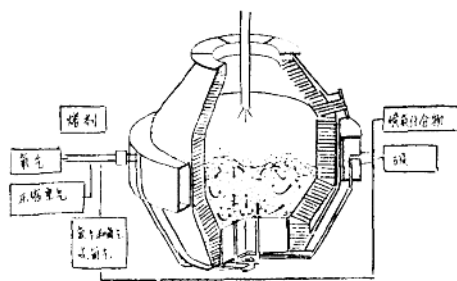


转炉喷煤技术译文集

TRANSLATIONS
OF CONVERTER COAL-INJECTION TECHNOLOGY



抚顺新抚钢厂
北京钢铁研究总院

推广应用转炉喷煤技术, 提高经济效益(代前言)

近几年来,转炉炼钢技术的迅速发展,顶底复合吹炼工艺的出现,使转炉炼钢法更加完善。随着世界各国工业飞跃发展,设备不断更新,更除设备的废钢量逐年增加,对转炉炼钢法提出了如何提高熔化废钢能力,转炉用固体炉料炼钢的课题。因此,西方许多先进产钢国家开始研究转炉的二次燃烧技术和向炉内喷吹煤粉技术,提高转炉熔化废钢等固体炉料的能力。其中比较典型的工艺方法有:

KMS法: 西德 klockner—CRA 技术集团 依据长期积累的底吹转炉生产经验,在 K—OBM法(顶—底复合吹炼,底吹石灰粉)的基础上发展起来的新型炼钢工艺。其技术特点是:在转炉底部喷吹煤粉,增加热源。该工艺喷煤55kg/吨钢,可使转炉的废钢加入量提高到50%。

KS法(klockner Steelmaking—克勒克纳炼钢法):该工艺是在KMS法的基础上发展起来的新型炼钢方法,目的是采用100%固体炉料炼钢。1982年建成两座125吨KS转炉,年产钢100万吨。采用100%废钢冶炼,煤耗是180~270公斤/吨钢。初步的生产实践证明:KS法炼钢比平炉,电炉炼钢节能40%,生产效率高,吨钢成本低,对原料适应性强(可采用铁水、生铁块、废钢和直接还原球团矿),可用劣质煤。

COIN法:西德克虏伯研究所提出的一种工艺方法。和KS法不同的是:由熔池底部喷入煤粉和氧气,并用煤粉保护底部吹氧管,而不是用油和天然气。COIN法的主要目的是进行熔融还原,目前已做过3^T规模的半工业实验。煤耗540公斤,氧耗400Nm³,可把2.5^T球团矿熔化,还原精炼成0.9^T钢水。

住友金属法:煤粉通过顶吹喷枪和高速氧流一起喷入熔池。主要用于转炉造气和熔化废钢。熔化一吨废钢,煤耗为193公斤。

上述除KMS法已在工业中采用、技术比较成熟外,其它方法还处于各种规模的实验阶段。

在国内研究采用转炉喷煤技术,具有特殊的意义。国内废钢资源并不丰富,但仍有不少钢厂有条件增用废钢(如攀钢)。上海、天津、唐山等地区钢厂和其它一些地方中小企业,由于缺少高炉,尽可能多用废钢具有重大经济意义。此外,这些地区现在普遍采用化铁炼钢,消耗大量冶金焦。如通过实验研究,在转炉内直接用煤粉熔炼生铁并炼成钢,可以减少以至完全取消化铁炉,会取得很大经济效益。

转炉煤—氧复合喷吹是七五期间冶金部重点科研项目,由新抚钢厂和北京钢铁研究总院组成的转炉煤—氧复合喷吹试验组已在新抚钢厂六吨转炉上进行了几十个炉次的喷煤试验,取得了良好效果。

为配合试验进行,进一步推广应用转炉喷煤技术,我们将德、日、美、法等国一部分有关转炉喷煤技术文献委托新抚钢厂情报室编译成册,介绍给国内同行以供参考。希望我们在各自不同的地区把转炉喷煤技术搞上去,赶上世界先进水平,为四化作贡献。

目 录

1. 直接还原—熔炼工艺的发展.....	(1)
2. 熔炼废钢新工艺的发展.....	(10)
3. 顶底复合吹炼热补偿技术的开发.....	(16)
4. 不锈钢精炼新工艺.....	(25)
5. 复吹试验转炉的熔炼废钢能力.....	(32)
6. KMS工艺.....	(38)
7. KS工艺.....	(45)
8. 用喷煤法提高氧气转炉的废钢比.....	(49)
9. 高废钢比的氧气转炉炼钢.....	(57)
10. 转炉中废钢熔化动力学, 理论模型和工厂实验.....	(66)
11. BOF转炉中脱碳和二次燃烧的热力学分析.....	(76)
12. 各种BOF废钢料装炉操作对炼钢原料成本的理论影响.....	(84)

直接还原—熔炼工艺的发展

于尔根·哈特维希等

提要 在熔池内煤粉与氧不完全燃烧熔炼海绵铁或废钢；确定在一个3吨熔炼炉中最大气体吹入量(受泡溢限制)和熔炼速度并比较了在顶底复合吹炼工艺上所获得的结果；煤粒度对熔化速度、炉尘产生、煤气成份和煤燃烧比的影响；熔池、渣和气体中硫的分配，融金属至终钢后部处理的工艺概念；有关熔炼工艺连续操作的某些设想；与工艺有关的气体直接还原的特殊适应性；竖炉生产海绵铁与熔炼工艺相结合的可能性(有无煤气中间冷却)。

* * * *

目前从矿石生产钢铁主要依靠高炉和氧气转炉流程。高炉生产生铁必须用大块冶金焦并受地理条件和能源结构的限制，其可用性已受到限制。为此，用直接还原生产钢铁(主要以天然气)在世界上钢产量的比例正在增加。

尽管平炉在装金属料上有较大的灵活性，但从经济方面考虑它却是非常落后的，所以绝大多数还是用电炉冶炼废钢和海绵铁。用一次矿物能量相比，电炉的总效率为25%。此外，电炉还必须依赖于高压电网。从能量角度看，采用直接燃烧而不通过电能转换产生热量的熔炼工艺显然是有利的。

考虑到目前及将来的能源形势可以清楚地看到，石油和天然气与煤相比是缺乏而且昂贵的，煤特别是占优势的非结焦煤是长期可用的燃料。

从以上各方面出发，克虏伯公司研究设计了一种熔炼方法，用这种方法可以直接使用任何类型的煤并且比电炉熔炼法有更高的效率。把这种工艺与直接还原结合起来，就产生了一种以任何类型煤为基础而不用冶金

