_4 时要高，而熔炼 Fe_3O_4 又要比熔炼 FeO 时来得高。

增加生铁中的硅、锰含量时，因为这些元素皆能被碳直接还原并生成 CO ，所以会增加煤气中 CO 含量，而减少 CO_2 的含量，当冶炼铸造铁时，使煤气中所含 CO 较冶炼钢铁时为多，具体数据见表1-1。

(5) 鼓风成分：空气中经常有一些水蒸气，特别是在加湿鼓风操作时，风中水蒸气就更多，水蒸气与赤热的碳作用生成 H_2 和 CO ，因而增加了煤气中的 H_2 及 CO 与 CO_2 含量，相对地减少了煤气中 N_2 的含量（见表1-2），富氧鼓风时，煤气中 N_2 含量减少， CO 与 CO_2 总含量升高，国外有的高炉采用富氧鼓风，煤气中 CO_2 高达20%以上。

(6) 喷吹燃料：特别是喷吹 H/C 比高的燃料，煤气中 H_2 的含量剧增， N_2 的含量降低， CO 与 CO_2 总含量也降低。

冶炼不同铁种的煤气成分与热值

表 1-1

铁 种	焦 比 (公斤/吨)	高 炉 炉 顶 煤 气 成 分 (%)					热 值 (千焦/标米 ³)
		CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂	
炼 钢 铁	500~750	14~16	24~26	1.0~2.0	0.3~0.8	57~59	3352~3771
	751~950	10~13	27~30	1.0~2.0	0.3~0.8	57~59	3771~4190
铸 造 铁	630~750	11~14	26~30	1.0~2.0	0.3~0.8	58~60	3561~4190
	751~950	9~12	28~31	1.0~2.0	0.3~0.8	58~59	3980~4231
硅 铁	1720~2160	2~5	33~36	2.0~3.0	0.2~0.4	57~59	4609~5028
锰 铁	1620~1760	4~6	33~36	2.0~3.0	0.2~0.5	57~59	4609~5028

鼓风中水分与炉缸煤气成分的关系

表 1-2

		鼓 风 中 水 分 含 量 (体积%)					
		0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
煤气成分 (%)	CO	34.7	35.0	35.2	35.5	35.7	35.9
	H ₂	0.0	0.8	1.6	2.4	3.2	4.0
	N ₂	65.3	64.2	64.2	62.1	61.1	60.1

2. 高炉煤气的炉尘 炉尘是煤气带出来的原燃料粉末，它含有原燃料中所含有的成分，一般炉尘中含铁达30~45%，含碳3~15%，可用它作烧结矿的配料，通常高炉的炉尘量为40~100公斤/吨生铁。高炉煤气的含尘量受下列因素影响。

(1) 原料的物理性质：单位生铁的炉尘吹出量在很大程度上决定于矿石和焦炭的强度及筛分组成，强度差和粉末多的矿石和焦炭，炉尘就多。在配合矿中若热裂矿石配比增大，由于矿石在炉内受热粉化而使炉尘增加。

(2) 鼓入高炉中的风量及炉顶压力：当其它条件相同时，单位时间内鼓入炉内的风量越多，煤气产量就越大，这时煤气的流速就会增大，因而使炉尘排出量增加。当高炉以高压炉顶操作时，由于煤气流速变慢和炉内压损降低，吹出量大为减少，鞍钢改用高压（表压 $0.49 \times 10^5 \sim 0.68 \times 10^5$ 帕）后，每吨生铁的炉尘量约为12~22公斤，比常压时减少19~35%，宝钢大高炉保持炉顶压力 $(1.47 \sim 1.96) \times 10^5$ 帕，炉尘量可控制在15~10公斤/吨铁。

(3) 炼制不同的生铁炉尘量及炉尘组成亦不同：当熔炼硅铁和锰铁时，大量地消耗焦炭，使高炉和煤气的温度增高，引起煤气体积和速度增加，使得灰尘排出量增加。由于温度的增高，能使矿石中的硅、锰、钙、锌、钾和钠等元素升华和挥发，变成气体，当这些元素的蒸气凝结时便形成了非常细的灰尘，大大地增加了煤气净化和输送的困难。

(4) 高炉状态：高炉不顺行，如崩料时，煤气含尘量增加。

三、高炉煤气产量的计算

高炉煤气的发生量一般是根据高炉中碳的平衡来计算的。公式如下：

$$V_{\text{煤气}} = \frac{C_{\text{焦}} + C_{\text{油}} + C_{\text{煤}} + C_{\text{熔}} + C_{\text{料}} - C_{\text{铁}} - C_{\text{尘}}}{\frac{12}{22.4}(\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4)}$$

式中 $V_{\text{煤气}}$ ——每吨生铁发生的煤气量，标米³/吨铁；

$C_{\text{焦}}、C_{\text{油}}、C_{\text{煤}}$ ——分别为每吨生铁消耗的焦炭、油、煤中的固定碳，公斤/吨铁；

$C_{\text{熔}}$ ——每吨生铁消耗的熔剂中的固定碳，公斤/吨铁；

$C_{\text{料}}$ ——炉料（废铁、烧结矿等）中的碳量，公斤/吨铁；

$C_{\text{铁}}$ ——生铁中的含碳量，公斤/吨铁；

$C_{\text{尘}}$ ——炉尘中的含碳量，公斤/吨铁；

$\text{CO}_2、\text{CO}、\text{CH}_4$ ——煤气中这些成分的相应百分数。

计算举例：根据所列某高炉生产统计数字，计算每吨生铁的煤气发生量。原料成分见表1-3。

生铁成分(%)：Fe——94.863；Si——0.955；Mn——0.059；P——0.086；S——0.024；C——4.013

煤气成分(%)：CO₂——15.45；CO——25.05；N₂——57.56；H₂——1.50；CH₄——0.44

燃料消耗(公斤/吨铁)：焦炭(干)——490；煤粉——60

石灰石消耗(公斤/吨铁)：13.36

炉尘量(公斤/吨铁)：76(根据分析炉尘含碳5.48%)

