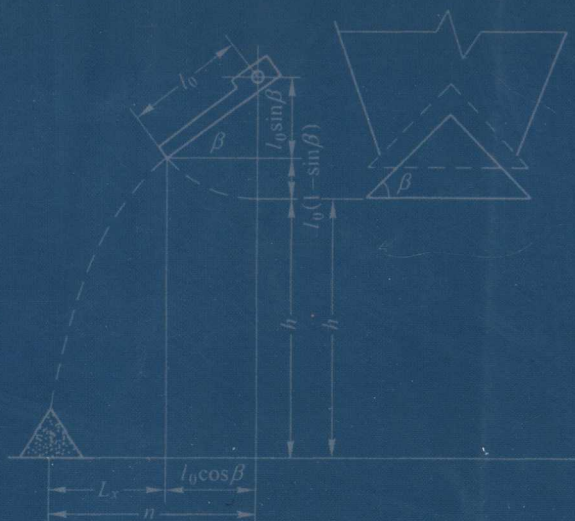


刘云彩 著

# 高炉布料规律

(第3版)



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

TF542

# 高 炉 布 料 规 律

(第3版)

刘云彩 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2005

## 内 容 简 介

本书最初于1984年出版,本次是第3版。书中重点讨论无钟布料操作和大钟布料操作,系统讲解布料操作如何影响高炉冶炼进程。掌握和运用布料操作基本规律有利于应对不同高炉和不同炉况。

书中附有布料模型,便于高炉操作者及高炉技术开发者使用。

本书可供高炉炼铁操作者、技术人员及相关专业的大专院校师生和科研人员等阅读参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

高炉布料规律/刘云彩著. —3版. —北京:  
冶金工业出版社, 2005. 1  
ISBN 7-5024-3638-3

I. 高… II. 刘… III. 高炉炼铁—配料  
IV. TF542

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 104208 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 赵培德 刘小峰 美术编辑 李 心

责任校对 王贺兰 李文彦 责任印制 牛晓波

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1984 年 2 月第 1 版, 1993 年 12 月第 2 版,

2005 年 1 月第 3 版, 2005 年 1 月第 3 次印刷

850mm × 1168mm 1/32; 9.875 印张; 261 千字; 302 页; 3001 ~ 6000 册

30.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010)65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

## 第3版 前言

本书第2版于1993年出版发行，至今已十余年。为适应炼铁技术发展，作者在第3版中改写了前版第6章“无钟布料操作”，并加写了第7章“大钟布料操作”和第8章“布料模型”，使本书更适用于高炉操作者及高炉技术开发者参考。书中重点介绍无钟布料和大钟布料，如何操作、如何编制高炉布料模型。

高炉布料是高炉频繁使用的操作技术，对高炉的作用是多方面的。本书系统讲解布料操作如何影响高炉冶炼进程，便于读者理解和灵活运用布料操作基本规律，以应对不同高炉、不同炉况。

布料操作本身有局限性，对有的高炉故障，无能为力；作者对布料操作的理解，也不全面，也经历过处理失误。不断完善本书，是作者的心愿。欢迎读者对本书提出宝贵意见。

本书唯一的计算程序，是作者请徐陵编写的，不熟悉程序的读者，可参照此例编写其他计算程序。邯钢炼铁厂青年工程师王国英向作者指出，第2版书中第227页关于炉料落到料面的位置和溜槽位置的关系计算，重算了越前角，利用这次再版的机会，做了改正。

冶金工业出版社杨传福总编、赵培德编辑为提高本书质量付出了辛勤劳动。

作者感谢徐陵同志的真诚帮助。感谢所有为本书编写提出过意见和建议的专家和学者。

感谢首钢对本书出版的资助。

刘云彩

2004年9月30日于北京

## 第2版 前言

《高炉布料规律》第1版于1984年出版。该书出版后受到不少读者、同行的鼓励。承蒙王之玺、成兰伯、恩·斯坦迪什(N. Standih)、安朝俊、刘述临、周取定、阿瑟·郑(Arthur S. Cheng)、樊哲宽和余仲洁等专家教授对本书评阅、推荐,《高炉布料规律》荣幸地被评为“1984年度冶金工业部优秀科技图书”。

