



高炉高压冶炼理论

〔苏联〕B. M. 谢德林 著

章光安 杜鹤桂等 译

中国工业出版社

76.213
818

高炉高压冶炼理论

〔苏联〕B.M.謝德林 著

章光安 杜鹤桂等 译

中国工业出版社



本书系根据苏联冶金出版社1962年出版的“高炉高压冶炼理论”(В.М.謝德林著)一书譯出的。

书中闡述了高炉采用高压操作的生产經驗和理論研究成果以及高压操作时高炉設備的維護等問題。

本书可供炼铁工程技術人員参考,对高等院校炼铁专业的教师和学生亦有裨益。

本书由章光安、杜鶴桂、叶岷、范志增、田启秀等同志翻譯。



В.М.Шедрин
ТЕОРИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ
Металлургиздат, Москва 1962

* * *
高 炉 高 压 冶 炼 理 論
章光安 杜鶴桂等 譯

*
冶金工业部科学技术情报产品标准研究所书刊編輯室編輯(北京灯市口71号)

中国工业出版社出版(北京德内大街10号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*
开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $13^{5/8}$ ·字数326,000
1965年8月北京第一版·1965年8月北京第一次印刷
印数0001—1,090·定价(科五)1.70元

*
统一书号: 15165·4063(冶金-631)

前 言

本书提出分析强化高炉和提高高炉冶炼經濟性的一种方法。从实行加热鼓风的时代开始，采用高压作业是高炉冶炼工艺中最根本的新措施之一，这一新措施涉及到复杂过程的各个方面。高压作业的方法与原料准备，建設特大高炉，采用綜合高风温一样，对于提高生鉄产量具有重大意义。

在构成高炉高压冶炼理論时的特殊困难是由高压作业参数的多样性所引起，例如压力对气体动力学，化学动力学，平衡关系，能量消耗以及其它冶炼因素的影响。

本书中的題材是作者在 A. A. 巴依科夫冶金研究所的實驗設備中以及部分在工厂內进行的多年研究工作。本书力求包括全部編写終了前（1961年11月）发表的高炉冶炼高压理論的所有原作的研究工作。书中沒有探討文献摘要性质的工作。本书主要提出高压方法的理論，同时重点反映工艺过程。此外，还涉及高压作业的结构和机械设备的寿命問題，因为它們与工艺操作的合理性一样，决定了进一步推广和发展这种方法的因素。这些問題在最后一章中以文献綜合的性质提出。

按工艺过程的原則將材料进行系統化。在本书末尾有对該問題直接参考意义的文献目录，同时該处具有单独参考价值的书目提要。相应的引文放在文中的方括号內。所有其它引用的文献，按頁脚注的形式列出。

作者在文稿写作过程中得到了許多的帮助。《热交換問題》一节經科学技术博士 B. H. 基太耶夫教授和科学技术副博士 Ю. Г. 耶罗辛柯副教授审閱过。动力問題一章考虑了科学技术副博士 B. B. 沙泽諾夫副教授所提的意見。此外，B. B. 沙泽諾夫提供了压縮高炉煤气位能利用問題的材料。国立冶金工厂設計院炼鉄科的 B. B. 唐辛工程师提出了改进结构和設備寿命一章上的許多宝贵意

IV

見。炉形物理化学的章节考虑了科学技术博士 И.С. 庫里柯夫的意見。其他材料（在苏联沒有）根据作者的要求由不列顛鋼鐵綜合科学研究所 С. 克列門塔斯基博士提供。最后本书的及时出版問世，极大程度上得到高炉工作者科学技术博士 А. Я. 高特里普，А. И. 拉姆和 А. И. 波赫維斯涅夫諸教授热心的关怀。

