

陶瓷内衬复合弯煤枪的研制与应用^{*}

王建江 赵忠民 叶明惠 杜心康 程正东

(军械工程学院)

(钢铁研究总院)

摘要 对目前国内高炉采用的普通型煤粉喷枪的结构、特点及使用情况进行了分析并指出其不足,提出了将直煤枪改为弯煤枪,用陶瓷内衬复合弯枪头取代不锈钢直枪头的观点与理由,给出了陶瓷内衬复合弯枪在宝钢、首钢高炉的应用情况,并对其发展进行了展望。

关键词 煤粉喷枪 高炉喷煤 自蔓延高温合成 内衬陶瓷^①

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF SHS CURVED CERAMIC-LINED COMPOSITE GUNS FOR COAL-DUST-INJECTION SYSTEM

WANG Jianjiang ZHAO Zhongmin YE Minghui DU Xinkang

(Ordnance Engineering College)

CHENG Zhengdong

(Central Iron and Steel Research Institute)

ABSTRACT The structure, characteristics and application of ordinary coal-dust-injection guns used in blast furnaces is introduced and the reasons the curved coal-dust-injection gun should replace straight one and ceramic-lined composite gun head should replace straight stainless steel one have been put forward. The performance of curved guns used at Baosteel and Shougang and the prospect of this new type of gun has been given.

KEY WORDS coal-dust-injection gun, coal-dust-injection system in BF, self-propagating high-temperature synthesis, lining ceramics

1 引言

我国是世界上开发应用喷煤技术较早的国家之一。进入 90 年代后,喷煤技术取得了长足进步。1995 年全国喷煤总量突破 400 万 t,1996 年全国喷煤总量达到了 502 万 t,仅次于日本,成为世界第二喷煤大国。当前,高炉喷煤已成为我国炼铁系统工艺结构优化、能源结构变化的核心^[1]。

在高炉喷吹煤粉系统中,煤粉喷枪是整个系统的关键。性能良好且长寿命的喷煤枪对提高喷煤效益、降低喷煤成本和工人劳动强度具有重要意义。因此,国内外学者对此开展了广泛深入的研究。

煤粉喷枪有两种结构形式。一种是普通型煤枪,即喷吹介质为压缩空气,另一种是氧煤枪,其喷

吹介质除压缩空气外还有一定比例的氧气。目前国内应用较普遍的仍然是普通型煤枪。

2 普通型煤枪的不足与弯煤枪的提出

普通型煤枪是在 60 年代初期高炉喷煤进行大量试验和系统研究时诞生的。当时的煤粉喷枪只是一根钢管,煤粉在压缩空气的携带下经直吹管喷入高炉。直到目前,国内大多数企业仍采用这种喷枪。有的企业根据自己高炉工况条件对煤枪进行了结构上的改进,如宝钢炼铁厂采用了双层气冷喷枪。该枪内层通压缩空气及煤粉,外层用压缩空气冷却。冷却喷枪用的压缩空气可直接吹入炉内。为了保证喷枪冷却用气的可靠性,采用了两种气源,一路为喷吹空压机提供,另一路来自高炉空压机。这种形式

^① * 国家自然科学基金资助项目(59972043)

联系人:王建江,副教授,石家庄(050003)军械工程学院基础部金工教研室

的喷枪由于外管有风冷保护,因此其使用寿命较长,且停喷煤的风口可以不拔枪,喷枪的修理和更换可以在高炉休风时进行^[2],但其制造成本也相对较高。

从风口插入的普通型煤枪主要为斜插式喷枪。斜插式喷枪直接受热段较短,不易变形烧坏,操作方便,为目前广泛采用的一种喷枪。但是喷枪插入深度、位置和角度要适宜,否则不仅影响煤粉燃烧,而且喷入煤粉流股易磨损风口。为避免喷吹煤粉磨损风口,在煤枪前端烧损时,必须及时更换,并随时根据煤粉喷入情况调整喷枪。因此,煤枪枪头的结构与寿命是影响喷煤效果和衡量煤枪性能优劣的重要指标。表1给出了国内主要钢铁企业喷煤枪头的现况。