近些年来,由于无钟炉顶布料技术的发展,对高炉布料的研究不断深入。在宋阳升等同志和冶金工业出版社的支持下,有机会得以对本书进行修订。第2版(修订版)中,补上了作者近年来关于无钟炉顶布料规律的研究结果。与第1版比较,增写了第六章和另外四节(目录中带\*号的),并补上了在第1版公式(1)中漏掉的 $l_0$ 。部分章节根据读者意见,作了补充说明。

宣钢张聪山同志对原书中摩擦系数的论述提出建议,并指出有些溜槽转动轴位置高于溜槽底面。对此,第2版中作了补充说明。首钢徐陵同志将本书第一章中讨论的料速、摩擦系数、料线深度等变量对炉料分布的影响,编成程序,在计算机上做模拟试验;徐陵、白宝柱同志为公式(22)~(28)进行了验算。在此一并向他们表示谢意。

感谢我国冶金界老前辈、学部委员王之玺同志为本书初版题写书名。

刘云彩

1992年10月13日于北京

# 第1版 前言

这本小册子是我对高炉布料研究的总结。

我的有关高炉布料的文章曾先后在《首钢科技》、《金属学报》、《钢铁》杂志上刊出，受到不少同志的鼓励。同时，也有部分同志觉得数学推导较多，文字叙述过少。这次将已发表的文章整理成册，考虑到各方面的要求，作了补充修改，着力阐明实际应用，公式推导力求简单，以免复杂的数学推导影响读者理解全书内容而花费很多时间和精力。

本书重点是第四、五章，是在前三章理论分析的基础上，结合生产实践写成的，读者对象主要是从事高炉生产的领导者和工程技术人员。即使不读前面部分，只读这两章，也不妨碍对这部分内容的理解。前三章为后面部分提供了理论基础，运用了一些数学分析的方法；其中第二章的主要内容是我在1956年北京钢铁学院首届学生科学报告会上提出的。这部分的读者对象主要是从事炼铁科研、高炉设计的同志和大专院校有关专业的师生。

陶少杰、杨永宜两位教授的精彩讲学，启发研究问题的讲授，对本书的写成是至关重要的。首钢的安朝俊、高润芝同志，北京钢铁学院的杨永宜、刘述临、王筱留、杨熙冲同志，东北工学院的陆旸同志以及上述三个杂志编辑部的王之玺、范学光、谭炳煜、冯有为、于宝君等同志，对发表在杂志上的文章曾给予评阅，并提出了宝贵意见，本书如果比发表在杂志上的文章有所提高的话，与这些同志的意见是分不开的。加拿大麦克马斯特大学卢维高（W. K. Lu）教授多次赠送他所主编的讲义，使我有机会了解西方冶金学家关于高炉布料问题的系统观点；柯俊教授在百忙中为我的部分布料文章的英文稿仔细斧正，在此一并致以深