作者对以上所有提到过的同志表示衷心的感谢。

1961年11月

目 录

前 言

第一章 炉尘吹出量	1
§ 1 炉尘吹出物的組成部分	3
§ 2 炉喉煤气的参数	5
§ 3 气体粘度	8
§ 4 等炉尘吹出量的条件	13
§ 5 压力对煤气上升浮力的影响	17
§ 6 强化冶炼的許可程度	23
§ 7 高炉冶炼指标的統計加工	26
§ 8 煤气压力对炉尘吹出量的影响	32
§ 9 高压下高炉煤气的清洗	36
第二章 高炉生产率	51
§ 10 高炉生产率与风量的关系	51
§ 11 气体动力学方面的評論。块状料层阻力	53
§ 12 某些实验数据	55
§ 13 块状料柱的阻力	72
§ 14 气体沿块状料柱高度上的压力分布	86
§ 15 高炉强化的可能性	89
§ 16 实践数据	92
§ 17 M.A. 斯捷潘諾維奇的“决定层”理論	97
§ 18 高压高炉冶炼和合理炉形問題	100
§ 19 高炉行程的調节	112
第三章 焦比	115
§ 20 若干实践数据	115
§ 21 高炉內鉄的直接还原反应和間接还原反应之比較	116
§ 22 化学平衡及其常数和气相压力的关系	120
§ 23 高炉冶炼基本的化学反应的平衡式	127

V

§ 24	直接还原动力学	135
§ 25	扩散与化学动力学的基本规律	153
§ 26	在压力下间接还原动力学实验数据的概括	176
§ 27	煤气在高炉内的停留时间	230
§ 28	氧化带的尺寸	241
§ 29	高炉截面上煤气和炉料的分布	245
§ 30	热交换问题	256
第四章 生铁的成分		260
§ 31	高炉高压冶炼和低硅生铁问题	260
§ 32	高炉中硅的还原过程的实验数据	262
§ 33	元素硅的还原	267
§ 34	液体中硅的还原	283
§ 35	实践资料	300
§ 36	锰的还原	308
§ 37	去硫反应	312
§ 38	铁的渗碳	315
第五章 高炉高压冶炼动力理论问题		321
§ 39	必需的鼓风参数苏联鼓风站状况	321
§ 40	气体离心压缩基本原理压缩热力过程	323
§ 41	气体离心压缩的理论基础。离心机械性能利用及构造 原理	335
§ 42	提高鼓风参数的方法	345
§ 43	压缩的炉顶煤气的位能利用	362
§ 44	高炉的高压冶炼和工厂的燃料—动力平衡。冶金联合企 业高温热化的原理	376
第六章 提高煤气压力时高炉设备的工作		382
§ 45	装料设备	383
§ 46	测料线的设备	395
§ 47	布料器	397
§ 48	减压设备	401
§ 49	均压阀	405

§ 50 放散閥	407
§ 51 干式和湿式除尘器的閘門	408
§ 52 炉前设备及設施	412
参考文献	417

第一章 炉尘吹出量

人为地提高高炉上部煤气的压力会减小煤气单位重量的容积和煤气的流速，这样就会促使减少炉尘吹出量。特别在用刻赤的粉矿、部分克里沃罗格、美国米沙比矿等冶炼生铁时，降低炉尘吹出量是很重要的问题。高炉鼓风量和产量在许多情况下受炉喉吹出炉尘量的限制。

许多高炉作业的經驗証明，提高煤气压力对炉尘吹出量是有良好影响的。彼德洛夫工厂的高炉工作者在首批建設的一些高炉上发现了这种现象：在这个工厂的高炉上1946年8月每批料的炉尘吹出量从1260公斤下降到840公斤（降低33%），而在10月份从1175公斤下降到480~610公斤（下降59~48%），并且这种炉尘吹出量的减少只在煤气压力提高到0.15~0.25表压时引起的。目前炉喉煤气压力提高到0.7~0.8表压时，一般可减少炉尘吹出量40~60%，但是未必能找到两座高炉在提高煤气压力时获得同样结果的炉尘吹出量。获得不同结果的本身就要求对问题进行理論分析。特别是出现苗头的时候，当高炉轉为高压作业时，炉尘吹出量不但不减少，相反却增加。1948年4月經本书作者在新土拉冶金工厂的高炉观察，常压作业时，一批料吹出420公斤矿石（57个作业班的平均数），当高炉改为高压时，每批料（10个作业班的平均）炉尘吹出量上升达590公斤。

