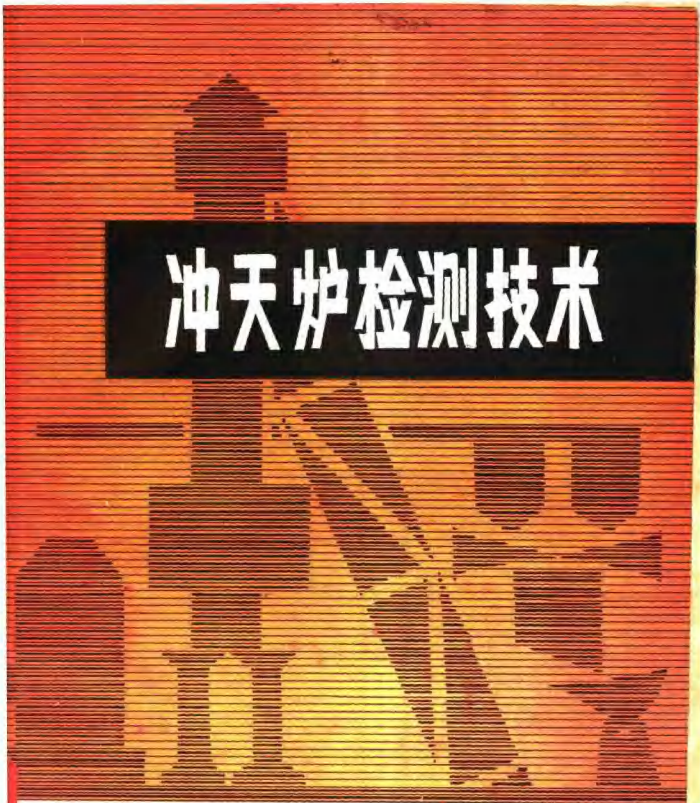




冲天炉检测技术

钱立 庞风荣 编著

北京市机械工业局技术情报所



冲天炉检测技术

钱 立 庞凤荣 编著

北京市机械工业局技术情报所

內 容 簡 介

冲天炉熔炼作为一种多因素的工艺，要实行稳定生产，必须加强检测手段。它对提高铁水质量、节约能源、降低成本和改善劳动条件等有十分密切的关系，生产中迫切需要推广和提高冲天炉的检测技术。

本书从我国当前生产实际出发，以与冲天炉熔炼工艺和铁水内在质量有关的参数为内容，系统介绍了各种检测装置的原理、功能、结构和安装使用等基础知识，对有关的计算和调控方法也作了详细的分析，对检测中存在的问题和改进的方向进行了讨论。

全书共分风量测定、炉气分析、铁水温度测试、料位监控、铁水化学成分快速检测、铁水含气量检测等六章。内容具体、新颖，论述清晰，文字简练，是一本比较全面系统的冲天炉检测书籍。

本书可供工厂技术人员、广大工人使用，亦可作为铸造专业师生教学参考。对于从事铸造工作的领导干部，也是一本有用的读物。

前 言

随着机械工业的发展,对产品性能要求不断提高。铸造生产作为提供毛坯的重要部门,正面临着实现铸件优质精化的重要任务,决定铸件质量的因素很多,但不外是铁水和铸造条件两大方面。其中,铁水质量是基础,是影响材质的关键。

铁水质量包括它的化学成分、温度、氧化夹杂和含气等。控制铁水质量,一切要用数据说话。而数据的获得必须运用各种仪器,对熔炼过程和熔炼结果作必要的检测。科学技术发展到今天,没有对生产过程的检测和控制,科学管理就无从谈起,产品质量的提高也没有依据。冲天炉熔炼作为一种多原材料、多因数的工艺,要实现优质稳定生产,必须加强检测手段。

