

钢液真空脱气

张振凯 编著

中国·南京

1994

钢液真空脱气



张振凯 编著

中国·南京

1994

谨以此书献给

南 钢

并作为个人六十年

冶金生涯的纪念

前 言

真空脱气、炉外精炼、连续注锭及氧气转炉的顶吹和底吹,无疑是近四十年炼钢技术上的卓越成就。从任何方面说,都是突破了炼钢的技术传统。从生产技术上来看,前二者不及后二者影响的深广,从提高质量来看,前二者却把钢质量推到更高的阶段;从真空意义来谈,把冶金推向更新的范畴。目前各方面科学和工程技术的进步,对真空冶金提出更高的要求。钢液的真空脱气,使钢内溶解气体及夹杂减少,从而使钢的机械性能,得到了极大的决定性的改进,不论是“大路货”、优质炭素钢、低合金钢、高合金钢及高级钢,特别把目前大量生产的沸腾钢及半脱氧钢全部地应用于连续注锭、真空脱气这一环节,在现阶段成为首要无疑是。为了把生产技术上的理论和实践,及二十年来真空脱气所取得的成果,介绍给国内的炼钢同志,编写成这一本书同已有的《钢液真空处理》(王殿录,洪保仪编),以姐妹篇来看,无疑是“不重复”和有益的。

资料的重要部分,一部分取材于下列各书,取材于分散的杂志篇章的恕未另列。

- 1) Vacuum Degassing of Steel, SP. Rpt. No. 92
- 2) Winkler: Vacuum Metallurgy
- 3) 制钢技术的现状及今后的展开(日)
- 4) 钢的真空溶解及真空脱气的进步(日)
- 5) Knuppel: Deoxidation und Vakuumbehandlung von stahlschmelzen, Bd. I
- 6) Kinetik Metallurgischen Vorgänge bei der Stahlerzeugung
- 7) Secondary Steelmaking
- 8) Proceedings of the 3rd, 4th and 5th International Conference on Vacuum Metallurgy
- 9) Thyssenforschung, 1971, Ht, 3+4

错误之处,容或不少,希读者指出,以便纠正。

南京钢铁厂——张振凯

一九九三年五月

内 容 简 介

本书概括地介绍了钢液的真空脱气的现行各种方法、理论基础、计算依据和实践结果,可作为研究人员、设计人员、生产技术有关人员参考。书后的附条,几乎全部是各国著名钢厂生产实践的结果,著名专家研究的结晶。提供给读者比较分析和讨论参考。此书原稿完成于1982年,出版于1994年,经过十二年,期内追加了不少新见的材料。材料虽仍嫌稍旧,但更多的增添,仍不失为一本值得参考的书。

编 著 者 附 志

18—12—1994

目 录

第一章 真空工程	(1)
1. 真空原理及真空范围	(1)
2. 压力换算	(2)
3. 有效抽气速度	(2)
4. 决定抽气时间的计算图表	(3)
5. 开始时气体含量及漏泄	(4)
6. 抽气过程中气体的放出	(4)
7. 抽气工场设计	(5)
8. 真空脱气工场使用的耐火材料	(5)
9. 蒸汽喷射器	(6)
10. 真空脱气控制计算系统	(10)
第二章 真空脱气的热力学及动力学	(11)
1. 钢液内 H_2 、 N_2 及 O_2 的溶解度	(11)
2. 钢液内 C 及 O 与 C 的脱气作用	(13)
3. 金属高速真空脱气的条件	(15)
4. 脱气的不同阶段及浓度的物质迁移	(19)
5. 气泡核心的生成与脱气	(24)
6. 用惰性冲洗气体来脱气	(28)
7. 用钢液流滴降落来脱气	(32)
8. 由熔体到气相的物质迁移	(36)
9. 罐内脱气与时间及系统内参数的关系	(39)
10. 在脱气过程中金属元素的蒸发	(41)
11. 在脱气中基本金属的蒸发损失及合金元素与不纯物的蒸发	(42)
12. 熔体耐火材料及渣的反应	(47)
13. 热损失问题	(51)
第三章 现行脱气的理论计算及其数学模型	(54)
1. 罐内脱气与喷入冲洗气体	(54)
2. 质量迁移与气泡逃出	(58)
3. 罐内气泡的逃出	(63)
4. 流滴脱气及薛尔坦模型	(66)
5. H、N 及 O 脱去的一般计算	(68)
6. DH 脱气数学模型	(72)
7. RH 原理及其数学模型	(73)
8. RH 脱气中的脱 C	(77)
第四章 现行脱气处理	(79)
1. 通论——现在几种通用的方法	(79)
2. 罐内脱气	(79)
3. 流滴脱气	(86)
4. DH 脱气	(93)
5. RH 脱气	(98)
6. DH 方法与 RH 方法的比较	(102)

