高炉降料面停炉措施的探讨*

王振山[1],邬虎林[2]

(1. 包头钢铁(集团)有限责任公司,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 肯定高炉降料面并送煤气操作法的先进性,阐明炉内水蒸汽爆震或爆炸形成的机理和防止措施,顺利停炉,做到简便、快速、环保、安全要求。可回收停炉过程中75%以上的煤气,有一定的经济效益。

关键词: 高炉;停炉;降料面
中图分类号: TF548⁺.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2019)05-0001-04
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.05.001

Discussions on Measures of Lowering Charge Level of Blast Furnace for Blowing Out

Wang Zhen-shan[1], *Wu Hu-lin*[2]

(1. *Baotou Iron & Steel (Group) Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In the paper, it is affirmed the operation method of lowering charge level of blast furnace and sending gas is advanced as well as elaborated the formation mechanisms and preventive measures for detonation or blast of vapour in blast furnace to blow out smoothly so that the requirements of simple and convenient, fast, environment friendly and safe are achieved. As a result, over 75% gas in blowing out could be recycled, which is with certain economical benefits.

Key words: blast furnace; blowing out; lowering charge level

1949年新中国成立以来,我国冶金工业迅速发展。2018年,年产钢9.3亿t、铁7.7亿t,居世界第一位。炼铁技术在精料、设备制造、机械化、自动化、大型化、冶炼理论、高炉监测和操作都达到新水平。本文仅对70年来高炉停炉方案进行探讨,并认为随着科技进步和事物本质更深入的认识,会使高炉停炉更科学、安全、可靠。

1 进程回顾

高炉生产一定周期后必将中修或大修。如何在停炉过程中将风口以上容积腾空,曾经历一个探索过程。新中国成立后的上世纪50年代,鞍钢是国内规模最大的钢铁企业,有480~910 m^3不同容积的7座高炉。由于环境限制,当时从前苏联和日本了解的信息有3种不同的停炉方法。一是填充石灰石

* 收稿日期:2019-03-01
作者简介:王振山(1928-),男,江苏省常州市人,正高级工程师,包钢炼铁专家。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

降料面停炉法，通过石灰石分解产生 CO_2 以稀释煤气防爆震。二是降料面同时装入卵石填充，停炉后以人工方式扒出卵石。三是炉顶打水降料面停炉法。经炼铁工作者综合考虑后采用第三种方法。

由于当时的技术水平和设备条件限制，认为降料面过程中发生的煤气是有爆炸性的，不能送入高炉净煤气管网，且一旦发生爆炸，将使荒煤气系统和净煤气系统设备受损。因此在降料面前的预休风时放下重力除尘器的切断阀并在边缘以细沙密封，甚至将总煤气下降管切断，封以盲板。

因没有高压水系统，临时在风口平台上安装2台水泵，一用一备。降料面过程中煤气全部放散，炉顶温度规定300～450 ℃，打水按温度波动时打时停。爆震或爆炸经常发生。曾有炉顶爆发孔炸开或风口区炸开被迫休风处理。

1959年9月包钢1#1 513 m^3 高炉、1960年10月包钢2#1 513 m^3 高炉相继投产。炉台安装2台水泵，水泵压力1.5 MPa，流量150 t/h。上世纪60年代高炉降料面仍沿用鞍钢方法，仅将重力除尘器切断阀关闭封沙，不切断炉顶荒煤气下降管，煤气全部放散。炉顶打水方式改进，在煤气取样孔插入4支水枪使之较好雾化，连续打水，炉顶温度始终控制在350～450 ℃之间。每30 min做煤气全分析一次。配合长探尺断定料线位置。由于炉顶放散阀能力限制，以及噪音过大，停炉初期风量不能太大。这样的停炉，仅发生较小的爆震数次。

科学技术是在设想—试验(实践)—再试验—成功历程中发展的。作者在总结经验及科学分析后得出，降料面过程中发生的煤气并无明显的爆炸性，对煤气中 H_2 含量机理有新的科学分析。较小爆震或由炉墙粘结物脱落、局部炉衬脱落、料柱发生煤气管道或由于打水不均匀所致。

在保证安全的基础上。从1971年起包钢首创采用打水空料面并送煤气法停炉，料线降至炉腰、炉腹交界处切断送煤气，改由炉顶放散。这样可以回收75%以上煤气并用大风量停炉，缩短降料面时间，减少煤气放散对大气的污染。实现简便、快速、环保、安全、经济的停炉要求。上世纪80年代初期，鞍钢来包钢交流经验后采用此方法停炉，随后在全国炼铁系统推广。