焦、天然气或石油从矿石直接炼钢的方法。

一、工艺原理

该工艺原理如图1所示，将煤粉和氧吹入熔池中从而调整了碳与氧的关系，完全产生了由一氧化碳和氢组成的煤气。煤不完全燃烧所产生的热用来熔化废钢和海绵铁。

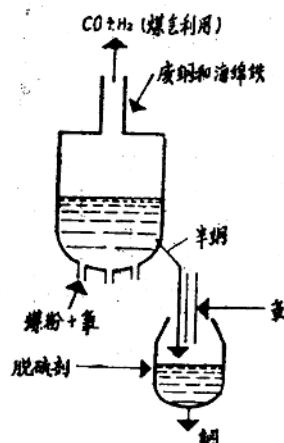


图1 煤氧熔炼工艺示意图

熔炼操作尽可能是连续的并且保持存在一个液态熔池。熔炼期开始时，只要工厂不需要液态金属时，就可在容器内用氧和煤粉自己产生熔池

由于气体发生量大而熔池产生的热量和强烈的熔体紊流为高速质和热的交换及能量利用提供了非常有利的条件。因此，本熔炼工艺吸收了已知各种精炼铁水的工艺技术优点，在任何情况下都可以使用废钢和海绵铁。

熔炼时，适当地产生约 C1% 的液态金属，在下一步工序进行脱硫和精炼。

熔炼产生的由 CO 和 H₂ (H₂ 量根据煤种不同范围在 ~25%) 组成的煤气应尽可能地得到利用 (取决于工艺的位置)。单位煤耗根据煤的挥发分和灰分以及炉料量来调整。

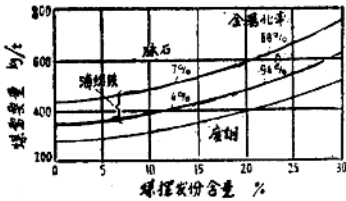


图2 熔炼废钢或海绵铁的煤需要量

图2是使用灰分为6%的煤、废钢及不同的海绵铁冷装料时每吨液态金属所需的煤量，原则上可以使用各种类型的煤。每吨液态金属所产生的气体量又与煤和金属料有关

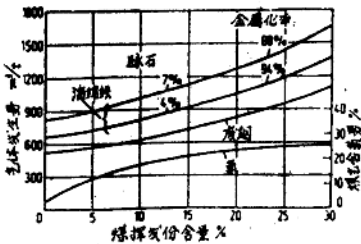


图3 熔炼期间产生气体量及其氧含量

(图3)。在使用海绵铁时，至少

680m³/t，从而可以满足相应矿石量气体直接还原的需要。由连续操作熔炼工艺及直接还原的造气供应产生了一个用任何种煤粉和氧从矿石炼钢的新工艺。

煤需要用运载气体气动输入熔池中，所以必须将煤破碎到1mm以下粒度并将残余水分干燥到3%以下。此外对于煤的挥发分和灰分原则上没有最高限制。

熔炼煤耗和气体量随挥发分含量而增加，也与灰分相应。因此通常首先要将高挥发分煤进行馏化并降低灰分的含量。总之，将煤破碎至1mm以下粒度有利于进行降低灰分及含硫量的处理。由于矿山的不断现代化开采的粒度小于1mm的煤增加，为获得这样的煤粉创造了有利条件。

在此，描述了作为新领域有关整个工艺的三个主要方面—熔炼，熔态金属处理和气体利用，在本章就迄今开发工作的重点讨论本熔炼工艺。在最近出版的文献已经报告了一些结果，本报告接着该文献按以下分段讨论。

1. 探明熔炼工艺的效率限度
2. 作为煤种的函数气体的含尘量及炉内容纳高度
3. 熔池、渣、炉尘及煤气中硫的分配
4. 融金属的进一步处理
5. 煤气利用，特别是用于直接还原时。

熔炼工艺试验一直是用一个改装的3吨坩埚炉进行的，该炉原来是作吹炼转炉用的。图4是整个装置的示意图。该工艺包括供氧和输气系统，煤粉风动输送系统，具有吹煤和氧用三个喷嘴的坩埚炉，有加废钢孔的镶耐火材料的罩以及海绵铁分配器。下面报告用该装置获得的试验结果。

二、熔炼工艺效率限度

为了避免过度的金属飞溅限制每个喷嘴

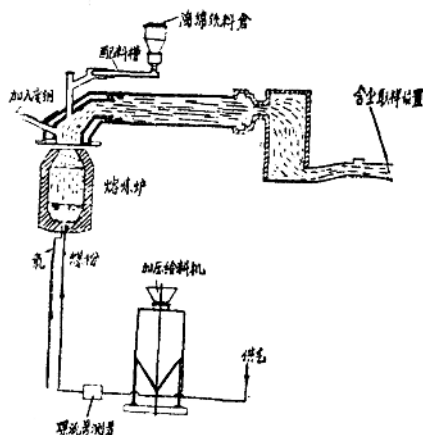


图4 3吨试验炉示意图

的进氧量。对于贫煤喷入试验炉的氧量为 $3 \sim 4 \text{ m}^3/\text{min}$ 。喷嘴数足够时，根据由金属、渣和气体形成弥散的泡沫沫确定最大容许气体发生量及供热量，因为弥散的体积不允许超过熔炼炉的空容积。

为了探明生产能力的限度，在用三个底部喷嘴操作时测定容器内弥散的高度（取决于气体流量）。为此，在吹炼期间用一个钢探测棒通过烟罩接近垂直插入熔池中一直接近炉底，根据熔池确定浸渍高度。（图5略）

由于吹入煤和氧而产生的气体（ $\text{CO} + \text{H}_2$ ）熔池容积开始的 V_M （静态熔池体积）上升到 V_F （弥散时的体积）并达到最大的坩锅炉可容纳的体积。在能够根据金属含量忽略渣量计算静态 V_M 后，根据所测得的弥散高度 H_F 和容器内部空间几何形状求出 V_F 。由熔池升起的气泡的体积流量用 V_G 表示。

用试验得出的这些量值，直接可以求出气泡在熔池中停留的时间 τ ：

$$\tau = \frac{V_F - V_M}{V_G} \quad (1)$$

为了能够通过3吨炉的测量求出更大操

作单元可达到的熔炼效率，用一个工艺模型求喷吹气体在液体中的停留时间。

喷吹气体在液体中的停留时间一般与流体的性质和喷吹量有关。喷吹量大时，熔体表面张力和粘滞性的影响减弱，喷吹气泡的上升速度主要由浮力（ K_g ）和惯性力（ K_d ）的对抗而确定：

$$K_g/K_d = Fr = \frac{v}{gH_F} \quad (2)$$

式（2）中：

Fr —费洛得数（Froude）

v —气泡上升速度

g —重力加速度

k —常数

经积分后得出一个简单的停留时间和充满高度之间的关系：

$$\tau = k\sqrt{H_F} \quad (3)$$

该式在转炉内气体停留时间的适用性已得到D. J. Kreyger证实。用该模型假定停留时间与熔池特性无关显然是一种近似法，另一方面，为了在测定精度范围内弄清渣成分对停留时间的影响，在试验中调整成的渣差异太小。因此，装入净化料显得有些不合理。

