

JIAOLU JIARE TIAOJIE YU JIENENG

焦炉加热 调节与节能

严文福 郑明东 编著

合肥工业大学出版社

内 容 摘 要

本书根据作者长期从事教学、科研以及我国炼焦生产的丰富经验编写而成。全书共分六章:第一章焦炉热工基础,包含流体力学、热力学与传热学基本原理、定律及应用。第二章系统介绍焦炉生产与调火操作以及现代测温技术。第三章运用热平衡分析法对国内不同炉型的大中小 45 座焦炉进行热工测试,并在此基础上归纳、分析、总结得到一系列独特的、实用性很强的测试方法、计算公式与分析图表。第四章运用烟分析法评价炼焦过程中能量在数量、质量上的变化、转换、损耗及利用情况,提出了三种烟平衡和七种烟效率。第五章提出了焦炉热工评价方法与节能途径,并重点论述了焦炉加热优化串级调控(OCC)系统。第六章介绍常用及发展中的热工测试与调节仪表。为方便读者,书末附有各种热工参数表。

本书内容丰富,理论性、实践性、系统性、实用性强,可供焦化、化工工艺、城市燃气、热能、自动化及相关专业科技人员、大专院校师生参阅和教学使用。

图书在版编目(CIP)数据

焦炉加热调节与节能/严文福,郑明东编著. —合肥:合肥工业大学出版社,2005.4

ISBN 7-81093-211-X

I. 焦... II. ①严...②郑... III. ①炼焦炉—温度—调节②炼焦炉—节能 IV. TQ522.15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 038676 号

焦炉加热调节与节能

编著 严文福 郑明东 责任编辑 权 怡

出 版 合肥工业大学出版社
地 址 合肥市屯溪路 193 号
邮 编 230009
电 话 总编室:0551-2903038
发行部:0551-2903198
网 址 www.hfutpress.com.cn
E-mail press@hfutpress.com.cn

版 次 2005 年 4 月第 1 版
印 次 2005 年 5 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 17.5
字 数 425 千字
印 刷 合肥现代印务有限公司
发 行 全国新华书店

ISBN 7-81093-211-X/TQ·3

定价:35.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换。

前 言

炼焦炉是将一次能源(煤)转化为二次能源(焦炭、煤气、化工等产品)的一种复杂的能源转换热工设备。近十年来,我国的焦化工业获得了飞速的发展,炼焦技术在理论、工艺及设备等诸多方面有了长足的进步。作者根据长期从事教学、科研以及丰富的炼焦生产经验撰写了《焦炉加热调节与节能》一书。全书分六章,介绍了焦炉热工基础理论、炼焦生产操作及调火技术、焦炉热工测试、烟分析法及其在炼焦炉上的运用、焦炉热工评价及节能、焦炉热工常用与发展中的仪表,尤其是重点介绍了近十年来安徽工业大学开发的焦炉加热优化串级调控(OCC)系统的研究与运用技术。

本书第一章(含第三章第六节)由严文福、王育红、高建伟编写,第二章由姜玉山、宁方青编写,第三章由张大力、彭宗胜编写,第四章由郑明东编写,第五章由严文福、王晓婷编写,第六章由宁方青编写。全书由严文福、郑明东统编,合肥工业大学出版社权怡担任责任编辑。本书在出版过程中得到马钢煤焦化公司总工杨建华教授、攀钢集团公司煤化工厂厂长杨天旺高工和张初永高工、济钢焦化厂厂长朱玉庭高工和陈昌华教授、山东金属协会秘书长宫玉秀高工、江西焦化学术委员会秘书长朱健崖高工、湖南邵东焦化厂厂长李友鹏高工、铜陵亚星焦化股份有限公司龚铜董事长、黑龙江建龙化工有限公司总经理凌秀远高工和杨光喜高工等的大力支持,在此表示衷心的感谢!

由于水平有限,书中难免有错误与不妥之处,敬请读者批评指正。

编著者

二〇〇五年四月

目 录

第一章 炼焦炉内气体的流动和传热原理	1
第一节 炼焦炉的发展与炉型	1
第二节 焦炉内气体流动	5
第三节 热力学基本概念与定律	25
第四节 煤气性质与煤气燃烧	31
第五节 焦炉传热	36
第二章 炼焦炉生产操作与调火技术	45
第一节 焦炉机械与出炉操作	45
第二节 煤气设备	57
第三节 焦炉加热制度	61
第四节 用焦炉煤气加热的调节	72
第五节 用贫煤气加热的调节	92
第六节 焦炉高向加热	101
第七节 焦炉现代测温管理	103
第三章 焦炉热工测试与评定	107
第一节 焦炉热工测试概况	107
第二节 焦炉物料衡算	111
第三节 焦炉热量平衡	132
第四节 焦炉热工评定指标	145
第五节 计算实例	147
第六节 捣固焦炉生产的热工特性	155
第七节 焦炉热工数学模型	161
第四章 烟分析法及其在炼焦炉上的应用	165
第一节 烟与炕的基本概念	165
第二节 烟及其计算	168
第三节 烟损(炕)与烟平衡	184
第四节 烟效率	188
第五节 烟分析法在炼焦炉上的应用	190
第五章 焦炉热工评价与节能	204
第一节 焦炉热工评价体系	204
第二节 节能环保型焦炉的发展	220
第三节 焦炉加热优化串级调控(简称 OCC)系统	227
第六章 焦炉热工测试仪表	240
第一节 概述	240