表1 国内主要钢铁企业喷煤枪现况对照表

Table 1 Comparison of coal-dust-injection guns for principal iron and steel group companies in China

企业名称	枪头形状	枪头弯角/ (°)	枪头材质	枪头外径与 壁厚/mm
宝钢	双层弯枪	13	1Cr18Ni9Ti	$\varphi 24 \times 2.5$ (内管)
首钢	弯枪	11	Ni25Cr20	$\varphi 21 \times 2.5$
鞍钢	直枪	—	1Cr18Ni9Ti	$\varphi 22 \times 2.5$
武钢	直枪	—	1Cr18Ni9Ti	$\varphi 25 \times 2.5$
攀钢	直枪	—	1Cr18Ni9Ti	$\varphi 22 \times 3$

目前,国内绝大多数高炉的煤粉喷枪为普通不锈钢无缝钢管经焊接制成,煤枪前端即枪头是平直的,材质为1Cr18Ni9Ti不锈钢等。这种煤枪多为炼铁厂自己购买原料,自行焊接制造,其制作简单,成本低廉,使用方便。但其存在两个缺点。一是插入风口后煤枪与直吹管和风口的轴线不重合,存在一角度 α ,见图1(a)。若煤枪插入深度与位置不当,极易造成风口磨损。为此,炼铁厂大都采用减小喷枪插入角度 α 来解决这一问题,但由于受高炉设备条件制约,插枪角度不可能再缩小。从目前情况看,只有改变煤枪枪头形状,由平直改为弯曲,即由直枪变为弯枪(其弯曲角度通常在 $10 \sim 13^\circ$ 之间),才有可能使喷出的煤流与直吹管和风口的轴线重合,从而根本上消除因煤股的偏喷或侧喷对风口的磨损,见图1(b)。二是普通不锈钢枪头在长期高温、严重磨损和腐蚀的恶劣环境下,经常出现枪头磨损、高温氧化、高温腐蚀与高温变形等现象。此外,为了解决就近选择喷吹用煤和保证用煤的稳定供应,提高喷煤的经济效益,一些企业的煤质正在发生变化,而高硬度、成分复杂的煤粉又将严重损伤煤枪。若采用弯枪,枪头磨损现象将更为严重。因此,必须选择一种

耐磨损、耐腐蚀、抗高温、抗变形的材料取代普通不锈钢作枪头,以提高煤枪的使用寿命。近年来,人们对此作了积极探索,其中,陶瓷材料以其良好的耐磨、耐蚀和耐高温性能成为可满足这一性能要求的理想选择。

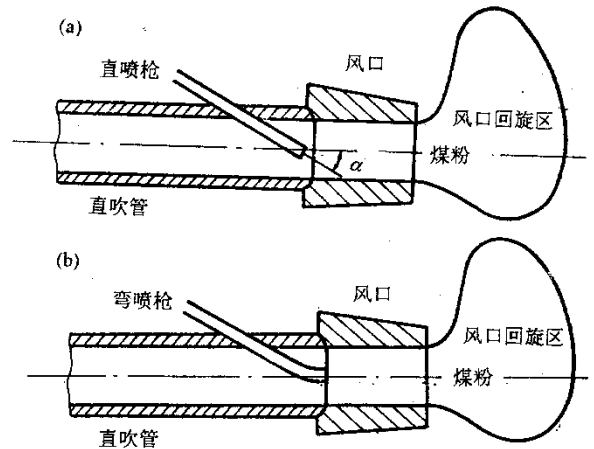


图1 直枪和弯枪与风口轴线交叉和重合示意图

Fig.1 Sketch of axis intersection between the straight guns and tuyere as well as axis coincidence between the curved guns and tuyere
(a) 轴线交叉 (b) 轴线重合