2 案例实践

上世纪80年代至今日，随着我国科技进步和设备制造能力的提升，为优化高炉降料面停炉创造了条件，高炉都有配套高压水系统，炉头设有多个雾化喷头，无料钟箱体有冷却水和氮气保护。从炉头、十字测温孔或煤气取样孔插入的水枪雾化较好，分布合理。有机械探尺和雷达探尺，有煤气自动分析仪或人工取煤气样分析仪，有随着料线降低炉顶温度升高的遥控喷水装置，使炉顶温度始终在规定的范围内较小波动，能做到顺利安全停炉。

根据国外发表的文献报道，欧美高炉降料面过程中，除注意防止水汽爆震外，也应防止煤气 H_2 含量过高引起爆震，控制煤气 H_2 含量不大于12%。为此从炉身喷入氮气以稀释煤气 H_2 含量。2006年印度ISPAT公司2 581 m^3 高炉炉身喷入氮气以稀释煤气中 H_2、O_2 含量，最大喷入氮气量约10 000 m^3/h，停炉初期煤气 H_2 含量约6%，料线降至炉身下部使煤气 H_2 含量9%～13%，仍然安全停炉[1]。

现国内一些大型高炉(容积大于2 000 m^3)打水降料面停炉时重点防止水汽爆震(炉身不喷入氮气)，而一些高炉既控制水汽爆震，也从炉身喷入氮气，以稀释煤气 H_2 含量。

2.1 不喷入氮气停炉

(1)昆钢6#高炉(200 m^3)于2007年10月停炉，煤气 H_2 含量为1.5%～2.0%[2]。

(2)唐钢3#高炉(2 560 m^3)于2007年9月停炉，顶温控制在300～500 ℃，当料线降至炉身下部时，煤气 H_2 含量为8%～11%，安全停炉[3]。

(3)包钢4#高炉(2 200 m^3)煤气处理为布袋除尘系统，于2008年4月停炉，顶温控制在400 ℃左右，布袋入口温度小于250 ℃，发生小爆震7次[4]。

(4)包钢3#高炉(2 200 m^3)煤气处理为布袋除尘系统，于2009年4月停炉，料线降至炉身中部时荒煤气管道与布袋箱连接处焊缝开裂，被迫停送煤气，改炉顶放散，发生小爆震数次[5]。

(5)邯钢8#高炉(3 200 m^3)于2011年10月停炉，在料线降至9.5 m前，有较大风量、富氧、喷煤，控制风口前理论燃烧温度2 200～2 300 ℃，料线降至炉身下部时，煤气 H_2 含量升至7.3%，煤气 H_2 含量值大于煤气 CO_2 含量值。料线降至22.66 m，即进入炉腹时，煤气 H_2 含量达12%，控制炉顶温度300～500 ℃，未发生较大爆震[6]。

(6)本钢5#高炉(2 600 m^3)于2011年11月停炉，控制炉顶温度400 ℃左右，煤气 H_2 含量在

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4% ~6% 之间，发生爆震 11 次[7]。

(7) 宝钢不锈钢 2# 高炉(2 500 m^3) 于 2010 年 12 月停炉，煤气 H_2 含量在 3% ~5%，料线降至 19 m时煤气 H_2 含量达 5.9%，然后由于风量减小和打水量减少，煤气 H_2 含量降至小于 3%，安全停炉[8]。

2.2　炉身喷入氮气停炉

(1) 安钢 2# 高炉(2 800 m^3) 于 2016 年 9 月停炉，炉身静压力孔通入氮气[9]。

(2) 梅钢 4# 高炉(3 200 m^3) 于 2016 年 9 月停炉，空料线开始即从风口吹入氮气 10 000 m^3/h，料线降至炉身下部由静压力孔通入氮气 20 000 m^3/h，煤气 H_2 含量在 2.3% ~7.16% 变动，未发生较大爆震[10]。

(3) 邯宝 2# 高炉(3 200 m^3) 于 2017 年 10 月停炉，炉身静压力孔通入氮气，控制炉顶温度在 300 ~350 ℃，不超过 400 ℃，匹配好风量、打水量和炉顶温度的关系。前期富氧 500 m^3/h，料线降至炉身下部接近炉腰时停止富氧和加湿，以减少煤气中 H_2 含量，认为煤气中 H_2 含量不大于 6%，否则应采取降低风量、风温、打水量。当料线降至炉腰以下，如大于 12%、顶压频繁波动时应停止回收煤气。实际停炉过程中煤气中 H_2 含量一直保持在 5% ~9% 较高水平[11]。