第二节	测温仪表	240
第三节	测压仪表	246
第四节	流量测量计	249
第五节	成分分析仪	256
第六节	其他分析仪器	260
附录		263
附录 1	压力单位换算表	263
附录 2	能量(功)单位换算表	263
附录 3	焦炭中灰分、固定碳和挥发分的比热容	264
附录 4	不同温度下各种气体与水汽的平均比热容	264
附录 5	焦炉煤气、高炉煤气及其废气的比热容与温度的关系图	265
附录 6	不同温度下水蒸气在煤气中的分压及其含量	266
附录 7	局部阻力系数表	267
参考文献		271

第一章 炼焦炉内气体的流动和传热原理

第一节 炼焦炉的发展与炉型

一、高温炼焦

烟煤隔绝空气加热到 $1000^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ ，经过干燥、热解、熔融、粘结、固化、收缩等阶段，最终成为焦炭，这一过程称为高温炼焦(高温干馏)。

高温炼焦于 1585 年提出，1709 年英国人达比首次将焦炭用于高炉炼铁。焦炉经历了成堆干馏、倒焰炉、废热式和蓄热室焦炉四个发展阶段。

现代焦炉是指以生产冶金焦、气化焦等为主要目的，可以回收炼焦化学产品的水平室式焦炉，它由炉体和附属设备构成。焦炉炉体由炭化室、燃烧室、蓄热室、斜道、炉顶与基础、抵抗墙等结构组成，并通过烟道与烟囱相连。焦炉的附属设备主要包括：护炉铁件(炉柱、保护板、拉条、弹簧与炉门框等)、粗煤气导出设备(上升管、桥管、水封管及集气管)、加热设备(煤气、废气与换向设备)及炉门修理站。

二、焦炉炉型分类

焦炉炉体主要结构由炭化室、燃烧室、蓄热室、斜道区和炉顶区组成，分述如下：

(一) 炭化室与燃烧室

炭化室是煤隔绝空气干馏的地方，燃烧室是煤气燃烧的地方，两者依次相间，其间的隔墙既要严格防止干馏煤气泄漏，还要尽快传递干馏所需热能。焦炉生产时，燃烧室墙面平均温度约为 1300°C ，炭化室平均温度约为 1100°C ，局部区域还要高些。现代焦炉的炉墙都用带舌槽的异型硅砖砌筑，燃烧室内各火道间的隔墙还起着提高结构强度的作用。

每座焦炉的燃烧室都比炭化室多一个。燃烧室用隔墙分成若干个立火道，以便控制燃烧室温度从机侧到焦侧逐渐升高。火道个数随炭化室长度增加而增多，JN43—58 型焦炉为 28 个，我国的大容积焦炉为 30 个 ~ 32 个。火道中心距大体相同，一般为 $460\text{mm} \sim 480\text{mm}$ ，火道宽度则因炭化室中心距增大而变宽，这有利于火道内废气的辐射传热。煤气和空气口设在立火道底部，一般复热式焦炉每个立火道底部有两个斜道出口和一个烧嘴。用焦炉煤气加热时，烧嘴走焦炉煤气(58 型焦炉由下喷管供入)，两个斜道均走空气；用高炉煤气加热时，一个斜道走高炉煤气，另一个走空气。

立火道间的相互连接关系有多种类型。58 型采用双联式，即两个火道为一组，上升煤气和空气并在其中燃烧，生成的高温废气从火道中间隔墙上部的跨越孔流入相邻火道而下降。

每隔 20min ~ 30min 换向一次。

立火道内煤气燃烧的火焰高度是不同的。当炭化室有效高度超过 3m 时,会出现焦饼中心温度上下差,致使焦饼上下成熟不匀。为改善高向加热均匀,58 型焦炉采用废气循环,即利用上升火道出口气流的喷射力和上升、下降火道因温差产生的热浮力差,将一部分下降废气从火道隔墙下部的循环孔抽回上升火道,将煤气和空气稀释,致使燃烧速度减慢,拉长火焰。

因此,58 型焦炉是双联、下喷、废气循环、复热式焦炉。

为控制二次热解以提高化学产品的质量和产率,同时减轻炉墙积炭,应在保证焦饼上下均匀成熟前提下适当降低炭化室空间温度。为此,燃烧室顶端高度应低于炭化室顶端高度,二者之差称加热水平高度。加热水平高度的选择与所用炼焦煤料收缩性有关,对挥发性较高的煤料,为防止炉顶焦炭过火和炉顶空间温度过高,加热水平高度可设计得大些。

(二) 斜道区

位于蓄热室与燃烧室之间,它是连接燃烧室和蓄热室的通道,不同类型焦炉的斜道区结构有很大差异,JN43—58 型焦炉的斜道区每个火道底有两条斜道,复热式焦炉还有一条砖煤气道,一座 65 孔的 58 型焦炉,斜道区内共有 5544 条通道,它们中各走各的气体,压力不同,但不许窜漏。此外,焦炉生产时斜道区温度为 $1000^{\circ}\text{C} \sim 1200^{\circ}\text{C}$,所以设计和砌筑时必须考虑耐火砖的热膨胀性。焦炉的机焦侧有护炉铁件将炉体紧箍,但这种紧箍是有弹性的,炉体升温膨胀时沿蓄热室墙底与基础平台间的砂料滑动层作整体滑动。而焦炉两端因有抵抗墙定位,不能整体膨胀,所以斜道区内需设膨胀缝,凡有膨胀缝的地方必须设置滑移缝。

