

高炉铁水 As 含量升高的原因分析及对策

Factors Analysis and Mitigation Strategies for the Increase of As Content in Hot Metal

供稿|崔政, 王瑞, 杨铭, 毛威昂, 王刘艳 / CUI Zheng, WANG Rui, YANG Ming, MAO Weiang, WANG Liuyan

内容导读

某钢厂近期生产的钢材在加工后频繁出现裂纹缺陷,经检测发现罪魁祸首竟是铁水中的“隐形杀手”——砷元素。砷是一种有害残留元素,过量会导致钢材变脆、热加工性能下降,甚至引发产品报废。研究发现,该钢厂铁水中的砷含量在半年内飙升近一倍,源头竟与进口的高砷俄罗斯铁矿密切相关!通过追踪冶金全流程,揭示了砷污染的传递路径:俄罗斯铁矿粉和块矿含砷量高,且在烧结和冶炼过程中难以有效脱除。同时,高炉工艺参数(如温度、碱度)的微小波动也加剧了砷的富集。针对这一问题,提出“源头控制+工艺优化”双管齐下的解决方案:严控高砷原料比例、优化烧结脱砷技术,并建立实时监测机制。为同类企业提供了经济可行的治理范本。

由于 As 元素的氧亲和力低于铁元素,故在冶炼过程中难以去除。铁水中 As 含量超标就意味着钢中 As 含量超标,进而将导致连铸钢坯的热塑性降低,影响后续轧制过程钢材的热加工性^[1]。曹呈祥等^[2]和张胤彦^[3]根据残余元素 3 种不同机制对钢质量和性能的影响进行研究,对固体废物预处理、铁矿床焙烧工艺、分批稀释工艺、除铁工艺、除钢工艺、添加其他制动元素这 6 项减少和控制高温下钢中含有残余金属元素的措施和方法进行了简要的分析。张伟等^[4]研究了各种不同 As 含量 50CrVA 钢的机械性能,发现 As 含量能够降低冲击功和断面收缩

率。刘建军^[5]通过对高 As 炉次和低 As 炉次生产的 ZG25MnNi 钢的机械性能进行对比,发现高 As 炉次的延伸率、断面收缩率、零下冲击功均有大幅度降低。钢中 As 含量的高低对钢的性能具有重要的影响,针对某钢厂因 As 升高造成热轧材产品不断出现裂纹的问题,本文以该厂 1#高炉为对象,研究了铁水 As 含量升高的原因并制定了相应的治理对策。

残余 As 元素的冶金形态和对性能的影响

残余 As 元素的冶金形态

As 多来源于褐铁矿和磁铁矿,在褐铁矿中主要

以 $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的形式存在, 在磁铁矿中主要以 FeAsS 的形式存在。胡晓等^[6]研究了含砷铁矿石脱砷现状, 并在实验室条件下通过气氛控制高温焙烧含砷的铁矿石, 使 As 以气体化合物的形式挥发去除, 但这一过程会生成大量的以 As_2O_3 为主的剧毒烟气, 且脱除效率有限, 故这种方法很难实现工业化。吕庆等^[7]对华南含砷铁矿在弱氧化气氛下的烧结过程进行了系统化的气化脱砷, 矿石中砷化物的脱除主要依赖 FeAsS 的氧化和热分解反应, 在 $1050 \sim 1100^\circ\text{C}$ 下保温 8~15 min 同时配加 6% 的焦粉, 脱砷效率最好且反应后样品中没有找到含砷矿物。由于温度等工艺条件的限制, 想要在烧结过程中将砷像硫化物一样以氧化物的形式大量进入到烧结尾气中, 烧结料中的 CaO 占比需要尽可能的降低, 即不能配加太多的石灰溶剂。谭培龙等^[8]研究发现减少 CaO 含量会进一步降低烧结矿的碱度, 进而导致炉料间的交互作用减弱。在 CaO 质量分数为 9.78% 的基础上进一步降低 CaO 的含量会减弱烧结过程中各物料的结合效果, 引起烧结过程中的温度分布不均, 导致烧结后强度达不到最低入炉标准^[9]。所以为了降低 As 含量而减少石灰溶剂显然是不合理的。高炉冶炼时, 在强烈的还原性氛围等环境下, 以硫化物或氧化物形式存在的砷极易被煤气还原, 但由于高炉料层厚, 透气性差, 即使有随着煤气上升的砷或砷的氧化物也基本上都会被料层所吸附^[10]。在转炉或电炉工序, 罗林根等^[11]对这一环节进行了脱 As 的热力学计算, 综合了钢水及炉渣成分的计算结果表明, 该环节的砷无法通过氧化和生成砷化钙脱除。一些国内外的学者通过不懈的努力, 寻找出了诸如配料稀释、硅钙/硅铁合金、真空处理、变质处理等脱 As 方法^[12-14]。其中应用于转炉和电炉的配料稀释法是通过使用残余元素极低的废钢来稀释钢液, 但会受到成本和低砷废钢储量的制约。