国外在冲天炉检测控制技术方面已达到了相当高的水平。一般对风量、风温、鼓风湿度、铁水温度、碳硅含量、炉气成分、配料加料等已实现自动检测记录,并应用电子计算机处理各种检测信息,对冲天炉整个熔炼过程进行集中控制。例如,根据铁水化学成分的变化规律综合调控熔化速度、供风强度、风温及铁水温度;根据铁水牌号、炉料成分和价格自动计算配料;根据由同位素料位控制器给出的指令,程序控制加料操作等等。

建国以来,我国冲天炉熔炼技术有了很大的改进和提高。广大铸造工作者结合我国资源条件,革新创造了各种不同型式的冲天炉,在熔炼的某些单项指标方面已经跨入世界先进行列。然而,在冲天炉检测控制技术方面进展不大,与国外相比还很落后。多数工厂缺乏必要的检测手段,仍凭经验判断炉况、掌握冲天炉的熔炼过程。有检测手段的工厂多半也限于指示、记录,进行综合检测和自动控制的为数极少。

近几年来,在整顿、改革、巩固、提高的方针下“质量求生存”的观念,已逐步被更多的人所认识,加强检测手段也引起了科研、生产、教学各部门的重视。继1978年5月在芜湖召开全国铸铁熔炼技术座谈会后,1979年4月又在常德召开了冲天炉测试技术协调会,提出了研究课题,制定了规划。在全国第三届、第四届铸造年会,第一次铸造质量控制与测试技术年会上,比较集中地检阅和交流了多年来冲天炉检测技术的研究成果,展出了产品和样机。这些年的主要进展可概括如下:

冲天炉配料、加料方面——国内进展较大,部分厂已实现了加料的机械化与自动化。济南铸锻所与济南第二机床厂协作,用电磁配铁称可自动定值、自动补偿和极限超重报警,基本上消除了人为因素造成的配料误差。沈阳铸造厂、南京第二机床厂等许多单位基本上实现了配料加料程序控制,并配有场致发光动态模拟和大屏幕数显装置,操作人员可在控制室内进行工作。目前国内配料加料的程序控制,由炉气压差式、激光式和同位素式等多种料位控制器发出主控制信号来完成。

风量方面——华中工学院研制了旋涡风量计,并在武汉重型机器厂等单位进行了生产性试验。河北工学院进行了双笛风量计和单笛双液风量计的研制工作,目前正在天津、北京等地推广使用。上海机电设计院与上海机床厂在十吨冲天炉上完成了等重送风的自

动控制系统，用于生产，效果明显。

炉气分析方面——除了传统的吸收式仪器外，无锡新华机械厂采用 HQG—71 型红外气体分析仪，对炉气成分进行了连续测定取得了良好的效果。专用于冲天炉炉气测定的气相色谱仪也正由南京气体分析仪器厂进行研制。

铁水连续测温方面——冲天炉铁水连续测温，能及时反映炉况变化，便于工人进行风焦的调整。78 年重庆仪表材料研究所与江北机械厂合作研制成功了连续测温装置，以后各地在外保护套管等方面又有改进。79 年 8 月、80 年 2 月天津、北京相继召开了连续测温的经验交流会。

炉前成分检测方面——在突破炉前由三角试样(或园棒试样)作经验判断上，近年进展较大。北京工业大学与有关工厂合作已将热分析法快速定碳、定硅用于生产。天津大学研制的扩展微分测量仪有多种功能，用于热分析可提高测量精度。洛阳农机学院与第一拖拉机厂试验了直接电阻法快速测定铁水碳当量及铸铁共晶团大小，也取得了较好的效果。

此外，在铁水浓差电池快速定氧，铁水含气量分析和底焦高度等方面有关单位正在进行试验。

鉴于冲天炉检测技术对于提高铁水质量、节约能源、降低成本和改善劳动条件等有十分重要的意义。普及和提高冲天炉检测技术，是当前急待解决的任务。故此，作者综合国内外有关资料和在在这方面所作的工作和体会，决定编著《冲天炉检测技术》，献给广大读者，以期共同提高。