斜道的倾斜角应小于 30° ,以免积灰造成堵塞。斜道的断面收缩角一般应小于 7° ,以减小阻力。同一火道内两条斜道出口中心线的交角,应有利于拉长火焰,我国近年投产焦炉的斜道出口交角约 20° 。斜道出口收缩,使上升气流的斜道出口阻力约占整个斜道阻力的 75%,这样,当改变调节砖厚度而改变出口断面时,能有效地调节贫煤气和空气量。

(三) 蓄热室

位于焦炉炉体下部,其上经斜道同燃烧室相连,其下经废气盘分别同分烟道、贫煤气管道以及大气相通。蓄热室构造包括顶部空间、格子砖、篦子砖、小烟道以及主墙、单墙、封墙和中心隔墙。下喷式焦炉,主墙内还有直立砖煤气道。

蓄热室在下降高温废气时,由内装的格子砖将大部分热量吸收并积蓄起来,使废气温度由 1200°C 左右降至 400°C 以下;当贫煤气或空气上升时,格子砖将所蓄热量传递出去,使贫煤气或空气预热到 1000°C 以上。每座焦炉的蓄热室总是半数处于下降气流,半数处于上升气流,每隔 20min ~ 30min 换向一次。下降气流蓄热室内压力要小于上升气流蓄热室。因此蓄热室应该是:传热面积大,气流分布均匀,阻力小,热稳定性好,主墙严密。

采用薄壁异型格子砖可以增大传热面积。采用合理的篦子砖孔型和尺寸排列,可以使蓄热室气流沿长向均匀分布。为了降低蓄热室阻力,应设计结构合理的格子砖,安装时上下各层格子砖孔要对准,高炉煤气含尘量应控制在 $15\text{mg}/\text{m}^3$ 以下,操作中应定期用压缩空气吹扫。蓄热室内温度变化大,故格子砖采用黏土砖,小烟道需设黏土衬砖以保持硅砖砌筑的隔墙不受温度变化的冲击。

蓄热室隔墙包括中心隔墙、单墙和主墙,中心隔墙将蓄热室分成机侧、焦侧两个部分,单墙两侧是同向气流,主墙两侧为异向气流。封墙的作用是密封和隔热。

焦炉生产时,蓄热室内为负压,若封墙不严,空气漏入下降蓄热室,使废气温度降低,烟囱吸力减小;空气漏入贫煤气蓄热室,使煤气在蓄热室上部燃烧,既降低炉头火道温度,又会将格子砖局部烧熔。封墙隔热可提高热工效率,降低蓄热室走廊温度,因此封墙内层为黏土砖,外层为隔热砖,表面刷白或复以银白色保护板。

(四) 炉顶区

炭化室盖顶砖以上部位称炉顶区,设有装煤孔、上升管孔、看火孔、烘炉孔及拉条沟。投产后烘炉孔堵塞不用。炉顶区高度关系到炉体结构强度和炉顶操作环境。大型焦炉为1100mm~1200mm,并在不承受压力的实体部位用隔热砖砌筑。炉顶区的实体部位也需设置平行于抵抗墙的膨胀缝。

(五) 烟道与基础

蓄热室下部设有分烟道,来自各下降蓄热室的废气流经各废气盘,分别汇集到机侧或焦侧分烟道,进而在炉组端部的总烟道汇合后导向烟囱根部,借烟囱抽力排入大气。焦炉基础包括基础结构与抵抗墙构架两部分。

烟道用钢筋混凝土浇灌制成,内砌黏土衬砖。分烟道与总烟道衔接部之前设有吸力自动调节翻板,总烟道与烟囱根部衔接部之前设有闸板,用以分别调节吸力。

基础结构根据加热煤气引入方式,有下喷式和侧喷式两种。下喷式焦炉基础是一个地下室,由底板、顶板和构架柱组成。侧喷式焦炉基础是无地下室的整片基础。

一座现代化的焦炉往往有几十孔炭化室,年产焦炭数十万吨。世界上已经投产的最大焦炉在德国,它有炭化室70孔,炭化室高7.85m、有效容积70m³,年产焦炭可达百万吨。现代焦炉已定型,其基本结构大体相同,但由于装煤方式、供热方式和使用的燃料不尽相同,又可分为许多类型。其分类如下:

(1) 按火道结构可分为:

水平火道(索尔维尔焦炉)

直立 火道	{	上跨式(美国考伯斯·贝克(Koppers-Becker);前苏联 ПК—47,49,50—2K)
		两分式(中国70型、61型、66型(I型~VI型),两分下喷,两分下喷捣固等; 德国卡尔·斯蒂尔(Carl-Still))
		四分式(美国威尔甫特(Wilputte)等)
		四联式(德国迪迪尔(DKH(Dider)))
		双联式(中国JN43,55,60及双联下喷捣固;德国奥托(Otto);美国考伯尔斯(Koppers);原苏联 ПБП;日本新日铁M,S型)