残余元素 As 对钢铁性能的影响

➤ 高温热塑性

陈伟庆等^[15]研究指出在 $900 \sim 1200^\circ\text{C}$ 时, 当温度降低且应变速率较大, 沿奥氏体晶界有过饱和的

硫化物、氧化物以及 As 等残余元素富集, 造成铸坯热塑性降低。在 $600 \sim 900^\circ\text{C}$ 时, Cu、As、P 和 S 等元素在铁素体与奥氏体相界面或者奥氏体晶界偏聚, 造成铸坯热塑性降低, 进一步导致铸坯在连铸弯道矫直过程中产生铸坯裂纹。图 1 为 20 钢由于残余元素在晶界偏聚引起的二次裂纹, As 等残余元素的晶界偏聚降低了晶界的结合力, 增加了晶界纤维空洞的形成与生长速率, 提高了第Ⅲ脆性温度区上限临界温度, 从一定程度上阻止了动态再结晶, 导致在晶界上形成应力集中源, 引发二次裂纹。

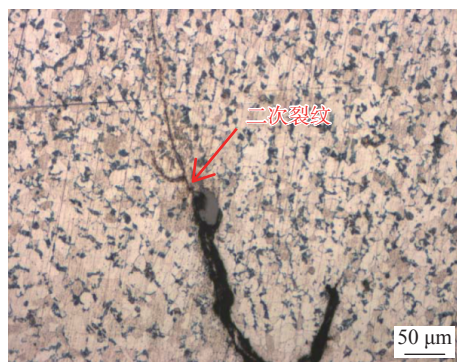


图 1 残余元素在晶界偏聚引起的二次裂纹

➤ 热加工性

含砷量较高的低合金钢在高温下容易发生 As 的表层富集, 导致其在轧制时出现开裂。As 质量分数低于 0.02% 时, 钢坯表面砷含量较低, 大部分砷集中于鳞状氧化物膜下, 在锻造时发生剥落, 未出现单一砷开裂倾向; As 质量分数大于 0.02% 时, 其热加工性下降, 锻压会出现较大的缺陷, 主要为表面和边角的开裂。图 2 所示为不同 AS 质量分数的 SWRH82B-1 钢连铸坯低倍图, 可以看出当 AS 质量分数高于 0.036% 时, 钢边角存在开裂。残余元素 As 对钢热加工性的影响除受成分、冷却速度、温度、时间和压力等因素作用外, 还与残留元素的固溶程度、熔融液相的熔点和浸润性及残余元素的扩散能力等密切相关^[16]。

辛文彬^[17]的研究表明, 低砷条件下 As 将固溶于铁基体中, 且淬火温度并不能改变合金的凝固组织。固溶于基体中的 As 往往容易发生晶界偏聚, 一旦偏聚于晶界, 将增加钢坯在连铸矫直过程和后续热加工过程中的裂纹敏感性, 1200°C 淬火试样的晶

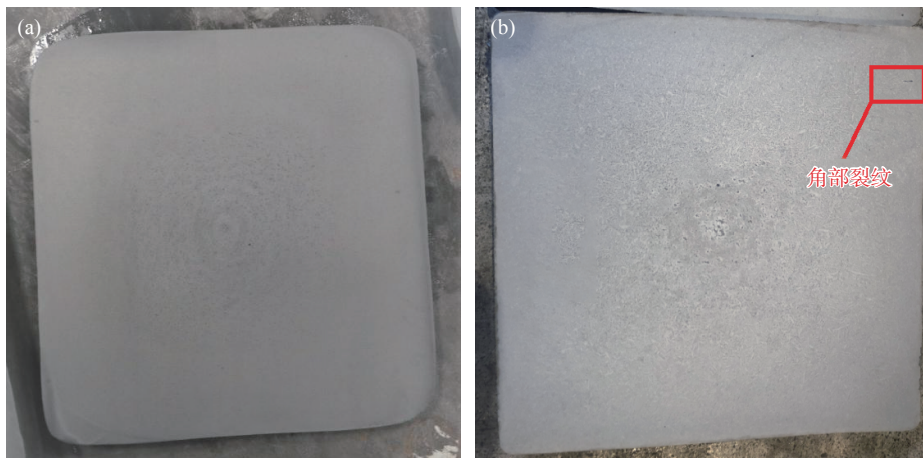


图2 不同As质量分数的SWRH82B-1连铸坯低倍图(尺寸:250 mm×250 mm):(a) $w(\text{As})=0.016\%$, 无角裂;(b) $w(\text{As})=0.038\%$, 角部裂纹0.5级

界平均As含量高于晶内含量,As偏聚于晶界处,使钢材表面严重开裂。裴斐等^[18]通过钢坯保温实验发现当温度高于1050℃时,氧化膜与基体的界面逐渐变得粗糙,残余元素Cu和As主要在氧化膜与基体交界处以及交界处球形氧化物附近富集。