本书从我国当前生产实际出发，以与冲天炉熔炼工艺和铁水内在质量有关的参数为内容，全书共分风量测定、炉气分析、铁水温度测量、料位监控、铁水化学成分快速检测、铁水含气量检测等六章。每章均在阐明基本原理的基础上，详细叙述各种检测装置的功能、结构与使用，以便读者能根据本厂条件正确选择和合理安装、使用各种检测仪器。

本书对有正式产品的仪器、没有正式产品但已成熟可以自制的仪器以及具有方向性而尚需进一步研究的仪器，作了不同的处理。对有正式产品的仪器重点在原理和仪器的组成，并尽量介绍它的生产厂和价格。至于使用和安装调试细则，用户在购得产品后，说明书上均有详细记载，本书不多费笔墨。没有正式产品而行之有效的仪器，对结构、安装和使用注意事项，从便利用户自制自用的角度考虑，都有较细致的交待。具有方向性有待研究的仪器，则力求提出方案，抛砖引玉，以便读者去摸索和创新。

本书可供工厂技术人员、广大工人使用，亦可作为铸造专业师生教学参考。对于有志于铸造事业的领导干部，它也是一本有益的读物。

本书第一、二、四章由钱立编著，第三、五、六章由庞凤荣编著。由于时间仓促，笔者水平有限，书中难免有缺点和错误，欢迎读者批评指正。

作者 1980 年 8 月

目 录

前 言

第一章 风量测定

第一节 送风管道内的流动特性 (1)

一、流动的紊流特性 (1)

(1) 鼓风的雷诺数 (1)

(2) 紊流的速度分布 (2)

二、空气重度 (4)

(1) 变压降流量通式 (4)

(2) 空气重度计算 (4)

第二节 风量测定方法 (7)

一、标准孔板法 (7)

(1) 工作原理 (8)

(2) 孔板设计的概念 (10)

(3) 差压计的选择 (11)

(4) 风量实用公式 (14)

(5) 孔板的使用条件 (17)

(6) 评价 (18)

二、毕托管法 (19)

(1) 工使原理与结构 (19)

(2) 两种风量实用公式 (20)

(3) 毕托管的使用条件 (23)

三、笛形管法 (24)

(1) 工作原理 (24)

(2) 单笛双液流量计的结构与使用 (26)

(3) 双笛流量计的结构与使用 (31)

(4) 常用流量计的比较 (33)

四、其它方法 (34)

(1) 旋涡流量计 (34)

(2) 弯头流量计 (35)

第三节 风量的运算 (35)

一、风量的修正与换算 (35)

(1) 风量的修正	(35)
(2) 风量的换算	(37)
(3) 风量的综合修正表	(39)
二、漏风量与入炉风量	(39)
(2) 漏风量的确定	(39)
(2) 入炉风量的计算与核定	(39)
第四节 风量的调控	(41)
一、风量与风压的关系	(41)
(1) 按风量操作的重要性	(41)
(2) 风压及其测量方法	(42)
二、风量调控的几个问题	(46)
(1) 以最佳工作点调控风量	(46)
(2) 注意季节和地区的差异	(48)
三、风量测定的二次仪表	(49)
(1) 动圈式毫伏计与电子电位差计方案	(49)
(2) 差动仪方案	(50)
(3) 电动单元组合仪表方案	(50)

第二章 炉气分析

第一节 炉气分析方法	(52)
一、化学式气体分析器	(52)
(1) 工作原理	(52)
(2) 炉气取样	(54)
(3) 分析操作	(55)
(4) 数据整理	(57)
(5) 简捷分析法	(58)
二、热导式气体分析器	(58)
(1) 工作原理	(58)
(2) 仪表型号	(60)
三、气相色谱仪	(62)
(1) 工作原理	(62)
(2) 载气与固定相	(63)
(3) 标准曲线与定量计算	(64)
(4) 仪表型号	(64)
四、红外线气体分析仪	(66)
(1) 工作原理	(66)
(2) 仪表型号	(66)