(2) 按加热煤气种类可分为:

单热式:用一种煤气加热,即用焦炉煤气或高炉煤气加热。

复热式:用两种煤气加热。

(3) 按加热煤气供入方式可分为:

侧入式(66型I~III,原ПБП型。卡尔·斯蒂尔)

下喷式(JN43,55,60)

全下喷式(新日铁M型)

(4) 按蓄热室结构可分为:

纵蓄热室(德国奥托-霍夫曼(Otto-Hoffmann);中国简易3[#]焦炉)

横蓄热室 { 带中心隔墙,机焦侧分开的蓄热室(JN 型、66 型)
无中心隔墙,机、焦侧连续的蓄热室(新大容积奥托)
分格蓄热室(中国 JNX 型、新日铁 M 型等)
两分蓄热室(新考伯尔斯)

(5) 按加热调节方式可分为:

横向加热的均匀性 { 算子砖结构改进(JN 型)
小烟道分格或变径(迪迪尔)
分格蓄热室
单向小烟道

高向加热的均匀性 { 多段加热(卡尔·斯蒂尔)
高低灯头(JN60;奥托)
废气循环 { 炉内废气循环(ΠBP、JN 型)
炉外废气循环(Koppers-Becker)
上下交替加热(科林式)
强化辐射加热(DKH)

(6) 按装煤方式可分为:

侧装焦炉(如捣固焦炉)

顶装焦炉 { 装煤车装煤(西姆卡法(Simcar))
管道化装煤(考泰克(Coaltek))
埋刮板装煤(普列卡邦(Precarbon))

焦炉炉型不同,无非是不同火道结构、不同加热煤气种类与方式、不同的蓄热室结构和不同装煤方式的排列组合。焦炉结构的变化与发展,主要是为了更好地解决焦饼的高向与长向加热的均匀性,节能降耗,降低投资成本,提高经济效益。

三、焦炉发展主要方向

我国炼焦工业自进入 21 世纪以后,获得了飞跃发展,其主要原因是整个国民经济稳定、快速发展,工业结构的调整带动了钢铁焦化工业的协调发展,加上欧美、日本等国的炉龄老化,产量下降,因而出口焦炭量也年年上升。综观世界各国炼焦工艺的现状与发展,当今的主要方向和要解决的问题是:

(1) 实现焦炉的大型化。德国 2003 年投产 TKS 焦化厂,炭化室高 8.3m、宽 0.6m、长 18.67m、容积 93m³,年产焦炭 264 万吨,而我国最大焦炉炭化室高 6m,容积仅 38.5m³。同时发展宽幅炭化室是方向,宽幅炭化室在稍微提高火道温度的前提下,产量基本上可以维持不变,而且提高了劳动生产率,降低了成本,改善了环保条件。

(2) 建造高效、节能型焦炉,发展薄炉墙的焦炉,炉墙厚度已经由 110mm 减至 80mm ~ 60mm。我国 80mm 工业试验炉已生产多年,德国 10m 高单孔焦炉,炉墙厚度仅 60mm。严文福通过对 100mm、80mm、60mm 三种炉墙厚度计算,证明了炉墙减薄后虽然蓄热量减少,但因为火道传给炭化室热量大于炉墙传给煤料的热量,即传热量大于蓄热量, $\Delta Q_{入} - \Delta Q_{出} > \Delta H$,故炉墙减薄后炭化室侧墙温度的下降值反而略有减少,即得到炉墙温度反而略有增加的重要结论。经计算:炉墙厚度从 100mm 减少到 80mm 时,炭化室侧墙面温度从 730℃ 增加

到 744.27℃;炉墙厚度减至 60mm 时,墙面温度增加到 787.53℃,增加了 57.53℃。

这样就不必担心炉墙厚度减薄后,炭化室侧炉墙温度在装煤初期降至高低型晶体软化点 700℃ 以下。当然,在炉墙减薄的同时,希望使用高密度硅砖,以提高炉墙强度和传热速率。

(3) 提高一代炉龄,对老炉体进行技术改造最典型的是攀钢焦化厂 4 座大容积焦炉。它们已经生产近 40 年,而结焦时间还能保持在原设计的水平上,这主要是因为加强了科学管理,长年不放松,并实施了一套独特的技术措施。但在当前突出的经济利益驱动下,对于一代炉龄问题有所争论。

(4) 实现高度的机械化和自动化,尤其是四项新技术的推广与运用。安徽工业大学化工自动化研究所在四大车联锁、推焦计划表、推焦电流的自动传送、自动对位功能的实施上做了大量工作,并已在全国十余个著名钢铁公司、独立焦化厂的 34 座焦炉上实施了焦炉加热优化串级调控(OCC 工艺)。这不仅稳定了炉温,提高了安定系数,而且降低了炼焦耗热量,减轻了劳动强度,并取得了明显的经济效益和社会效果。

(5) 提高环境保护水平,尤其是近十年来,在解决装炉煤出焦、运焦烟尘治理上取得了明显的效果。

(6) 采用不同工艺,扩大炼焦煤源,尤其是在推广捣固焦炉上已取得了一定的效果。

(7) 进一步提高管理水平,提高综合经济效益。

第二节 焦炉内气体流动

一、流体的主要物理量

(一) 压强(压力)