将式（1）和式（3）合并可得出容器内相对充填容积和气体发生量的关系：

$$\frac{V_F}{V_M} = 1 + k\sqrt{\frac{H_F}{V_M}} \cdot V_G \quad (4)$$

通过对与这个公式相应独特的数据绘图（图6）可以确定常数，在估计更大熔炼设备的熔炼能力时需要此数值。该值处于散射状态，可用两条直线限定。对于式（4）中常数的求得，以上部直线即在试验观察到的最强烈浮泡为基础。

顶底复吹转炉在因起泡而限制方面与本精炼法很相似，两者进行比较是有意义的。

H. Voegel和E. Eickworth在一份报告中

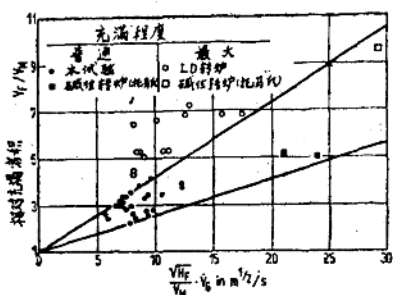


图6 熔炼炉相对充填容积与吹入气体量的关系

详尽地阐述了一座45吨托马氏转炉的炉衬磨损，以至能够重新建立在一定的转炉状态下吹炼期间的实际充满高度和充填容积。图6中的结果在特定测量点的散布范围内，人们用可供使用的转炉容积和新炉衬时的高度对此进行估计。所以可在图6中求得上部直线附近的值，用这个值LD转炉的数据是可以进行比较的，P.J.Kreyer已引用数据进行了比较，同样也是以已知的容器容积和高度为依据的。这些点完全位于特有的影射场的上部 and 托马氏转炉的值上。这就意味着（实践已证实）喷吹冶炼工艺在相同的容器单位容积时，比顶吹工艺能够达到更高的气体产生能力。

根据最大允许气体发生量限定热量供应。根据所用的煤种和金属料比（废钢或海绵铁，确定得到最大可及的熔炼效率。但当金属化料的熔化速度足够高时这才能够实现。因此必须检验是否并且在哪种吹炼过程状态下能够确定工艺熔炼的速度。

在3吨坩埚炉上进行了不同量海绵铁和块废钢的冶炼试验。熔炼炉料通过烟罩冷态加入坩埚炉中。

用测量熔池的温度变化可确定熔炼速度。图7是供助一部分试验的求值法。以在稳定吹炼条件和固定炉中金属容量状态下不加冷却剂时所观察到的熔池温度上升为基准状态。根据初期温度测量和接着的添加金属

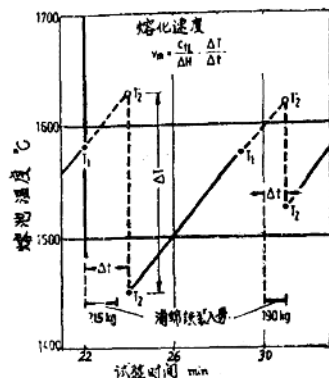


图7 不同熔池温度海绵铁熔化速度的确定

料，再重新测熔池温度， T_2 根相对于 T_1 的时间间隔为 Δt 。以下求值将需要温度差 $T_2 - T_1 = \Delta T$ （图8）。在 Δt 时间内，添加的料还不能完全熔化，在这个先决定条件下，单位熔化速度称为条件方程：

$$v_m = \frac{C_s}{\Delta H} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

此式包括试验中确定的表达式 $\Delta T / \Delta t$ 以及比热 C_s 和液态金属的热焓 ΔH 。

图8描绘了与平均熔池温度相对的熔化速度。它给出了海绵铁和废钢的均值线，它随着熔池温度轻微上升。在 1500°C 时达到 $v_m = 32 \text{ kg} / (\text{t} \cdot \text{min})$ ；在 1600°C 时为 $37 \text{ kg} / (\text{t} \cdot \text{min})$ 。在可达到的准确度内还没弄清不同类型废钢料之间的差别。

当出现废钢块过大时，脱氧工艺所能达到的冷液废钢平均熔化速度同样也处于 $30 \text{ kg} / (\text{t} \cdot \text{min})$ 左右的范围。值得注意的是在范

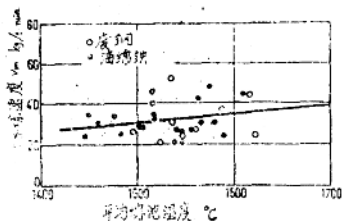


图8 作为熔池温度函数的废钢和海绵铁熔化速度

围明显宽时冷料的块度影响不大。

熔炼工艺可达到的效率一方面受气体发生量的限制,另一方面受最大熔化速度的限制。由浮泡所限制的熔化能力 L_G 由式(4)和式(6)

$$V_G = V_P \cdot L_G \cdot \frac{T \cdot P^\circ}{T^\circ \cdot P} \quad (6)$$

合并为

$$L_G = \frac{d \cdot V_P - M}{d \cdot p_k \cdot \frac{T \cdot P^\circ}{T^\circ \cdot P} \cdot V_G \cdot \sqrt{H_P}} \quad (7)$$

来求得,式中

d —液态金属的比重

M —容器内金属量

T°, P° —分别为标准状态下温度和压力

T, P —熔池内温度和铁平均静压力

V_P —根据图3每吨铁水生成的单位气体量,

由熔期速度所限定的熔炼能力 L_M 为:

$$L_M = v_m \cdot M \quad (8)$$

最大熔化率为 L_{max}

$$L_{max} = \frac{d \cdot v_m V_P}{1 + d \cdot v_m \cdot K_1 \cdot K \cdot \frac{T \cdot P^\circ}{T^\circ \cdot P} \cdot V_G \cdot \sqrt{H_P}} \quad (9)$$

图9定量地描述了根据取得的结果之间的关系,并凭具体范例提高了直观性,这个范例为:炉容量为 $90m^3$; 高度 $5.7m$ (相当于 $100t$ 的炉子)使用贫煤(挥发份 10%),金属料为不预热废钢,熔池温度 $1500^\circ C$ 。该图表达了与熔炉内金属是相对应的可及的熔化率。随着炉内金属量的增加,熔化率首先受熔化速度的限制(式8),然后就受到气体发生量的限制(式7)。该范例的直线的交叉点是最大熔化率(式9)。