7. 几种变型的循环脱气方法	(103)
热流方法	(103)
转移脱气方法	(104)
8. 模内脱气	(105)
在真空槽内真空浇注	(105)
没有外真空室的真空浇注	(109)
钢锭脱气	(109)
第五章 对真空脱气的讨论	(112)
1. 气体含量及脱气动力学	(113)
2. 钢的纯洁度	(114)
3. 真空冶金潜能	(114)
4. 与生产过程相结合	(114)
5. 脱气方法对钢性质的影响(锻造钢,低合金钢,高合金钢,高级钢)	(115)
6. 大量钢的真空脱气及控制钢锭反应	(121)
7. 应用真空脱气在连铸上浇沸腾钢	(122)
图集	125
图 I - 1/11	127-130
图 II - 1/60	131-150
图 III - 1/15	151-156
图 IV - 1/105	157-191
图 V - 1/15	192-195
附录一	196
A1 各种真空脱气的真空度与 H 含量的关系, A1-1/A1-A2	199
A2 流滴脱气,真空浇注及罐内脱气的 H 含量, A2-1/A2-4	200-201
A3 大气浇注,真空浇注,流滴脱气及出钢脱气的夹杂比较, A3-1/A3-4	202-203
A4 出钢脱气的 H 及 O 含量,流滴脱气的 O 含量, A4-1/A4-3	204-205
A5 出钢脱气的作业参数及出钢脱气钢与大气钢的比较, A5-1/A5-2	206-207
A6 出钢脱气的炭素钢的夹杂, A6-1	208
A7 重轨钢脱气处理后 H 含量的变化, A7-1	209
A8 滚珠轴承钢出钢脱气及 DH 脱气及夹杂与低合金钢夹杂, A8-1/A8-3	209-210
A9 DH 处理极低炭素钢, A9-1/A9-7	211-214
A10 DH 处理对钢机械性能的效果, A10-1/A10-5	215-216
A11 DH 处理作业中的数据, A11-1/A11-8	217-220
A12 DH 处理半脱氧钢, A12-1/A12-14	221-225
A13 RH 处理中操作诸参数, A13-1/A13-14	226-230
A14 用 RH 处理的沸腾钢及一般沸腾钢, A14-1/A14-3	231
A15 RH 处理操作诸参数, A15-1/A15-16	232-238
A16 真空浇注锻钢锭, A16-1/A16-13	239-248
附录二	249-256
1. 真空处理的基础	
2. 气体由钢液内的放出	
3. 喷吸气体喷吹钢液脱气	

钢液真空脱气

第一章 真空工程

1. 真空原理及真空范围

真空技术的原理来自气体动力学的理论。

粒子密度 一个理想气体在℃及 1013 毫巴 (mbar) 时, 它的粒子密度 $n = 2.69 \times 10^{19}$ /厘米³, 即就是在℃, 10^{-13} 毫巴时, 1cm³ 容积内有 2.69×10^3 个粒子。在真空过程中, 粒子密度是介于这个限值的范围内。

热速度与压力 在均质的气体中, 没有外力的作用, 气体分子以平均热分子速度 (u) 运动:

$$u = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (I-1)$$

R 为气体常数 (8.313×10^7 爱耳格/克分子·K), T 为绝对温度, M 为气体的分子量。

在 20℃ 时, H₂ 的 u 值约为 1757m/s, 水蒸气为 585m/s, 空气为 462m/s, 汞蒸气 175m/s, 有机化合物蒸气 (M=350) 为 132m/s。

在充满气体容器的壁上, 气体粒子以热速度碰撞, 在每 cm²·S 上的次数为

$$A = \frac{nu}{6} \cdot \frac{1}{\text{cm}^2\text{s}} \quad (I-2)$$

气体分子的质量为 m, 所生的压力为 p

$$p = \frac{nm\bar{u}^2}{3}, [\text{受力/面积}] \quad (I-3)$$

平均自由路程 气体的粒子密度为 n, 一个粒子的气体动力学碰撞直径为 δ, 径返经过的路程为 X, 不碰撞的机率为

$$W(X) = e^{-(\sqrt{2} \pi \delta^2 n)X} \quad (I-4)$$

这平均自由路程 Λ 为距离, 即一个不碰撞飞行的机率约为 e⁻¹,

$$\Lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \delta^2 n} = 6.32 \times 10^3 \frac{\eta}{p} \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{cm} \quad (I-5)$$

$$= 4.74 \times 10^2 \frac{\eta}{p} \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{cm} \quad (I-5a)$$

在 (I-5) 式中, η 为 1 泊 (poise), p 为托 (mmHg, Torr) 时, 在 (I-5a) 中, η 为帕斯克 (pascal), p 为毫巴 (mbar)。

在单位时间, 单位面积时, 在表面上分子蒸发的速度为 G。

$$G = \frac{mnu}{4} \quad (I-6)$$

所生的压力 p 为毫巴。

$$G = 4.38 \times 10^{-2} p \sqrt{\frac{M}{T}}, \text{g/cm}^2 \cdot \text{s} \quad (I-7)$$