流体作用于单位面积上的力,称为流体压力强度,亦称为流体静压强,简称压强。焦炉调火中习惯称压力。

$$P = F/A \quad (1-1)$$

式中 F ——垂直作用于流体表面上的压力,N;

A ——作用面上的面积, m^2 ;

P ——流体的静压力,Pa(帕斯卡)。

压力的其他非法定计量单位(其中有些已被停止使用)有:公斤/米²(kg/m^2)、千克力/厘米²(kgf/cm^2)、工程大气压(at)、标准大气压(atm)、巴(bar)、毫米水柱(mmH_2O)、毫米汞柱($mmHg$)、磅/英寸²(bf/in^2)。单位换算可查附录 1。

流体的压力除用不同的单位来计量外,还可以用不同的方法来表示。以绝对零压作为起点计算的压力,称为绝对压力,是流体的真实压力。

流体的压力可以用测压仪表来测量。当被测流体的绝对压力大于外界大气压力时,所用的测压仪表为压力表。压力表上的读数表示被测流体的绝对压力比大气压力高出的数值,称为表压(正压),即

$$\text{表压} = \text{绝对压力} - \text{大气压力} \quad (1-2)$$

当被测流体的绝对压力小于外界大气压力时,所用测压仪表为真空表。真空表上的读数

表示被测流体的绝对压力低于大气压力的数值,称为真空度(负压)。焦炉燃烧系统为负压,常称吸力,即

$$\text{真空度} = \text{大气压力} - \text{绝对压力} \quad (1-3)$$

例 1-1 用微型斜压计测得 58 型焦炉集气管的压力为 90Pa,求绝对压力。

解:绝对压力 = 大气压力 + 表压 = 101325 + 90

$$= 101415\text{Pa} = 101.415\text{kPa}$$

例 1-2 用微型斜压计测得 JN60 焦炉分烟道吸力为 250Pa,求绝对压力。

解:绝对压力 = 大气压力 - 吸力 = 101325 - 250 = 101075Pa = 101.075kPa

(二) 温度

温度是表示物体冷热程度的一种量度。一般采用摄氏百分温标的度数($^{\circ}\text{C}$)表量度,这种摄氏温标是以冰点(在标准大气压下与空气共存饱和水的凝固点)为 0°C ,而以水的沸点(在标准大气压下)作为 100°C 来表示。

国际单位制(SI)的温标以开尔文为单位,符号为 K。它是以理想气体作为温度计流体,是水三相点热力学温度 $1/273.15$ 的一种绝对温标。它与摄氏温度的关系为:

$$TK = (273.15 + t)^{\circ}\text{C} \quad (1-4)$$

(三) 密度

单位体积流体的质量称为密度,即

$$\rho = m/v \quad (1-5)$$

式中 m ——流体的总质量,kg;

v ——流体的总体积, m^3 ;

ρ ——流体的密度, kg/m^3 。

理想气体的密度可以采用下述方法计算:标准状态(1 atm, 0°C)下,每 kmol 气体的体积为 22.4m^3 ,则密度为

$$\rho_0 = M/22.4, \text{kg}/\text{m}^3 \quad (1-6)$$

式中 M ——理想气体的平均分子量。

在焦炉水力计算中,常用的工作状态下的气体密度 ρ_t 与 ρ_0 的关系为:

$$\rho_t = \rho_0 \frac{T_0 P}{T P_0} = \rho_0 \frac{T_0}{T} \quad (1-7)$$

焦炉燃烧系统内, $P \approx P_0$ 。

(四) 流量

单位时间内流经通道任一截面的流体量称为流体的流量。流量有两种表示法:

1. 体积流量:单位时间内流经通道任一截面的流体体积,称体积流量。符号为 V ,单位为 m^3/s , m^3/h 。由于煤气体积随温度和压力而变化,故必须注明煤气温度、压力值。

2. 质量流量:单位时间内流经通道任一截面的流体质量称质量流量。符号为 G ,单位为 kg/s , kg/h 。

质量流量与体积流量的关系为

$$G = \rho V \quad (1-8)$$

以后符号下注脚为“0”者均表示标准状态“ $\ominus$ ”。

(五) 流速

单位时间内流体在流动方向流过的距离称为流速。符号为 w , 单位为 m/s 。

由于流体流经管道截面上各点的流速是不同的, 分布规律较为复杂, 且在管截面中心处最大, 越靠近管壁流速越小, 在管壁处的流速为零, 因此通常所指流速为整个管截面上的平均流速。其表达式为

$$w = V/F, \quad \text{m/s} \quad (1-9)$$

式中 F ——与流动方向相垂直的管道截面积, m^2 。

例 1-3 某焦炉用焦炉煤气加热, 流入总管焦炉煤气量 $V_0 = 26800 \text{m}^3/\text{h}$, 试选择总管管径。

解: 要求总管内煤气流速小于 20m/s , 现选 $w = 15 \text{m/s}$, 则管道截面积为:

$$F = \frac{V_0}{w_0} = \frac{26800}{3600 \times 15} = 0.496 \text{m}^2$$

管径

$$D = \sqrt{\frac{4F}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.496}{\pi}} = 0.795 \text{m}$$