原 料 成 分 (%)

表 1-3

成分 原料	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	FeS	SO ₃	CO ₂
混合矿	51.840	18.000	0.081	13.580	2.518	12.800	0.936	0.081	0.170	—	0.020
石灰石	痕迹	0.401	0.017	54.109	1.011	0.721	0.130	0.011	—	0.072	43.528
成分 原料	C	H	O	N	S	灰 分					
焦 炭	84.60	0.75	0.35	0.85	0.95	12.50					
煤 粉	75.30	3.66	3.56	0.34	0.32	16.82					

计算：

1. 校正焦比 经调查统计生铁挂钩粘罐等损失约占出铁量的0.8%。所以，冶炼一吨生铁的实际焦比为490/1.008=486.11公斤；另外，应扣除炉尘中的碳含量。因此，在炉内参与化学反应的焦炭量为486.11-76×5.48/84.60=481.19公斤。

2. 每吨生铁发生的煤气量

$$V_{\text{煤气}} = \frac{C_{\text{焦}} + C_{\text{油}} + C_{\text{煤}} + C_{\text{油}} + C_{\text{焦}} - C_{\text{焦}} - C_{\text{油}}}{\frac{12}{22.4}(\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4)}$$

(本例高炉未喷油，并用校正后的焦比计算，因此 $C_{\text{焦}}$ 及 $C_{\text{油}}$ 均为零)

$$C_{\text{焦}} = 481.19 \times 0.8460 = 407.09 \text{ 公斤}$$

$$C_{\text{煤}} = 60 \times 0.753 = 45.18 \text{ 公斤}$$

$$C_{\text{油}} = 13.36 \times 0.43528 \times 12/44 = 1.586 \text{ 公斤}$$

$$C_{\text{焦}} = 40.13 \text{ 公斤}$$

$$C_{\text{焦}} \approx 0$$

$$V_{\text{煤气}} = \frac{407.09 + 45.18 + 1.586 - 40.13}{\frac{12}{22.4}(15.45 + 25.05 + 0.44) \times 0.01} = 1886.4 \text{ 标米}^3/\text{吨铁}$$

高炉煤气的回收量，亦可根据下列经验式进行计算：

$$B_1 = (1-a)(3.5 \text{ 焦比} + 4.2 \text{ 煤比} + 5.0 \text{ 油比})，\text{标米}^3/\text{吨铁}$$

式中 B_1 ——高炉煤气回收量，标米³/吨铁；

a ——为煤气的炉顶损失率，根据高炉的设备状态可取3~7%；

系数3.5、4.2、5.0分别表示1公斤焦炭、煤、油发生的煤气体积数，标米³/公斤。

上述经验式主要是根据中型高炉生产统计数据整理而得，用该式计算大型高炉煤气回收量时所得结果略偏高。

四、高炉煤气的净化

从高炉引出的煤气中含有大量灰尘，在输送和使用的过程中，这些灰尘不仅会堵塞煤气管道和用户的设备，还可以引起蓄热室内耐火砖渣化和导热性降低。因此，高炉煤气必须经除尘处理后才能输送和使用。

煤气中灰尘的清除程度，应根据煤气用户对其质量的要求和可能达到的技术条件而定。一般由大、中型高炉、焦炉组成的钢铁联合企业，对于高压操作的高炉，其煤气含尘量要求不超过10毫克/标米³；常压操作的高炉其含尘量不应超过10~20毫克/标米³。此外，为了降低煤气中饱和水含量，还要求净煤气温度不高于40℃；煤气中机械水分应尽量除掉。

根据高炉煤气中灰尘的净化程度，通常将除尘系统分为粗除尘，半精除尘和精除尘三个阶段。

粗除尘阶段：一般只能除去颗粒较大的灰尘，经过粗除尘煤气中含尘一般为1~10克/标米³。所用设备为重力除尘器。

半精除尘阶段：利用洗涤塔或文氏管除去用于式粗除尘所不能除掉的细颗粒灰尘，一般经半精除尘后煤气含尘量可降到500毫克/标米³以下。

精除尘阶段：进一步除掉悬浮于煤气中的固体细粒，经精除尘后煤气中的含尘量可小于10毫克/标米³（有的可达2~3毫克/标米³）。精除尘的设备有文氏管、静电除尘器和洗涤机等，洗涤机由于耗电量大，除尘效率也不高，我国除个别老厂外，多数已不再使用。高压高炉的减压阀组也起一定除尘作用。

1. 高炉煤气的净化系统 高炉煤气净化系统的选择主要决定于煤气用户对质量的要求

求、炉顶煤气压力和炉尘的物理、化学性质等条件。

目前高炉煤气净化有下列几种不同系统：

(1) 高压洗涤塔文氏管系统（如图1-2）：自高炉出来的脏煤气进入重力除尘器，初步除尘后含尘量降到 $6\sim 10$ 克/标米³，经荒煤气管进入洗涤塔，用水喷洒，煤气冷却至 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，并使含尘量降到 $0.5\sim 1$ 克/标米³，然后将半净煤气送入文氏管进一步净化使煤

