

971942

TE5
12046

● 高等学校教学用书 ●

炼铁学

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



冶金工业出版社

高等学校教学用书

炼铁学

E. Ф. 维格曼 B. H. 热廖宾 Ю. С. 尤斯芬
A. H. 波赫维斯涅夫 B. B. 连别尔特 著
董学经 杨乃德 等译

冶金工业出版社

(京)新登字 036 号

高等学校教学用书

炼 铁 学

E. Ф. 维格曼, B. H. 热廖宾, Ю. С. 尤斯芬

A. H. 波赫维斯涅夫, B. M. 尤连别尔特著

董学军 杨乃伙等译

冶金工业出版社出版

(北京北三环大街海润院北巷 39 号)

新华书店总店科技发行所发行

北京昌平环球印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 17.375 字数 457 千字

1993 年 10 月第一版 1993 年 10 月第一次印刷

印数 1~1100 册

ISBN 7-5024-1239-5

TF·294(课) 定价 8.20 元

译者的话

本书译自俄文《炼铁学》（Металлургия чугуна, 1989年）第二版（第一版1978年出版）。该书经前苏联国家教委批准作为高等学校黑色冶金专业本科生教科书。

本书叙述了高炉冶炼原料，造块的理论及工艺和强化造块过程的装备及新方法；详细讨论了高炉过程理论，包括物理化学原理、液化过程、传热理论；介绍了高炉冶炼计算指标，强化高炉冶炼新方法，氧化物还原及生铁形成的理论，现代高炉车间设计及其设备和结构。

本书的特点是明确而透彻地描述高炉内各种复杂的现象，精辟地运用钢铁冶金基本原理分析高炉工艺，使读者很容易掌握高炉冶炼的基本规律及工艺与操作中的各种主要问题。它是一本理论联系实际的好教材。

本书由冶金工业部教材编辑室董学经、北京科技大学杨乃伏、首都钢铁公司马善长以及北方工业大学罗本捷翻译，方茹娟和王秋芬参与了本书译文的整理、修改及校核，赵晓薇绘制了本书的插图。全书由董学经校对。

本书可作为我国高校钢铁冶金专业的教学参考书，也可供从事钢铁冶金的科学工作者、设计人员及工程技术人员参考。

1991年10月于北京

3A01-102

作者中文版前言

本书能翻译成中文,并在中国出版,作者谨向中国的科学家们表示谢意。该书译自四年前即1989年出版的教科书(第二版)。鉴于在此期间世界上大型的铁矿石熔融还原设备已在南非首次投入生产,在俄罗斯利别茨克具有工业规模的熔融还原试验炉也进行了一系列新的试验,故此我们就上述内容对书中有关章节做了补充。由于前苏联、现独联体高炉生产技术指标有了一些变化,因此,有必要在本书的某些章节中增补一些新的统计资料。

本书主要内容未作大的变动。希望读者能够从本书中获得现代炼铁生产状况和发展远景全面而真实的信息。

我们期望本书中文版的出版将会促进我们两国冶金工作者之间在科学领域中广泛的联系。

E. Ф. 维格曼

1993年1月14日于莫斯科

序 言

近年来,由于人们采用了一些现代研究方法及监控技术,冶金科学取得了极大的成就。在研究铁矿石炼制生铁过程的理论时,必须应用现代物理化学、结晶学、固体物理、热物理、气体动力学和其他一些基础学科方面的知识。

尽管近年来许多新兴工业领域迅猛发展,但冶金工业在现代工业中仍然并将在一个较长的时期内保持其重要的地位,黑色冶金工业仍以较高速度向前发展。苏联生铁年产量已突破1亿1千万吨,铁矿石、焦炭、球团矿和烧结矿产量,苏联均占世界第一位。

在苏联,烧结生产已进入一个新的阶段。采用了一系列新工艺,显著地强化了矿石造块和生铁冶炼进程。现在烧结与球团生产在冶金行业中已形成一个独立的部门,这就要求工程技术人员去提高自己的业务水平。

本书不可能涉及到本专业的所有问题,作者只着重阐述专业的主要点,避免一些烦琐的叙述,仅为探索各种现象与构造的本质提供一些基本的研究方法及手段。

本书的内容与讲述方法是作者在莫斯科钢铁及合金学院冶金过程教研室工作期间多年教学经验的总结。

本书第2至第4章和第9章由A. H. 波赫维斯涅夫和E. Ф. 维格曼编写,第5至第8章、第10、11、14和15章由A. H. 波赫维斯涅夫和Ю. С. 尤斯芬编写,第12、13章由A. H. 波赫维斯涅夫和B. M. 克连别尔特编写,第16至24章由B. H. 热廖宾编写,第1章及结尾由E. Ф. 维格曼编写。