选用 800mm 管径, 则煤气实际流速为:

$$w_0 = \frac{4 \times V}{3600 \times \pi \times d^2} = \frac{4 \times 26800}{3600 \times \pi \times 0.8^2} = 14.81 \text{m/s}$$

工作状态下气体流速 w_i 与标准状态下气体流速 w_0 (焦炉内) 之间的换算式为:

$$w_i = w_0 \frac{T}{T_0} \quad (1-10)$$

二、气体状态方程式

气体有两个特性: 一是气体没有一定的外形, 无论用什么形状的容器来装气体, 气体分子均会充满整个容器; 二是气体有压缩性与热胀冷缩的现象。

气体的压力、温度、体积之间存在着一定的关系, 即有理想气体状态方程式:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (1-11)$$

或

$$\frac{PV}{nT} = R \quad (1-12)$$

式中 R ——气体常数或称阿佛伽德罗常数, 即在一定的温度和压力下, 同体积的任何气体的摩尔数(分子数)相同, $R = 8.314 \text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K}) = 1.987 \text{kcal}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$;

n ——摩尔数, $n = m/M$ (m 是质量, M 是分子量)。

例 1-4 已知加热煤气的温度为 40°C , 管道内煤气压力为 1000Pa , 测得煤气实际流量为 $9000 \text{m}^3/\text{h}$, 换算成标准状态下的流量。

解: 由式(1-11)得:

$$\begin{aligned} V_0 &= \frac{PV}{T} \frac{T_0}{P_0} = \frac{1000 + 101325}{273 + 40} \times 9000 \times \frac{273}{101325} \\ &= 7927 \text{m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

三、柏努利方程式

在流体流动系统中,若各截面上流体的流速、压强、密度等有关物理量仅随位置而改变,但不随时间而变,这种流动称为稳定流动;若流体在各截面上的有关物理量既随位置而变,又随时间而变,则称为不稳定流动。但在焦炉内,气体的流动以稳定流动为主。

(一) 柏努利方程式的推导

稳定流动时,流体能量形式与变化的规律可用柏努利方程式来说明,见图 1-1。

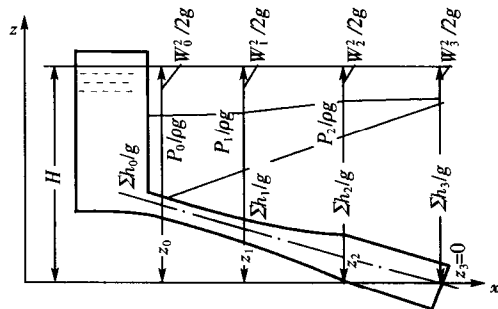


图 1-1 柏努利方程式图解示意

1. 位能

流体因受重力的作用,在不同的高度处具有不同的位能,相当于质量为 m 的流体自基准水平面升举到某高度 Z 所做的功,即

$$\text{位能} = mgZ, \text{J} \quad (1-13)$$

单位质量流体的位能为:

$$E_{\text{位}} = gZ, \text{J/kg} \quad (1-14)$$

1N 流体的位能称为位压头:

$$\text{位压头} = mgZ/(mg) = Z, \text{m} \quad (1-15)$$

位压头的单位与长度的单位相同,但物理意义不同,它表示每牛顿重的流体具有的能量(焦耳)。

2. 动能

因流体有一定的速度而具有的能量称为动能。质量为 m 、流速为 w 的流体所具有的动能为:

$$\text{动能} = \frac{1}{2}mw^2, \text{J} \quad (1-16)$$

单位质量流体的动能为:

$$E_{\text{动}} = \frac{1}{2}w^2, \text{J/kg} \quad (1-17)$$

1N 流体的动能称为动压头:

$$\text{动压头} = \frac{mw^2}{2mg} = \frac{w^2}{2g}, \text{m} \quad (1-18)$$

3. 静压能

静止流体和流动着的流体内部任何位置都有一定的静压强。

设质量为 m 、体积为 V 的流体通过某一截面 A 时,把该流体推进此截面所需的作用力为 PA ,而流体通过此截面所走的距离为 V/A ,则流体带入系统的静压能为:

$$\text{静压能} = PA \frac{V}{A} = PV = \frac{Pm}{\rho}, \text{J} \quad (1-19)$$

单位质量流体的静压能等于压力与密度之比,即

$$E_{\text{静}} = \frac{P}{\rho}, \text{J/kg} \quad (1-20)$$

1N 流体的静压能称为静压头:

$$\text{静压头} = \frac{mP}{\rho mg} = \frac{P}{\rho g}, \text{m} \quad (1-21)$$

以上三项之和总称为机械能,即

$$\text{机械能} = \text{位能} + \text{动能} + \text{静压能} \quad (1-22)$$

4. 损失能量

流体流过管路时需克服阻力而消耗掉一部分机械能,这部分机械能转变为热能后,不能再转化为机械能。在作平衡计算时,将这部分能量看作是从流体输出到外界的能量,称为损失能量。

当有外功 W_e 加入体系,并有损失能量 h_f 时,根据能量守恒定律,流体从 1-1 截面流到 2-2 截面时,单位质量流体的能量变化时,以**能量形式**表示的柏努利方程式为:

$$gZ_1 + \frac{w_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} + W_e = gZ_2 + \frac{w_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho} + \sum h_f \quad (1-23)$$