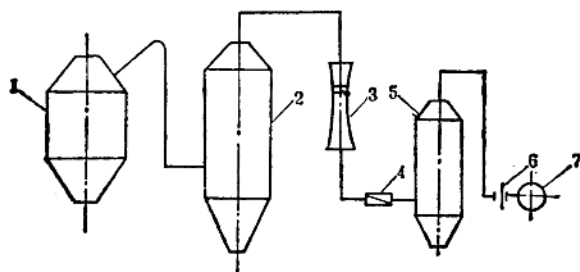
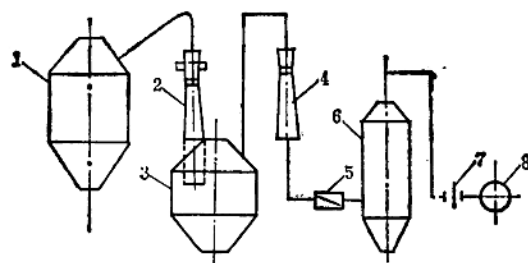
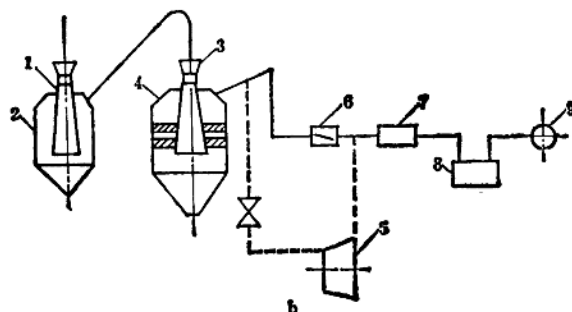


图 1-2 塔后文氏管系统

1—重力除尘器；2—洗涤塔；3—文氏管；4—减压阀组；5—脱水器；6—叶形插板；7—净煤气总管



1—重力除尘器；2—溢流文氏管；3—脱泥器；4—调径文氏管；5—减压阀组；6—脱水器；7—叶形插板；8—净煤气总管



1—一级R型可调文氏管；2—重力式灰泥捕集器；3—二级R型可调文氏管；4—填料式灰泥捕集器；5—余压透平发电机组；6—减压阀组；7—消音器；8—快速切断水封；9—净煤气总管

图 1-3 高压串联调径文氏管系统

气含尘量降到10毫克/标米³以下，再经减压阀组、脱水器使煤气减压并除去煤气中的水滴，脱水后的净煤气进入净煤气管道再送到用户系统。

该系统为国内高压高炉广泛采用的系统，文氏管有采用定径的和调径的两种，调径的更能保证煤气的净化质量。

(2) 高压串联调径文氏管系统（见图1-3）：该系统与塔后文氏管相比，突出的优点是操作维护简便，占地少。在相同的操作条件下，本系统的煤气温度要高些，煤气经过系统的压力降要大些。

图1-3 (b) 为宝钢高炉煤气净化系统，由重力除尘器出来含尘量约5克/标米³的煤气进入一级R型可调文氏管1，该文氏管无溢流箱，为避免灰尘积聚，在喉口上部安设有水嘴连续冲洗，洗涤煤气用水由设在喉口两侧喷水箱的侧壁喷水孔喷入。洗涤后的污水沉降在重力式灰泥捕集器2底部，经自动控制水位的排水装置排出，洗涤后的煤气（含尘约100毫克/标米³，温度50~60℃）自灰泥捕集器肩部排出，经半净煤气管进入二级R型可调文氏管3，二级文氏管的给水方向同一级文氏管，为了提高煤气脱水效果二级R型可调文氏管后安设有填料式（为塑料环填料）灰泥捕集器4，洗涤后的煤气（含尘<10毫克/标米³，温度为49~55℃）自灰泥捕集器的肩部排出进入高炉煤气余压透平发电机组（简称TRT）5，回收高压高炉煤气剩余压力能。在TRT装置中经膨胀压力降低的高炉煤气再经消音器7、快速切断水封8至净煤气总管9。当TRT装置检修停运时，自灰泥捕集器的肩部排出的洗涤后煤气经减压阀组6、消音器7、快速切断水封8至净煤气总管9。

b系统与a系统相比有如下优点：b系统的文氏管喉口设有一个R型调节板，横断面形状类似于椭圆形，其开度与煤气流量呈一次线性的函数关系，这样能精确地控制其压差，保证煤气的净化质量，在文氏管顶部煤气入口处取消了溢流水箱改为预清洗的喷嘴喷水，这样就节省了为确保溢流水箱水平而多消耗的相当数量的钢材；过去国内一般采用的净煤气脱水方法是在减压阀组后，煤气减压至常压再进行脱水，亦即是在湿含量高的情况下脱水，而b系统采用了高压脱水的方法，即在二文后的塑料环填料脱水，这样煤气的饱和水含量就低，在相同的脱水效率下高压脱水的煤气水分含量就低；b系统中减压阀组不喷水，为了减轻噪音在减压阀组后设有消音器。