宝钢炼铁厂多年前曾采取粉末冶金的办法,通过配料、制坯和烧结工艺,研制了一种带 13° 左右弯弧的陶瓷弯枪管,但由于无法解决陶瓷枪管与枪身母体的连接问题而被迫放弃。首钢炼铁厂采用在圆柱形不锈钢耐热钢体上,开一与其轴线成一定交角的通孔,机械地安装内衬碳化硅陶瓷管的办法欲以解决,但由于操作复杂、可靠性差而难以实现。由机械工程学院开发的专利产品^[3]陶瓷内衬不锈钢复合弯枪头既解决了弯枪及其寿命问题,又可用焊接的办法,较方便地将陶瓷复合枪管与枪身连接在一起。

3 陶瓷内衬复合弯枪的制备

陶瓷内衬复合弯枪是在普通煤枪前端焊接陶瓷内衬复合弯枪管(或弯枪头)煤枪,该枪头已在宝钢炼铁厂和首钢炼铁厂等企业推广应用,取得了良好的经济与社会效益。它是采用自蔓延铝热—重力分离法新技术制备的^[4]。自蔓延铝热—重力分离法制备陶瓷内衬复合弯枪头的基本原理如图2所示。

将粒度一定的三氧化二铁粉、铝粉及二氧化硅粉等,按一定比例配制成铝热剂,充分混合并烘干后,填充于钢管内,点燃钢管上部的反应物料使其发生自蔓延铝热反应($\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} = \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{Fe} + 836 \text{ kJ}$)。该反应所产生近 3000°C 高温,使反应生成物

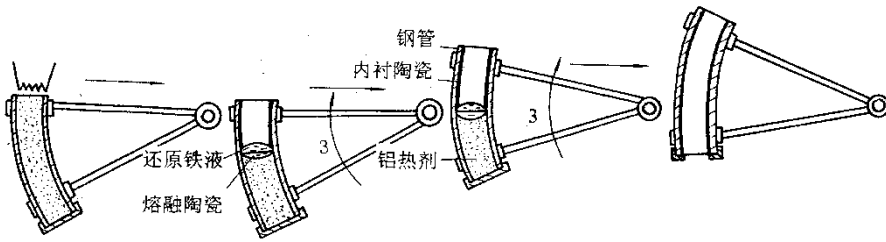


图 2 自蔓延铝热—重力分离法制备陶瓷内衬复合弯枪头原理图

Fig.2 Principle of using SHS gravitational separation-thermit to produce curved ceramic-lined composite gun pipes

Al₂O₃ 和 Fe 处于熔融状态,并在钢管未反应物料上部形成熔池。当燃烧界面到达钢管弧弯处时,通过启动旋转装置,使钢管按箭头方向慢慢旋转,以使燃烧波面和反应熔池始终保持水平。由于熔池中液相铁的密度大于三氧化铝熔融陶瓷的密度,因而在重力的作用下,不互溶两相熔体分离,使金属铁沉积于熔池底部,陶瓷氧化铝浮于上部。随着自蔓延反应燃烧波面和反应熔池自上而下的移动和钢管向外散热冷却,氧化铝陶瓷自上而下在钢管内壁结晶凝固,从而形成了一层厚度在 0.8~2.5 mm 均匀的氧化铝内衬陶瓷涂层。由于氧化铝内衬陶瓷与钢管在热膨胀系数上存在着较大的差异,使钢管对陶瓷层产生较强烈的机械压迫效应,从而使两者在工作状态下能保持良好的结合而不分层^[4,5]。

4 陶瓷内衬复合弯煤枪的应用

陶瓷内衬复合弯煤枪在首钢高炉使用后,得到了炼铁厂的充分肯定。近一年,首钢的自冷却单体喷枪(整枪加工制作由钢铁研究总院完成)的应用统计表明,在喷煤比为 130 kg/t 情况下,单枪寿命可达 50 d,煤枪平均寿命由原来的 18.83 d 提高到现在的 81 d (含修枪),风口磨损率下降了 80 %。