第二节 燃烧工况的分析 (68)

- 一、燃烧工况的热工分析 (68)
 - (1) 焦炭的发热效率 (68)
 - (2) 炉子的热效率 (68)
- 二、燃烧工况的冶金分析 (69)
 - (1) 铁水温度 (70)
 - (2) 炉气氧化性 (70)

第三章 铁水温度测量

第一节 铁水测温仪表 (72)

- 一、热电偶 (73)
 - (1) 工作原理 (73)
 - (2) 热电偶的选用 (74)
 - (3) 热电偶的焊接与校验 (75)
 - (4) 热电偶变质的判断与处理 (79)
 - (5) 参考端温度补偿 (79)
- 二、二次仪表 (83)
 - (1) 动圈式测温仪表 (83)
 - (2) 电子自动平衡记录仪 (85)
 - (3) 数字显示仪表 (90)
 - (4) 仪表故障及其排除 (90)
- 三、热电偶测温装置的误差 (90)
 - (1) 偶的测温误差 (91)
 - (2) 二次仪表误差 (92)
 - (3) 测温线路与干扰误差 (93)
 - (4) 误差计算举例 (94)

第二节 测温方法与数据分析 (94)

- 一、快速测温 (94)
 - (1) 快速偶测温装置 (95)
 - (2) 测温位置与误差分析 (96)
 - (3) 自制简易偶测温法 (96)
- 二、连续测温 (97)
 - (1) 偶与二次仪表的选配 (97)
 - (2) 两层保护套管的选用 (98)
 - (3) 前炉连续测温要点 (102)

(4) 过桥连续测温要点	(103)
三、测温数据分析	(103)
(1) 快速测温数据分析	(104)
(2) 连续测温数据分析	(104)
四、常用热电偶的分度表	(108)
(1) 铂铑 ₃₀ —铂铑 ₆ 热电偶分度表	(108)
(2) 铂铑 ₁₀ —铂热电偶分度表	(112)
(3) 镍铬—镍硅(镍铝)热电偶分度表	(118)
(4) 镍铬—考铜热电偶分度表	(123)

第四章 料位监控

第一节 料位监控方法 (126)

一、炉气压差式料位监控	(126)
(1) 工作原理	(126)
(2) 主要型式	(128)
二、半导体激光式料位监控	(132)
(1) 工作原理	(132)
(2) 结构与应用	(132)
三、机械式料位监控	(133)
(1) 工作原理	(133)
(2) 应用	(133)

第二节 炉后的计数与显示 (133)

一、批料数显	(133)
(1) 基本类型	(133)
(2) 三种常用的计数器	(133)
二、程序控制器	(134)
(1) ZLCK-1 型加料配料程序控制器	(134)
(2) 有激光料位器的程序控制器	(137)
(3) CTL 型程序控制器	(137)
(4) 由继电器构成的程序控制器	(138)
三、熔化率连续测定	(140)
(1) 问题的提出	(140)
(2) 测定装置	(140)
(3) 差距	(142)

第三节 底焦高度与铁水量的检测 (142)

一、底焦高度的检测	(142)
-----------	-------

(1) 开孔观察法.....	(143)
(2) γ 射线法.....	(143)
(3) 压差法.....	(143)
二、前炉铁水量的检测.....	(144)
(1) 重量法.....	(144)
(2) 高度法.....	(145)