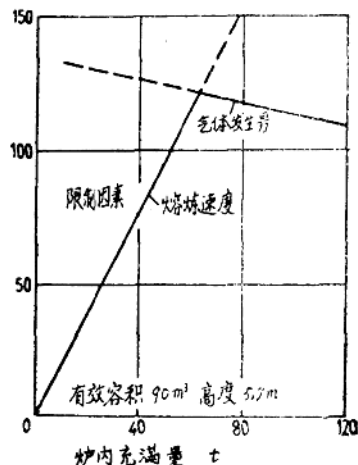


图9 与熔化速度和气体相对应的熔化率

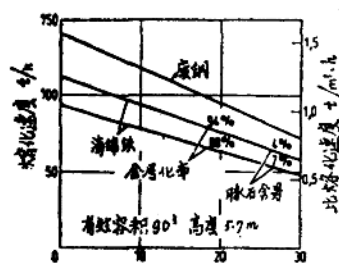


图10 最大熔化率与煤挥发分的关系

图10表达了在同一边界条件下最大熔化率与煤种和金属添加剂之间的关系。熔化率随着煤挥发份的下降和产生液态金属单位热耗的下降而上升。对于 $1m^3$ 炉容的熔化率(右侧纵坐标)最大为 $15t/(m^3 \cdot h)$,最近新建的高功率电弧炉大约可达到这个值(与炉容和熔炼周期有关)。如果在高压操作时(如考虑到煤气利用),对于普通压力下工作采用的值就会升高。这种增高与压力成比例变化,在总压为 3 巴时,熔化率大概为 $4t/(m^3 \cdot h)$ 。与废钢相比海绵铁的熔化率小与工艺无关,而是由于熔化脉石需热量高及海绵铁中其铁氧化物的还原的结果。

果。

本熔炼工艺具有熔炉空间利用大的特点，所以可以预料在生产成本上是有好处的。按范例所提到的尺寸，两个炉子轮换操作时，按图10那样使用挥发份10%的贫煤，年操作8000小时，大约可用废钢生产93万吨/年铁水。对于海绵铁（脉石4%，金属化率90%）同样的操作时间可获得67万吨铁水/年。

三、煤气含尘

冶炼过程中发生的煤气中含有非常小的尘粒，不经过二次燃烧的这样炉尘一般成分为：1~3% C，2~3% ($\text{SiO}_2 + \text{CaO}$) 0~3% FeS ，其余为 Fe 金属，炉尘的主要成份是铁，铁在燃烧焦点以蒸气形式进入气泡中，然后气泡经过熔池上升冷却最后冷凝成细铁滴。由于铁蒸汽化量取决于烧焦点的温度，从而煤挥发份含量对煤气含尘量的影响就可以估计到。由于随着气泡停留时间的增加一部分灰尘被熔池重新吸收，所以炉尘含量与熔池中（也可按充满高度）气泡停留时间的关系应成立。

图11表达了在使用烟煤焦粉、褐煤焦（挥发份4%）瘦煤（10%），木炭（15%）时，与通常炉子充满高度有关的每立方米（标准状态下体积） $\text{CO} + \text{H}_2$ 的含尘量。

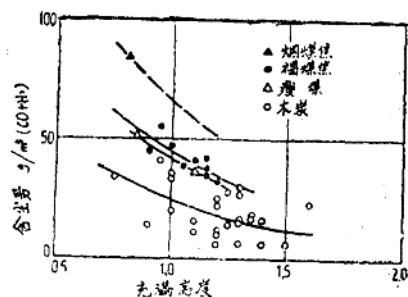


图11 充满高度对不同煤种时气体含尘量的影响。

对于在用烟煤焦和瘦煤已经进行的试验中所确定的含尘量可以经常充满高度的平均值为基础。灰尘含量、充满高度和煤种之间的关系可以明显地认识到。由于含尘量与恒定充满高度有关，所以得到了图12中表达的含尘量与煤种之间的关系。炉尘的生成随着煤挥发份的上升而明显地降低。根据这个结论，每吨液态金属所产生的炉尘量为1~3%。

四、硫的分配

在将煤喷入熔池的过程中不可避免地要带入一定量的硫，硫在熔池、渣，煤气和灰尘中的分配对工艺控制意义是重要的。由于应用酸性灰份的而不用碱性灰份的煤只有形成一种吸收硫能力很小的渣。因此，可以估计到带入的硫绝大部分进入到金属中。由

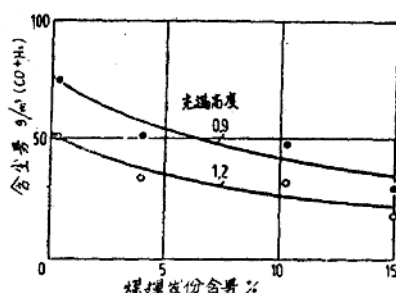


图12 煤挥发含量对煤气含尘量的影响

于硫的分配不仅对液态金属的下一带处理而且对煤气利用都起很大作用。所以用高硫煤和低硫煤（瘦煤和褐煤硫焦）进行熔炼海绵铁的试验来研究硫的平衡。表1列出了熔池含硫量、渣碱度及所测得的熔池、渣炉尘和煤气中硫的分配。此试验的金属碳含量为1~3%。

正如所料，使用酸性灰份的煤造成的渣只含有少量的硫，在使用含有碱性灰份的煤，渣中造成的高钙渣的吸硫能力就提高。有一部分不可忽略的进入的硫，正如热力学

表 1 硫 的 平 衡

煤 种	熔池含硫量 %	渣 碱 度 $\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$	硫 的 分 配			
			金 属	渣	尘	焊 气
瘦煤 (1.0% S)	0.10~0.20	0.6	89	2	8.2	0.8
褐煤焦 (0.3% S)	0.03~0.11	1.0	88.5	7	4.5	<0.5

估计那样, 气相中以 H_2S 和 COS 形态出现的硫以及在炉分外部随温度下降对与煤中的细铁尘反应生成 FeS 。以此方式, 经除尘的煤气几乎没有S存在。

将灰尘返回到熔炼炉中时, 其全部硫终究要进入液态金属中(试验已经证实), 然后用适当的脱硫剂如 CaC_2 — CaO 混合粉剂能够脱除液态金属中的硫。

五、液态金属的下一步处理

在熔炉生产出的液态金属必须经过冶金上二次处理以调整所需要的钢种。根据所使用的原料, 特别是煤, 金属都含有一定量的

硫。适宜的含碳量为1~2%, 脱磷处理只对于使用高磷矿或高磷焦时才是必要的。因此半钢冶金处理最重要特殊的工序是脱硫和精炼。

浇铸之前的其它工序如脱氧、合金化, 镇静和浇铸温度的调整在现在的钢厂生产中都已经采用。

在完成按目的进行连续熔炼以后, 应按装料顺序进行二次处理。在连续吹炼过程中可以不连续地排出金属—渣液。例如, 金属流到钢包中, 同时进一步处理并可远走、将渣(在冶炼海绵铁时一般为酸性渣)分离开后, 金属进行脱硫处理以一种运载气体将商品化的 CaO — CaC_2 脱硫剂吹入熔体中的处理