切的谢意。

由于本人忙于高炉生产，时间匆忙，书中有些问题未能仔细推敲，不当之处，请读者指正。

作 者

1981 年 12 月

# 目 录

|                                       |      |
|---------------------------------------|------|
| 绪论 布料的历史沿革 .....                      | (1)  |
| 第一章 布料方程 .....                        | (17) |
| 第一节 炉料在溜槽上的受力分析 .....                 | (19) |
| 第二节 炉料在空区中的运动 .....                   | (21) |
| 第三节 炉料初速度 $C_0$ 和摩擦系数 $\mu$ 的确定 ..... | (24) |
| 第四节 溜槽倾动轴高于溜槽底面的计算公式 .....            | (32) |
| 第五节 计算实例 .....                        | (36) |
| 第六节 大钟布料方程 .....                      | (46) |
| 参考文献 .....                            | (49) |
| 第二章 炉料分布规律 .....                      | (50) |
| 第一节 料线的作用 .....                       | (50) |
| 第二节 装料次序的作用 .....                     | (53) |
| 第三节 界面效应 .....                        | (57) |
| 第四节 批重的作用 .....                       | (62) |
| 第五节 批重特征数 .....                       | (67) |
| 第六节 布料特征数 .....                       | (67) |
| 第七节 炉料分布的计算方法 .....                   | (70) |
| 第八节 修正系数的确定 .....                     | (74) |
| 第九节 阻力系数的确定 .....                     | (75) |
| 第十节 炉料堆角的确定 .....                     | (78) |
| 第十一节 修正炉料堆角 .....                     | (82) |
| 第十二节 计算实例 .....                       | (84) |
| 参考文献 .....                            | (93) |
| 第三章 各参数对布料的影响 .....                   | (96) |
| 第一节 对布料方程的证明 .....                    | (96) |

|            |                       |              |
|------------|-----------------------|--------------|
| 第二节        | 炉料粒度和堆角的影响 .....      | (100)        |
| 第三节        | 炉料堆密度的影响 .....        | (107)        |
| 第四节        | 大钟直径和炉喉直径对布料的影响 ..... | (108)        |
| 第五节        | 大钟角度和溜槽角度对布料的影响 ..... | (116)        |
| 第六节        | 溜槽转速的影响 .....         | (118)        |
| 第七节        | 溜槽倾动距对布料的影响 .....     | (120)        |
| 第八节        | 不同空区煤气速度对布料的影响 .....  | (123)        |
| 参考文献 ..... |                       | (126)        |
| <b>第四章</b> | <b>装料制度的作用 .....</b>  | <b>(127)</b> |
| 第一节        | 炉料分布对软融带的影响 .....     | (129)        |
| 第二节        | 布料与高炉寿命 .....         | (135)        |
| 第三节        | 煤气分布的判定标准 .....       | (140)        |
| 第四节        | 利用边缘气流处理炉墙结厚 .....    | (146)        |
| 第五节        | 布料操作与高炉行程 .....       | (152)        |
| 第六节        | 合理的煤气分布 .....         | (162)        |
| 参考文献 ..... |                       | (167)        |
| <b>第五章</b> | <b>装料制度的选择 .....</b>  | <b>(169)</b> |
| 第一节        | 保持足够高的炉缸温度 .....      | (169)        |
| 第二节        | 保持活跃的炉缸工作状态 .....     | (174)        |
| 第三节        | 选择装料制度的原则 .....       | (183)        |
| 第四节        | 装料制度与送风制度相适应 .....    | (188)        |
| 第五节        | 批重的选择 .....           | (190)        |
| 第六节        | 不同批重操作的实践 .....       | (204)        |
| 第七节        | 料线的选择 .....           | (207)        |
| 第八节        | 低料线操作 .....           | (209)        |
| 第九节        | 装料次序的选择 .....         | (212)        |
| 第十节        | 装料制度的选择实例 .....       | (216)        |
| 参考文献 ..... |                       | (219)        |
| <b>第六章</b> | <b>无钟布料操作 .....</b>   | <b>(221)</b> |
| 第一节        | 炉料落点的不同 .....         | (221)        |