3　煤气中 H_2 含量与发生爆震关系

凡含 CO、H_2、CH_4(其它如 C_2H_6、C_3H_8、C_4H_{10}、C_2H_4、C_3H_6、C_4H_8、C_2H_2、C_3H_4、C_4H_6) 等气体，因其发热值高、着火点较低等因素，在与空气混合且处于密闭容器内，混合比例达到一定程度时，将发生爆炸，即所谓可燃性气体的爆炸。为此，控制 O_2 进入可燃气体是保证安全的首要任务。炼焦时发生的焦炉煤气出口温度大于 1 000 ℃，H_2 含量 35% ~40%，CH_4 含量 45% ~50%，CO 含量 6% ~8%，在密封的管道中输送或储存于煤气塔内仍然是安全的，水煤气中 H_2 含量大于 12%(为保持炉膛温度，间断送空气或送氧气，二者煤气 H_2 含量有较大波动)。早期年代独立的炼钢厂用于平炉炼钢也是安全的。在高炉休风时，防止炉顶产生负压，即以通蒸汽和调整放散阀开度，或在坐料、大崩料时炉顶易产生负压，也可以开送蒸汽充压。

高炉正常生产时煤气中 H_2 含量约 0.5% ~1.5%，湿度较大或无烟煤—烟煤混合喷吹时煤气中 H_2 含量处于上限。

(1) 水是不可燃物，即使处于高温状态无催化剂时也难于分解产生 H_2、O_2，而在高炉内遇到高温含碳物(焦炭) 时即发生化学反应。

$$C + H_2O = CO + H_2$$

这是一个吸热反应，温度升高，反应平衡常数增大，当温度大于 500 ℃时，反应明显进行。钢铁冶炼本身是化学工程的一个支脉，高炉冶炼过程是聚集化学反应物理行为的综合产物。

降料面过程中上升煤气流是高温且携带粉尘的，粉尘有碳元素，当煤气温度大于 500 ℃后，水蒸汽便分解成 CO、H_2，料线俞深，温度俞高，煤气粉尘中矿物质减少，微小炭粒增多，碳—水反应加强，使煤气中 H_2 含量很快增加，通常可达到 4% ~6% 的水平。

(2) 降料面过程中最理想的是某一时刻的煤气热焓量(超过炉顶温度规定以上部分) 完全汽化，达到平衡状态。如在规定的炉顶温度下有一部分 H_2O 未及时汽化而落到温度大于 1 000 ℃的料面上，C、H_2O 剧烈反应，生成 CO、H_2，煤气量大幅增加，煤气中 H_2 含量上升至 7% ~9% 或更高。

分析多次停炉数据可知，如在一定风量下，炉顶温度较高，在 400 ~500 ℃，煤气中 H_2 含量一般在 5% 左右，说明喷水量合适或仅有少量水落到料面上。如炉顶温度较低，在 300 ℃左右，煤气中 H_2 含量较高，可达 7% ~9%，说明打水量多，有较多的水落到料面上，此时应及时减少打水量。如炉顶温度较高，在 450 ~500 ℃，煤气中 H_2 含量升高到 8% 以上，此时应减小风量，降低风温，同时减少打水量，实现新的平衡状态。

(3) 煤气中 H_2 含量较高，就定性来说，有稍微增加煤气爆炸的潜在性，但依然是安全的。国外规定煤气中 H_2 含量不大于 12%。国内部分企业规定煤气 H_2 含量不大于 6% 或 8% 是缺乏科学依据的。在炉身通入氮气以稀释煤气中 H_2 含量的作用是很有限的。经计算，如当时风量 3 000 m^3/min，即煤气量约 3 600 m^3/min，炉身若喷入氮气量 20 000 m^3/h，每分钟仅 330 m^3，若煤气 H_2 含量为 8%，经稀释后 H_2 含量仅降低 9%，煤气中 H_2 含量仍然保持 7.2% 水平，相反消耗了大量的氮气，增加了停炉成本。

4　重视水汽爆震的危害性

总结多次停炉经验，作者在上世纪 70 年代就从

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

科学理论上认定停炉过程中发生的爆震或爆炸主要由瞬间大量水变成蒸汽造成的。马钢凌绍业同志在1983年发表的文献中持同样的观点,并详述了水汽爆炸的形成和防止措施[12]。