轧制后钢中的Cu、As和Sn主要富集在基体。当砷、铜共存时对钢材的热加工危害性更为严重,砷对钢热脆性的影响程度相当于铜的1/4,砷能够降低含铜相的熔点,导致熔融液相更易沿晶界渗入;另外,砷可降低铜在 γ 相中的溶解度,但是作用不如Sn、Sb明显^[19-20]。

➤ 组织和力学性能

砷可通过影响钢的临界转变温度,进而影响过冷奥氏体转变过程的显微组织。冯赞等^[21]在研究砷及镧对E36船板钢连续冷却转变曲线的影响时发现,当冷速为0.01℃/s、As质量分数由0.019%增加到0.24%时,试样组织会出现更多的晶内铁素体。程慧静等^[22]研究含砷45钢的过冷奥氏体连续转变过程时同样发现,随着试样中含砷量增加,45钢锻后空冷组织中晶内铁素体含量增加,同时整个组织的铁素体含量随As含量增加而增加。

Takashima^[23]研究砷对碳钢、SiMnCr钢和CrW钢机械性能的影响规律时发现,当As质量分数增加至1%时,3种钢屈服强度的增加幅度为15%~20%,抗拉强度和硬度增加约10%,延伸率增加2%~15%,冲击值下降50%~70%。60钢在As质量分数为0.0026%时抗拉强度的970.37 MPa,随着As质量分数提高

到0.0044%,抗拉强度增加到1023.41 MPa,提升了5.46%。Sawamura等^[24]研究指出As元素能够提高普碳钢和软钢的韧脆转变温度,降低韧性,但当 $w(\text{As})<0.1\%$ 时,对钢的韧脆转变温度没有明显的影响。耿明山等^[25]研究表明,将As的质量分数由0.019%改变为0.24%后,D级船板型钢的屈服强度呈现出先增大后减小的趋势,但其抗拉强度没有明显下降,中低温冲击韧度减小。

铁水中As含量升高的原因

近年铁水中As含量的变化趋势

为了统计铁水中砷的变化规律,对某炼铁厂1[#]高炉2023年3—10月铁水样中的As含量进行分析,并绘制出变化趋势图如图3所示。可以看出,2023年3—5月,炼铁厂1[#]高炉铁水中As质量分数在0.0080%上下波动,但其月均值不超过0.0095%;

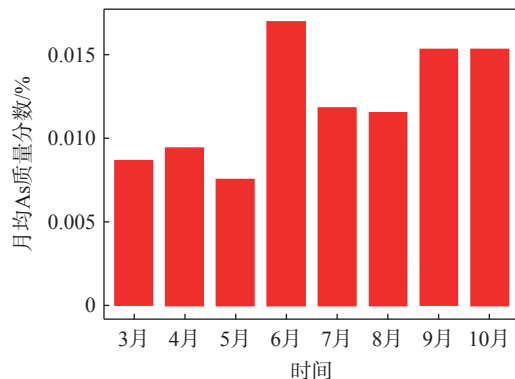


图3 2023年3—10月铁水月均砷含量图

2023年6—10月,铁水中As含量大幅上升,2023年9—10月的月平均As质量分数高达0.0153%,每日的铁水As质量分数全部超过0.01%。炼钢铁水中砷含量增高,对以后的生产和后续产品的质量有较大影响。在炼铁生产中铁水的含砷量与原材料中的含砷量存在着紧密的联系,原材料中的砷元素几乎全部流入到了铁液中。

高炉的冶炼工艺及炉况

通过对2023年3—9月每周的高炉日报进行总结,可以表征冶炼工艺和炉况的参数如下:冶炼强度、炉缸温度、煤比和热风温度。冶炼强度是高炉鼓风工艺参数之一,与炉顶压力相关,高炉正常运行时冶炼强度应为 $1.75\sim 2.8\text{ t}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。高炉炉缸温度一般在 $50\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$,随外部气温和高炉炉体循环冷却水水压波动,一定程度上反映了炉缸侧壁的侵蚀情况、焦炭质量、死料柱状态和铁水中碳的饱和情况。高炉煤比与高炉上部装料的布料矩阵、下部送风参数和烧结矿粒度有关,一般根据烧结矿成分通过碱度、球团矿和生矿比例、烧结矿粒度以及控制装料制度,调整炉料对煤气流的阻力以保证高炉热量充沛,渣铁流动性好。热风温度是鼓风的质量标志,提高风温有利于活跃炉缸、提高喷吹物数量,降低焦比,正常生产时应将风温控制在 $(1050\pm 150)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图4所示为2023年3—9月每周冶炼强度、炉缸温度、煤比和热风温度的相较于2022全年平均值的波动量。其中冶炼强度在 $-5\%\sim -8\%$ 之间波动,炉缸温度在 $-13\%\sim -18\%$ 之间波动,煤比的波动为 $-7\%\sim +7\%$,热风温度在 $-3\%\sim -1\%$ 之间波动,即