|                |                     |              |
|----------------|---------------------|--------------|
| 第二节            | 炉料偏析 .....          | (222)        |
| 第三节            | 多环布料 .....          | (223)        |
| 第四节            | 多环布料操作 .....        | (228)        |
| 第五节            | 无钟布料的初级操作 .....     | (234)        |
| 第六节            | 并罐式无钟的圆周均匀布料 .....  | (243)        |
| 第七节            | 中心加焦技术 .....        | (253)        |
| 第八节            | 无钟操作事故的诊断及处理 .....  | (254)        |
|                | 参考文献 .....          | (263)        |
| <b>第七章</b>     | <b>大钟布料操作 .....</b> | <b>(264)</b> |
| 第一节            | 同装和分装 .....         | (264)        |
| 第二节            | 大批重与小批重结合 .....     | (270)        |
| 第三节            | 等料线及不等料线 .....      | (272)        |
| 第四节            | 半倒装 .....           | (276)        |
| 第五节            | 炉料在大料斗及炉喉内的分布 ..... | (276)        |
|                | 参考文献 .....          | (278)        |
| <b>第八章</b>     | <b>布料模型 .....</b>   | <b>(279)</b> |
| 第一节            | 测定方法 .....          | (280)        |
| 第二节            | 料面形状描述 .....        | (286)        |
| 第三节            | 径向料层的负荷及碱度 .....    | (288)        |
| 第四节            | 料层的塌落与变形 .....      | (289)        |
| 第五节            | 料层塌落的定量计算 .....     | (293)        |
| 第六节            | 气流速度对料面的影响 .....    | (294)        |
| 第七节            | 布料模型编制 .....        | (296)        |
|                | 参考文献 .....          | (296)        |
| <b>本书中主要符号</b> | <b>.....</b>        | <b>(298)</b> |

## 绪论 布料的历史沿革

高炉在中国出现,已有 2700 年的历史<sup>[1]</sup>。由于古代生产装备差,技术水平低,虽然 2000 年前(西汉末年)已有  $50\text{m}^3$  的巨型高炉生产<sup>[2]</sup>,但当时还不懂布料,煤气利用极差,每炼 1t 铁要用 7~8t 木炭<sup>[1,2]</sup>。燃料消耗高,煤气直接放散到大气里,致使高炉附近黑烟蔽日。前秦(公元 350~390 年)高僧道安著的《释氏西域记》中曾记述新疆库车地区的当时实况:“屈茨北二百里山,夜则火光,昼日但烟,人取此山石炭,冶此山铁,恒充三十六国。”<sup>[3]</sup>在欧洲,阿格里科拉(Georg Agricola, 1494~1555 年)作的《论金属》中的一幅图(见图 1),描述了当时北欧高炉生产状况,高炉较小,有固定的加料平台,炉料从高炉固定的一侧倒入<sup>[4]</sup>。显然,当时尚未认识布料的作用。

18 世纪有一张高炉图(见图 2)描述了法国高炉加料情形<sup>[5]</sup>。在炉喉周围有一层平台,加料工人可以沿炉喉周围加料。炉喉直径较小的高炉,这样加料比较均匀。倒料工人的对面有另一个人手持工具,估计他是在用一个耙子平料,以改善煤气利用。

第一个兼有布料和回收煤气的炉顶设备是 1850 年在英国应用的巴利式布料器(见图 3),它用手工操作,炉料放进料斗后,开大钟,炉料沿大钟斜面布到炉内,使炉内料面呈漏斗形:边缘料面高,中心料面低。边缘料多,使沿炉墙上升的煤气阻力增加,有利于改善煤气利用;中心料面低,高炉中心的料柱阻力减少,有利于在整个高炉断面改善炉料与煤气的接触,对改善炉缸工作也有良好作用。虽然巴利式布料器在结构上存在严重缺点,但它对高炉布料起到了启蒙作用,开拓了现代料面分布的重要方向。一百余年来,高炉炉料分布基本沿用巴利式大钟布料器所形成的漏斗形。