無論在彼德洛夫或在新土拉工厂，当高炉改为高压时，风量沒有增加，强化高炉行程对炉尘吹出量的影响起了相反作用。因此，显然有可能将煤气压力和风量結合起来，在此情形下可达到既增加产量又减少炉尘吹出量的目的。在苏联和其他国家的大多数的高压高炉上进行的大量試驗工作也証明了这一点。

因此在既定条件下，摆在理論工作面前有着以下一些主要問題：为什么采用新方法在炉尘吹出量上的定量效果不一致？当提

高煤气压力时，保持通常的炉尘吹出量，增加风量的极限^①是多少？与煤气压力以及高炉结构特性相关的，确定这一极限的计算方法是什么？是否可拟定某种工艺上适宜的煤气压力，而超过此

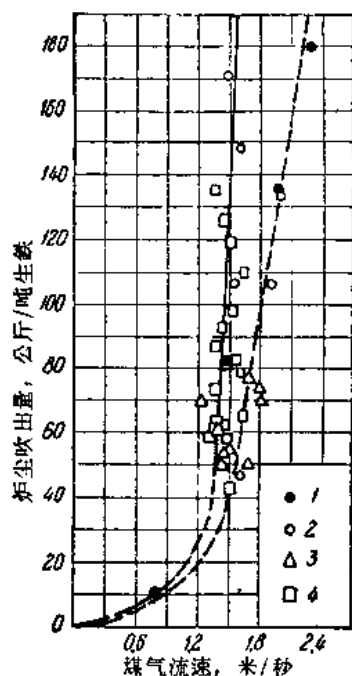


图 1 依据料面上煤气实际流速的关系来决定克里夫林特工厂 5 高炉轻负荷（虚线）和重负荷作业时的炉尘吹出量（Л.斯列依吉尔数据）

1—同一高炉低风量作业时；2—常压作业时；3—中压作业时；4—高压作业时

压力对炉尘吹出量没有明显的影响？计算结果用实际高炉作业的分析材料进行校核。

在许多研究工作者的著作中对炉尘吹出的气体动力学特性得出不正确的概念，因此也没有回答上述提出的问题。

美国的理论家 T. A. 捷索谢福认为^(17,18)，“由于煤气上升浮力是和煤气流速的某次方成正比，增加炉喉煤气压力将会相应降低煤气的平均流速，并大大降低炉尘吹出量”。捷索谢福在自己计算中取煤气上升浮力和煤气流速的平方成正比，同时忽略上述煤气上升浮力与压力成正比的煤气密度关系。

И. И. 柯罗博夫避免了这种错误，同时计算出⁽¹²⁾，高压时，煤气上升浮力的减小和煤气流速的一次方成正比。但同捷索谢福一样，他把炉尘吹出

① 这个极限在各章里简称“许可鼓风量”，即高炉允许鼓入的风量，在一般情形下，使用同样原料，能保持不超过既定冶炼条件时所观察到的炉尘吹出量。在这种要求的规定下，还包括有某些细节，例如不能把确定许可鼓风量和炉尘吹出量的“稳定性”联系起来，而后者和煤气压力，流量无直接关系。按此，稳定炉尘吹出量的概念应以“等”炉尘吹出量来代替。

量直接和煤气上升浮力連系起来，并且証明，当煤气上升浮力減低到1/1.77时，炉尘吹出量应减少約1/2。

后来的許多著作中也有着一系列的錯誤，特別是 M. H. 盖尔曼⁽¹⁹⁾及 B. B. 沙札諾夫⁽²⁰⁾的著作，这些錯誤 H. E. 庫納柯夫已經指出并校正⁽²¹⁾。

A. 斯列依吉尔根据美国麻省理工学院毕业生論文^(17,18)中理解錯誤的結論，引出料线上煤气“临界速度”的概念（約1.2米/秒），超过此速度将会使炉尘吹出量急剧增加。这种情形可用克里夫林特工厂5高炉炉喉吹出的周平均炉尘量的数据來說明（图1）；在揚格斯坦烏3高炉获得了相似的数值⁽²²⁾。在美国毕业生論文中^(17,18)，研究者在玻璃的圓筒里吹过粒度为0.15~0.21毫米硅石和矿石的混合物。由于料块差別不大，在試驗中实际观察到矿粒呈悬浮状态并且煤气到某一速度值时，料柱的阻力下降了。这种情形 T. A. 捷索謝福注意到：矿石自料柱中吹出并在硅石块上形成“假液化”层时，容器中炉尘吹出量是不多的（由于料层內和料层上部的煤气流速差異大所致）。

