首钢一号高炉基本制度的探讨

张思斌　霍吉祥
（首钢总公司　北京　100043）

摘　要　首钢一号高炉根据自身炉型特点，不同时期的炉料质量变化，逐渐掌握了矮胖高炉煤气分布规律，并通过装料与送风制度的有机结合对煤气分布进行有效控制，使高炉顺行状况得以改善，综合燃耗降低，05年各项技术经济指标大幅攀升。

关键词　高炉　煤气分布　上下部调剂　煤气利用率

1　引言

首钢一号高炉是上世纪90年代高炉向矮胖型发展的一个特例，2500m^3 中1.985的高径比堪称世界之最，矮胖高炉的优缺点表现尤为突出。从炉料与煤气相对运动的力学观点出发，该炉型易于接受以高风量为主的强化冶炼措施。由于降低了固体料柱高度，整体压差低，为提高矿焦比创造了一定条件，同时受软熔带以上间接还原区变窄影响，燃料消耗相应增加，炉温不易控制，炉况稳定性稍差。而偏小的炉身、炉腹角，使炉腰、炉身下部受上升煤气流冲刷侵蚀加快。

2　矮胖型高炉易形成边缘重、中心轻的原因分析

高炉解刨中已得到证实，虽然炉料下降过程层状结构保持不变，但堆角趋向平坦，到炉身下部堆角可降至10°以下。原因之一就是高炉自上而下的横截面积逐渐扩大，料层在软熔前发生横向位移填充增加的空间，尤其是炉身角偏小的矮胖型高炉，炉料体积的膨胀远远低于高炉体积的增加，致使在炉身下部焦层更薄，而矿石距离炉墙越近，边缘矿焦比增加越快，煤气阻力加大，形成边缘重、中心轻的煤气分布。因此，找到不同炉型合理的堆尖位置对于控制煤气分布至关重要。

3　一高炉煤气分布与近年来出现的三种变异

因料柱阻损小，一定风速动能下相同布料制度会呈现与瘦高炉型不同的煤气分布，长期以来围绕不同原料质量下如何进行上下部调剂结合，合理搭配两条煤气通路摸索出一套系统规律，解决了降低燃耗与高产顺行的矛盾，从而最大限度挖掘与炉料质量相匹配的技术经济指标。

表1　历史指标

	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年
焦比 Kg/T	374.9	372.2	351	408.5	449	360
煤比 Kg/T	112.1	134.6	147.1	87.3	58.9	114
燃料比 Kg/T	505.3	528.2	519.6	517.3	524.2	496

3.1　边缘相对稳定、中心气流发展

2002年初焦炭质量大幅提高，年平均灰分12.25%，炉内压差低，风量水平高，实际风速263 m/s，鼓风动能达到130.50KJ/s，炉缸活跃，上半年焦比达到331Kg/T，煤比157Kg/T，焦炭改善后的初期煤气逐步演化为中心过吹，顶温高，煤气利用率无法满足重负荷低焦比的需求，综合燃料比上升，炉温不足，采用小角度增加矿石比例抑制中心取得良好效果，焦比由333 Kg/T降至319Kg/T，综合燃料比降低6 Kg/T，顶温、风

压稳定性显著增强(表2)。统计数据表明,边缘稳定时中心煤气值的轻重与煤气利用率有很好的对应关系(图2)。

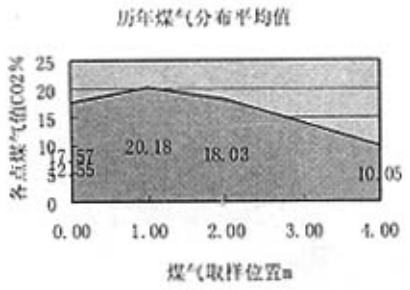

图1 00－05年各点煤气均值分布形态

注:煤气取样机1至5点与炉墙径向距离分别为0.08m,0.644m,1.276m,2.69m,4.214m。

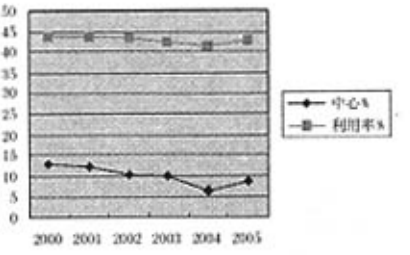

图2 中心煤气与利用率对比

注:利用率人工分析低于自动分析约6个百分点。

表2 煤气调整前后参数变化

时间	2001年12.17	2002年01.05	2002年03.09
布料角度	27°30°27°/4 3 3	27°30°27°/4 2 4	27°30°27°/4 1 4
煤气利用%	43.6	43.3	43.9
炉温[Si]%	0.41	0.44	0.40
焦比Kg/T	333	332降至326	319
燃料比Kg/T	503	升至512后降至503	497