宝钢的双层气冷喷枪(带枪加工制作由常熟喷嘴厂完成)制备出的陶瓷内衬复合弯枪管及其在宝钢 2 号高炉使用 2000 h 后的性能对比情况见表 2。实践证明,在喷煤比达 200~250 kg/t 的情况下,煤枪的平均寿命达到半年,个别的达一年以上,从而为宝钢高炉喷煤技术达世界一流做出了应有的贡献。

表 2 陶瓷内衬复合弯煤枪管使用前后的性能对比
Table 2 Property comparison of curved ceramic-lined composite gun pipes used before and after using

	抗压溃强度/ MPa	抗压剪强度/ MPa	陶瓷层硬度/ HV _{0.2}	陶瓷层孔隙率/ %	陶瓷层壁厚/ mm
使用前	340	16.56	1767 ± 321	2.5	1.25
使用后	364	30.50	1776 ± 270	2.2	1.23

从表 2 看出,使用前后的陶瓷内衬复合弯枪管其他性能变化不大,唯有弯枪管的抗压剪强度不但没有下降,反而增大了 50 % 左右。这说明陶瓷内衬复合弯枪管在高温恶劣环境中喷煤一段时间后,陶瓷层与钢管基体的结合强度得到较大提高。

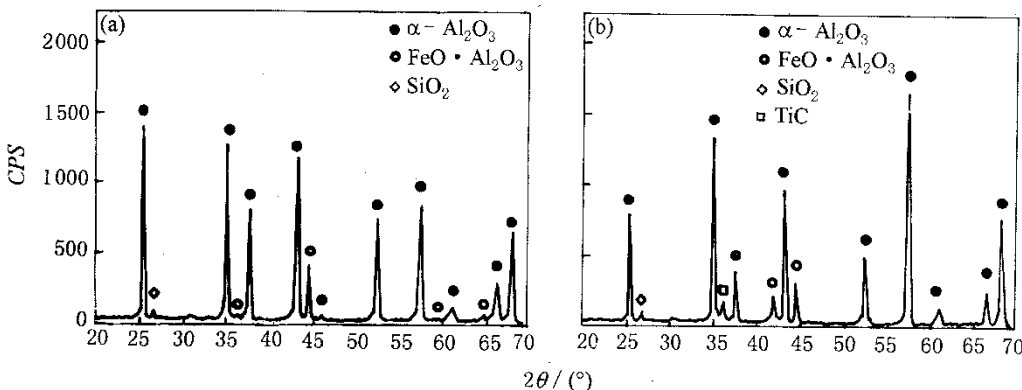


图 3 内衬陶瓷层 X 射线衍射图谱

Fig.3 X-ray diffraction patterns for lined ceramics layers

(a)使用前 (b)使用后

宝钢炼铁厂所用复合弯枪使用前后的内衬陶瓷层 X 射线衍射分析表明,在使用后的复合弯枪内衬陶瓷层中,除存在原有的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 基体相、 $\text{FeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 尖晶石相及 SiO_2 石英相,还存在着 TiC 相结构,如图 3。对使用前后的内衬陶瓷层显微组织观察,看到两者基体组织形貌大体相同,即在陶瓷层基体上 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 沿钢管径向以枝晶向心略呈平行排列, $\text{FeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 尖晶石构成枝晶晶界, SiO_2 石英相存在于枝晶晶界上。

经对使用前后复合弯枪钢管与陶瓷层界面组织观察,看到使用前的复合弯枪界面结构为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢基体、过渡层和 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 基体,其中金属与陶瓷间界面清晰分明,属于界面结合中结构较简单、稳定性较差的机械结合方式,如图 4(a) 所示。面对于使用后的复合弯枪钢管与陶瓷层界面组织,虽然该界面结构仍为三层结构,但金属与陶瓷的层间界面轮廓已不分明,而且钢基体与陶瓷层间的过渡区宽度有所增加。EPMA 电子探针元素成分分析显示,在过渡区中存在着一些 Ni、Ti 等元素,在界面附近的陶瓷层上也出现了一些 Ti 元素的分