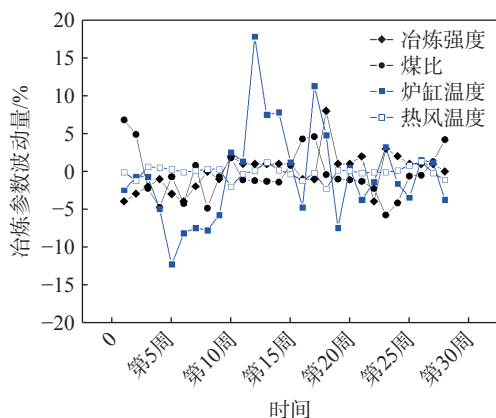


图4 2023年3—9月部分冶炼参数的波动量

7个月内1#高冶炼工艺和炉况相较于2022年未发生明显改变,故影响铁水As含量的原因为高炉原料的变动。

高炉的原料对As含量的影响

烧结用俄罗斯粉矿

1#高炉烧结料由天宝矿、敦化粉、俄罗斯矿、罗伊山矿、高品位低砷铁矿、混合粉和溶剂烧制而成,现行烧结铁矿粉的配料如表1所示,可知破碎俄罗斯矿(简称破碎俄块)的占比为19.0%。烧结料中加入俄罗斯粉矿比加入其它系粉矿具有明显的降本优势,故混匀料从7月开始加入俄罗斯粉矿,但因9月下旬铁水As质量分数高达0.016%,已经有影响产品质量的趋势,故开始减少烧结用俄罗斯粉矿的配量。图5统计了2023年10月份烧结用俄罗斯矿的As含量,当月平均砷质量分数为0.097%,其中砷质量分数的最高值达到了0.295%。同月烧结用除尘粉和其他烧结矿的月平均砷质量分数分别为0.004%和0.002%。烧结混匀料中,每增加1%的烧结用俄罗斯粉矿配比,铁水中As质量分数升高0.00079%。

表1 烧结铁矿粉原料质量配比 %				
天宝矿	敦化粉	破碎俄块	高品位低砷铁矿	混合粉
47.8	9.5	19.0	4.7	19.0

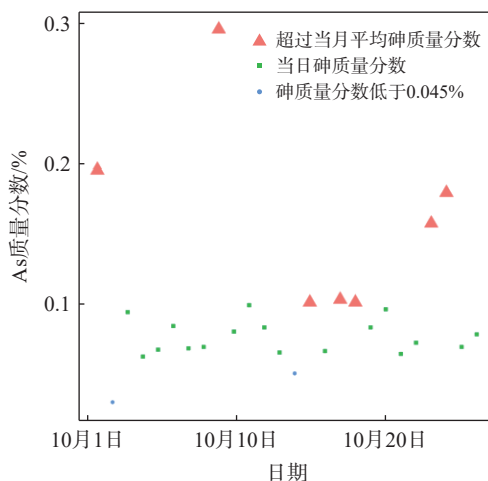


图5 2023年10月烧结用俄罗斯粉矿As含量图

高炉入炉俄罗斯块矿

高炉入炉原料除了烧结矿和球团矿,还会直接加入块状铁矿。由于价格上的优势,1#高炉将可直入

高炉的国内块矿替换成俄罗斯块矿。2023 年 10 入炉俄罗斯块矿的 As 质量分数有 50% 为 0.020%~0.095%。对 10 月份 1—25 日烧结矿、俄罗斯块矿、钢渣的配比和铁水的 As 含量通过 Minitab 19 进行多元回归分析, 其中入炉俄罗斯块矿与铁水 As 含量的拟合线见图 6。入炉俄罗斯块矿添加质量分数 (X) 与铁水 As 质量分数 (Y) 呈线性增加关系, 虽受到烧结矿和钢渣添加比例的影响, 但大致拟合模型方程为 $Y=0.014043+0.000674X$ 。烧结矿、入炉俄罗斯块矿、钢渣的 As 含量分别作为多元回归分析的 X 项, 在 X 变量的递增影响中, 入炉俄罗斯块矿的拟合度远超于其他两项, 证明了入炉俄罗斯块矿所携带的 As 与高炉冶炼出来的铁水的 As 含量直线相关。