表 2 液 态 金 属 的 脱 硫

熔 池 内 质 量 含 量%			处理时间 min	脱硫剂 CaC_2 — CaO 耗量 kg/t金属
$C_{\text{终点}}$	$S_{\text{处理前}}$	$S_{\text{处理后}}$		
1.48	0.270	0.037	5.5	8.5
3.03	0.395	0.023	3.5	14.0
3.40	0.230	<0.01	4.5	15.0

法已证明是非常有效而经济的。

表 2 表达了典型的试验结果。就在这个 3 吨试验炉本身上进行了脱硫试验, 在此炉上经排除渣之后用运载气体将 CaC_2 — CaO 粉剂通过喷煤嘴喷入, 由表 2 看出: 经处理 4~5 分钟之后硫含量的水平从 0.3~0.4% 下降到<0.02, 此时脱硫剂的单耗约 15kg/t。

金属经过脱硫处理结束后, 钢包处于精炼工序。经临时调整, 可在另一个钢包再次

进行脱硫处理。也就是说, 要用两个钢包轮替操作。

精炼式目标终点碳含量的调整与铁水的精炼方式相近似。不过进入的气体量和产生的气体量特别少并且吹炼的时间也短。

由于粗金属液含有磷, 所以必须在此工艺流程位置添加石灰来以熟悉的方式除掉磷。

在一个钢铁联合企业是以铁水冶炼为基

础的,但也会出现在炉内使用废钢和海绵铁产生的可能性,因此转炉也需要脱硫铁水。由于使用液态铁水使吹炼时间缩短,所以必然明显地提高转炉钢厂的生产率。

六、煤气利用

熔炼过程中产生的 $\text{CO}-\text{H}_2$ 混合气体离开熔炉的温度约 1500°C , 并带有 $10\sim 15\text{g}/\text{Nm}^3$ 的炉尘, 还含有一定含量的熔炼过程带入的硫。然而这些硫绝大部分与铁尘反应生成 FeS , 大多数脱尘煤气几乎是不含硫的。

煤气的利用主要取决于工艺结构的状态。使用的煤种和熔炼用金属料, 原则上可分为热能利用和化学性质的利用。

在利用热能方面, 过热煤气的显热一般用来发生蒸汽。冷煤气经脱尘后根据不同场合所用, 一般为:

一在钢铁联合企业作为二次热源的加热各种炉子, 必要时, 与高炉煤气, 焦炉煤气或天然气混合。

一发电、远距离供热、热水, 主要给钢铁厂外的用户。

由于在某些情况下煤气必然与其它能载体结合起来利用, 尽管完全连续的造气是有利的, 但也没有必要强制去做。

当利用煤气的化学能时, 通常根据目的需要, 在进入工艺前首先在发生蒸汽冷却, 然后除尘、压缩可以考虑以下用处:

- 一在化工上作为合成气体利用;
- 一吹入高炉以代替焦炭;
- 一用于气基直接还原生产海绵铁。

热工方面的优点是可以估计到的, 熔炼炉产生煤气的显热直接带入另一工艺过程, 这可以想象用在吹入高炉中和直接还原上。在直接利用热煤气时, 必须在 $2\sim 3$ 巴的压力条件下进行熔炼操作, 废钢或海绵铁在熔炉上的压力炉口装入。在利用煤气的化学

能时, 操作必须以连续方式进行, 考虑到炉衬寿命的限制, 应采用两个炉体交替操作。

下面阐述一下将熔炼工艺与气体直接还原结合起来的两个方案。

假设使用 15% 挥发份的煤, 熔炼用的海绵铁含脉石 4% , 金属化率 90% 。两个方案都是需要煤 440kg (可燃基有机质)/t 海绵铁, $350\text{m}^3\text{O}_2/\text{t}$, 发生煤气 950m^3 , 成份为 $79\%\text{CO}$ 和 $21\%\text{H}_2$ 。

在方案 I 中, (图13) 煤气首先进行冷却和除尘, 然后改制成 $\text{CH}_2:\text{CO}=1$ 的还原气体。该煤气预热到 900°C 然后供直接还原用。炉顶煤气循环返回后与改制气体一起经 CO_2 脱除器。对于还原和加热所不用的过剩煤气足够还补充还原工艺对电能和蒸汽的需要。每吨液态金属的总工艺消耗为 490kg 煤和 $390\text{m}^3\text{O}_2$ 。在方案2中(图14), 假定采用超压熔炼, 热煤气在热旋风除器里粗除尘, 然后与 300°C 预热的循环煤气混合后 ($850\sim 900^\circ\text{C}$) 直接进入还原炉。由于煤气中

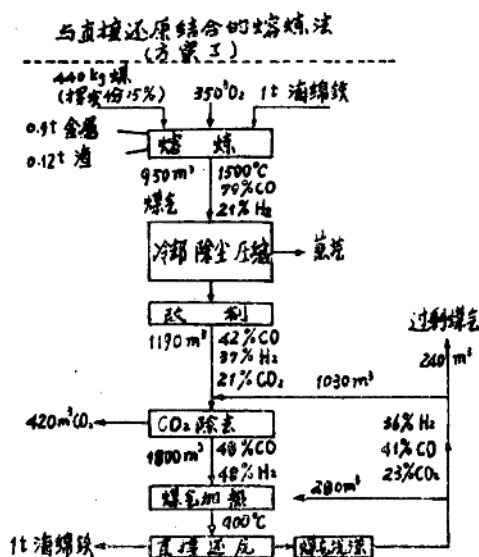


图13 具有中间冷却和还原气体改制的工艺方案

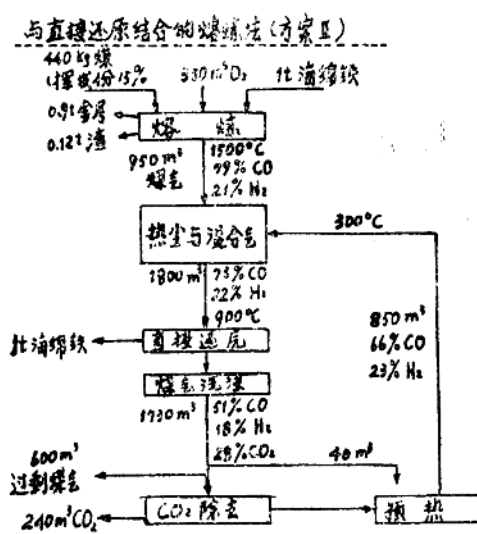


图14 直接使用热煤气的工艺方案

CO 成份高,所以比目前常见的气基还原工艺的还原速度高低,并且煤气中含有一定量的细尘,需要对直接还原工艺作一些改动,这都有待于进一步研究。方案Ⅱ比目前技术上稳

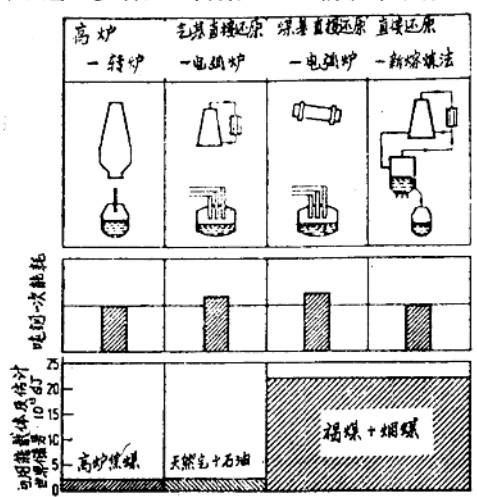


图15 各种炼钢流程的能量消耗和燃料消耗

妥的方案Ⅰ投资费用小,并且有更好的能量利用。从图14看出,由于煤气过剩量,不仅是直接还原操作所需要的能量,而且弥补了熔炼所必需制氧的消耗。这个工艺方案所必需的外部能量只有490kg煤/t液态金属。