第五章 铁水化学成分的快速检测

第一节 炉前热分析法.....	(146)
一、热分析法测定碳硅含量.....	(146)
(1) 工作原理.....	(146)
(2) 测定装置.....	(149)
(3) 碳、硅含量的确定.....	(151)
(4) 对公式和曲线的讨论.....	(152)
二、其它热分析法.....	(153)
(1) 热分析法测球化率.....	(153)
(2) 微分热分析法.....	(154)
第二节 试验室的仪器分析法.....	(155)
一、库仑滴定分析法.....	(155)
(1) 库仑滴定法定碳、硫原理.....	(156)
(2) 测定装置.....	(156)
(3) 应用.....	(158)
二、光电直读光谱分析法.....	(158)
(1) 工作原理.....	(159)
(2) 仪器的类型与结构.....	(160)
(3) 应用.....	(165)
三、其它光谱分析法.....	(166)
(1) X 射线荧光光谱分析简介.....	(166)
(2) 红外光谱法定碳、硫简介.....	(167)
第三节 成分分析仪器性能和分析结果的有关术语.....	(167)
一、仪器性能的术语.....	(167)
(1) 灵敏度与检测极限.....	(167)
(2) 准确性、精度和重复性.....	(168)
(3) 选择性.....	(168)
二、分析结果的术语.....	(168)
(1) 被测组分含量的表示方法.....	(168)

(2) 精确度、精密度与误差	(169)
----------------	-------

第六章 铁水含气量检测

第一节 铁水氧化与炉前快速定氧	(170)
-----------------	-------

一、铁水氧化及其原因	(170)
(1) 铁水氧化的表现	(170)
(2) 铁水氧化的基本原因	(170)
二、炉前浓差电池快速定氧	(172)
(1) 基本原理	(172)
(2) 测定装置	(175)
(3) 数据及分析	(177)

第二节 铸铁中氧、氮、氢的测定	(179)
-----------------	-------

一、氧的真空熔融法测定	(179)
(1) 工作原理	(179)
(2) 装置与测定方法	(179)
二、气相色谱法定氧、氮、氢	(182)
(1) 测定方法	(182)
(2) 仪器类型与使用	(183)
三、库仑滴定法定氧	(185)
(1) 定氧方法	(185)
(2) 仪器与应用	(186)
四、红外脉冲法定氧	(186)
(1) 工作原理	(186)
(2) 仪器与应用	(186)

第一章 风量测定

冲天炉工作中的风量对焦炭的燃烧状况、铁水温度、熔化率、元素烧损和炉况的稳定性影响极大。当焦炭质量较差时，风量大小及其分配方式就更为突出。我国的炉料组成与工业发达国家不同，多年来为适应本国焦炭的特点，采取了以强化燃烧为中心的种种改炉措施。然而，由于在风量控制上注重得不够，致使大炉控制失却意义。在冲天炉工作的风、焦、料、型四大要素中，焦炭与炉料是基础，风量则是可控因素中的关键。如果不以风量为前提，炉型将难以发挥其应有的作用。现实生产中，多种炉型间之所以缺乏可比性，一些改炉措施之所以效果不稳定，以及冲天炉工作之所以长期得不到提高，无不与风量有关。因此，要提高冲天炉工作的质量、加强炉子操作的科学性，研究风量的测定与控制乃是当今的一项重要课题。

风量的测定方法很多，常用的有标准孔板法、毕托管法、笛形管法等。它们各有其使用的范围。本章的目的在于详细介绍风量测定装置的理论结构与结构，并通过分析，纠正当前在风量测试与调控中存在的错误观点和混乱的计算方法。鉴于风压与风量之间有十分密切的关系，在测试方法上又有许多共同点，若风压及其测定装置单独构成一章内容比较单薄，故在本章一併讨论。

为了便于叙述和深化对风量测定问题的认识，本章首先分析送风管道内的流动特性。在此基础上再进一步研究风量的测定、运算和调控诸问题。

第一节 送风管道内的流动特性

冲天炉的风量都是在送风管道上测定的。然而，在生产实际中却往往出现种种不合理现象。例如：不问管道条件，任意选用和安装风量计；不管风温和风压，风量一律不作修正；不管公式的来历，随便套用计算等等。所有这些，都是由于对送风管道内空气的状态参数和流动特性缺乏了解引起的。为此，本节着重讨论流动特性和空气的重度。