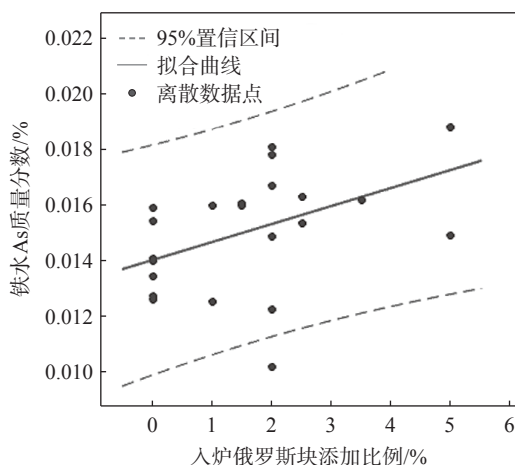


图 6 入炉俄罗斯块矿加入量与铁水 As 含量的拟合线图

控制 As 含量的措施与应用

调整原料采购和配矿

通过一些学者的研究以及钢厂自身冶炼的印证, As 含量在转炉冶炼这一过程中几乎没有变化, 故想降低最终产品的 As 含量应该从降低铁水 As 含量这一源头入手, 制订出对于 As 含量的验收规范, 从原料审核、进货检查、检验 3 个环节入手, 严格把控原料的品质^[26], 避免高 As 原料流入生产过程。在配矿方面, 烧结矿粉中降低俄罗斯矿粉的比重, 增加 WPF 公司矿粉的比重; 在原料组成方面, 应当停止使用含 As 质量分数超过 0.122% 的入炉俄罗斯块矿, 并将入炉俄罗斯块矿逐步替换为其它块矿;

同时炼铁厂应该构建一套基于实时原料成分预测铁水 As 的方法^[27]。入炉俄罗斯块矿代替一部分高炉原料, 在经济上的确减少了生铁的冶炼费用, 但使用高 As 铁水炼钢却加重了后续炼钢工序去砷的负荷^[28], 增加了精炼的成本。因此, 在使用俄罗斯的含 As 铁矿时, 必须考虑到其引入的 As 元素, 同步调整其他含 As 原料的配比, 这样使用俄罗斯的含 As 铁矿才能达到提高经济效益的目的。

烧结过程脱砷控制

鞠亚华等^[29] 试验表明, 烧结工艺的除砷率最高可达到 90%; 烧结料的初始砷含量越低, 脱砷效果越显著。李华成等^[30] 研究了砷在烧结中的迁移规律, 结果表明: 烧结矿的碱性越高, 脱砷率越低, 当碱度大于 2.0 时, 脱砷率<10%。国外也有一些学者研究了多种因素对除砷率的影响^[31-32], 发现烧结过程中脱砷分为亚砷酸的氧化和高温分解 2 个阶段进行: 在弱氧化气氛条件下, 提高反应温度、延长反应时间和增大加入焦粉的质量分数, 有利于提高铁矿石的除砷效果。烧结过程的气化脱砷, 主要发生 FeAsS 的氧化和热分解反应, 在 1050~1100 °C 下保温 8~15 min 配加 6% 的焦粉, 脱砷效率最好, 反应后样品中没有找到含砷特征的矿物。

2023 年某炼铁厂实际使用的俄罗斯粉矿月均砷含量高达 0.097%。通过对比发现, 生产中的实际脱砷率显著低于文献值, 初步分析原因如下: 1) 初始砷含量差异。文献中原料砷质量分数较低 (0.039%~0.046%), 而某炼铁厂使用的俄罗斯粉矿砷含量较高, 导致烧结过程中砷的挥发效率降低。2) 碱度限制。某炼铁厂烧结矿碱度月均值为 1.81, 虽未达到 2.0, 但仍显著抑制了砷的脱除过程。3) 气化脱砷动力学条件较差。某炼铁厂为提高烧结矿的产率而大幅度增加烧结料层的高度, 对 As 的挥发和烧结脱砷具有明显的阻碍作用。

在烧结工艺中, 由于温度等工艺条件的限制, 在此环节欲将砷像硫化物一般以氧化物的形式大量进入到烧结尾气中除去, 原料中不应含有太多的 CaO。但某炼铁厂烧结矿中月均 CaO 含量仅次于铁含量, 基本上保持在 9.41% 左右, 且以添加石灰的方式引入。石灰水解后与铁矿粉均匀混合水解放热

可降低湿度、提温 30~50 °C、增加烧结料的透气性，故在烧结配料中盲目的减少石灰配比显然是不合理的。

想要在烧结环节降低 As 含量，应当在炼铁厂建立一套烧结料 As 含量实时监测机制，每天对烧结料进行取样分析，监控烧结料中俄罗斯矿的 As 含量变化。当 As 质量分数大于 0.018% 时，入炉俄罗斯矿配比减至 1.5%；当质量分数大于 0.020% 时不加入俄罗斯矿。通过此措施，可使铁水中 As 质量分数预计降低到 0.0147% 左右。

高炉冶炼脱砷的研究和分析

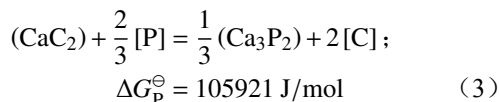
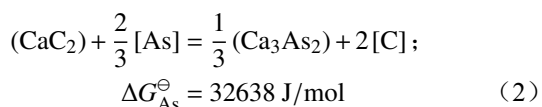
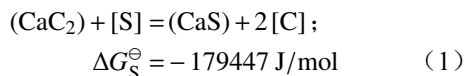
➤ 高炉脱砷的机理