图15对新炼钢方案与各种炼钢流程(包括高炉/转炉,气基直接还原/电弧炉固体燃料直接还原/电弧炉)的一次能量消耗和将来燃料的可用性进行了比较。就使用以矿物一次能源来说,将本文描述的熔炼工艺与直接还原结合起来所需能量数字与高炉-转炉的水平相近。然而对这种工艺方案最主要的优点是具有更广泛的燃料基础,从而可以预料:这种新工艺从长远看具有更大意义。

结 论

描述了一种新的熔炼工艺,该工艺可以用任何类型煤(特别是低至中挥发份含量)作能量载体。该工艺适用以废钢和海绵铁为炉料,根据在3t炉上的试验,其熔化率大于1t/(m³·h),可与最大功率的电弧炉相比,但是该工艺不用电弧炉那样的高压供电系统。当在一个钢铁联合企业时使用废钢操作时,其煤气可用在本身系统或用在高炉上。将直接还原与海绵铁熔炼工艺相结合而产生了一种新的炼钢方法。从这种工艺的良好能量利用率,高生产能力和更大的灵活性来看,将来是有发展前途的。

参考文献: (略)

孙宝坤译自《Stahl and Eisen》100

(1980) No.10 S535—543

熔炼废钢新工艺的发展

Jurgen Hartwig 等人

在氧气炼钢中提高废钢比

随着平炉工艺的显著衰落,钢铁联合企业在适应废钢价格波动、根据市场行情在生产中调整铁水和废钢比方面的灵活性已丧失。

由于这种原因,在数年中为了对氧气炼钢废钢比取得更大的灵活性做了大量研究工作。底吹转炉厂家又促进了这种研究,与顶吹BOF工艺相比底吹转炉产生热量少、废钢装炉量小,这是由于进入渣中的铁量较大和废气燃烧率低。

现在试验的提高废钢比重要的方法是用附加燃烧器在炉中预热废钢。在BOF炉炼钢时一般把废钢一批或分成二批装炉,在炉内用带有天然气或氧—燃料燃烧器的附加氧枪预热废钢。在实际操作过程中,当二次燃料热利用率达40~50%时,提高的废钢比不超过40~80公斤/吨钢。如果加强对废钢的预热,二次燃料利用显著下降,冶炼时间进一步增加。因此可明显看出当铁水装炉量降低而精炼用时间减少时,预热需要的时间为所减少时间的两倍。

在实际操作中,废钢预热用10~15分钟。因而对在进行精炼的炉内预热废钢能力所强加的限制必须在成本分析中予以考虑。

提高废钢比的另一方法是在精炼期间炉内附加的CO气体二次燃烧。这带来了使炉体锥部炉衬损耗增大的缺点。卢森堡阿尔贝德公司在它的埃施—贝尔瓦尔厂BOF车间对冶炼高磷铁水进行了一项工艺试验,使用150吨转炉,炉中二次燃烧借助于双流氧枪进行。同时,通过炉底多孔砖吹氩保证了良好

的能量传递并控制了渣氧化。这种工艺使废钢比增加80公斤/吨钢。炉体锥部炉衬损耗也能通过水冷阻止。

通过二次燃料和CO二次燃烧的混合应用,开发了KMS工艺以提高底吹操作的废钢比。因为燃料喷嘴安放于炉底,整个柱状废钢堆从底向上加热,与BOF的逆向火焰予热相比能量利用率较高。据报导予热10分钟可使废钢比提高150公斤/吨钢。只用CO二次燃烧即不使用二次燃料,废钢比大致增加50公斤/吨钢。

为提高氧气炼钢的废钢比而做的努力证明,用附加的顶部燃烧器在BOF炉中予热废钢,由于适当的效率、炉衬损耗低、冶炼时间较长等因素仅在特殊情况下才可能有较大的经济效益。BOF炉中的CO二次燃烧是一种提高废钢比的有效方法——但限制在很窄的范围内与增强溶池运动的底吹一起使用,必须顾及增大炉体锥部炉衬损耗的危险。

在底吹操作中废钢能被有效地预热即加热快、有效程度高。为此目前许多钢厂采用底吹工艺。设有附加炉底喷嘴的BOF炉能有效地予热废钢并能利用复合吹所提供的冶金优点。

不过,认为使用这种工艺可获得平炉工艺的灵活性是错误的,因为用炉底燃烧器予热废钢有其局限性,废钢比只能被提高100~150公斤/吨钢。

喷射物产生的热量

由于上述原因,在精炼期间喷射二次燃

料来代替或增强废钢预热也是有可能的,值得考虑。除了CaSi和CaC₂(这是用昂贵的电能生产的)以外只有以固体煤形式的碳在技术和经济上是可行的。因为在炼钢条件下只有一部分C燃烧生成CO,所以使用液体和气体碳氢化合物释放的热量太小甚至产生冷却效果。

在精炼过程中加煤的想法并非现在产生的,在气体炼钢工艺中曾不时采用过。不过在技术上产生一系列问题。因为氧气精炼是一种非常快的化学反应,煤也必须同样快的喷入,溶解在溶池中并部分被氧化。这些要求通过向熔池中喷煤粉不能被满足。用从上面深深插入到铁水中的管子喷射煤可获得较佳反应条件,但管子损耗较大和包括控制下降运动等困难却显示一系列缺点。

为确保反应时间充分,从炉底向铁水中喷煤更为可取。这就需要与炉底炉衬寿命大致相等的特殊喷嘴。

克虏伯研究所对这一题目进行了详细的研究。如果炉底喷嘴借助于惰性载气把煤粉喷入到铁水中,强烈的冷却效应将很快使喷嘴被凝固金属阻塞。经对局部燃烧正确的化学计算进行局部混合喷吹煤和氧气曾解决了这个问题。一旦煤的冷却效果与喷吹氧气释放的热量适当地平衡,从而获得使喷嘴既不被凝固金属阻塞也不由于过热或氧化而过度损耗的热力学和化学条件,则此问题得到解决。这种煤氧喷嘴原理在克虏伯进行了研究与试验。煤粉流围绕氧气流并与其同心,这样就给氧气喷嘴提供了充分的热保护而同时氧气流保证了煤喷嘴不发生凝固。