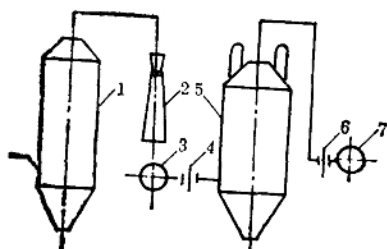


图 1-4 塔后调径文氏管电除尘系统

- 1—洗涤塔；2—调径文氏管；3—半净煤气管；
4—叶形插板；5—电除尘器；6—叶形插板；
7—净煤气管

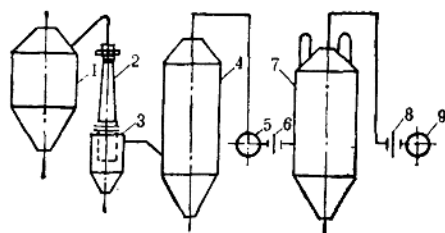


图 1-5 塔前溢流定径文氏管电除尘系统

- 1—重力除尘器；2—溢流文氏管；3—脱泥器；4—冷却塔；5—半净煤气管；
6—叶形插板；7—电除尘器；8—叶形插板；9—净煤气管

(3) 常压洗涤塔文氏管系统(见图1-4和图1-5):高炉炉顶煤气压力经常保持在 0.196×10^5 帕以下时,一般采用塔后调径文氏管电除尘器系统或塔前溢流定径文氏管电除尘器系统,其中文氏管仅作为预精洗装置。塔前溢流定径文氏管与塔后调径文氏管系统相比,在相同操作条件下,可以减少煤气洗涤污水的处理量和煤气冷却塔的容积,但溢流文氏管的喉口在较高的气流速度下易磨损。塔前溢流定径文氏管电除尘器系统也常用作锰铁高炉煤气净化流程。

以上介绍的均为湿式净化系统,它与干式净化相比有以下不足:洗涤水中含有氰化物和硫化物造成污染,因此必须对污水进行处理和水的调质;从热能方面来考虑,洗涤后的煤气温度一般为 40°C 左右,既损失了显热又使煤气夹带水分,降低了煤气的理论燃烧温度;湿式净化系统压头损失大,耗水量也大,一般耗水 $3 \sim 6$ 吨/1000标米³煤气。虽然目前湿式净化高炉煤气系统占绝对优势但随着钢铁工业中大型高压高炉的兴建,随之对节能和对环境保护的要求,高炉煤气净化技术将从目前一般的湿式转向干式的研究与开发,以充分利用炉顶煤气的物理有效能(温度与压力有效能)并进一步提高炉顶煤气余压透平发电装置TRT的发电能力和减少高炉煤气湿式净化系统流程中煤气洗涤水对环境的污染。根据有效能平衡,采用干式净化装置后的TRT综合发电能力将比湿式净化的提高 $20 \sim 30\%$ 。虽然目前干式精净化(出口含尘量一般要求达 $5 \sim 10$ 毫克/标米³以下)和长期持续运行尚存在一定具体问题,但这仍是目前世界上普遍探索的重要课题之一。

2. 煤气净化设备简介

(1) 重力除尘器:重力除尘器的除尘原理是利用煤气流速的突然降低和气流方向的改变使煤气中大颗粒灰尘在重力和惯性力的作用下与煤气流分离,而沉降于除尘器底部。重力除尘器的构造如图1-6所示。煤气从顶部中心管导入,这样可以减少灰尘降落时受反向煤气流的阻碍,所以除尘效率较高。

除尘器直径的大小是根据煤气在除尘器内的流速而定,而流速又与灰尘的粒度组成有关,因此实际设计时往往是根据一些经验数据来确定其直径大小,必须保证煤气在除尘器内的流速不超过 $0.6 \sim 1.0$ 标米/秒,高限适用于高压高炉(如宝钢灰尘的粒度构成为 150μ 以上的约占 50% ,对粒度 150μ 的灰粒沉降速度约为 1 米/秒)。除尘器直筒部分高度决定于煤气在除尘器内的停留时间,一般要保证煤气停留时间为 $12 \sim 15$ 秒。除尘器中心导入管可为直筒状也可做成喇叭状。导入管以下高度决定于贮灰体积,其容量一般应满足三天的除灰量。为了便于清灰,除尘器底部做成锥形,其倾斜角 $\geq 50^\circ$,底部设有排灰装置,可用清灰阀或螺旋清灰器。

(2) 洗涤塔:洗涤有两种作用,一是冷却,把煤气冷却到 40°C 以下,随之也降低了饱和水气含量,二是除尘。

目前采用的洗涤塔有木格填料洗涤塔和空心洗涤塔。它们的工作原理为:煤气由塔的下部入口进入后,自下向上流动与由上向下喷洒的水滴相遇,通过质量与热量的交换,煤气的温度被降低,所携带的灰尘被水滴润湿并彼此凝聚成大颗粒,由于重力作用这些大颗粒离开煤气气流随水流向洗涤塔下部与污水一起经塔底水封排出,经冷却和洗涤后的煤气由塔顶引出。

在填料洗涤塔中,使冷却水沿着洗涤塔截面均匀分布并使其与煤气得到充分接触,这里填料起主要作用。而在空心洗涤塔中,传热面是由水滴表面构成的,因此水滴表面的大

小就决定了空心洗涤塔操作的好坏。近年来由于不断改进喷嘴的结构型式、塔内气流的均匀分布装置以及提高塔内气、水的相对速度，从而强化了空心洗涤塔内部传热传质的强度（设计计算时，容积传热系数一般取 $1466.5 \text{ 千焦/米}^3 \cdot \text{℃} \cdot \text{时}$ ）。生产实践证明，高炉煤气净化系统中心空心洗涤塔的冷却和除尘效果都可与木格填料塔相当。空心洗涤塔与木格填料塔相比，它具有结构简单、节省木材、投资少、建设速度快和维护简便，不易堵塞等优点，因此空心洗涤塔得到广泛应用。