一、流动的紊流特性

(1) 鼓风的雷诺数

流体的运动按其形态可分为层流和紊流两种。在层流流动中，质点的流迹互相平行，作层状运动，各层间互不混杂，其流动方向与管轴平行。在紊流流动中，运动杂乱无章，没有层次，流体质点间频繁地发生着大量的质量交换。

利用雷诺数，可以判断流体属于何种运动形态。

若流体的雷诺数 $R_{e,0}$ 大于临界雷诺数 $R_{e,c}$ ，则为紊流。

若流体的雷诺数 $R_{e,0}$ 小于临界雷诺数 $R_{e,c}$ ，则为层流。

对于光滑圆管， $R_{e,c} = 2320$ 。

按定义,

$$R_{e, \nu} = \frac{VD}{\nu}$$

式中 V 为流体平均流速;

D 为管道内径;

ν 为流体运动粘度。

对空气, 上式可化简整理成:

$$R_{e, \nu} = 21220 \frac{Q}{\nu D}$$

式中 Q 为风量, 米³/分;

D 为风管内径, 米;

ν 为空气的运动粘度, 厘斯。标准气压下不同温度的空气粘度值 ν 见表 1—1。当工作压力高于标准气压时, ν 值有所下降, 但变化不大, 故压力影响忽略不计。

表 1—1 标准气压下, 不同温度的空气运动粘度

温度 (°C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
运动粘度 (厘斯)	13.7	14.7	15.7	16.6	17.6	18.6	19.6	20.5	21.7	22.9	23.8

举例: 某内径为 $\varnothing 200$ 毫米的风管内, 测得风压 (表压) 为 100 毫米汞柱, 风温为 40°C, 风量为 40 米³/分。忽略风压的影响, 由表查得: $\nu = 17.6$ 厘斯。于是, 流体雷诺数

$$R_{e, \nu} = 21220 \times \frac{40}{17.6 \times 0.2} \approx 2.4 \times 10^5。此值百倍于 Re_k 。流动无疑属于紊流。$$

当为热风时, 由关系式 $R_{e, \nu 2} = \frac{T_2}{T_1} \frac{\nu_1}{\nu_2} R_{e, \nu 1}$, 不难证明其雷诺数将低于冷风。但仍不失为紊流。

推至一般, 各种冲天炉管道内的流动都属紊流。

(2) 紊流的速度分布

根据流体力学的观点, 紊流中任一点的瞬时流速发生着随机的脉动。然而从时均运动要素分析, 任一点的时均流速又是固定的, 与时间无关。因此, 按照统计规律把紊流称作假稳定流或时均稳定流。与层流相比, 由于紊流瞬时速度的脉动和质点间的频繁交换, 管截面上的 (时均) 速度分布被大大地均匀化了。只是在管壁附近, 受管壁的阻碍, 流体质点的自由交换受到限制, 遂出现了层流边层和过渡层。这种层流边层和过渡层的厚度, 随雷诺数的增大而减小, 在冲天炉管道内, 一般都小于 1 毫米。进入过渡层后, 流速陡降, 在管壁上流速等于零。图 1—1 给出了随 $R_{e, \nu}$ 的不同, 截面上速度分布图形的变化。

半个多世纪以来, 人们对紊流作了大量的研究, 但其速度分布尚未能从理论上找出规律, 至今仍依赖于试验方法加以确定。在众多的方法中以尼古拉兹试验最为完整。

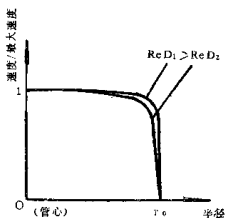


图 1-1 紊流的截面速度分布

光滑管道的尼古拉兹试验公式具有指数的形式(参照图 1-2),

$$\frac{V_r}{V_{max}} = \left(\frac{y}{R} \right)^{1/n}$$

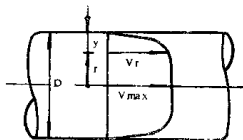


图 1-2 紊流速度的计算关系

式中 V_r 为距轴心 r 处的流速;