实际使用中最重要的是这种设备依据煤的类型和C/O比而具有的高度灵活性。在多次试验中,即使喷吹料从焦粉向含40%易挥发物的煤变化,煤与氧的质量比变化从0.5到2,喷嘴操作完全正常。使用这种喷嘴就能够调节煤/氧气比进行渗碳或精炼铁水或仅仅在溶池含碳量不变的条件下产生熔化能

量。向铁水中喷射煤粉和氧气的装置称作COIN(coal/oxygen injection 煤/氧气喷射)。

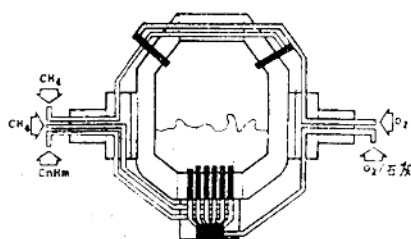


图1 KMS炉管线示意图

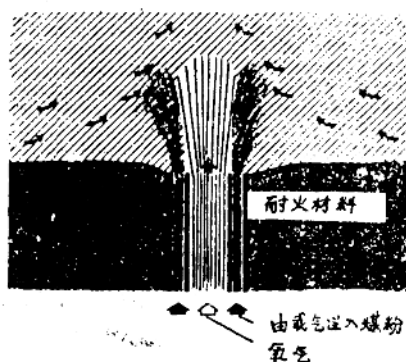


图2 通过转炉底部向金属池中喷射煤粉和氧气的COIN喷嘴设计

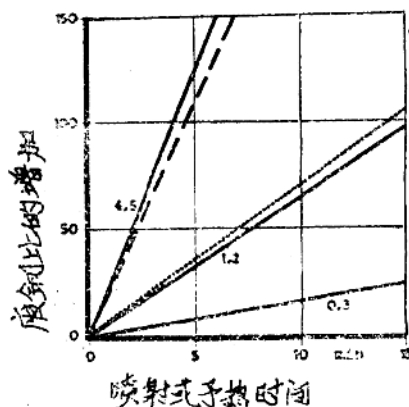


图3 用炉顶燃烧器(-----)和炉底燃烧器(——)予热废钢及以4.5、1.2、0.3米³/吨·分钟吹氧量的煤氧喷射(·····)的热收入率

图3比较了由于用顶部和底部燃烧器予热废钢及通过炉底喷嘴进行COIN期间进入铁水中热收入率的提高而增加的废钢比。煤与氧气的部分燃烧在熔池中产生的热量计算是根据低挥发性煤（易挥发物少于10%）和炉体锥部CO二次燃烧产生的CO₂在废气含量中为10%。

在BOF炉中使用二次顶枪予热废钢可使废钢比提高4~7公斤/吨/分，当在BOF炉底安装了氧—燃料予热燃烧器（KMS）时，可期望提高22公斤/吨/分。

当使用COIN炉底喷嘴时可以假定与用KMS所获的相同的热收入用于废钢予热。图3指出了向铁水中喷煤和氧的不同氧量。若以通过炉底喷射来增强搅拌为基本目的，那么经炉底喷嘴喷吹的氧量大致为0.3米³/吨/分就足够了。这样所使废钢比增加1.5公斤/吨/分是相当低的。如果BOF炉安装附加的COIN喷嘴，底吹氧量可大致增加到1.2米³/吨/分，而不必使大致为3米³/吨/分的顶吹氧量降低。唯一的要求是有足够的排气能力。顶枪与熔池的距离必须加大以保证早期渣形成。这也导致了废气中相当高的CO₂含量，对于提高热利用率来说是合乎要求的。在这种情况下，将特殊提高了废钢比6.5公斤/吨/分。

经验表明COIN喷嘴的最大吹氧量大约为4.5米³/吨/分，可使废钢比为25公斤/吨/分。这样获得的热收入明显高于使用炉底燃烧器予热废钢所得热收入。不过使用这种操作方法不能同时进行精炼。煤从送料漏斗由压缩气体按比例送入，一个料斗给几个管道送料，每个管道有一个流量阀和一个粒子流量探测器。全部流量通过综合流量探测器指示和对料斗的连续称量进行双重检测。煤粉必须予先干燥到水含量为2~3%，粉碎粒度为1mm范围内。应非常小心保证装置中避免出现超粒度颗粒。

氧气炼钢中的喷吹

用COIN装置喷吹煤和氧气给氧气炼钢带来了不少优点。在BOF顶吹操作中充许复合喷吹，价格昂贵的搅拌气体例如氩气或CO₂被非常便宜的直接由煤和氧气生成的CO所代替。与使用氧气作搅拌气体（用碳氢化合物保护喷嘴）相比较，COIN更具优越性，因为即使熔池含碳量很低，气体量和产生的熔池运动不依赖于铁水的状态或化学成分。这使以后的冶金处理能够精确，例如硫和磷的含量。

COIN能带来附加热量，既可用于提高废钢比又可用于调节铁水温度。另外，它还能通过炉底喷嘴喷射粉状炉料例如熔剂或脱硫剂。采用CION工艺，喷嘴可当作予热燃烧器使用。

通过予热，废钢比可提高大致为80公斤/吨钢（顶部燃烧器）或150公斤/吨钢（底部燃烧器）。在精炼期间，喷吹煤/氧气超过一般时间例如12分钟可使废钢比提高80公斤/吨。可以不必延长冶炼时间这一事实代表了一种优点。按此使用COIN装置提高的总废钢比可达230公斤/吨。

通过与精炼不同时的进一步喷煤/氧气可进一步提高废钢比。所能获得的最大提高是25公斤/吨/分，冶炼时间相应地延长。煤在铁水中只有部分燃烧成CO，其中仅有一小部分在熔池上部进行二次燃烧，通过在BOF车间增加废气利用的操作，煤中所含能量的利用率得到相当大的改善。把废钢予热、喷煤粉和废气利用结合起来，在不远的将来，对于废钢/铁水比的令人满意的灵活性十分有可能获得。与此同时，某种设备和工艺技术将出现，将获得更高的生产率、对环境影响小、能源利用率高及对交替变化的能源市场适应性强，直接使用一次能源和二次能源。

废钢冶炼

进行与精炼不同时的喷吹煤和氧气可提

高废钢比，最终获得直接冶炼废钢工艺，这种工艺将与电炉竞争。这种工艺不需要电能冶炼，尤其去除了电炉所要求的高功率供电系统。它与平炉比较将进一步显示出能量平衡的优越性。