空心洗涤塔的构造如图1-7。大、中型高炉煤气空心洗涤塔内设三层喷嘴，下面二层

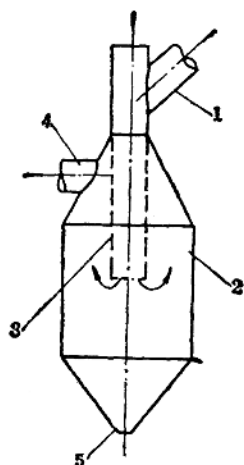


图 1-6 重力除尘器

1—煤气下降管；2—除尘器；3—中心导入管；4—煤气出口管；5—清灰口

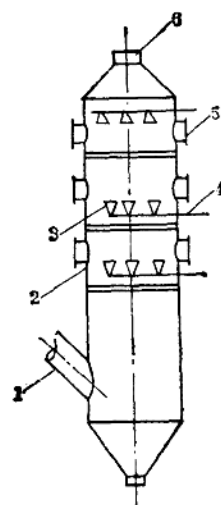


图 1-7 空心洗涤塔

1—煤气导入管；2—洗涤塔外壳；3—喷嘴；4—喷嘴给水管；5—人孔；6—煤气导出管

向上喷，上面一层向下喷。小型高炉煤气空心洗涤塔内设二层喷嘴，上层向下喷，下层向上喷。常用喷嘴形式有碗型和渐开线型，渐开线型不易堵塞。喷嘴的布置应使水滴布满塔内截面。洗涤塔内设2~3层煤气分配栅板，每层互相错开 45° 以保证煤气流在塔内分布均匀，提高冷却和除尘效果。煤气从洗涤塔下部导入，进塔管道与塔壁夹角成 $45^\circ \sim 60^\circ$ ，以使气流入塔后在横断面上分布均匀。

洗涤塔筒体直径与高度系根据煤气在洗涤塔中的平均流速（以煤气在洗涤塔进出口的温度、压力、湿度计算的平均值）来确定，一般为 $1.8 \sim 2.5 \text{ 米/秒}$ 。高压高炉煤气洗涤塔上设有自动控制的排水装置，它既能使水封封住洗涤塔内的煤气，又能使塔内水位稳定。对于常压高炉煤气洗涤塔的排水装置一般采用水封排水，水封高度不应小于 $0.29 \times 10^5 \text{ 帕}$ 。

影响洗涤塔工作效率的主要因素如下：

1) 煤气速度：增加煤气在洗涤塔内的速度，容易产生紊流，增加了灰尘与水滴的碰撞机会使灰尘容易被水所润湿和吸附，凝聚成较大的颗粒，可提高除尘效果。

2) 水的消耗量和喷水方式：喷水量大，水滴细，则效率高，然而过大的水量也是无效的。一般洗涤塔的水消耗量为每1000标准立方米煤气约 $4 \sim 4.5 \text{ 吨}$ 。在水量一定的情况

下，常用增加水压的办法提高水的雾化程度，使水和灰尘更好地接触，以提高洗涤塔工作效果。一般塔内上层喷嘴水压为 $(0.98 \sim 1.47) \times 10^5$ 帕，为了充分利用洗涤塔的高度，应尽量增加上层喷嘴供水量，一般分配的原则（三层喷嘴的洗涤塔）是上层喷嘴供水量为 50~60%，两层喷嘴的洗涤塔其上层喷嘴供水量为 70%。

3) 冷却水的温度和水质：从煤气冷却的角度来考虑，水温低一些好，然而水温高表面张力小雾化容易除尘效果好。一般洗涤塔用水多为循环供水，水温不会很低，但不宜高于 35°C 。为了保证喷嘴不被堵塞，要尽量降低水中悬浮物，特别要避免水中夹带杂物，循环水中悬浮物要求不大于 150~200 毫克/升。

除上述影响因素外，洗涤塔工作效率还与煤气含尘量和灰尘物理性质有关。煤气中含灰尘愈多，洗涤塔除尘效率愈高；灰尘颗粒愈大，愈容易被润湿，除尘效率也愈高；反之，则低。

(3) 文氏管：文氏管用于煤气净化的主要目的是除尘和降温。

文氏管是由收缩管、喉管和扩张管三部分组成。当煤气由收缩管进入喉口时，流速迅速增加，同时因阻力损失而煤气压力降低，在扩张管部分流速逐渐减慢煤气压力也随着回升。随着煤气流速的变化，煤气中不同粒径的尘粒相互发生碰撞，当在喉口处喷水时，尘粒与水滴同样发生碰撞，这不仅使尘粒之间由于碰撞而凝聚，而且尘粒和水滴的碰撞也凝聚。同时高速煤气与喷水产生剧烈冲击使水雾化而与煤气充分接触，两者进行热交换后煤气温度降低，水滴润湿尘粒加快，凝聚沉降效果更高。由于尘粒凝聚变大，能使尘粒和水滴同时从煤气中分离出来一起沉降随水排出。欲提高除尘效率就需要增加单位体积中的水滴数量，除选择较高的水气比外，在压力降许可的范围内最有效的方法是提高喉口气流速度，促使水滴进一步雾化；另一个重要因素是合理布置和选择雾化性能好的喷水嘴，使喷入的水滴能均匀地分布在整个喉口容积之内。