蒸气的 $\Lambda \geq$ 蒸发面到冷凝面的距离, 永久气体的 p 蒸气的 $p \ll$ 蒸气的 p 。

真空的范围

图(I-1) 表面碰撞数 $A[\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$, 粒子数密度 $n[\text{cm}^{-3}]$,

平均自由路程长 $\Lambda[\text{cm}]$ 均为压力的函数(空气在 20℃ 时)

所谓真空是指 1013 毫巴以下的范围:

粗真空	1013 毫巴以下
低真空	$1 \sim 10^{-3}$ 毫巴
高真空	$10^{-3} \sim 10^{-7}$ 毫巴
超高真空	$10^{-7} \sim 10^{-15}$ 毫巴

设 d 为容器的尺寸。

粗真空	$\Lambda < d$
低真空	$\Lambda \approx d$
高真空	$\Lambda > d$

超高真空 真空器的表面须大。温度在 150℃ 时, 压力 $< 10^{-8}$ 毫巴。加热在 450℃ 以下时, 压力仍须下降, 使气体抽出加速。

2. 压力换算

在下表内为不同单位压力的换算。现在国际单位为帕斯克($1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2 = 1\text{kg}/\text{ms}^2, 1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$)

表 I-1: 压力换算

求得单位 给定单位	Pa ($\text{kg}/\text{ms}^2 \cdot \text{N}/\text{m}^2$)	Dyn/ cm^2 (μbar)	Torr ($\text{mmHg} \times 10^3$)	kp/ $\text{cm}^2 = (\text{at})$ ($10^4\text{kp}/\text{m}^2$)	atm (760Torr)	%Vakuum
pa(kg/ms^2)	1	10p	$7.5 \times 10^{-3}\text{p}$	$1.02 \times 10^{-5}\text{p}$	$9.87 \times 10^{-6}\text{p}$	$\frac{1.013 \times 10^5 - p}{1.013 \times 10^5}$
Dyn/ cm^2 (μbar)	0.1p	p	$7.500 \times 10^{-4}\text{p}$	$\frac{1.0197 \times 10^{-6}\text{p}}{10^{-6}}$	$9.869 \times 10^{-7}\text{p}$	—
Torr(mmHg)	$1.33 \times 10^2\text{p}$	1332.2p	p	$\frac{1.3595 \times 10^{-3}\text{p}}{10^{-3}}$	$\frac{1.3158 \times 10^{-3}\text{p}}{10^{-3}}$	$\frac{760 - p}{7.6}$
kp/ cm^2 ($10^4\text{hp}/\text{m}^2$)	$9.81 \times 10^4\text{p}$	$\frac{98.067 \times 10^4\text{p}}{10^4}$	735.56p	p	0.9678p	$\frac{1.0332 - p}{0.010332}$
atm(760torr)	$\frac{1.013 \times 10^5\text{p}}{10^5}$	$\frac{1.0134 \times 10^6\text{p}}{10^6}$	760p	1.0332p	p	100(1-p)
α (%Vakuum)	$\frac{1.013 \cdot 10^5}{(1 - \frac{\alpha}{100})}$	—	$760(1 - \frac{\alpha}{100})$	$\frac{1.0332 \times (1 - \frac{\alpha}{100})}{(1 - \frac{\alpha}{100})}$	$1 - \frac{\alpha}{100}$	α

3. 有效抽气速度

要将容器制成真空, 必须选用一定的、有效的真空泵, 以及适当的标准管件。空气分子在彼此的互相碰撞中, 在室温时, 平均自由路程为 Λ , 在压力为托时。

$$\Lambda = \frac{5 \times 10^{-3}}{p}, \text{cm}$$

(I-8)

在抽空开始时, 可以碰到湍流, 但抽空相当时间以后, 当平均自由路程接近于通道直径或

断面尺寸的 1/100 时,在真空泵相连接的管道或通道中,经常可以得到流线型或泊肃叶型流动 (poiseuille Flow)。在室温下,50mm 管径的空气,相当于压力为 0.1 托。

“流线型流动的管道阻力因压力而变化。对于在管道进口处的有效体积抽气速度的影响,可以用抽气速度、进口压力,在许多进口压力下的管道尺寸及对于管进口压力的有效抽气速度曲线来进行推导和估算。因此,基本的泊肃叶公式可以写为:

$$\frac{P_E}{P_p} \approx \sqrt{1 + \left[\frac{L}{91D^4} \cdot \frac{S_p}{P_p} \right]} \quad (1-9)$$

因为质量流动是连续的,所以

$$S_E P_E = S_p P_p \quad (1-10)$$

P_p, P_E 为泵的进口压力及在管进口的有效压力,(托)