图1 高炉冶炼和加料情形  
A—高炉；B—台阶；C—矿石；D—煤

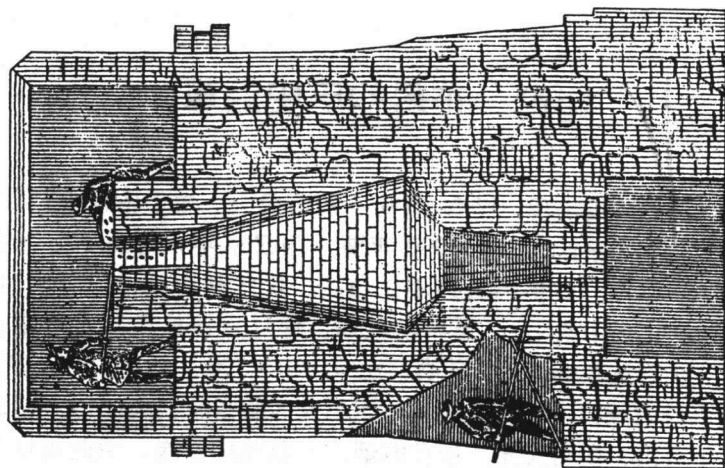


图2 法国高炉的加料图

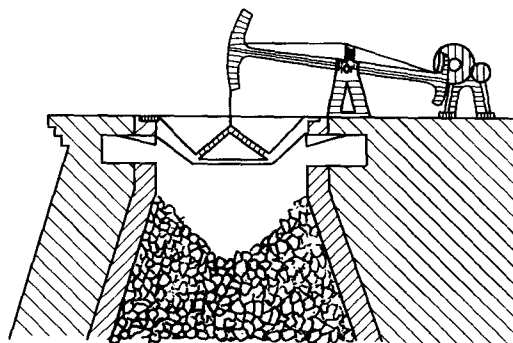


图 3 巴利式布料器<sup>[5]</sup>

巴利式布料器除结构上的缺点外，布料也不均匀。一批料倒进料斗后，炉料在倾倒的一侧，集中形成堆尖，而对面的炉料较少，造成粒度偏析。炉料下到炉内继续保持这种不均匀性，引起高炉偏行。如果料斗旋转，则堆尖位置可以变化，从而减小炉料在料斗内的不均匀性。布郎式布料器是初期的旋转式布料器。美国埃比威尔（Ebbw Vale）厂第一个使用布郎式布料器<sup>[6]</sup>，该厂为高炉设计布料器提出了重要的原则——旋转。现代布料器无一例外，都是能够旋转的。

布郎式布料器（见图 4）是单钟的，使用过程中发现它不能从根本上克服巴利式布料器密封性不佳的缺陷。加料时，大钟开启，炉内大量煤气从炉顶放出来。此外，布料器旋转的歪嘴放料口很大，流料时间较短，不能克服大料斗内炉料的不均匀性。

1907 年美国马基公司设计的马基式布料器（见图 5），继巴利式布料器之后，进行了高炉布料的第二次革命。在它出现的短短 20 年内，美国 150 座高炉几乎全部采用；除美国以外，它在世界范围内也得到迅速推广。到 20 世纪 80 年代，它已成为世界上绝大部分高炉的布料设备。

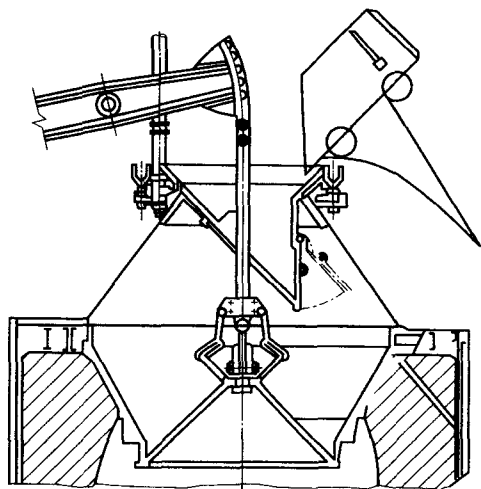


图 4 布朗式布料器<sup>[7]</sup>

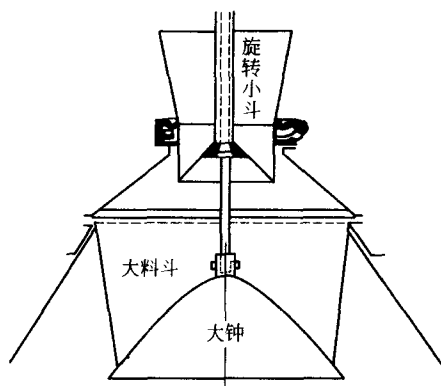


图 5 马基式布料器<sup>[6]</sup>

马基式布料器继承了巴利式大钟、大斗的优点，并且用双钟、双斗克服加料时煤气漏出的缺陷；它吸收了布朗式布料器旋转的长处，使小钟、小斗一起旋转，把炉料按六站（每站  $60^\circ$ ）放到大斗内。这样就使炉料堆尖较均匀地分布在大斗里。