刘守平等^[33]采用硅钙合金，并配入 CaF₂ 提高钙的利用率，对砷质量分数为 0.027%~0.092% 的铁水进行脱砷实验。实验结果表明，在 1450 °C 加入质量分数为 35% 的 CaF₂ 和质量分数为 65% 的硅钙合金，处理时间为 20 min，可以达到 30%~78% 脱砷率。

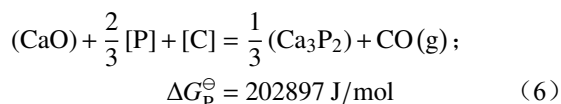
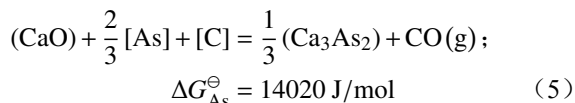
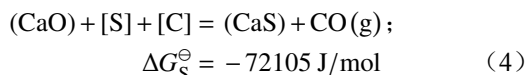
付兵^[34]通过碳管炉和感应炉的实验认为采用 CaC₂-CaF₂ 渣系对铁水进行脱砷为最佳选择，当渣中 CaC₂ 质量分数为 50%~70% 时，脱砷率较高，但存在 CaC₂ 分解使钢液增碳的缺点；通过感应炉实验得出铁水搅拌良好的状态下，相对增加脱砷反应的界面面积可加快铁水中砷的扩散，脱砷效果要明显好于碳管炉的结论。

朱元凯等^[35]采用 CaC₂ 质量分数为 60%，CaF₂ 质量分数为 40% 的渣系对砷质量分数为 0.1% 左右的铁水进行还原脱砷实验，反应时间在 15~20 min 时，铁水中砷质量分数最低可降至 0.019%，即最大脱砷率为 34.5%，同时脱硫率达到 99%。

采用 CaC₂ 在铁水中脱砷，根据 2022 年全年铁水的平均入炉温度可知在 1300~1350 °C 的范围内，CaC₂ 加入铁水后反应如式 (1)~(3) 所示：



使用 CaO-CaF₂ 渣系脱砷发生的热力学反应如式 (4)~(6) 所示：



从热力学角度来讲，由于反应的实际发生方向取决于反应的自由能变化 ΔG ，在 1350 °C 加入 CaS₂ 脱 As 时，CaC₂ 与 S 反应对应的 ΔG 具有最小值，所以该反应会优先进行。即使使用 CaO-CaF₂ 渣系，依旧优先生成 CaS。

➤ 高炉冶炼脱砷的可行性分析

砷在高炉中的脱除量与当日入炉全铁砷含量、铁水硅含量、碱度值、渣比、铁水温度及炉顶压等密切相关。在一定的温度范围内随着铁水温度的升高，高炉脱砷率逐渐上升的主要原因是因为随着铁水温度的升高，铁水含 C 量增加，使得砷在铁水中的溶解度下降。相对地，铁水温度过低不利于渣铁的联系、分解及渣铁间化学反应进行，从而导致铁矿石中心砷直接随着矿石变为熔融态，蕴含于铁基中而非循环富集，脱砷率自然较低。

罗林根等^[11]的研究表明，采用 Ca 系脱砷剂脱砷，只有当 S 的质量分数小于等于 0.0035% 时，脱砷反应才可以进行。某炼铁厂 1# 高炉 10 月份铁水平均硫质量分数为 0.024%，即式 (1)~(6) 所提到的 Ca 系渣脱砷只在热力学理论上具有可能性，在实际生产中脱砷剂会由于过高的铁水 S 含量而无法起到脱 As 的作用。

常力忠等^[36]通过热力学以及多组实验对铁水还原脱砷进行了研究，发现不论是单一脱砷剂还是复合脱砷剂，均会进行还原脱砷到一定程度才开始脱砷反应。某炼铁厂 1# 高炉相应的生产数据发现 2023 年 10 月份铁水中磷含量最低 10 炉的平均磷质

量分数高达 0.069%，对应的脱砷率仅为 20%。

吕庆等^[37]研究了渣铁成分对铁水含砷量的影响，将生铁、高砷铁与高硫铁按相应的比例和钢渣混合，通过调整炉渣的碱度发现高炉脱砷模拟实验能将砷质量分数为 0.1% 的铁水经处理后得到平均砷质量分数 0.074% 的铁水。某炼铁厂 10 月份的平均 As 含量约为 0.0267%，远低于上述实验的平均砷含量。

刘守平等^[38]通过研究发现当高炉渣碱度在 1.20~1.30 时，脱砷效果明显，实验预测最佳的高炉脱 As 碱度为 1.16。经过统计分析，某炼铁厂在 23 年生产中炉渣碱度的月均值为 1.102，已经较为接近预测的最佳碱度。