S_p, S_E 为泵的进口速度及在管进口的有效速度,立升/秒。

L, D 为管的长度及直径,厘米

泊肃叶公式为空气在室温下,假定为均一温度时的连续性方程式。

分子的或克努生 (Knudsen flow) 的流动,当平均自由路程超过通道断面 1/3 以上时,在泵的连接件,阀门,挡板等等上可以得到。因为空气在室温时,这相当于在 50mm Φ 的管道中,压力在 3×10^{-3} 托以下;即在 500mm 直径管道中,压力在 3×10^{-4} 托以下。

分子流动的管道阻力,不因压力而变更。在流动路程中的管道或管件可以分担各自的导率 (导率=1/阻抗),这与它们的几何形状及气体种类和温度有关。与真空室及泵相连接的一条列的管道及管件,在这些进口处与泵进口处的有效抽气速度,可以用倒数公式化为各自的导率和泵速度:

$$\frac{1}{S_E} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (1-11)$$

$C_1 \cdot C_2 \dots C_n$ 为导率,而且 $S_E P_E = S_p P_p$ 。

空气在室温时分子流动的导率,在直径 D ,长宽 L (厘米)的圆管中,为

$$C = 12.1 \frac{D^3}{L}, \text{立升/秒} \quad (1-12)$$

当流动由任何大面积,流入开口为任何形状的断面 A (厘米²)中时,导率有相似的情况。为

$$C = 11.6 A \text{ 立升/秒} \quad (1-13)$$

运送分子流动的管道,连接真空室与泵,在管道进口的有效速度,可以将泵及管件速度的倒数与管道的导率及其进口开度各自的倒数相加,求得有效速度的倒数。

当流动在泊肃叶 (Poiseuille) 及克努生之间过度时,压力用这两种方法及合理的插入法都可以进行计算。上述方法仅对抽气通道尺寸的影响,提供初步的了解。

4. 决定抽气时间的计算图表

图 (1-2) 决定抽气时间的计算图表 (没有排气的粗真空与细真空)

例 1: 真空室的总容积为 2000 立升, 平板泵的有效抽气量为 60 立方米/时即 16.71 立升/秒, 由大气压抽至 1×10^{-1} 托。

连接 $V=2000$ 立升的 V -尺与 60 立方米/时的 S_{eff} -尺, 延长与 τ -尺相交, 连接此点与 $P=1 \times 10^{-1}$ 托之点, 交 τ -尺, 所得之点约为 22 分种, 即所求的时间。

例 2: 在 P -尺的左侧为 K -尺 (即压缩比), 当由一个大气压, 抽到压力 P_0 , 想再抽到较低压力

$P = \frac{P_0}{k}$ 时, 所需的抽气时间, 而抽气泵的抽气容量不变。

用二级活塞泵, 抽气量为 100 立方米/时, 在 $1 \sim 10^{-2}$ 托之间, 抽气量不变。压缩比大约为 $k = 1/5 \times 10^{-2} = 20$

用 $V = 2000$ 与 $S_{\text{eff}} = 100$ 相连接, 与 τ -尺交于一点, 连此点与 k -尺的 $k = 20$, 交 t -尺于 4 分钟左右处, 即为所求的时间。

例 3: 真空室容积为 2000 立升, 应用闫轮泵与杆式活塞泵联合抽气。闫轮泵有效抽气量为 75 立方米/时, 抽气时间 6 分钟, 真空抽到 25 托。

连接 $V = 2000$, $S_{\text{eff}} = 75$ 两点, 延长与 τ -尺相交, 连接此点与 p -尺, $p = 25$ 托, 交于 t -尺 6 分钟附近。 $p_0 = 25$, $p = 1 \times 10^{-2}$, $K = 2500$, 活塞泵的平均抽气量为 220 立方米/时, 连接 $V = 2000$ 及 $S_{\text{eff}} = 200$ 之线, 延长交于 τ -尺, 连接此点到 $k = 2500$, 交 τ -尺之点, 约为 4 分钟。

5. 开始时气体含量及漏泄

在真空室内大气及在气相的蒸气开始时的含量, 是用来评估真空室总的自由容积的根据。在真空室所需要的真空程度即真空范围与原始气体含量提供了主要抽气负荷、抽气速度, 从而决定了有效体积抽气速度。这由泵的速度及管线尺寸而定(参考 I-11)(在许多情况下, 设计的真空管线的阻抗, 在压力范围内, 并不十分降低可达到的抽气速度)。

图 I-3 用“单位稳定速度”抽空“单位室内体积”的抽气曲线。

图 I-3 的曲线应用于抽气的进程。曲线及公式为体积不变的抽气速度。如果在抽气时, 有效抽气速度是变的, 在限定的压力范围内可以用近似的不变速度, 连续地应用此曲线和公式。

(a) 为理论曲线: 在两压力之间, 体积为 V , 用速度 S 抽气所用的时间为 $T = t \times \frac{V}{S}$ (用一致的单位)

(b) 为操作曲线: 表明从一个抽空容器内排出气体的作用。

(c) 存在漏泄, 最后真空极限为 0.7 托时所得的曲线。曲线(a)的方程式为 $t = 2.303 \frac{V}{S} \log \frac{P_1}{P_2}$, t 为将体积 V , 由绝对压力 P_1 , 用稳定体积速度, 抽到绝对压力 P_2 所需的时间(如果有大气