一种以 COIN 为根本的冶炼工艺取决于对 CO 废气有效利用的经济效益。在废钢冶炼过程中能量收入的最大一部分用于熔化废钢（图 5）。

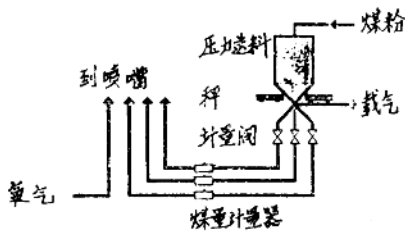


图 4 COIN煤粉送料系统

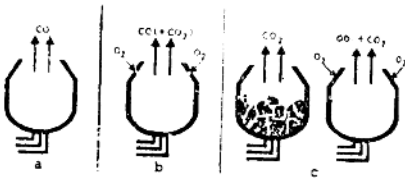


图 5 用COIN冶炼废钢能量利用率逐步增加示意图

热量供应：a. 部分燃烧

b. 部分燃烧和CO二次燃烧

c. 部分燃烧、CO二次燃烧和废钢予热

在a方式中，只有部分煤燃烧生成CO释放的热量被利用，与此同时产生游离的CO₂或可燃性气体。在b方式中，借助于熔池上面的氧气喷嘴部分废气发生氧化以致节省大约15%的煤。在c方式中，在COIN之前利用炉底喷嘴作为燃烧器予热废钢。因而燃料消耗进一步降低，这是可燃气体的收益。

因为煤/氧气冶炼工艺的生产经验还未获得，不能详尽地在各方面与电炉进行比较。因此只能从冶炼速度、一次能源消耗和

主要的经济因素等方面来考虑。

应用 COIN 所能达到的冶炼速度及有关参数是最近一篇论文的题目。若采用b或c方式使用挥发性物质小于10%的煤，则可获得出钢温度为1650℃时大致1.2吨/米³/小时的冶炼速度。那么假若使用100吨BOF转炉，产量将大约为100吨/小时。这些数据在不考虑废钢是否进行予热时适用，因为予热废钢和冶炼时能量被输入的速度大致相等，只要在冶炼之前装入占炉容25%的取自以前炉次的金属液。

图6表示了用COIN工艺冶炼废钢的可能过程。

采用 COIN 工艺使用低挥发性煤生产一吨钢的一次能源消耗与电炉的吨钢一次能源消耗进行了比较（图7）。对于电炉考虑了熔化电量、二次燃料、氧气、冷却水和电极消耗，对于 COIN 工艺考虑了煤、氧气和废气。

COIN 工艺的可用废气占其发热量的80%，废气的显热不能应用。因为可用气体取决于冶炼车间所占位置和具备的条件，其它参数也可能如此，所以引用的数据若有不同也并不奇怪。与电炉比较并没有获得显著的节约一次能源的效果。

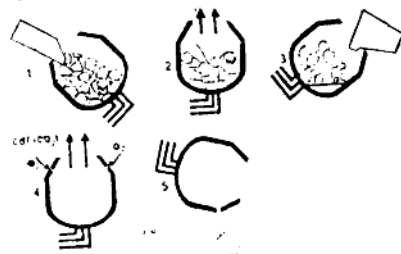


图 6 COIN 冶炼废钢的工艺步骤。

1. 装废钢 2. 预热废钢

3. 装液体金属 4. 熔炼 5. 出钢

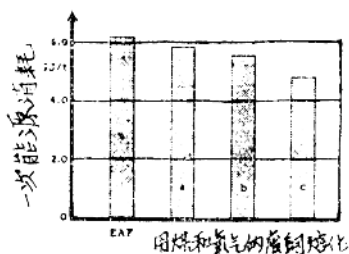


图7 电炉和 COIN 工艺一次能源消耗

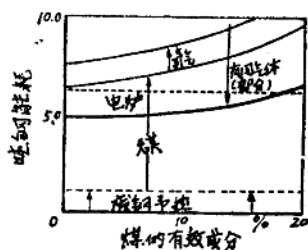


图8 煤中易挥发物含量对 COIN 冶炼废钢工艺能量消耗的影响。

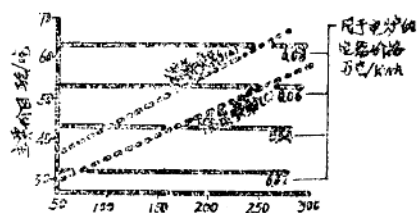


图9 COIN 冶炼废钢与电炉冶炼废钢的成本因素比较。

图8指示了煤挥发性物质含量在方式c中(图6)对能量消耗的影响。为了进一步阐明相互关系,由煤、氧气和可用气体所提供的能量消耗表示在图9中,煤中易挥发性物质含量的增加导致能量消耗增高,与电炉的交汇点位于易挥发性物质含量约为20%处。这样看来使用低挥发性煤或焦粉冶炼废钢更为有利。另外,图8表明了适当的可用

气体对于该工艺节省能源消耗的重要性。如果能够利用废气加热或发电,则使用低挥发性煤的煤/氧气冶炼废钢工艺与电炉冶炼工艺相比,就提供了节省一次能源的可能性。

图9概要比较了主要的成本因素,这些因素在能量消耗计算中也被考虑。熔化电能和小于1mm的干燥粉的价格被认为是可变的。下列价格认为是固定不变的:石墨电极,4.50马克/公斤; O_2 , 0.11 马克/米³;天然气,7.90马克/GJ;冷水,0.05 马克/米³; N_2 , 0.18 马克/米³;就一定价格的煤来说,可用气体占发热值80%。

在成本比较中,予热废钢和部分CO二次燃烧的方式c比熔池中煤的直接部分燃烧方式a更为有利。按照消耗情况,如果在予定的工艺操作期间价格的波动比现今的价格关系更重要则可以期望新冶炼工艺成本更低(在熔化电能价格为0.04 马克/千瓦时、煤价低于150马克/吨和电价0.06 马克/千瓦时、煤价低于230马克/吨的情况下)。

煤/氧气冶炼的发展前景被认为在不久的将来是美好的,至少在补充电力供应不足方面是如此。这种工艺也可能对其它的特殊要求具有意义,例如必须满足位置和公司需要的特殊要求。例如,克勒克纳公司目前正在其格奥尔格马利恩哈特厂建造一个车间,设有一座倾注式125吨转炉,年生产能力为一百万吨,设计用这样一种工艺原理操作。计划1981年底建成。克勒克纳公司不准使用由克虏伯研制的COIN喷嘴,而用带有中心送料管的Q—BOP喷嘴(用碳氢化合物气体作冷却剂)。

还原/熔炼混合工艺

喷吹煤粉和氧气代表了一种多用途的工艺技术,可用于精炼、熔炼废钢和直接还原炼钢(图10)。这种多用途性意味着这种装置可逐步投入实际应用。预期在不远的将来在精炼和预热废钢方面得以应用。