V_{max} 为轴心最大流速;

y 为测点至管壁的距离;

R 为风管半径;

n 为与 Re_0 有关的纯数。

利用尼古拉兹公式进行积分运算, 可求得:

$$\frac{\bar{V}}{V_{max}} = \frac{2n^2}{(2n+1)(n+1)}$$

解上两式即得:

$$\frac{y_c}{R} = \left(\frac{\bar{V}}{V_{max}} \right)^n$$

式中 $\bar{V}$ 为平均流速;

y_c 为平均流速处至管壁的距离。

不同 R_{eD} 下之 n 、 $\bar{V}/v_{\max}$ 、 y_c/R 值列于表1—2。显然，只要知道 R_{eD} 在哪个数量级范围，即可由表1—2方便地确定出平均流速的位置及其与最大流速的关系。

例如： $R_{eD} = 2.4 \times 10^5$ 时，由内插法可得平均流速大致在距管壁 $0.240D$ 处，而 $\bar{V}/v_{\max} \approx 0.821$ 。

表 1—2 平均流速与最大流速的关系

R_{eD}	n	$\bar{V} / v_{\max}$	Y_c / R
4×10^3	6.0	0.791	0.245
2.3×10^4	6.6	0.806	0.242
1.1×10^5	7.0	0.817	0.241
1.1×10^6	8.8	0.850	0.238
大于 2×10^6	10.0	0.865	0.236

必须指出，使用尼古拉兹公式应具备的条件是紊流已充分展开，流速是旋转对称分布，最大流速在管轴心之处。此外，该公式在推导中没有考虑层流边层的因素。

二、空气重度

(1) 变压降流量通式

由测量压力降求得流量的测量仪表称为变压降流量计。这种仪表因其本身的通用性和易于大量制造而得到广泛的应用。不论感受件的形式如何不同，变压降流量与压差之间存在平方根关系，亦即变压降的流量通式为：

$$Q = \alpha A \sqrt{\frac{\Delta h}{\gamma}}$$

式中 Q 为空气流量；

α 为与感受件种类和结构有关的流量系数；

A 为主要取决于管截面和感受件的常数项。有时受流体绝热膨胀和状态参数的影响，数值在不大的范围内变动；

Δh 为压差；

γ 为工作状态下空气的重度。

十分明显，采用一定的感受件，在特定的管道上，流量与压差间的关系将受工作状态下空气重度的变化而改变其数值关系。因此，如何计算不同工作状态下空气的重度是十分重要的。

(2) 空气重度计算

由理想气体状态方程式知，不同工作状态下气体的 PV/T 相等。亦即，

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$$\text{因 } \gamma = \frac{1}{V}, \quad \text{故 } \frac{P_1}{T_1 \gamma_1} = \frac{P_2}{T_2 \gamma_2}$$

$$\gamma_2 = \frac{P_2 T_1}{P_1 T_2} \gamma_1$$

已知压力为 760 毫米汞柱，温度为 0°C 时，空气的重度为 1.293 公斤/米^3 。故得：

$$\gamma = 0.4645 \cdot \frac{P}{T} \text{ 公斤/米}^3$$

式中 P 为测点处空气的绝对压力，毫米汞柱；

T 为测点处空气的绝对温度， $^\circ\text{K}$ ；

γ 为测点处(即工作状态 P 、 T 下)空气的重度，公斤/米³。

按理，空气并非理想气体，由上式求得的重度尚须除以压缩系数。不过冲天炉的送风压力不大，压缩系数接近于 1(0.998~0.999)，可不予考虑。

例：某地大气压力为 756 毫米汞柱，测得管道内表压为 100 毫米汞柱，温度为 40°C 则该工作状态下空气的重度 $\gamma = 0.4645 \cdot \frac{756 + 100}{313} = 1.270 \text{ 公斤/米}^3$