作者诚恳期望读者对本书内容及其叙述方法提出宝贵意见。

目 录

第 I 篇 炼铁生产历史	(1)
第 II 篇 高炉冶炼原料	(12)
第 1 章 焦炭	(12)
§ 1. 炼焦过程	(12)
§ 2. 焦炉及炼焦车间构造	(17)
§ 3. 焦炭质量	(22)
第 2 章 铁矿石	(25)
§ 1. 铁矿石的分类及其形成过程	(25)
§ 2. 铁矿石质量评价	(33)
§ 3. 铁矿石主要产地	(51)
第 III 篇 铁矿石的准备	(58)
第 3 章 高炉冶炼前铁矿石准备的现代工艺	(58)
第 4 章 铁矿石及精矿粉烧结	(69)
§ 1. 一般问题	(69)
§ 2. 链式烧结机	(73)
§ 3. 烧结过程气体动力学	(85)
§ 4. 固相反应	(93)
§ 5. 物料熔融、熔体结晶、烧结矿最终微观结构的形成	(99)
§ 6. 焙烧矿石和精矿粉时从物料中排除有害杂质	(106)
§ 7. 烧结过程的热制度	(108)
§ 8. 烧结矿质量	(114)
第 5 章 球团矿生产	(120)
§ 1. 生球制造	(120)
§ 2. 球团矿高温固结	(124)
§ 3. 不焙烧法生产球团矿	(139)

§ 4. 球团矿的冶金性能	(140)
§ 5. 烧结矿与球团矿冶金性能的比较	(146)
§ 6. 金属化球团生产	(147)
第IV篇 高炉生产	(149)
第6章 水分的蒸发、挥发分的挥发和熔融物的分解	(149)
第7章 高炉还原过程	(153)
§ 1. 铁氧化物的结构及性质	(153)
§ 2. 铁氧化物的还原热力学	(155)
§ 3. 其他氧化物的还原热力学	(163)
§ 4. 高炉内氧化物的还原动力学	(168)
§ 5. 各种因素对还原速度的影响	(179)
§ 6. 高炉内还原过程参数与冶炼的技术经济指标	(185)
第8章 生铁的形成及其性质	(193)
第9章 炉渣	(200)
第10章 高炉内硫的行为	(222)
§ 1. 含硫气体与炉料的作用	(222)
§ 2. 生铁及炉渣中的硫	(224)
§ 3. 铁渣间脱硫反应热力学	(228)
第11章 炉内热交换	(241)
§ 1. 块状料层传热理论	(241)
§ 2. 高炉热平衡及热工指标	(247)
§ 3. 高炉冶炼的区域热平衡	(254)
第12章 高炉炉缸过程	(265)
§ 1. 风口燃料燃烧	(265)
§ 2. 已还原元素的氧化及其二次还原	(275)
第13章 高炉炉料及气体的运动	(277)
§ 1. 炉料运动	(277)
§ 2. 高炉内气体的运动	(282)
§ 3. 炉顶炉料与气流的分布	(287)

§ 4. 提高炉内气体压力	(292)
第 14 章 配料计算、高炉物料平衡及热平衡	(294)
§ 1. 热当量概念	(294)
§ 2. 元素与氧化物的热当量	(295)
§ 3. 高炉配料计算	(303)
§ 4. 高炉炉顶煤气成分计算	(314)
§ 5. 物料平衡及热平衡计算	(318)
第 15 章 强化高炉冶炼	(325)
§ 1. 提高风温	(325)
§ 2. 富氧鼓风	(329)
§ 3. 加湿鼓风	(333)
§ 4. 高炉喷吹含碳物质	(334)
§ 5. 高炉使用金属化炉料	(351)
§ 6. 冶炼技术经济指标	(355)
第 V 篇 高炉结构及其车间设备	(357)
第 16 章 高炉炉型	(357)
§ 1. 高炉炉型的一般概念	(357)
§ 2. 高炉剖面主要尺寸及其组成部分	(359)
§ 3. 高炉炉型的演变	(360)
§ 4. 炉型尺寸的确定	(371)
第 17 章 高炉构造	(382)
§ 1. 炉基	(383)
§ 2. 金属结构	(384)
§ 3. 高炉支柱及托圈	(387)
§ 4. 炉壳	(388)
§ 5. 炉顶装置	(391)
§ 6. 煤气上升管	(393)
第 18 章 高炉炉衬及其构造	(394)
§ 1. 炉底衬	(394)
§ 2. 炉缸	(401)