佟志芳等^[39]通过生产中对高炉参数的一系列实验表明，当铁水温度为 1460℃ 时，高炉脱砷率最高达 57%。对某炼铁厂 10 月份的铁水温度进行统计，其中最高铁水温度为 1426℃，平均温度仅为 1300℃，故 1#高炉铁水的 As 含量居高也与铁水温度低有关。

高炉料层厚，透气性差，尽管高炉内煤气流速较大，但大量的砷在上升过程中被料层所吸收，真正跟随烟气离开高炉的砷反而是极少数。随着炉顶压力的提高，铁水含砷量不断下降，高炉脱砷率也逐步提高。提高炉顶压力后随烟气离开高炉的砷量有所增加，但铁水含砷量下降的主要原因为铁水含碳量增加，铁水对砷的溶解度下降。且提高炉顶压力意味着整个高炉内部压力的提升，升高了炉墙热负荷以及加重侵蚀，被动地增加了焦比，对高炉经济指标影响较大。为了脱砷而一味地提高炉顶压力，反而有些得不偿失。

结束语

(1) 控制铁水 As 含量要从原料来源上对铁矿石中的含砷量进行了严格的管控，大量配吃高砷铁矿石会给产品质量带来较大的影响，给企业所带来一定的经济损失。在进行入炉俄罗斯块矿以及含 As 废钢的循环利用时，要结合后续对钢液残余元素脱除工序的费用进行成本的综合计算。

(2) 高顶压、低碱度及提高铁水温度均有利于高炉脱砷，但调整后生产的风险太大。实际应用中还是要考虑和生产指标的结合。

(3) 烧结中大部分的砷被钙固定在烧结矿中，欲将砷像硫化物一般以氧化物的形式大量进入到烧结尾气中除去，原料中不应有太多的 CaO，但在烧结配料中降低 CaO 质量分数会导致烧结料的透气性变差。

(4) 建立烧结料 As 含量检测与预配基准制度，可有效地实现对高炉入炉料中铁、砷的有效调控。

(5) 某炼铁厂 1#高炉 23 年 10 月份铁水平均硫含量为 0.024%，实际生产中会由于过高的 S 含量导致脱砷剂基本上没有机会和铁水中的砷接触进行反应，通过 Ca 系脱砷剂对铁水脱砷无法应用到实际生产中。

参考文献

- [1] 方亮, 刘英才. 铁水中砷来源调查研究. 山西冶金, 2015, 38(3): 1
- [2] 曹呈祥, 梁雨雨, 辛文彬, 等. Ce 对含铜砷钢热塑性的影响研究. 稀有金属与硬质合金, 2022, 50(3): 52
- [3] 张胤彦. 残余元素对工艺及性能的影响. 中国金属通报, 2021(4): 247
- [4] 张伟, 徐袁, 欧阳志. 砷对 50CrVA 弹簧钢性能的影响研究. 山西冶金, 2018, 41(6): 34
- [5] 刘建军. 砷对 ZG25MnNi 钢机械性能的影响. 铁道机车车辆工人, 2007(10): 12
- [6] 胡晓, 吕庆, 张淑会. 含砷铁矿石脱砷研究现状. 钢铁研究, 2010, 38(4): 47
- [7] 吕庆, 张淑会, 胡晓. 含砷铁矿石烧结脱砷的试验研究. 钢铁, 2010, 45(6): 7
- [8] 谭培龙, 张建良, 黄建强, 等. 烧结矿碱度对综合炉料交互反应的影响. 工程科学学报, 2023, 45(6): 890
- [9] 时越, 王沧, 马林泉, 等. 不同碱度的烧结矿试验研究. 金属世界, 2008(2): 12
- [10] 鞠亚华, 张建良, 郭豪. 高炉炼铁过程脱砷的研究. 金属材料与冶金工程, 2019, 47(3): 25
- [11] 罗林根, 王建军, 孔辉, 等. 钢水中有害元素砷的脱除. 过程工程学报, 2011, 11(4): 595
- [12] 蒋国昌. 纯净钢及二次精炼. 上海: 上海科学技术出版社, 1996
- [13] 于月光, 陈伯平, 王玉刚, 等. 钢真空感应熔炼过程痕量元素挥发的动力学. 北京科技大学学报, 1993(6): 549
- [14] 刘守平, 孙善长. 钢液真空处理挥发脱砷. 特殊钢, 2002(3): 1
- [15] 陈伟庆, 昌波, 于平. 钢中残余元素对连铸圆坯纵裂的影响. 钢铁, 1998(9): 23
- [16] Imai N, Komatsubara N, Kunishige K. Effect of Cu, Sn and Ni on hot workability of hot-rolled mild steel. ISIJ Int, 1997, 37(3): 217
- [17] 辛文彬. 砷对钢性能的影响及稀土的改善作用研究 [学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2016