当空气中有水汽时，湿空气的重度应是湿空气经干燥后干燥空气在工作状态下的重度 γ_s 和湿空气中水汽在工作状态下重度 γ_3 之和：

$$\gamma_{\text{湿}} = \gamma_s + \gamma_3$$

其中，

$$\gamma_s = 0.4645 \cdot \frac{P - \varphi P_s}{T}$$

$$\gamma_3 = \varphi \gamma_s$$

式中 P 、 T 的含义同前；

P_s 、 γ_s 分别为工作状态下的饱和蒸汽压和饱和蒸汽密度。可近似地由表 1—3 查得。

φ 为工作状态 P 、 T 下湿空气的相对湿度。不少人往往错误地以大气温度代替。正确的作法应由 $\varphi = \varphi' \cdot \frac{T' P \gamma_s'}{T P' \gamma_s}$ 进行换算。在此， P' 、 T' 、 φ' 、 γ_s' 分别为大气的相应参数。大气压 P' 应由气压表测得或向当地气象台询问。在不具备这两个条件时可采用表 1—4 中的气象资料。

例：某地某天的气温为 20°C ，气压为 756 毫米汞柱，大气相对湿度为 60%，风管测点表压为 100 毫米汞柱、温度为 40°C ，求工作状态下空气的重度。

由表 1—3 查得 $\gamma_s' = 17.3 \text{ 克/米}^3$ ， $\gamma_s = 51.2 \text{ 克/米}^3$ ， $P_s = 55.3 \text{ 毫米汞柱}$ 。

$$\varphi = \varphi' \cdot \frac{T' P \gamma_s'}{T P' \gamma_s} = 0.6 \times \frac{293 \times (756 + 100) \times 17.3}{313 \times 756 \times 51.2} = 0.2149$$

$$\begin{aligned} \gamma_s &= 0.4645 \cdot \frac{P - \varphi P_s}{T} = 0.4645 \times \frac{(756 + 100) - 0.2149 \times 55.3}{313} \\ &= 1.253 \text{ 公斤/米}^3 \end{aligned}$$

$$\gamma_3 = \varphi \gamma_s = 0.2149 \times 51.2 = 11.00 \text{ 克/米}^3 = 0.011 \text{ 公斤/米}^3$$

故 $\gamma_{\text{湿}} = \gamma_s + \gamma_3 = 1.253 + 0.011 = 1.264 \text{ 公斤/米}^3$

将此值与干空气的重度 $\gamma_{\text{干}} = 1.270$ (见前例)相比，重度相差 0.47%。

表1—3

标准大气压下的饱和蒸汽压和饱和蒸汽密度

温 度	饱 和 蒸 汽 压	饱 和 蒸 汽 密 度
(°C)	(毫米汞柱)	(克/米 ³)
25	0.47	0.5
20	0.77	0.9
15	1.24	1.4
10	1.95	2.1
5	3.0	3.2
0	4.6	4.8
2	5.3	5.6
4	6.1	6.4
6	6.9	7.3
8	8.0	8.3
10	9.2	9.4
12	10.5	10.7
14	12.0	12.1
16	13.6	13.6
18	15.4	15.4
20	17.5	17.3
22	19.8	19.4
24	22.4	21.8
26	25.2	24.4
28	28.3	27.2
30	31.8	30.3
32	35.7	33.8
34	39.9	37.6
36	44.6	41.7
38	49.7	46.2
40	55.3	51.2
42	61.5	56.5
44	68.3	62.3
46	75.6	68.7
48	83.7	75.6
50	92.5	83.0
100	760	597.7
150	3571	2548
200	11683	7864