布,同时在界面三层结构基体上均有 C 元素的存在。这说明复合弯枪在长时间的高温喷煤环境下,1Cr18Ni9Ti 基体上的 Ni、Ti 等元素发生了向过渡层甚至陶瓷层的扩散;同时因喷吹煤粉高温裂解使复合弯枪内腔中存在着较大的碳势气氛,而其中部分碳原子也可通过内衬陶瓷层中的某些缺陷(如裂纹和孔洞)发生向过渡层及不锈钢基体的扩散。化学活性较强的 Ti 与 C 元素在金属与陶瓷间界面附近相遇,形成了如 X 射线衍射图谱所示的 TiC 相结构,从而在靠近界面处陶瓷基体上形成了部分 TiC 颗粒增韧的($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$)复相陶瓷,而在界面处金属基体上形成了部分 TiC 颗粒增强的合金。由于在与 Fe、Cr、Ni 等金属的粘接性上 TiC 陶瓷强于 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷,所以对于使用后的复合弯枪,金属与陶瓷的界面结构出现了由机械结合逐渐向扩散结合的过渡,使两者间界面结合表现出界面稳定性较好的扩散型结合方式,从而引起两者的结合强度升高和复合弯枪管的抗压剪强度增大。

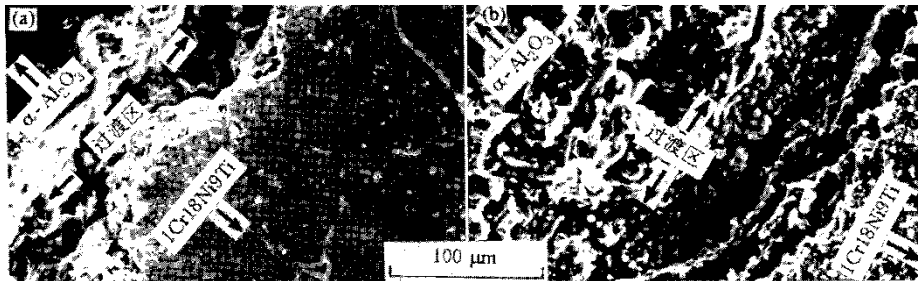


图 4 复合弯枪枪管金属与陶瓷间界面结构组织

Fig.4 Interface structure between metal and ceramics for curved composite gun pipes

(a) 使用前 (b) 使用后

5 展望

近年来,我国高炉大量喷煤技术取得了新进展,一批高炉正努力争取喷煤比达 200 kg/t,并向 250 kg/t 的世界水平迈进。要实现上述目标,大型高炉(大于 2500 m³)喷枪的单枪喷煤负荷应达到 1.5~2 t/h 的能力。为了使如此大量的煤粉燃烧完全,开发富氧喷煤技术,使用高效能氧煤枪又将成为关键。

那时,无论是同心式氧煤枪、缩管式氧煤枪,还是氧枪、煤枪分开的双枪系统,陶瓷内衬复合枪管将因其优良的耐磨损、耐高温、抗氧化性能和长久的寿命而广泛采用。应用自蔓延高温合成技术制造的陶瓷复合弯枪管,在未来大批高炉大喷煤这一我国炼铁系统结构优化的中心环节中必将发挥重要作用。

参 考 文 献

- 1 汤清华,马树涵.高炉喷吹煤粉知识问答.北京:冶金工业出版社,1997,1~10.
- 2 宋阳升主编.高炉富氧喷煤技术的新进展.北京:冶金工业出版社,1995,1~20.
- 3 王建江.中华人民共和国实用新型专利第 288680 号.专利号 ZL97223704.6.
- 4 赵忠民,王建江.重力分离 SHS 法制备陶瓷内衬复合钢管的组织与性能.机械工程材料,1998,22(2):34.
- 5 王建江,王建江. Al_2O_3 陶瓷内衬煤粉喷枪枪管的研制.化工冶金,1998,19(3):266~270.