至于图1的数据，上述研究者指出，料面上煤气实际流速相同时（1.5米/秒），炉尘吹出量波动范围很大——40到170公斤/吨生鉄。由此作出这样結論，煤气在料面上的流速不决定炉尘吹出量的多少；同样在該图上的数据指出，当提高煤气压力时，虽然煤气流速保持几乎不变，但炉尘吹出量是增加的。

§1 炉尘吹出物的組成部分

根据高炉內炉尘吹出的原因，炉尘可分以下各部分：

1) 高炉順行时吹出的炉尘。由于顆粒的重量和尺寸很小，使之在料面上与煤气上升浮力平衡相峙；

2) 炉料落入高炉时刻所吹出炉尘。当炉身炉喉部分的断面减小到大钟圓周的面积时，煤气流速相应地提高。大多具有菌形炉喉的近代高炉，在大钟工作正常时，不会显著增加煤气在大钟圓周間隙的流速。

3) 高炉不顺行, 崩料和塌料时带走的炉尘。由于高炉下部煤气冲出料面, 在料面上的煤气流速在短時間內就急剧升高。

料柱内管道的形成经常是上述列举炉尘吹走的因素, 但这些因素的作用还有争论。实际上, 煤气在高炉强化时沿断面上的分布经常是不均匀的; 边缘或中心行程的发展同样又看成是管道的形成。如果炉喉下部逸出的煤气速度很快的平稳, 则在料面上出来的最终煤气流速将会经常小于料柱任何截面上的流速。如果从管道抛出的颗粒, 由于惰性作用不能到达具有高速度煤气的煤气管道处, 则不可避免地促使吹走炉尘沉积下来。

Л. 斯列依吉尔试图评价上列因素的作用⁽²²⁾, 并为此对照炉尘吹出量和崩料次数的关系(图2)。炉尘吹出量和崩料次数的

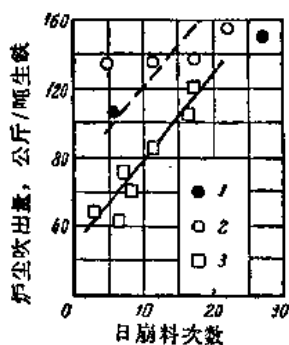


图2 依据日平均崩料次数的关系来决定美国克里夫林特工厂5号高炉的炉尘吹出量, 月平均数据(Л.斯列依吉尔)

1—1945年高炉常压作业; 2—1944年高炉常压作业; 3—炉喉煤气压力0.63~0.77表压

的关系在高压和常压下成为平行直线, 虽然直线按月平均数值作出的(图2), 但上一条直线对横轴的斜度应该小些, 亦即常压时崩料次数对炉尘吹出量的影响比高压时要小。按此, Л. 斯列依吉尔建议以下依据崩料次数 x (昼夜)的关系来决定炉尘吹出量 Q (公斤/吨生铁)的经验方程:

$$Q = 70 + 5x \text{ (常压作业)} \quad (1)$$

$$Q = 30 + 5x \text{ (高压作业)} \quad (2)$$

根据这些方程, 由于压力的影响使炉尘吹出量减少40公斤/吨生铁。高压作业时, 高炉顺行改善了(减少崩料次数), 这大概是压力

影响较大的缘故, 但在既定条件下, 这种影响仍旧不很明显的。这按Л. 斯列依吉尔的说法完全由管道行程所引起, 这无论如何不能令人同意的。此外, 高炉顺行对炉尘吹出量的影响——每昼夜每崩料一次增加吹出量5公斤/吨生铁, 看来是夸大的, 因