漏泄, 限定最后真空到 P_0 , 抽气方程式就变为 $t = 2.303 \frac{V}{S} \log \frac{P_1 - P_0}{P_2 - P_0}$ 。

漏泄的单位为每秒托·立升(Torr·l/s), 托·立升为在一定温度下, 正比于所测定的气体漏泄的质量。即阻止压力不降到 P_L 以下, $P_L S = Q_L$, Q_L 即为漏泄的量。在这里, S (立升/秒) 即为在 P_L 时的有效抽气速度。所谓 $10P_L$ 即除漏泄外, 抽气速度的有效利用率为 90%。

6. 抽气过程中气体的放出

在设计真空系统时必须了解气体的性质。在逃出时所需要保持的压力。逃出的量与逃出的时间。既须作实践的探讨, 也必须作理论上的研究。在真空脱气处理的过程中, 气体的发生是:

(a) 溶解的气体直接除去(钢液中的 H 及 N), 这样就利用在真空中的冲洗、搅拌、沸腾、浇铸及流动, 使气体大量逃出。

(b)在化学反应以后生成的气体不纯物的除去。例如,已还原金属氧化物所生成或溶解于钢液中的 O 或 CO,一般是在相界面控制物质的反应速度。在罐衬或容器表面提供生成晶核的部位和界面,并使之生成气泡。或由钢液内的 C 与耐火衬的反应,还原氧化物而生成大量的 CO 气体或次氧化物的气体。这些反应的速度是受搅拌或钢液流动的强烈影响。

(c)控制过程中引入气体的除去——例如冲入 He、Ar 及其它气体,使之搅拌钢液,或在 30 托低压下冲入 Ar,制止在容器内的强烈沸腾,在平息后使之除去。

最常遇到的气体为 H₂O 气、N₂、H₂、O₂、CO、SO₂、Ar 及 He 等气体。

7. 抽气工场设计

基本地说,真空脱气工场的设计是不复杂的。是现有炼钢操作的延伸。象钢液运送,浇铸及耐火材料,加入合金、测温、取样等。应配合的抽气系统、除尘系统有一个特殊的要求。抽气不论是 H、O 或 N,是可以物理定律来进行计算。所以设计分三个主要部分:

(i)钢液运送及脱气处理设备

(ii)耐火材料

(iii)抽气设备

钢液吊运及真空脱气设备与它的位置条件及选用的脱气方法有关,不能概括而论。必须仔细注意的是,减少时间上的耽误和延长,因为在脱气处理中的温度损失是极为重要的。所以在新的工场设计中,象罐盖的盖上和揭开,钢液罐的坐下和吊下,密封与拆除,许多操作的绝对可靠与机械化,加热的方式,抽气设备的抽气速度,泵的选择,脱气方法的选用,都是极为重要的。

温度的损失是不可避免的,但是可以减小的。不管任何脱气方法,在出钢时,在吊运中的温度,都远较浇注时温度高 50—100℃,这对耐火材料是极严酷的,而且在真空中钢液和耐火材料起作用,这就要求耐火砖的高质量,否则在任何脱气处理中,都会缩短罐及真空器的使用寿命。

8. 真空脱气工场使用的耐火材料

表 I — 2 真空脱气用耐火材料的特性

火砖种类	电 融 镁 铬 砖	电 融 镁 铬 再 结 合 砖	超 高 温 烧 成 直 接 结 合 砖	烧 成 镁 砖	超 高 铝 砖
使用部位	真空塞底部 钢罐底部 下部罐壁 真空塞下部 吸上罐及下 降管	罐壁 罐底 真空塞底部	罐 及 真 空 室 上 部	真空室顶部 真空室上部 壁	吸上管 下降管
化学成分: Al ₂ O ₃ Cr ₂ O ₃ MgO	15 18 55	12 20 55	9 10 72	0.2 — 97.5	96 SiO ₂ < 0.1
表现比重	3.9	—	3.65	3.47	—
假比重	3.3	3.2	3.07	2.9	干燥后 2.7, 烧成后 2.65
气孔率	—	15.0	16	17	—
压缩强度 kg/cm ²	1.000	1250	600	1000	干烧后 200
热膨胀率%(1000℃)	1.07	0.90	1.20	1.26	0.6
荷重软化点 T ₂ (℃)	1750℃以上	热弯曲高温 强度	1720℃以上	1720℃以上	最高使用温 度 1850℃
热传导率,600℃	2.7	>230	2.9	4.4	1.2
(Kcal/m · h · °C)1000℃	3.3	1260℃	2.5	3.7	1.4