§ 3. 炉缸设备	(402)
§ 4. 热风环管及热风总管	(413)
§ 5. 炉腹	(413)
§ 6. 炉腰及炉身	(416)
§ 7. 炉喉及炉身顶部的保护性加固	(418)
第 19 章 高炉冷却	(420)
§ 1. 主要冷却方法	(420)
§ 2. 冷却设备结构	(426)
§ 3. 炉底冷却	(430)
第 20 章 高炉装料装置	(434)
第 21 章 高炉上料	(451)
§ 1. 高架储料仓及炉料输送设备	(451)
§ 2. 取料、称量及向炉顶送料系统	(454)
§ 3. 储料仓下工作间及料车坑设备, 矿仓及焦仓给料机, 筛子	(458)
§ 4. 炉顶卷扬设备	(465)
第 22 章 出铁场及其设备, 冶炼及浇注产品的输送	(472)
§ 1. 出铁场设备	(472)
§ 2. 冶炼产品流槽	(476)
§ 3. 高炉炉前机械设备	(478)
§ 4. 出铁场机械化操作	(485)
§ 5. 输送设备	(488)
§ 6. 铸铁机	(492)
§ 7. 炉渣粒化装置	(495)
第 23 章 鼓风加热装置	(497)
§ 1. 热风炉构造、发展及其操作程序	(497)
§ 2. 耐火炉衬	(500)
§ 3. 热风炉设备	(506)
第 24 章 高炉煤气净化	(516)

§ 1. 煤气净化的一般情况	(516)
§ 2. 煤气粗除尘及半净除尘	(516)
§ 3. 净除尘	(518)
§ 4. 喷雾管和蝶阀组除尘	(521)
第 25 章 高炉生产发展前景	(526)
附录	(533)
推荐参考书目	(540)

第 1 篇 炼铁生产历史

人类物质文明的发展史可分为三个时代，即石器时代、青铜时代和铁器时代。在每个时代为了制作劳动工具使用了不同的材料。用燧石、石英岩、石英和火山岩玻璃（黑曜岩）制造的最古老的劳动工具是旧石器时代（公元前 80 万年至一万二千年前）的产物，它们是靠劈、砸石头等原始方法粗制的。

在中石器及新石器时代原始公社制度兴盛时期，已经使用了精细磨光的石制工具。考古学家认为铜制工具最早出现于公元前六千年，而广泛使用铜器是在晚得多的奴隶制社会。在新石器时代（公元前三、四千年）石器与铜器并用。最初的铜器是由天然铜制成的，以后，才找到由铜的氧化物和硫化物制造铜的方法。铜器逐渐取代了石器，这是因为铜器便于在冷状态及热状态下锤打，可以得到复杂形状的铸件，还可以制成铜丝、铜板、铜管，而石器则完全不可能。在青铜时代（公元前三千至一千年前）使用了铜锡合金制件和劳动工具。青铜比一般铜坚硬并且不易腐蚀。铁器时代开始于公元前一千年的前半期。陨铁制件早在著名的古埃及王朝时代，即公元前三至四千年就有了，但它稀少而昂贵。

关于铁制武器和劳动工具，最早的文字记载是在古中国及印度的手稿以及圣经中发现的，注明日期在公元前三千年；同样古老的已被折断了的钢制工具于 1837 年在埃及希奥斯大金字塔内被发现。

与青铜相比，大规模地冶铁及制造铁质工具，需要有更高的冶金技术水平。在近东、印度和南部欧洲，它开始于公元前二千至一千年之间，在北埃及埃及始于公元前 7 世纪，而在远东始于公元前 7 世纪至 5 世纪。据考古学家发掘的资料，苏联领土上在黑海沿岸希腊殖民地于公元前 10 世纪开始使用铁制工具，而古俄

罗斯在公元前9世纪开始冶铁。冶铁和铁加工工艺也逐渐完善。在荷马（公元前8世纪）的著名史诗《奥德赛》中，以诗歌的形式记述了钢制宝剑的淬火。亚里斯多德（公元前384~322年）描述印度冶金时首先提到了生铁，当时是由铁与木炭在坩埚中合金化炼制的，因此，早在高炉出现以前的很长一段时期人们就知道了生铁。