停炉时发生的水汽爆炸与当时喷入过量的水密切相关,过量的水加入之前,必然是前面缺水,以致顶温超过设定上限,煤气储备较大的热焓,过量的水加入后即刻产生大量蒸汽,煤气体积极速增加,瞬间炉内压力升高。未能汽化的水落到1 000 ℃以上高温的料面,迅速汽化,煤气量快速增加。同时料面上的水发生C、H_2O化学反应生成2倍体积的CO、H_2,当上述情况同时发生时,瞬间煤气体积数十倍增加,在有限的空间中,必然引起爆震或爆炸。

水汽爆炸的实质就是以水为介质,将煤气热能转化为气体做膨胀功的过程。爆炸的必要条件是能量储备和瞬时释放,爆炸的破坏力取决于其功率大小,而功率与功的大小成正比,与做工所耗时间成反比。如集中尽可能多的能量,释放时间最短,其爆炸力最大。凌绍业根据热力学公式计算,每千克水产生的水汽爆炸时最大的能量相当于0.35 kg TNT炸药。20世纪70年代,马钢2#高炉停炉时发生爆炸,致高炉拦腰炸断;20纪90年代,酒钢1#高炉爆炸,致高炉整体倒塌,这都是水汽爆炸造成的。

实践证明,水汽爆炸是可控的。炼铁工作者应把注意力从煤气中H_2含量控制重点转移至控水上来。同时控制水量和控制煤气中H_2含量又是密切相关的,控制水量做好了,煤气中H_2含量一定不会太高。

(1)规定合适的炉顶温度,以保证炉顶设备安全,又能满足荒煤气系统如布袋除尘器入口温度低于250 ℃。较高的顶温能缩小不同料线下不同煤气温度与炉温间的温差,这样可减少打水量。一般维持在350~500 ℃较好。如有必要可在重力除尘器后安装热交换器降温。有些高炉重力除尘器后安装了旋风除尘器,可以进一步降温。

(2)完善供水系统,能连续打水,水量能计量,且能灵活遥控。喷水的水枪沿圆周方向均匀安装多支,枪上孔多而小,以利于雾化。

(3)按料面温度不同分阶段控制打水量。超过规定顶温500 ℃、700 ℃、900 ℃以上,事先计算该段温度煤气量和热焓,设定相应的打水量。使顶温控制在400~450 ℃,以免过量的水落到高温料面。

(4)降料线前应停止富氧、喷煤、加湿等操作。料线降至15 m后可降风温至900 ℃,以降低煤气温度,此时风口前理论燃烧温度仍可大于2 100 ℃,对炉缸温度并无影响。

(5)料线降至炉身下部时必须控制热源,即风量和风温。控制风量即控制了煤气发生量,相应调节打水量。煤气发生量减少,热流强度低,以保证深料线下操作安全。

(6)精准掌握料面水平,及时关闭重力除尘器的切断阀,改为炉顶煤气放散,以免煤气中O_2含量过高进入煤气系统。

5 结论

(1)停炉前调整好高炉的送风制度、热制度、造渣制度,炉况呈现顺行状态。

(2)有关停炉降料面的项目一定要落实做好。如设备的运行,煤气系统、送风系统、喷水系统、监测系统、炉前工作等保证安全可靠。

(3)正确的掌握好顶温水平,处理好风量、风温、煤气温度和打水量的关系。使煤气量的热焓和打水量的吸热达到基本平衡。水在料面以上的空间内完全汽化。如果过量的水落至高温料面上,将剧烈汽化同时产生C、H_2O化学反应,煤气体积瞬间剧烈膨胀,从而引发爆震或爆炸。

(4)从炉身静压力孔向炉内喷一定量的氮气,对防止煤气爆震或爆炸效果甚微,且浪费了资源,增加了炼铁成本。对此措施不予支持。

(5)料线降至炉腰与炉腹交界水平,由送煤气改为炉顶放散。最后一次铁水空出炉缸容积,最好与风口水平以上未燃烧焦炭容积相适应。这样铁后休风剩余焦炭落于风口水平以下,可减轻扒料工作量。

参 考 文 献

[1] 青格勒,钱世荣. 印度ISPAT公司2 581 m^3高炉降料面操作实践[J]. 炼铁,2008,27(1):24-27.

[2] 董建坤. 昆钢6#高炉降料线操作实践[J]. 炼铁,2009,28(2):28-30.