表 1—3 真空脱气工场使用耐火材料

脱气方法	钢液 最高 温度℃	炉 及 罐					容 器	
		使用的耐火材料					提升管、下降管、钢罐、模、盖	
		使用条件	罐 衬	塞 棒	水 口	流滴挡板	使用情况	使用的耐火材料及寿命
罐内脱气	1730	高度过热 小渣量 用 Ar 搅拌	标准粘土砖 (在渣线用高 Al_2O_3 砖 镁铬砖)	粘土火泥 在渣线上加 大直径 厚的吹 Ar 管	—	—	—	—
流滴脱气 (罐到罐)	1700	高度过热 上部盖渣	一级标准火砖 高 Al_2O_3	高级火泥 直径须加大	结合镁砖	结合镁砖	钢液翻腾	标准火砖
流滴脱气 (罐到模)	1640	微过热 上部盖渣 大钢锭须加 保温帽	80% Al_2O_3 砖 下部墙用 60% Al_2O_3 砖 上部墙用标准 粘土砖	高级火泥 有保温帽时 用炭粉涂 抹火泥层上	烧结镁砖	高级火泥	流滴喷溅	在钢锭保温帽上, 用 42% Al_2O_3 砖
DH 脱气	1600	微过热 上部盖渣 在脱气时,小 面积上冲 蚀线经常 波动	标准粘土砖	标准火泥 在渣线上直 径加大	—	—	钢液严重 喷溅 及翻腾,并 有渣进入 提升管	主真空室用镁铬 砖或镁砖,提升管 内部用高 Al_2O_3 砖 或石墨泥浆,外部 经常捣固补修
RH 脱气	1600	微过热上 部盖渣	标准粘土砖	标准粘土砖	—	—	钢液严重 喷溅及 翻腾	上部详用烧成镁 砖,喷溅及下部墙 及底部有时用 72% Al_2O_3 砖,翻 腾提升管及下降 管用 96% Al_2O_3 砖。

* 参考表 1—2

9. 蒸汽喷射器

蒸汽喷射器的操作压力范围为:

- 1—级 大气压—75 托
- 2—级 125—20 托
- 3—级 30—2.5 托
- 4—级 $5-3\times10^{-1}$ 托
- 5—级 $5\times10^{-1}-3\times10^{-2}$ 托
- 6—级 $5\times10^{-2}-3\times10^{-3}$ 托
- 7—级 $5\times10^{-3}-3\times10^{-4}$ 托

蒸汽喷射器可生成抽吸的压力,是一种特别的压缩机,没有转动机件,其工作流体能与被压缩的气体混合。典型的蒸汽喷射器如图 1—4,说明了它的向量和压力。蒸汽进入蒸汽入口以后就膨胀,主要是等熵线。经过一个收缩——扩大咀,以 1200 米/秒的速度离开(因喷射器设计而有相当的变化),这个高速的蒸汽喷射,挟带着要抽出的气体,带它前进到联接管,到喷射器的扩大断面上,这叫扩散器或压缩管。在这点,这混合物有高的速度。在扩散器内,动能转化为压力能,对向外排出就生成压力,这低于蒸汽压力,但较高于吸入的压力。例如:图 1—4。压缩

的程度与混合物进入扩散器的速度有关。

图 I—4—1 蒸汽喷射器

图 I—4—2 蒸汽喷射器压力与速度的关系

图 I—5 蒸汽喷射器的操作曲线

一个喷射器经常的耗汽量,可以设计为高效率的。就是在规定的压力下能带一定的负荷。每个设计有它不同的操作曲线,如图 I—5。横轴是于空气负荷(lb/h),这对任何分子量及温度的挟带气体规定小时的一个简便方法。如果画出最大效率时,各点的许多曲线的包络曲线如图 I—6 的 A,自然得来蒸汽的消耗率。对于喷射器,蒸汽——气体混合物排出的压力对于挟带气体的吸入压力之比,叫做压缩比。即是

蒸汽与气体混合物排出的压力

对挟带的气体的抽吸压力

扩散与流阻根据同一理论,可以划分为:是在超音速和亚音速流动之间的过渡流体流动或者是所有流动都是亚音速的。

图 I—6 多级喷射器操作曲线

如果压缩比小于 2 时的流动,喷射器就是亚音速的。在这情况得来运行图例不是一个极好的特性曲线,这种型式的喷射器不能应用于钢的脱气设备。

如果在一个喷射器内,流动是 100% 有效,当这个喷射器在不带负荷时运转,蒸汽就在连接管内膨胀,对于原来供应压力的蒸汽喉头再压回来。这种损失的发生,主要是在设计蒸汽咀的损失通常较小时,把在扩散器内的速度转化为压力。但是当喷入速度(因此也是压缩比)增加时,有效地转变速度为压力就相当地困难了。气体在扩散器内减速,使这种转变由超音速变为亚音速状态及震动波,以及所有的固有损失,这是不能避免的。当进去的速度(也是压缩比)增加时,这种震动损失就很严重。