为了冶炼铁矿石，建立了不大的竖炉——直接由铁矿砂炼铁的炉子（生吹炉），获得粘稠状的熟铁块。生吹炉（图1）通常建

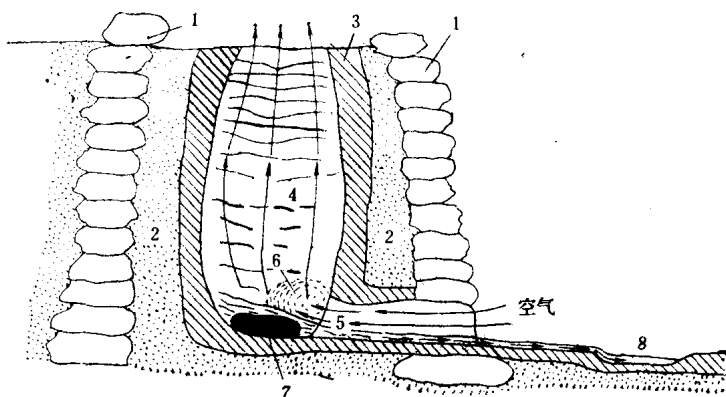
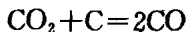
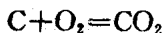


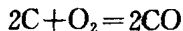
图1 生吹炉构造

1—砍平的大石块或大圆石（砂石、石灰岩、花岗岩）；2—泥土或砂填实层；3—耐火泥涂抹层；4—炉子工作空间；5—敞开式渣沟兼进风口；6—渣沟-风口区木炭燃烧带；7—熟铁块；8—渣坑

于山丘斜坡，这样可以利用天然抽力将空气经永远敞开的渣口吸入炉内。最初炉子高度为1.0~2.5m。因为没有鼓风机，故经渣口借自然抽力进入炉内的空气较少，冶炼强度很低。渣口前木炭在冷空气流中按下式燃烧：



或



每1kg 燃烧的碳约需4.4m³ 空气。因为借自然抽力进入的空

气有限，故单位时间内在渣口前燃烧的炭量很少，而同时通过炉壁的热损失及用于还原所消耗的热量很大，因此在炉子底部炉缸最炽热区的温度也不超过 $1200\sim 1250^{\circ}\text{C}$ （而现代高炉风口前炉缸的温度达到 $1900\sim 2100^{\circ}\text{C}$ ）。木炭燃烧后的气体产物（ CO 和 N_2 ）上升到炉子空间，因炉子很低而来不及冷却到足够的温度，离开炉顶时温度高达 $800\sim 900^{\circ}\text{C}$ （现代高炉炉子高达 $30\sim 33\text{m}$ ，炉顶煤气温度很少有超过 $250\sim 300^{\circ}\text{C}$ 的），炉气的还原性能很少被利用，逸出的炉气中 CO_2 含量只有百分之几（现代高炉炉顶煤气 CO_2 含量高达 $16\sim 18\%$ ）。生吹炉不合理的热制度使木炭消耗量大得惊人，每 1kg 熟铁块达 $4\sim 6\text{kg}$ 木炭（现代高炉每千克生铁只消耗 $0.4\sim 0.5\text{kg}$ 焦炭）。

生吹炉炉料中除木炭外，只有铁矿石，当时还不知道使用熔剂石灰石。

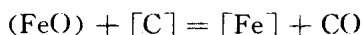
随着木炭的燃烧，炉料缓慢下降，从炉顶则不断分层加入新的矿石及燃料。生吹炉上部，炉料水分蒸发，结晶水及碳酸盐分解，铁的还原在整个炉内进行，但由于炉内温度很低，还原反应过程不能充分进行，很多未被还原的铁氧化物进入硅酸铁渣之中。

从生吹炉内排出来的终渣含 FeO 高达 $50\sim 55\%$ ， Fe_2O_3 达 $10\sim 15\%$ （ Fe_2O_3 以磁铁矿 $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 形式进入炉渣）。