为在同样的工作中⁽²²⁾表明，崩料次数增加和增大焦炭负荷有关，而这本身也影响炉尘吹出量的增加。

Л. 斯列依吉尔的方程具有极重要的统计性，但其结果对各种高炉是不同的。例如在扬格斯坦乌工厂3高炉方程的自由项要大于20公斤/吨生铁，而确定这些结果，预先通过计算是不成的。同时采用 Л. 斯列依吉尔方法不能得出任何一个在本章之初提出的相对许可鼓风量等问题的答案。

可以认为，高炉不顺行，伴随着悬料和崩料是不正常的。而我们要分析的主要是压力和高炉顺行时的炉尘吹出量[●]的关系。

§ 2 炉喉煤气的参数

最大（临界）炉尘悬浮颗粒的半径（ r_{kp} ）取决于料面上煤气的线速度 v （即以米/秒表示）和煤气的重度。煤气在料层和管道上的速度大于这个线速度，但是基本上认为，被煤气从料块平面带出的大于 r_{kp} 的颗粒能在掉下前顺利地沉积到煤气管道里。

料面上煤气速度 v （米/秒）和风量 V_0 （标准米³/分）成正比和炉喉煤气压力 p_k （绝对大气压）成反比：

$$v = k \frac{V_0}{p_k} \quad (3)$$

系数 k 取决于高炉构造（炉喉直径 d_k ，炉喉横断面积 F ）和冶炼工艺（炉喉煤气温度 T_k （°K）和单位鼓风量的煤气量）。从炉喉煤气的状态方程很易导出这个系数：

$$\frac{p_k V_k}{T_k} = \frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{\frac{760}{735} \times V_0}{273} = \frac{1.033}{273} \times V_0, \quad (4)$$

① 下面分析阐明的工作（§ 2，4~6，8）由本书作者在1950年完成，同时早期已简短发表^[23]。此后这个方法不止一次应用于解决和炉尘吹出量有关的各种问题（参看如И.В.Распопов, Я.П.Куликов, Методы борьбы с выносом колошниковой пыли.—Сталь, 1952, №10, с. 888~92）。这种方法同样在П.Е.庫納柯夫本人的著作中（Развитие газового хозяйства металлургических заводов, Металлургиядат, 1959, с. 18~25）应用过。

式中 V_k 和 V_0 ——相应地为实际和标准状态时(273°K, 760 毫米水银柱)炉喉煤气的流量(标准米³/秒)。

标准状态的煤气流量 V_0 可按氮的平衡, 用风量 V_d (标准米³/分) 来表示:

$$V_0 \times N_{2k} \times 60 = V_d \times N_{2d} \quad (5)$$

从平衡式(4)和(5)导出:

$$k = \frac{N_{2d} \times T_k \times 1.033}{N_{2k} \times F \times 273 \times 60} \quad (6)$$

系数 $k \times 10^3$ 数值上等于风量 $V_d = 1000$ 标准米³/分, 炉喉煤气压力 $p_k = 1.0$ 大气压时料面上煤气的流速。对于标准型高炉, 这些数据列于表 1 ($N_{2d} = 79.0\%$, $t_k = 300^\circ\text{C}$)。

表 1 标准型高炉系数 $k \times 10^3$ 的数值

高炉容积 (米 ³)	炉喉直径 d_k (米)	炉喉煤气中 N_{2k} 的含量(%)				
		55	56	57	58	59
600	5.0	2.64	2.59	2.55	2.51	2.46
1033	5.8	1.96	1.93	1.90	1.86	1.83
1386	6.5	1.56	1.53	1.51	1.48	1.46
1513	6.6	1.52	1.49	1.46	1.44	1.41
1719	6.9	1.39	1.36	1.34	1.32	1.29
2002	7.3	1.24	1.22	1.20	1.18	1.16
2286	7.7	1.11	1.09	1.08	1.06	1.03
2700	8.2	0.98	0.96	0.95	0.93	0.92

例 1 求新利比茨克冶金工厂 2 高炉料面上煤气的流速。该高炉炉喉直径 5.8 米。主要取 1952 年 2 月的平均数据, 代入(6)式($t_k = 170^\circ\text{C}$, $N_{2k} = 56.2\%$)得:

$$v = \frac{79.0 \times 443 \times 1.033}{56.2 \times \frac{\pi \times 5.8^2}{4} \times 273 \times 60} \times \frac{V_d}{p_k} = 0.00149 \frac{V_d}{p_k}$$