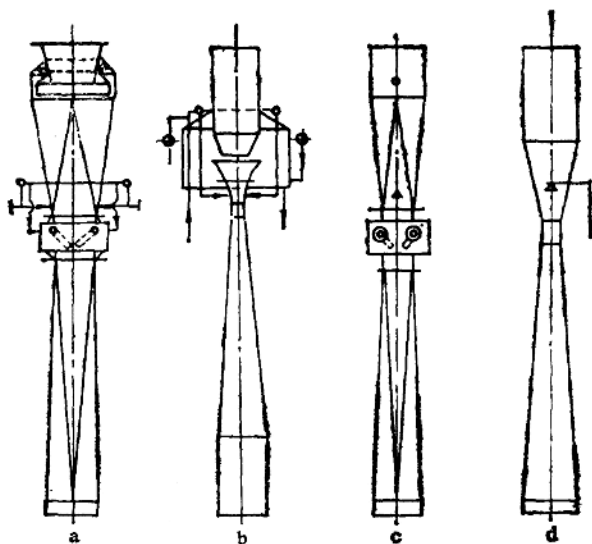


图 1-8 文氏管类型

a—溢流调径文氏管，b—溢流定径文氏管，c—调径文氏管，d—定径文氏管

用于煤气净化的文氏管，按喉口有无溢流膜可分为喉口有一层水膜的溢流文氏管和喉口没有水膜的文氏管；按喉口有无调节设备可分为喉口部分装有调节装置喉口可调节的调径文氏管和喉口部分无调节装置喉径是固定的定径文氏管。煤气净化系统常用的文氏管有溢流调径文氏管、溢流定径文氏管、调径文氏管和定径文氏管等四种。如图1-8所示。

溢流调径或溢流定径文氏管多用于清洗高温的未饱和的脏煤气，文氏管喉口上部设有溢流水箱或喷淋冲洗水管，在喉口周边形成一层均匀的连续不断的水膜，避免灰尘在喉口壁上积聚。这种文氏管一般采用外喷式供水。溢流文氏管喉口处在低流速、低压力降的情况下不仅可以部分地除去煤气中的灰尘，而且可以有效地将煤气冷却到较低的饱和温度。目前，国内外一些高炉已使用溢流文氏管取代洗涤塔，并在生产实践中取得良好效果，它与洗涤塔相比具有构造简单、节省钢材、体积小、高度大大降低和除尘效率高等优点，但压头损失要比洗涤塔增加 $(0.029 \sim 0.039) \times 10^5$ 帕、喉口易磨损、煤气出口温度比洗涤塔高 $3 \sim 5^\circ\text{C}$ 。因此用溢流文氏管取代洗涤塔时必须是高炉炉顶压力能够满足煤气净化系统的要求，而且用户对煤气温度无严格要求。

某厂一座中型高压高炉溢流文氏管的生产指标如下：

喉口煤气流速：40~50米/秒；

文氏管压力降： $(0.034 \sim 0.039) \times 10^5$ 帕；

外喷耗水：3.5~4.0吨/1000标米³煤气；

溢流耗水：0.5吨/1000标米³煤气；

煤气含尘量：溢流文氏管前6~12克/标米³；

溢流文氏管后0.25~0.35克/标米³；

煤气温度：溢流文氏管前300℃；

溢流文氏管后55℃

设计和安装溢流文氏管的关键问题在于保证溢流水箱水平度，确保整个收缩管的周边都有一层均匀的水膜。为此应尽量缩短溢流文氏管前的煤气管，以免膨胀时影响溢流水箱的水平度；溢流水箱的给水可成切线进入，使溢流给水呈旋流状态防止溢流水被溅起，煤气入口管与收缩管应保持50~100毫米的距离。

溢流文氏管喉口处在高流速、高压降的情况下，不仅可以有效地将煤气冷却到较低的饱和温度，而且可以达到煤气精除尘的作用。煤气净化程度随喉口煤气流速及文氏管压降的增加而提高。目前，国内一些锰铁高炉多采用它作为煤气精除尘装置。

调径或定径文氏管多用于净化常温的、已饱和的半净煤气，安装在溢流文氏管或洗涤塔后，组成串联文氏管系统或塔后文氏管系统，视高炉炉顶压力的大小可作为煤气精除尘或半精除尘设备。

调径文氏管的喉口部位的调节装置有调节叶板、R型调节板和圆形重砣等形式，结构较定径文氏管复杂。在相同的喉口煤气流速下煤气压降要比定径文氏管稍大。由于调节装置的调节可以改变喉口的断面积，能适应煤气量的变化维持喉口煤气流速恒定，因此在煤气流量变化的情况下亦能保证煤气净化的质量。这种文氏管目前正逐步得到推广。

文氏管的除尘效率主要与煤气在喉口处的流速和耗水量有关，当流速及耗水量增加时，除尘效率提高，但这时压降也增大，所以压降愈大除尘效率愈高。表1-4为某厂两座大型高压高炉的煤气净化系统中文氏管的生产指标。文氏管作为煤气精除尘前的预处理装