- [18] 裴斐, 成小军, 彭伟, 等. 残余元素在 CSP 热轧钢板中的分布及其对力学性能的影响. 矿冶工程, 2010, 30(4): 86
- [19] 孟庆阳, 辛文彬, 张婧, 等. 铜砷共存时砷含量对 C-Mn 钢高温热塑性的影响. 矿冶, 2021, 30(5): 77
- [20] 杜显彬, 魏泽华, 杜传治, 等. 残余元素砷、铜对耐低温热轧型钢表面质量的影响. 连铸, 2017, 42(3): 34
- [21] 冯赞, 肖寄光, 王福明, 等. 砷及镧对 E36 船板钢连续冷却转变曲线的影响. 金属热处理, 2009, 34(3): 14
- [22] 程慧静, 王福明, 李长荣, 等. 砷对 45 钢组织及力学性能的影响. 金属热处理, 2010, 35(2): 33
- [23] Takashima T. Studies on the influence of arsenic on the mechanical properties and structures of some high grade structural steels. *Tetsu To Hagane*, 1948, 34(1): 24
- [24] Sawamura H, Mori T, Fujita T. Effect of carbon, arsenic, copper and tin on transition temperature of steel. *Tetsu To Hagane*, 1955, 41(8): 861
- [25] 耿明山, 王新华, 张炯明, 等. Cu、As、Sn 对 C-Mn 钢热轧板表面质量的影响. 特殊钢, 2008, 29(6): 41
- [26] 刘荣伟, 柯技, 李家新, 等. 基于氧气高炉的铁矿石还原动力学研究. 金属世界, 2021(5): 54
- [27] 张吉. 基于深度学习的高炉炉况建模与预测 [学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2021
- [28] 李文博, 包燕平, 王敏, 等. 不同钙合金对钢液脱砷作用的实验研究. 工程科学学报, 2016, 38(4): 484
- [29] 鞠亚华, 张建良, 郭豪. 南(京)钢烧结脱砷试验研究. 烧结球团, 2009, 34(5): 1
- [30] 李华成, 陈文如, 韩光烈. 含砷铁矿在烧结过程中砷的行为研究. 矿冶工程, 1989, 9(4): 52
- [31] Díaz-Somoano M, López-Antón M A, Huggins F E, et al. The stability of arsenic and selenium compounds that were retained in limestone in a coal gasification atmosphere. *J Hazard Mater*, 2010, 173(1/3): 450
- [32] Martinez-Villegas N, Briones-Gallardo R, Ramos-Leal J A, et al. Arsenic mobility controlled by solid calcium arsenates-A case study in Mexico showcasing a potentially widespread environmental problem. *Environ Pollut*, 2013, 176: 114
- [33] 刘守平, 孙善长. 钢液和铁水硅钙合金脱砷研究. 特殊钢, 2001(5): 12
- [34] 付兵. 钢中残余元素的影响及其控制研究 [学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2010
- [35] 朱元凯, 董元簏, 彭情强, 等. CaC_2 - CaF_2 渣系对铁水脱砷的研究. 北京钢铁学院学报, 1986(2): 103
- [36] 常立忠, 施晓芳, 王建军, 等. 铁水还原脱砷的研究. 钢铁钒钛, 2014, 35(6): 113
- [37] 吕庆, 黄宏虎, 刘小杰, 等. 渣铁成分对铁水含砷量的影响. 钢铁钒钛, 2015, 36(3): 83
- [38] 刘守平, 孙善长, 张丙怀, 等. 铁液碱性熔渣脱砷. 重庆大学学报(自然科学版), 2001(4): 106
- [39] 佟志芳, 简云, 吴强, 等. 高炉控制铁水砷含量的研究. 有色金属科学与工程, 2014, 5(1): 54

作者简介: 崔政 (2001—), 男, 内蒙古自治区乌兰察布人, 汽车与工程机械用钢研发工程师。2023 年毕业于内蒙古科技大学冶金工程专业, 主要研究方向: 钢铁冶金冶炼、铸造技术的研究。通信地址: 黑龙江省齐齐哈尔市富拉尔基区建龙北满特殊钢有限责任公司技术中心研发部, E-mail: longma163163163@163.com。

王瑞 (1987—), 男, 汽车与工程机械用钢研究室主任, 现供职于建龙北满特殊钢有限公司, 主要从事钢铁新材料研发工作。

杨铭 (1984—), 男, 铁前工艺研究室主任, 2007 年毕业于长春工业大学金属材料工程专业, 现供职于建龙北满特殊钢有限公司, 主要从事铁前工艺研究。通信地址: 黑龙江省齐齐哈尔市富拉尔基区建龙北满特殊钢有限责任公司技术中心质量部。

毛威昂 (1992—), 男, 汽车与工程机械用钢研发工程师, 2014 年毕业于佳木斯大学金属材料工程专业, 现供职于建龙北满特殊钢有限公司, 主要从事齿轮钢新材料研发。

王刘艳 (1986—), 女, 汽车与工程机械用钢研发工程师。2013 年毕业于燕山大学冶金工程专业, 现供职于建龙北满特殊钢有限公司, 主要从事钢铁新材料研发及工艺研究工作。