炉喉煤气流速和风量、风压的关系, 对所取的条件用图 3 曲面 Q 来表示。如 $xy = kz$ 所有形式的函数一样, 函数(3)用等边双曲抛物面图形来表示, 它有两条相交于顶点的母线。

这个曲面用平面 $p_x = \text{常数}$ 截出的截线形成一族等压直线与 $p_x - V_0$ 平面成角系数为比值 k/p_x 的斜角。根据炉喉煤气压力的提高，等压线的角系数减小了，即风量影响煤气流速不是很显著的。这个物理概念是清楚的，随着压力的提高在增加相同重量的风量时，煤气速度也不是显著增快的，因为这种风量的增量，得到相应煤气量的容积总是小的。

这个曲面 Q ，用平面 $v = \text{常数}$ 截出的截线形成另一族直线（均速），表示出在既定煤气线速度下炉喉煤气压力和风量间成正比的关系。图3指出其中两条代表煤气速度1.40和2.47米/秒的直线。第一条直线为曲面 Q 和座标平面 $p_x - V_0$ 的相交线，第二条线（ Sa ）将在下面指出的，标志高炉许可强化的程度，而此线在假设煤气比重（密度）不变的条件下获得的。

最后，这个曲面 Q ，用 $V_0 = \text{常数}$ 截出的截线形成一族等边双曲线（等容），其中，实质上为 $p_v = \text{常数}$ 的波义尔-马利奥特定律。

除了料面上煤气线速度外，还有其它因素对炉尘吹出量的影响。这些因素分析如下：

依据炉喉煤气压力和温度的关系来决定的煤气比重 γ ，可用普遍了解的公式来表示：

$$\gamma = \gamma_0 \frac{p_x T_0}{p_0 T_x} = m p_x, \quad (7)$$

式中 γ_0 ——标准状态下炉喉煤气的比重，计算时和煤气成份有关，按方程：

$$\gamma_0 = 1.977 \text{CO}_2 + 1.250(\text{CO} + \text{N}_2) + 0.717 \text{CH}_4 + 0.0899 \text{H}_2, \quad (8)$$

方程中每一组分前的系数代表组分的分子量和分子容积的比值，即为 $M/22.4$ 。当煤气中的含量： $\text{CO}_2 11.9\%$ ， $\text{CO} 28.7\%$ ， $\text{N}_2 56.2\%$ ， $\text{CH}_4 0.3\%$ ， $\text{H}_2 2.9\%$ （新利比茨克冶金工厂2号高炉1952年12月平均数据）时，煤气的比重为：

$$\gamma_0 = 1.977 \times 0.119 + 1.250(0.287 + 0.562) + 0.717 \times 0.003 + 0.0899 \times 0.029 = 1.30 \text{公斤/米}^3.$$