亚库梯有一个生吹炉的终渣成分如下： $\text{FeO}48.5\%$ ； Fe_2O_3 14.82% ； SiO_2 23.01% ； Al_2O_3 2.67% ； MnO 3.48% ； CaO 2.84% ； P_2O_5 0.87% ；碱质 3.78% 。而现代高炉炉渣 FeO 含量仅 $0.5\sim 1.0\%$ ，每 1000kg 炉料中只有 $3\sim 5\text{kgFe}$ 进入炉渣， $997\sim 995\text{kgFe}$ 进入生铁。生吹炉炉料中每 1000kgFe 进入熟铁块的不超过 $600\sim 700\text{kg}$ ，其他 $300\sim 400\text{kgFe}$ 均未被还原并进入炉渣损失掉了。黑色硅酸铁渣（ Fe_2SiO_4 ）具有良好的流动性，在生吹炉炉底（ $1100\sim 1250^{\circ}\text{C}$ ）渣钩处不停地流出，并聚集在炉子外专门的渣坑内。德国称生吹炉为《Rennofen》，即从此而得名，意思是“不断跑渣的炉子”。生吹炉炉渣碱度不大于 $0.1\sim 0.3$ ，因此几乎没有金属脱硫反应（ $\text{FeS}+\text{CaO}=\text{CaS}+\text{FeO}$ ），炉料中全部硫进入熟铁块，只有

不含硫的或含硫极少的矿石才能炼出优质的熟铁块。

在生吹炉内，形成含铁渣之前就出现了固体粘稠状的铁粒，当它与碳及碳的氧化物接触时立刻开始渗碳。在高炉，此过程导致获得生铁（含C4.5~5.0%，其熔点为1130~1200℃），从高炉放出时的温度为1300~1500℃。应该指出，高炉炉缸中铁水是在炉渣的下面，炉渣中含有0.5~1.0%FeO，这个含量是不足以引起如下反应的：



生吹炉内条件与此完全不同，在其底部刚渗碳的粘稠铁落入含FeO50~55%的铁渣中，发生激烈的生铁脱碳反应（被含铁炉渣氧化），得到的产品含碳不超过0.5%（有时≤0.3%）。

这种产品的熔化温度不低于1400℃，不可能从炉内流出（炉内最高温度不超过1200~1250℃）。

加热到粘稠状的可塑性铁颗粒粘连在一起并聚积于炉底形成熟铁块（源于古老的斯拉夫语《крѣч》—铁匠）。生吹炉旁设有木质挤压机，专门用来将处于熟铁块空隙中的铁渣挤压出来。含碳很低的熟铁容易锻打，但不能浇注成铸件。为了取出已练成的熟铁，生吹炉要定期停炉，拆开炉子前墙将几普特的熟铁掏出，再将前墙重新砌好。这种周期性的停炉拆炉是生吹炉冶炼法的主要弱点，生产率太低。木炭燃烧带温度低，气体能量利用率低，铁损耗太大以及间歇性过程也是生吹炉的重要缺点。为了进一步发展冶铁技术，必须从改进生吹炉结构及消除上述缺点着手。

公元八世纪，西班牙加泰隆人在改善生吹炉结构上迈出了重要一步。在加泰隆炉（图2），矿石及木炭是分开加入的，有专门的风口供鼓风入炉，设有单独的渣沟和倾斜的前墙，在操作平台上可用夹钳将制成的熟铁块取出而无需停炉，从而最先实现了连续生产熟铁，显著提高了炉子生产率。逐渐加高生吹炉，使炉气在炉内停留的时间增加，降低了煤气出口温度，提高了进入炉子最热区域的矿石温度及其还原程度。使用楔形风箱，首次用人力强行鼓风，进而用畜力带动以至用水轮带动风箱，显著增加了单

位时间内鼓入炉内的风量，因而增加了单位时间燃烧的木炭数量。结果提高了炉子下部的温度，改善铁的还原条件，降低了铁在渣中的损耗。渣的氧化性能降低，这导致减少脱碳反应 $(\text{FeO}) + [\text{C}] = [\text{Fe}] + \text{CO}$ 。上述变化又导致熟铁中的含碳量增长，从而降低了其熔点。到 11~12 世纪，首次在较大的炉子（高 4~5m）获得了含有一定数量液态生铁（2~4%C）的熟铁块，它与炉渣同时流出炉外。同时炉子下部温度达到了 1300 ~