随着钢铁工业的发展,高炉容积日渐扩大。冶金专家对高炉深入研究后发现,马基式布料器也不是完美无缺的。

首先,炉料在小料斗内分布不均匀,这种不均匀性,在炉料下到大料斗内及随后下到炉内时依然存在。

格鲁金诺夫(В. К. Грудинев)曾仔细地研究过马基式布料器布料所带来的沿高炉圆周方向的不均匀性<sup>[8,9]</sup>。

从图6可以看出,料车将炉料倒入小斗后,大块滚到对面,粉末留在堆尖附近,沿小斗上部有 $\Delta h$ 高度是偏布的炉料。格鲁金诺夫仔细地计算了炉料在炉喉水平面上的不匀,用图一目了然地表示出来。他将炉喉圆周展开成平面,画出一批炉料沿炉墙的厚度分布。为使不均匀分布的炉料明显起见,他做了两种处理。

- (1) 只画出不均匀部分,而将均匀分布的一层炉料去掉;
- (2) 纵坐标的比例尺比横坐标的比例尺放大10倍。

这样处理后,炉料偏布现象被放大几十倍,突出了偏布的形象。

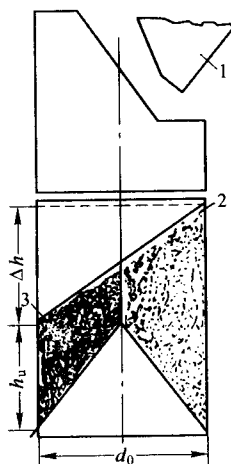


图6 炉料在小斗内的分布<sup>[8]</sup>

1—料车;2—细粒分布区;3—大块分布区

图7是采用六站布料、4车一批(KKJJ↓)的炉料不均匀分布图。

根据格鲁金诺夫的研究结论,保持 $60^\circ$ 或 $60^\circ$ 倍数布料,或改变车数或加一定修正角度,均无法消除水平面分布的不均匀性。对一批料而言,均匀分布的占大部分,在图中得不到反映;而纵坐标比例



图7 六站布料分布图(KKJJ↓)

白色—矿石;黑色—焦炭

放大 10 倍,又将这相对不均匀部分再次放大 10 倍。

库兹涅茨克钢铁公司炼铁厂高炉实验证明,格鲁金诺夫的有些结论是不正确的。现有高炉布料其他改变的影响,远远大于水平面分布的不均匀。格氏关于水平面与垂直面不均匀的严格划分,是没有必要的<sup>[9]</sup>。

此外,炉料在炉喉内按一定堆角分布;随着高炉容积扩大,矿石可能很少或根本布不到高炉中心。矿石少,中心气流容易发展,影响煤气利用。美国金尼 (S. P. Kinney) 的试验表明,随炉喉直径增加,保持炉喉间隙为 609.6mm,矿石批重相应增加。试验结果如表 1<sup>[10]</sup>所示。