若流体流动时不产生流动阻力,则流体的能量损失 $\sum h_f = 0$,这种流体称为理想流体。

实际上并不存在真正的理想流体,仅是一种设想,但这种设想对解决工程实际问题具有重要意义。

对于理想流体,又没有外功加入时,式(1-23)可简化为:

$$gZ_1 + \frac{w_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} = gZ_2 + \frac{w_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho} \quad (1-24)$$

式(1-24)称为柏努利方程式,而式(1-23)是柏努利方程式的引申,习惯上也称柏努利方程式。

柏努利方程式常用下述两种形式描述:

(1) 以单位重量流体为衡算基准,将式(1-23)中各项除以重力加速度 g ,并令 $H_e = W_e/g$, $H_f = \sum h_f/g$,则以**压头形式**表示的柏努利方程式为:

$$Z_1 + \frac{w_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + H_e = Z_2 + \frac{w_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + H_f \quad (1-25)$$

式中,各项单位均为 $\frac{\text{J/kg}}{\text{m/s}^2} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m/s}^2}{\text{kg} \cdot \text{m/s}^2} \times \text{m} = \frac{\text{N}}{\text{N}} \cdot \text{m} = \text{m}$;

H_e —— 输送设备对流体所提供的有效压头;

H_f —— 流体流动过程中压头损失,对理想流体为零。

(2) 以单位体积流体为衡算基准,将式(1-23)中各项乘以流体密度 ρ ,即得以**压力形式**表示的柏努利方程式:

$$Z_1 \rho g + \frac{w_1^2}{2} \rho + P_1 + \rho W_e = Z_2 \rho g + \frac{w_2^2}{2} \rho + P_2 + \rho \sum h_f \quad (1-26)$$

式中 $\rho \sum h_f = \sum_{1-2} \Delta P$ 称为压力降,表示流体通过 1-2 截面间的阻力;

各项单位为 $\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg}} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{m}^3} = \text{Pa}$,表示单位体积流量所具有的能量,简化后即压强(压力)的单位。

柏努利方程式可用能量形式、压头形式、压力形式三种计算公式表示,其基本原理是一致的,只是在不同场合使用不同方程式,单位有所不同。

例 1-5 某焦化厂用泵将地下澄清水池中的水送到熄焦喷洒水管。泵的进口管为内径 500mm 的铁铸管,泵的流量为 $1400 \text{ m}^3/\text{h}$,出口管内径为 408mm,水池中的水位低于水池平面 1m,喷洒水管标高为 7.4m,熄焦用水经管路的总阻力为 70Pa,喷洒水管出口的水流程为 5m/s,试计算水泵的扬程。

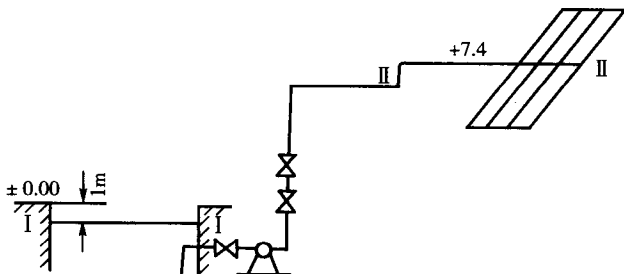


图 1-2 例 1-5 附图

解:见图 1-2。

在计算时应先选择计算断面,选择水池中水的液面 I-I 断面和喷洒水管 II-II 为计算断面最简便。再确定基准面,如以水池平面即标高 ± 0.00 的平面作基准面,由题意得:

$$Z_1 = -1.00\text{m}, \quad Z_2 = 7.4\text{m}, \quad P_1 = P_2 = 1\text{atm},$$

$$w_1 = 0, \quad w_2 = 5\text{m/s}, \quad \sum h_f = 70\text{Pa}$$

代入式(1-25)得:

$$-1 + 0 + H_e = 7.4 + \frac{5^2}{2 \times 9.81} + \frac{70}{9.81}$$

$$\text{得} \quad H_e = 16.8\text{m}$$

故泵的扬程至少应为 16.8m。根据泵的扬程,还可确定泵的功率。

(二) 流体流动的类型

雷诺通过实验证明,影响流体的流动状态的因素,主要是流体的流速 w 、管径 d 、流体的黏度 μ 和密度 ρ 。雷诺将这些影响因素组成一个复合数群,即称为雷诺数 Re :

$$[Re] = \left[\frac{dw\rho}{\mu} \right] = \frac{\text{m}(\text{m/s})(\text{kg}/\text{m}^3)}{\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})} = \text{m}^0 \cdot \text{kg}^0 \cdot \text{s}^0 \quad (1-27)$$

雷诺数是一个没有单位、无因次的纯数,在计算中各物理量必须用同一单位制。几个物理量组合而成的无因次数群又称准数。

根据实验,流体在圆形直管内流动, $Re < 2000$ 时属于层流; $Re > 4000$ 时为湍流; Re 在

2000 ~ 4000 之间称过渡流。流体在管内作滞流(层流)流动时,其质点沿管轴作有规则的平行运动,各质点互不碰撞,互不混合;流体在管内作湍流流动时,其质点作不规则的杂乱运动,并相互碰撞,产生大大小小的漩涡。由于质点碰撞而产生的附加阻力较由黏性所产生的阻力大得多,所以碰撞将使流体前进的阻力急剧加大。