当高炉用焦炭和一般大气鼓风冶炼时， γ_0 的数值和计算获得的差别就小。这实际上主要受 CO 和 N_2 总含量不变的影响所致。

在例题1中：

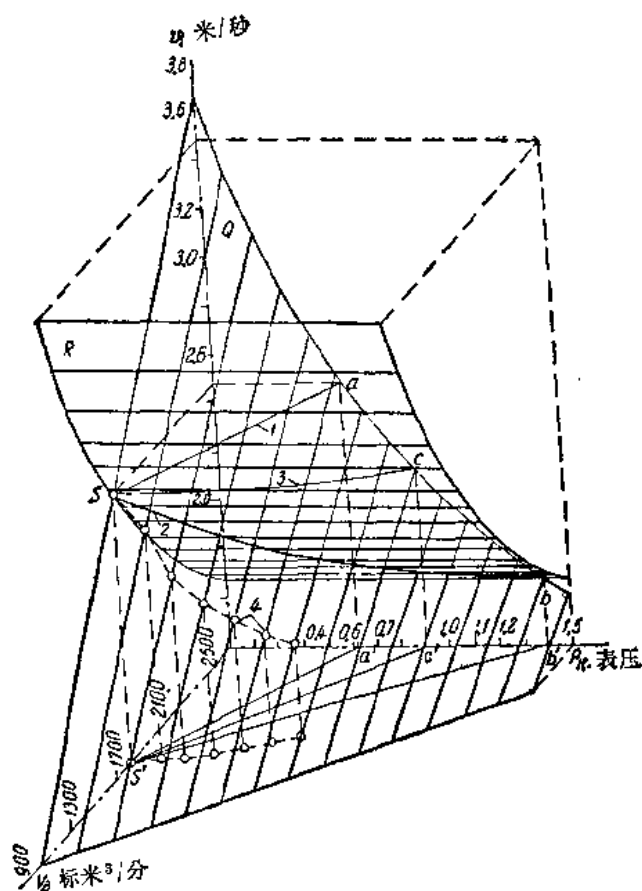


图 3 等炉尘吹出量条件下，确定高炉行程许可的强化程度

- 1— ψ =常数时(γ =常数)(周口夫数据); 2— ψ =常数时(И.А.索格洛夫数据);
3— r_{kp} =常数时(本书作者数据); 4—新利比茨克冶金工厂2号高炉(1953年2~5月)
实际增加的加权平均风量

$$\gamma = \frac{1.30 \times 273}{1.033 \times 443} \times p_k = 0.776 p_k,$$

即 $m=0.776$ 。

§3 气 体 粘 度

气体粘度(内摩擦)在气流和物体动力的相互作用中具有一定的意

义。众所周知，物体在沒有粘性的介质中匀速运动时，一般不應該感到有阻力，所以这种运动不能在气流中引起变化；在此情形，在物体后边某一距离内介质微粒的速度与在物体前的微粒速度相同，介质的动量^①不变，因而运动物体的动量亦保持恒定。这种情形至少对均称的物体是正确的，即众所周知的所謂尤拉理論。可以指出，在这种假設下，介质对物体表面的压力分布是均称的，并且其均匀作用力等于零。

气体粘度对物体运动阻力的影响将在以下阐明。为了了解这种影响的一些特性，应该明确气体粘度的本性。

气体粘度最易在不可能改变气体某部分速度时显出，并且此情形不影响相邻层的速度；提高某一气体层运动的速度，并传给相邻层，后者本身又阻滞移动气体层的运动。气体粘度是由气体分子存在无秩序的热运动以及由不同速度气体层之間分子的相互交换（动量的轉移）所引起。

研究不同运动速度和一层至另一层相距为 dx 的气体层内动力的相互作用（图4），由于动量的交换只有分子在相互撞碰的条件下进行，因而距离 dx 在相互作用层之間不能大于 2λ ，或比 λ 小（在自由路程 λ 的长度上，速度 v 是不变的）。

包含在容积 $S\bar{u}d\tau$ 中，并具有一定方向的热运动平均速度 $\bar{u}$ 的气体分子，在 $d\tau$ 時間內通过滑动面 S （垂直于 x 轴）从一层轉到另一层。按照三度空間测量和沿着每度空間的两个方向，分子数的交换可取如下值：

$$\frac{1}{6} n S \bar{u} d\tau,$$

式中 n ——单位容积的分子数。

在这情形下，速度更快的气体层失去动量：

$$\frac{1}{6} n S \bar{u} d\tau m \left(v + 2\lambda \frac{dv}{dx} \right),$$

得出， $\frac{1}{6} n S \bar{u} d\tau m v$ ，（ m ——分子质量）

既然分子热运动的平均速度 $\bar{u}$ 对二气体层是一样的，則1秒内动量的改变等于气体层相互作用力 f ：

$$f = \frac{1}{3} n m S \bar{u} \lambda \frac{dv}{dx} = \frac{1}{3} \rho \lambda \bar{u} \frac{dv}{dx} S = \eta \frac{dv}{dx} S.$$

① 介质动量为质量对其速度乘积之和 (mv)。按牛頓定律，单位時間內动量的改变和所加之力 F 成正比： $F = k \frac{d(mv)}{d\tau}$ 。