置时，喉口处煤气流速一般取60米/秒左右，流经文氏管的压降约为 $(0.034 \sim 0.049) \times 10^5$ 帕。作为精除尘装置时，喉口处煤气流速一般取100~120米/秒，流经文氏管的压降约为 $(0.078 \sim 0.118) \times 10^5$ 帕。文氏管的水气比一般选用0.5~1.0升/标米³，最大不超过1.5

圆形定径文氏管的生产指标

表 1-4

水气比 (升/标米 ³)	1			0.7		
喉口流速 (米/秒)	80	85	90	85	90	95
压降 ($\times 10^5$ 帕)	0.074	0.078	0.088	0.054	0.059	0.064
净煤气含尘量 (毫克/标米 ³)	25	20	15	40	35	30

升/标米³。溢流文氏管的水气比与所选定的煤气饱和温度有关，可按热平衡计算。

文氏管各部分的几何比例，应根据保证除尘效率、减小流体阻力的原则来确定。一般收缩管的收缩角采用 $20^\circ \sim 30^\circ$ ，扩张角取 $6^\circ \sim 7^\circ$ ，喉口直径按煤气流速而决定，外喷供水的溢流文氏管的最大喉径一般不大于350毫米，否则水滴就不能布满整个喉口断面而影响除尘效率，如喉径需超过350毫米时，则可采用矩形断面。内喷供水不受此限制。由于煤气通过喉口的时间与尘粒减少的数量成正比，故喉颈长度的选择是影响压降与效率的重要因素，如降低喉口煤气流速、增长喉颈或提高煤气流速、缩短喉颈都可获得良好的除尘效果，但为了减少压降，多采用增长喉颈的办法，因此，喉颈长度一般应不小于200毫米，当喉口直径小于200毫米时，颈长可等于喉径；当喉口直径大于350毫米时，则颈长不应大于350毫米，因颈长继续增大时，通过喉口的压降迅速增大。

文氏管具有重量轻、结构简单、制造安装和操作维护方便的优点，调径文氏管又可通过调节喉口断面以适应煤气流量的变化，保证煤气净化质量，而且耗电耗水少，除尘效率高。因此只要高炉炉顶煤气压力能够满足系统要求，使用文氏管作为煤气净化设备是经济合理的。

(4) 电除尘器：电除尘器是一种除尘效率高的精除尘设备，可将煤气含尘量降到10毫克/标米³以下，压头损失小，耗电量也少。它需要的设备材料较多，投资较大，对操作和维护的技术要求较高。

电除尘器的除尘原理：煤气通过高压直流电产生的不均匀电场（图1-9），电场电晕放电使尘粒荷电，在电场的作用下荷电的尘粒被阳极（沉淀极或集尘极）所吸引，沉积在阳极上的尘粒失去电荷后，用振动或用水冲洗的办法使尘粒落下而排出，前者为干式电除尘器，后者为湿式电除尘器。

根据收集尘粒电极的形式电除尘器分为管式、板式和套管式三种，它们的除尘原理相同。电除尘器均由外壳、气流分布装置、沉淀极（阳极）、电晕极（阴极）和清灰装置构成。管式电除尘器沉淀极为许多直径200~300毫米的无缝钢管，电晕电极则是穿过每根无缝钢管中心的钢丝，钢丝两端用绝缘器悬挂；板式电除尘器沉淀极是由许多并排的钢板组成；套筒式电除尘器沉淀极是许多不同直径的同心套管，后两者的电晕线是按一定间距均匀分布在两沉淀极板间的钢丝，为加强放电，电晕线上固定着许多星形或正方形电晕片。三种

电除尘器中目前以管式电除尘器用得较多，它与板式和套管电除尘器相比除尘效率高，操作费用较低，制作安装比较容易，但金属材料消耗较多、投资高。图1-10为管式电除尘器的结构。