在一定的压缩比及排出压力下,抽吸压力是固定的。因为在图 I—4 中的喷射器型式对于喉口速度及压缩比,有一个应用的限度,因此,在排放到大气时,就必须有一个固定的最小绝对压力,小于这个压力,喷射器才能起作用。这样,抽空一个密闭器,使它能长抽下去不至有泄漏,但是不能在限定的绝对压力以下抽下去。

由图 I—6 的曲线可以看出,压缩比达到 18:1,用一个简单的喷射器可以达到。但在实际操作中,这种型式喷射器的压缩比约为 7:1。这样,当排放到大气中时,最后的抽吸压力,仅为 100mmHg 绝对压力,即是最大压缩比可能只是约 40mmHg,这对于大多数脱气操作仍然太高。

但是,把许多喷射器串联起来如图 I—7,把压力能更大的地降低,直至到几个微米。在串联中的每一设备叫做段,仍然保持它的一般特性。这些段的压缩比在低真空段限定为 10,在高真空段限定为 20。虽然在操作上,为了蒸汽的节约都在较低值下操作。在选择这个段时,最好的办法,是将全压缩比依照特殊的操作条件再仔细划分。

图 I — 7 四级喷射器

在多段设备中,当由每段排出是,是配合蒸汽与要带出的气体,使之排于下段。第二段必须将第一段排出的蒸汽及要抽出的气体再行压缩。如果没有采取步骤抵消这一作用,下段就要压缩更多重量的气体。而且通常习惯地,在可能以前的适当点,即早加入一个中间冷凝器。对于各种喷射器系统,都用一个特别的相同的蒸汽消耗 $100\text{lb}/\text{m}^2$ (表压),进口温度 85°F ,在冷凝器内喷入水来操作。图 I — 6 是各种喷射器最大效率各点的包络曲线。蒸汽消耗率较高或较低时,这曲线向右或向左分别移动。但是实际所达到的绝对无负荷压力只有极小的差别。因为如上所述,喷射器主要是一部压缩比机器。

图 I — 6 在特殊抽气压力时,可以用来对于不同设计的喷射器的能力作比较。例如在 10mmHg 绝对压力时,可以有四种组合:

- (i) 2—段不冷凝
- (ii) 3—段不冷凝
- (iii) 2—段中间冷凝
- (iv) 3—段两个中间冷凝

由调查结果,二段没冷凝,比三段没冷凝的设备蒸汽消耗多 9%。二段及三段冷凝设备,分别仅为二段没冷凝设备蒸汽消耗的 43% 及 19%。当然,前者的开始投资较高,而且须供给冷水。如果蒸汽是首要的降低消耗就值得重视。对大的喷射器更是这样。必须知道,在一定的蒸汽消耗率时,喷射器才能增加,因此才能达到最后的绝对压力。设计的压力要减小,喷射器的段数就要增加。

表 I — 4 段数,操作压力及压缩比

段 数	操作压力 mmHg(绝对)	平均压缩比	总压缩比
1	100	7.6	7.6
2	30	5.02	25.3
3	4	5.75	190
4	0.4	6.6	1.900
5	0.05	6.9	15.200
6	0.002	8.55	380.000

在许多例中,在罐内及流滴脱气中,有一套快速起动器或增压器与最后段的主喷射器平行连接起来,使能很快地抽空到中间压力。这种短时操作,是为了速度不是考虑效率。

多级喷射器的特点是,喷射器可以用多段的,在真空室附近切断。可以在较高压力下,使用较大的负荷。为增加通过量,第一段可以切断。虽然压力微高,必须注意使喷射器充分稳定,防止意外弹回,这个可以引起压力很快升高。当混合管的蒸汽发生完全的反向,就发生弹回情况。喷射器能不能在不同的负荷下操作而没有弹回,是对喷射器稳定性的一个测验。弹回最明确的原因是在蒸汽供应减少时;其次的原因是减少负荷;因为那里有减少抽吸压力的作用。这样,为了一个恒定的排出压力,就增加压力的梯度到这样的程度;在蒸汽不能保持这梯度时,结果这机器就不操作。发生弹回的另一原因是增加了排出压力。因为保持恒定的抽吸压力,也能产生一个不容许的压力梯度。

如果一个喷射器工作稳定,排出压力增加,因此发生上述的弹回。如果输送压力减低,很清

楚地,另一个压力使之重归稳定。这两个压力就叫做弹回压力及恢复压力,后面这一压力较低。而且所有的通行喷射器在设计时,操作的输送压力都低于一般的恢复压力,这是考虑到在负荷及蒸汽供应会有小的波动。在喷射器设计中,它的特征有一点在改变,那就是最有效地、最经济地使用蒸汽,在这点也或许效率不高,但是必须在变化的情况下,有高度的适应性。

相似地在改变供汽压力时,喷射器变为不稳定,应用于两个蒸汽压力的不同名称,弹回压力及恢复压力,就成为相同的现象。在操作系统上,排出压力可以改进到把供汽压力增加到喷射器设计规定以上。但是,蒸汽流量超过 5—10% 以上,因为扩散器变为阻塞,能力就要减小。一般是喷射器按照设计进行工作,而且在一定压力下改变它的操作参数,并不能相当地改进它的能力。