表 1 炉喉直径与炉料分布

| 直 径/m | 中间无矿<br>部分直径 | 矿石环圈<br>宽度/m | 面 积/m <sup>2</sup> |              |      | 无矿部分面积<br>占炉喉面积比<br>/% |
|-------|--------------|--------------|--------------------|--------------|------|------------------------|
|       |              |              | 矿石环圈<br>面积         | 中心无矿<br>部分面积 | 炉喉面积 |                        |
| 5.2   | 1.2          | 2.0          | 19.92              | 1.17         | 21.1 | 5.5                    |
| 5.5   | 1.5          | 2.0          | 21.86              | 1.83         | 23.7 | 7.7                    |
| 5.8   | 1.8          | 2.0          | 23.66              | 2.65         | 26.3 | 10.5                   |
| 6.1   | 2.1          | 2.0          | 25.58              | 3.59         | 29.2 | 12.3                   |
| 6.4   | 2.4          | 2.0          | 27.47              | 4.66         | 32.1 | 14.5                   |
| 6.7   | 2.7          | 2.0          | 29.38              | 5.92         | 35.3 | 16.7                   |
| 7.0   | 3.0          | 2.0          | 31.26              | 7.30         | 38.6 | 18.9                   |

从表 1 所列试验结果看出,炉喉直径由 5.2m 增到 7.0m,炉喉面积增加 82.5%,中心无矿部分的面积增加 626.5%。无矿部分占炉喉整个面积比由 5.5% 增到 18.9%。由此,金尼得出结论:炉喉直径超过 5.2m,炉料分布将不理想。这种结论,使部分美国高炉的炉喉直径偏小,出现“瓶式高炉”<sup>[11]</sup>。

以巴甫洛夫为首的前苏联学派研究表明,马格尼托哥尔斯克厂的炉喉直径为 5.8m 的高炉,虽然矿石布不到中心,但“无矿区”的煤气利用并不差。这些结论使前苏联 1300m<sup>3</sup> 的标准高炉炉喉直径达 6.5m,冶炼效果良好<sup>[11]</sup>。

与此同时,一些设计专家研究把矿石既能布到边缘又能布到中心的新型布料器。研究的新型布料器种类繁多,但由于设备复

杂，操作困难，而没能实现，或者在生产高炉上昙花一现，没有得到发展<sup>[12]</sup>。

图8是著名的索洛金布料器<sup>[13]</sup>，它就是基于上述思想设计的。

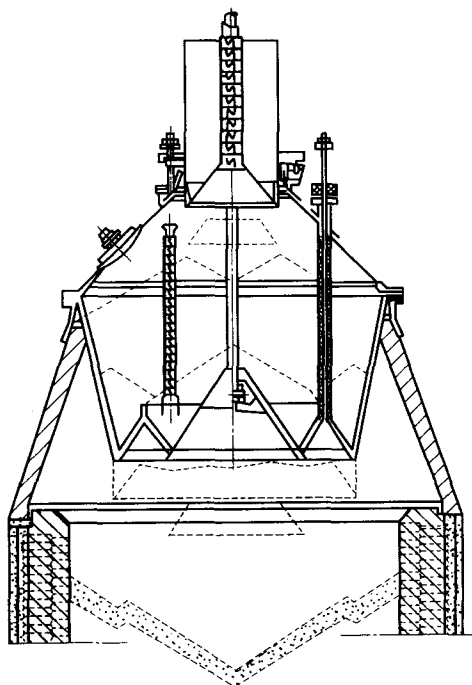


图8 索洛金布料器

20世纪60年代，巨型高炉不断出现，各工业国家为提高效率，增强竞争能力，高炉容积一扩再扩，大钟式布料器面对巨大直径的炉喉，中心布矿过少的现象更加突出；中心料面和边缘料面高度之差，随炉喉直径增大而增大。以炉料炉内堆角为  $30.8^\circ$  计算，料面高度差  $\Delta H$  如下：

|                     |      |      |      |      |     |      |      |      |      |      |
|---------------------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|
| 炉喉直径/m              | 2.5  | 3.5  | 4.7  | 5.6  | 6.7 | 7.3  | 8.2  | 9.8  | 11   | 12.4 |
| 料面高度差 $\Delta H$ /m | 0.75 | 1.04 | 1.40 | 1.67 | 2.0 | 2.18 | 2.44 | 2.92 | 3.28 | 3.58 |

为解决上述矛盾，出现了变径炉喉。第一个变径炉喉投产于1964年，是德国克虏伯公司设计建成的<sup>[14]</sup>。