(三) 阻力

流体具有流动性,同时在运动的状态下,流体还有一种抗拒内在的向前运动的特性,称为黏性,黏性是流动性的反面。而衡量流体黏性大小的物理量称为黏度,用符号 μ 表示。当流体在通道内流动时,由于流体有黏性,因此在流体层之间、流体层与管壁之间因相互作用而产生摩擦力,这种因流体的黏性引起的阻碍流体流动的力称为阻力。流体的黏度越大,流体流动时的摩擦力就越大,即阻力就越大,因而流体流速就小,就不易流动。流体阻力的大小不但与流体本身的物理性质有关,而且与流动状况、管壁的形状等因素有关。

由于流体流动才产生阻力,且流体的动压头或动压力是流体流动的一种量度,因此可用以下的一般式表示流体流动时的损失压头(或压力降、阻力)与动压头(或动压力)之间的关系,即

损失压头:

$$H_f = k \frac{w^2}{2g}, \text{m} \quad (1-28)$$

压力降或阻力:

$$\Delta P = k \frac{\rho w^2}{2}, \text{Pa} \quad (1-29)$$

对于气体:

$$\Delta P = k \frac{\rho_0 w_0^2}{2} \frac{T}{T_0}, \text{Pa} \quad (1-30)$$

式中 k ——阻力系数。

流体在通道中流动时所产生的阻力有两种:一种是由于流体沿管壁运动而引起的沿程损失,称直管阻力或摩擦阻力;另一种是流体在流动过程中遇到局部障碍,例如改变流动方向、断面变化、在各种管件里流动等等所引起的局部损失,称局部阻力。在焦炉内气体流动时均能遇到这两种情况。

1. 直管阻力的计算通式

$$\Delta P_{\text{直}} = k_{\text{直}} \frac{\rho w^2}{2} = \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho w^2}{2} \quad (1-31)$$

式中 $k_{\text{直}} = \lambda \frac{L}{d}$, 直管阻力系数;

L ——直管长度, m;

d ——管道的直径(对非圆形管道,即为当量直径 $d_{\text{当}}$), m;

λ ——摩擦系数, λ 是与流体的流动类型及通道的粗糙程度有关的值,其计算式有两种:

层流时计算式:

$$\lambda = 64/Re \text{ (圆形管道)} \quad (1-32)$$

湍流时计算式:

$$\lambda = A/Re^n \quad (1-33)$$

式中 A 与 n 是与管壁粗糙程度有关的系数,由实验测得:

对表面光滑的金属管道: $A = 0.32, n = 0.25$;

对表面粗糙的金属管道: $A = 0.129, n = 0.2$;

对砖砌的通道: $A = 0.175, n = 0.12$ 。

工业上在简化计算中,摩擦系数的取值为:

对砖砌烟道: $\lambda = 0.05 \sim 0.06$;

对金属管道: $\lambda = 0.045$ 。

流体在通过具有分配或汇合的直管通道时,各截面的流量是变化的(见变量气流),阻力系数为:

$$k_{\text{变}} = \frac{1}{3} \lambda \frac{L}{d} \quad (1-34)$$

计算阻力时流速取汇合或分配前通道中的最大流速。

2. 局部阻力

局部阻力计算的一般式为:

$$\Delta P_{\text{局}} = k_{\text{局}} \frac{\rho w^2}{2} \quad (1-35)$$

式中 $k_{\text{局}}$ —— 局部阻力系数,因装置不同而异,一般由实验确定。

焦炉内气体流动常遇到的局部阻力有:突然扩大阻力、突然缩小阻力以及其他阻力。

突然扩大阻力系数见图 1-3。

突然扩大阻力系数按下式计算:

$$k_{\text{扩}} = (1 - F_1/F_2)^2 \quad (1-36)$$

式中 F_1, F_2 —— 扩大前、扩大后的截面积, m^2 。

计算阻力时的流速取扩大前通道中的流速 w_1 。

突然缩小阻力系数见图 1-4。

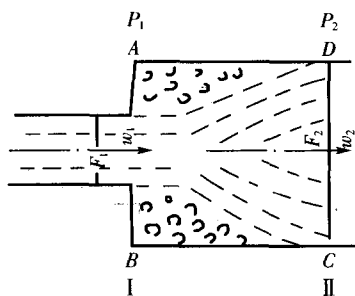


图 1-3 流体在突然扩大管路中的流动

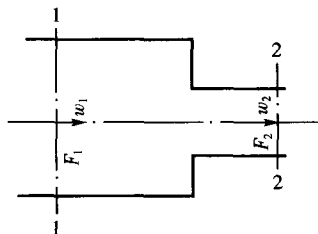


图 1-4 流体在突然收缩管路中的流动

突然缩小阻力系数按下式计算:

$$k_{\text{缩}} = 0.5[1 - (F_2/F_1)^2] \quad (1-37)$$

式中 F_1, F_2 —— 收缩前、收缩后的截面积, m^2 。

计算阻力时的流速取收缩后通道中的流速 w_2 , 即取大的一个流速。

其他阻力系数查附录 7。