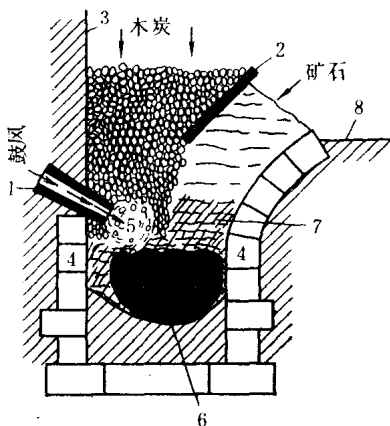


图 2 加泰隆炉

- 1—鼓风口；2—砖制隔板；3—炉子竖墙；
- 4—由巨型劈石或耐火砖铺成的砌体；
- 5—木炭燃烧带；6—熟铁块；7—渣；
- 8—操作平台

1350°C，而渣中 FeO 含量降到 10~15%。生铁不能锻打，当初被人们视为废品，并再次将其与矿石一并投入炉内。生铁的英文名称为“Pig iron”（意为猪铁）。今天要提起冶金工作者注意，在用鼓风炉冶炼矿石时期，它不仅在高度上与生吹炉有区别，而首先是在产品的形式上有区别。有时，甚至现在还有一些文献中将鼓风炉误认为即是现在的小型高炉，这二者之间有根本的区别。前者产出熟铁及生铁，而后者只炼生铁。在欧洲，高炉（古斯拉夫语《дмение》——鼓风）出现于 13 至 14 世纪。当时炉子下部温度达到 1350~1450°C，渣中 FeO 含量 3~6%，在该条件下，炉渣下面铁中的碳的氧化已很少，产品几乎全部是生铁。后来，发明了生铁炼钢的有效方法，把从矿石获取钢分成两步，生铁作为中间形式的产品。从生铁炼制成钢是在氧化性的熟铁冶炼炉内进行的，以后在搅炼炉（Г. 科特，1784 年）、转炉（Г. 贝塞麦，1855 年和 C·托马斯，1878 年）、马丁炉（埃米尔和马丁，1864 年）和氧

气转炉中炼制。铁矿石冶炼方法的发展史表明，高炉不是由某个人发明的，它是在若干世纪中由简陋的生吹炉到鼓风机，由鼓风机发展到现代的高炉，经过各时期各代冶金工作者共同智慧集体创造的结晶。高炉生产的历史是一个不断开发、发明和完善高炉结构及高炉冶炼工艺的历史，其中一些主要的发明如下述。

在发展高炉生产的年代，显著改进了炉子的送风技术。在 Геродот (公元前 484~425 年) 的著作中首次提到了由水轮机带动的楔形风箱。在 1589 年, Джамбатиста Делла Порта 发明了圆柱形的吹风机。1743 年, Г. махотин 在 Невоянск 工厂首先使用了两个风口送风, 而在 1767 年在 Барнаульский 工厂 И. Ползонов 建立了蒸汽鼓风机。水冷风口的建立与 Конди (1802 年, 苏格兰, Кальдер工厂) 的名字是分不开的。1828 年 Нельсон (苏格兰, Клайд工厂) 提议空气进入鼓风机之前先加热, 1857 年, 为此目的 Э. 考贝采用了蓄热式砖结构热风炉。

1832 年法国人 Фабер дю Фор 首次试验用高炉煤气作为冶金工厂的燃料。

1886 年, Люрман 建议用高炉煤气作为鼓风机的燃气发动机, 1889 年, 在比利时的 Серен 工厂启动了高炉煤气鼓风机。

在各个时期, 有很多关于改变送风成分的动议。1825 年, Нельсон (苏格兰) 提出了高炉使用干空气送风的建议, 这一倡议于 1890 年由 Фрайер 和 1904 年美国的 Дж. Гейли 实现。而 1830 年德国化学家 Интромейер 提出高炉加湿鼓风。1871 和 1876 年 Г. 贝塞麦取得了富氧鼓风以及高炉内高压操作专利特许证。1926 年, Гескамп 获得经风口与鼓风同时喷入高炉煤粉的专利。而经风口喷吹天然气、重油及石油的建议早在 1838 年就由 Барнет 提出了。

高炉结构发生了巨大的变化。现在有效高度达到 33~35m, 高炉有效容积达 5600m³, 高炉车间也发生了很大的变化。炉料的装填均采用 Парр (1850 年) 上料设备及马基式 (1907 年) 布料器。1959 年苏联发明家 Е. Ф. 维格曼 (Вегман) 及 А. А. 瓦金 (Вагин) 首先提出了一种装料设备, 用旋转斜板 (槽) 代替大钟。