选择段数达到要求的压力,是受应用的蒸汽压力的影响的。通常是至少 100 lb/in^2 , 虽然有时低到 20 lb/in^2 还是可用的。低压时蒸汽消耗相当地高。这样选择的唯一正当理由,就是用便宜的低压蒸汽。每公斤蒸汽的能量因压力而增加,因此同样功能,高压蒸汽就需要得。但是蒸汽过热并不能降低消耗,它仅仅能保证蒸汽是干的,因为它含水气时就损失效能。不能保证干饱和蒸汽时,就用一个适当的蒸汽分离器。对蒸汽的质量不必过于重视,因为经常遇到的困难是喷射器用湿的蒸汽和压力较规定低的蒸汽。所以通常的操作是在多级喷射器的各段中插入冷凝器。例如二段没冷凝的喷射器,那就有一个大的下阶段,比之如果用中间冷凝器就要用较多的蒸汽。但是,没冷凝的喷射就不需要冷凝冷却塔和热水井。

冷凝是选用直接喷射或表面冷却。前者是使蒸汽与气体混合物直接与冷水喷射接触,后者是用冷水经过管内循环。直接冷凝的优点是:

(i) 可以用污水或海水冷却

(ii) 低的投资

(iii) 冷却效率,占场地小

表面冷凝器的优点是:

(i) 冷却水不污染

(ii) 可以回收热

(iii) 小的冷凝泵(如用气压管代替时)

冷凝重要的特性是除去积存的水。这可以用泵或大气排水。前一个是最简单的方法,但须仔细地设计,不要在停泵时水进入室内。气压管担保绝对地安全,但是需要把冷凝器装在放水槽 10m 以上,在位置上或有困难。而且在设计气压管密封槽时还须注意在引出管与排出管管底间水的容量;在开始运转时必须充分地能填满气压管。

决定冷凝器位置的重要因素,是要在那里蒸汽压力极低使之能冷凝下来。在最大水温大约达到 20°C (70°F), 第一个冷凝器的限定真空压力为 20 mmHg 。因为气体离开冷凝器时,在冷凝压力及排出温度下饱和着蒸汽,任何压力的增加或温度的降低,都能够冷凝更多的蒸汽,而且能够降低下段的水气负荷。一个较低的水温,就是较低的饱和温度,这就增加了设计第三段或更多段数喷射器的重要性。因为那决定了在第一个中间冷凝器使用以前,要把多大的负荷进行压缩。显然地,中间冷凝的操作压力,必须高于相对的进入冷凝水温度的水气压力。

当规定一个蒸汽喷射时,必须把计算的气体负荷,变为决定蒸汽消耗量的共同基础。一般的根据是:在 70°F 时干空气的重量,以这个作为实际负荷。用一磅蒸汽在恒定的压力限度内操作,它处理的气体量,因气体分子量增加而增加,因气体温度降低而减少。这关系表示于图 I —

8 及图 I-9。等效空气。

图 I-8 分子量挟带比

图 I-9 温度挟带比

图 I-10 空气泄漏值

负荷应用于一般脱气操作中所遇的气体,用下式计算:

$$\text{等效空气负荷} = \frac{\text{气体负荷 (lb/h)}}{\text{分子量挟带比} \times \text{温度挟带比}}$$

分子量挟带比是:要处理气体的重量对用同一喷射器在相同的条件下,所能处理的空气之比(即在 70°—80°F 处理)。温度挟带比是:在 70°时空气的重量对用同一喷射器操作在相同的条件下,在较高的温度时所处理的空气重量之比(70°F=100%)。

必须注意,一个系统可能使之没有泄漏;但经常是一个真空泵,允许它有泄漏,那就是一个 $\Phi \frac{1}{8}$ 孔在操作系统内,在小于半个大气压的任何压力下,空气逃出量必须小于 14lb/h。

图 I-10 表明在一个绝对压力范围内,一般密封系统的泄漏值。建议喷射器的设计容量是等于在处理气体之外还有两倍于最大估计的空气泄漏。

在真空室及泵之间的管线设计,既照顾到投资成本,又必须在低压操作。还必须考虑,如果气体速度保持在合理限度内,就必须相对地大的设备。而且,操作费用大部是由于高压降的泵损失带来的,而且在现有的总压力中本身又占高的比例。

特别必须注意的是:在气体由真空室到泵的自由流动,尽量地减少障碍;即就是在 900mm 直径的管道中,一个 90°弯管,边等于 13m 长的直管。基于这个原因,真空室同泵之间尽可能地接近而减少迂回,这是最希望的。

10. 真空脱气控制计算系统

真空脱气的操作,已经基本上完全进入计算机控制的阶段,其控制计算系统,如图 I-11。

图 I-11 真空脱气控制计算系统