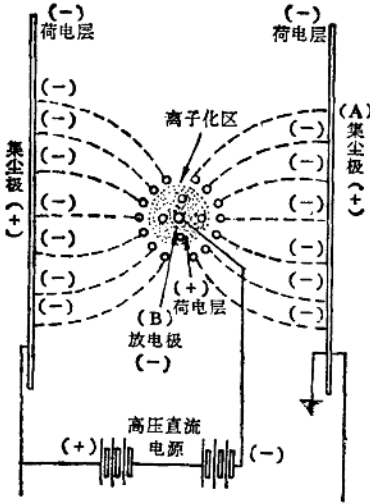


图 1-9 电除尘器的原理

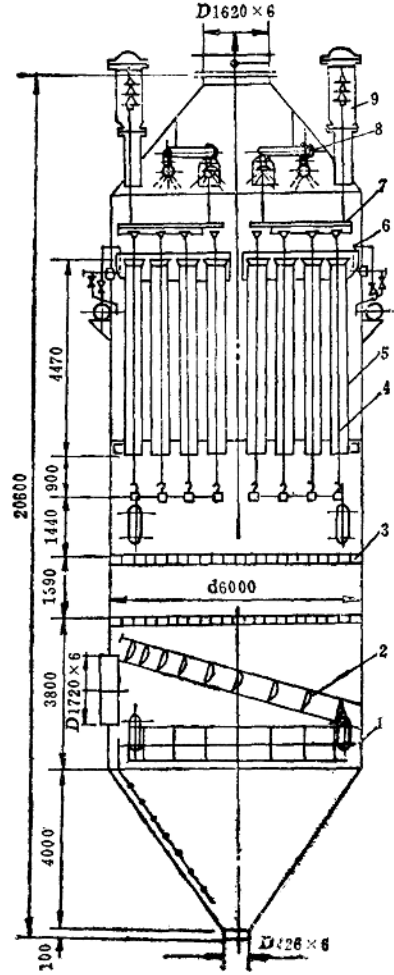


图 1-10 管式电除尘器

1—外壳；2—导流板；3—分配板；4—电晕线；5—沉淀极；6—连续冲洗；7—电晕极上部框架；8—定期冲洗；9—绝缘箱

除了上述三种电除尘器外，蜂窝式电除尘器近来也被用于高炉煤气净化系统，它的沉淀极由六角形蜂窝状管组成，充分利用了设备空间，设备体积小，通过气体的有效截面积较大，其生产能力为相同直径管式电除尘器的1.8~2倍，由于大部分为公用边，因此节省了钢材和投资。

电除尘器的效率决定于尘粒的比电阻、煤气流速、煤气温度和煤气湿度等因素。尘粒的比电阻对除尘的效率影响很大，电除尘器最适宜净化比电阻为 $10^4 \sim 2 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$

的尘粒。比电阻小于 $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 时, 由于被沉淀极吸附的荷电尘粒中和过早, 因而会发生尘粒二次飞扬现象, 比电阻在 $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上时, 则随着沉淀极上尘粒的增多, 两界面间的电位差也逐渐升高, 当堆积层绝缘被破坏, 随即在沉淀极上发生反电晕现象, 频频发生火花放电, 极电压降低, 电场减弱, 则除尘器的效率随之降低。当比电阻大于 $10^{12} \sim 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ 时, 火花放电消失但出现荧光现象, 此时有很大的正电晕电流发生, 除尘效率更加降低。尘粒的比电阻在 $10^4 \sim 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 范围时, 由于它在电除尘器内电中和速度适当, 所以能获得较好的除尘效率, 并且除尘效率变化不大。在工业上降低比电阻的方法, 可采用向含尘气体中喷入水、水蒸汽或其它调阻剂进行调阻, 从而使高比电阻尘粒适于除尘器的要求, 以提高其除尘效率。因此在湿式净化系统中电除尘器安装在洗涤塔或文氏管后是恰当的。

为了保证电除尘器的除尘效率, 煤气在电除尘器内还必须有适宜的流速和一定的停留时间, 煤气流速过大会影响尘粒奔向沉淀极或把已在沉淀极沉淀下来的尘粒掀起, 重新带走, 影响除尘效率。反之, 煤气流速过小, 停留时间过长, 造成浪费。煤气经电极间流速约为 $1 \sim 2$ 米/秒。

(5) 干式除尘设备: 目前正在研究与开发的用于高炉煤气净化的设备有颗粒层除尘器、布袋除尘器和干式静电除尘器等。

1) 颗粒层除尘器: 它是以散状颗粒为介质的过滤器, 散状料可以用砾石、煤块、焦炭、细砂等。清灰的方法有振打、搅拌反吹、移动床和沸腾床反吹等。这种除尘器能耐高温和高压, 对各种粉尘特性适应性强, 并且颗粒滤料——砂子价廉易得。据介绍, 日本在高炉煤气移动床清灰颗粒层除尘器的实践中所遇到的问题除结构庞大外, 主要是在高温高压下移动床料层阻力迅速增加, 清灰效果不佳, 操作困难和运行费用不经济。目前我国正在进行的高炉煤气连续过滤, 周期反吹清灰式颗粒除尘器, 在清灰方面利用沸腾反吹松动砂层, 避免了移动床清灰因砂层下料不均匀和隔筛易堵塞造成阻力增加的缺点, 因此降低了投资并延长了运行时间。

2) 布袋除尘器: 布袋除尘器属织物过滤器, 它依靠布袋粘附炉尘进行过滤, 把含尘煤气中尘粒分离出来。布袋上积累的炉尘愈多, 对气流的阻力愈大, 故要周期性地反吹, 把粘附的炉尘清除掉, 使阻力保持在一定限度内, 以保证除尘效率。除尘效率除与滤布的粉尘负荷有关外, 还与煤气的流速、粉尘粒径的分布和滤布的粗细等因素有关。用于高炉煤气净化的滤料布袋必须能耐高温、高压、使用寿命长和效率高。现在作为过滤高炉煤气的滤布为玻璃纤维织成并经有机硅油、石墨等处理过的玻璃纤维滤袋, 它只能限制在 250°C 以下。目前正在研究与开发的有碳素纤维、不锈钢丝纤维、聚四氟乙烯纤维及其表面经处理过的其它材料的不织毡滤料等, 但这些滤料的价格太高。

3) 干式电除尘器: 干式电除尘器的清灰方式有机械振打、电容振打和刷子清灰等。据介绍日本三菱重工(株)已在日本钢管厂高砂制铁所的高炉上试验采用干式电除尘器净化高炉煤气进口煤气含尘 10 克/标米³, 出口含尘量降至 20 毫克/标米³以下, 可满足余压透平发电的要求。

上述三种除尘设备的比较见表1-5。

(6) 脱泥脱水设备: 高炉煤气经洗涤塔、文氏管等除尘设备湿法净化后, 应采用脱泥脱水设备使煤气中的水分和灰泥从煤气中分离出来。目前, 高炉煤气净化系统中, 采用