[3] 董国强,杨晓韬,徐艳丽,等. 唐钢3#2 560 m^3高炉大修停炉实践[J]. 炼铁,2008,27(4):28-30.

[4] 闫风,季文东,汪进刚. 包钢4号高炉降料线实践[J]. 包钢科技,2009,35(4):58-60.

(下转第67页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

置对正后，可保证良好的安装位置。

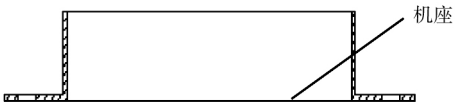
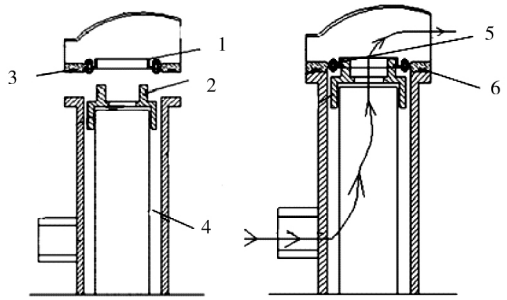


图 2　机油滤清器改造用套筒结构

滤清器回装时，滤清器前盖上安装的套筒会套在滤芯上座的外部，因为套筒的内径略大于滤芯上座的外径，而滤芯上座上加工的两道环槽内又装有两道凸出量为 0.5 mm 的橡胶 O 型圈，所以套筒与橡胶 O 型圈安装后，由于滤芯上座 O 型圈的压缩，使套筒与滤芯上座之间形成过盈配合。滤清器回装完成后，套筒与 O 型圈就在滤清器前盖与滤芯上座之间形成了一条环形密封带，这样就使得机油不能再通过滤清器前盖与滤芯上座之间的间隙直接从滤芯外腔到达滤清器出油口。此时进入滤清器的机油就必须经过滤芯的过滤，杂质被隔离在滤芯的外腔，清洁的机油从滤芯内腔向上流至出油口见图 3。



1 – 套筒；2 – O 型圈；3 – 密封圈；4 – 滤芯；
5 – 密封面(1)；6 – 密封面(2)

图 3　机油滤清器改造后结构

5　结束语

通过对滤清器设计缺陷的研究改造，在滤清器前盖与滤芯上座之间的安装套筒，形成了完善的机油过滤系统，有效解决了机油过滤效果不良导致的机油不清洁、脏污、机械杂质过多等问题，使机油的使用周期有效的增长，同时，减少了因润滑不良造成的柴油机故障，减少了柴油机整修台次及频率，节约了人力物力经济和社会效益显著，为机车的正常运行提供了保障。

参　考　文　献

[1] 李晓村. 内燃机车总体 [M]. 北京: 中国铁道出版社，2009.
[2] 王连森. 内燃机车检修 [M]. 北京: 中国铁道出版社，2009.
[3] 李人宪. 车用柴油机 [M]. 北京: 中国铁道出版社，2010.
[4] 刘洪斌. 东风 4 型内燃机车柴油机试验台监控系统的研制 [D]. 大连: 大连交通大学，2007.
[5] 李晓村. 内燃机车柴油机 [M]. 北京: 中国铁道出版社，2010.

(上接第 4 页)

[5] 钟金香，王利廷，贾西明，等. 包钢 3 号高炉干法除尘降料面操作实践 [J]. 炼铁，2009，28(6)：35 – 37.
[6] 李世杰，杨占海，侯健，等. 邯钢 8 号高炉快速停炉降料面实践 [J]. 炼铁，2012，31(4)：48 – 50.
[7] 高慧斌，杨丽霞. 本钢 5 号高炉降料线停炉操作实践 [J]. 炼铁，2014，33(1)：59 – 61.
[8] 储滨，张振伟，唐培华，等. 宝钢不锈钢 2 号高炉空料面停炉操作实践 [J]. 炼铁，2011，30(3)：46 – 48.
[9] 牛卫军，牛群，程树森. 安钢 2 号高炉空料线停炉操作实践 [J]. 炼铁，2017，36(3)：51 – 54.
[10] 董跃玲. 梅钢 4 号高炉空料线停炉操作实践 [J]. 炼铁，2017，36(6)：50 – 53.
[11] 赵永平，王永林. 邯宝 2 号高炉环保停炉操作 [J]. 炼铁，2018，37(3)：37 – 39.
[12] 凌绍业. 停炉的爆炸与防止 [J]. 炼铁，1983，(3)：61 – 65.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net