3.2 边缘不稳、中心不开

2003－2004年焦炭质量劣化,平均灰分12.90%以上,M_{40}降至79.5%,占入炉焦炭量60%的外购焦反应后强度仅有58.0%,炉内压差高,透气性恶化,全风率低,吃风吃热能力不足,为适应压量关系,长期低炉温冶炼,炉缸工作不活。集中表现为顶温死,不接受提温措施,铁温低,脱硫效果差,频繁损坏风口,且停风时灌渣灌铁,以至04年初退全焦进行炉况治理。究其原因在于使用劣质焦炭后,中心焦柱的透气透液性变差,未能采取有效措施对中心进行引导,加上炉缸长期亏热,频繁慢、休风,造成炉芯温度低,炉缸死焦堆增大。治理初期一味敞开边缘以换取风量的调整未能考虑到此时的炉缸状态已无法接受正常的风速动能。因风口前端回旋区产生畸变,初始煤气分布紊乱,边缘气流不稳,时而咬坏风口前端下部,炉况进入恶性循环。后期的治理中明确调整方向,矿角外移,中心边缘增加焦炭环数,以打开中心为主,辅以疏导边缘,在减轻焦炭负荷,做好炉温的基础上,逐步提高风量,随炉缸活跃程度提高,风速由初期的220 m/s提高到正常的260 m/s,炉况恢复正常水平。值得借鉴的是焦炭质量退步时,保持中心开及稳定通畅的边缘煤气对于高炉顺行尤显重要。图3反映了2004年初开始治理炉况后对两道煤气的调整结果。

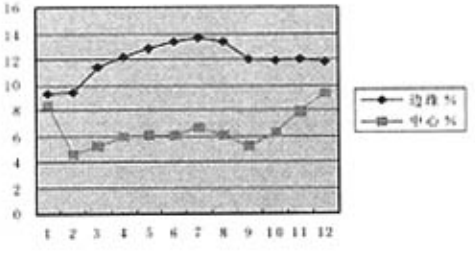

图3 2004年第1.5点煤气趋势

3.3 边缘重,中心轻,两道煤气搭配失衡

05年二季度从抓入炉原料源头着手,提高焦炭采购标准,大力推广高效率筛分设施,平均筛下物提高15%,块状带透气性明显改善。为扩大矿批、改善稳定性、提高煤气利用及加重焦炭负荷进行试探性调整,矿石角度由29°32°29°/3 3 3分三次外扬到30°33°30°/3 4 3,意图进一步打开中心,以利扩大矿批。随调整的推进,中心CO_2值快速降低,边缘值升高,炉喉摄像呈现很强的中心火盆,顶温高且呈锯齿形态,料尺工作快慢不均,透气性指数在高水平下波动,转热过程风口损坏,综合负荷明显减轻,炉墙热负荷降低。矿石批重由52吨提高到56吨过程中,平均班强度减少6批料,日产损失210吨,而瓦斯灰量增加2.5 Kg/T,铁水温度下降8℃,综合数据表明煤气利用率未增反降。因未达预期效果,被迫缩小矿批以维持小时料速,同时矿角缩

回并适当增加边缘煤气通路、控制中心，各项参数趋于正常。顺行状态改善后，采用矿石双向摊开，合理搭建焦炭平台，适当控制两头煤气，尤其是提高第2、4点CO_2值，使煤气搭配相对均衡，获得了很好的煤气利用率。相同焦炭负荷下，煤比降低，铁温升高，矿批逐渐扩大到59.5吨。高炉利用系数提高0.17，焦比降低45 Kg/T。此过程中第1、5点CO_2值分别上升1.2%、0.5%，未影响顺行。

4 不同原料的煤气分布控制

4.1 焦炭冷热强度

高炉强化过程中，焦炭的骨架作用愈为突出，冷热强度的高低直接影响高炉压差及气流分布。四年来，钢铁市场的发展变化直接导致了首钢焦炭的波动。不同焦炭下的装料制度亦不尽相同，但调整原则始终不变，即运用灵活的布料达到全风、炉缸活跃、降低消耗。实践中发现，焦炭强度低时，不仅整体压差升高，还易造成局部边缘气流不稳，炉缸周向工作不均，顶温偏差增大，墙温波动大，频繁出现渣皮脱落。长此以往，炉芯焦柱透气透液性降低，传质传热能力不足，看似单纯的边缘气流，但如不对中心加以疏导势必引起炉况波动。04年通过风口取样机分析，自风口前端向炉芯延伸，大于10mm的焦炭比例逐步减小，小于10mm的焦炭比例从风口前0.5m处开始急剧上升，回旋区末端至2.5m范围内则存在大量-2.5mm粉焦，这与焦碳热强度低密切相关，同时也揭示了中心堵塞的原因。按已取得的经验，此时布料是以打开中心为主，辅以疏导边缘。具体措施是在缩小矿批的同时，减少矿石环位，增加两头焦炭量，尤其是中心焦炭环数，换取全风和顺行。焦炭强度高时，抓住影响煤气利用的主要矛盾，力争扩大横断面矿石与上升煤气的接触面，压缩边缘与中心通路面积，在保证煤气通路的前提下，最大限度改善矿石预还原。生产实际中，根据煤气分布的轻重趋向，矿石针对性地铺开，减薄边缘中心焦层厚度，加厚矿带焦层，维持焦窗良好的透气性，并不失时机地扩大矿批，进一步提高利用率和稳定性。

表3 焦碳成份

焦碳成份	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年
水分%	6.0	6.2	6.1	8.0	7.7	6.9
灰分%	12.21	12.23	12.25	12.90	12.96	12.85
M_{40}%	89.3	82.3	81.1	79.5	79.9	80.4
CSR%外购	63.2	63.5	65.7	60.2	58.0	61.96

表4 焦炭反应后强度降低后风口带焦炭粒度变化

时间		>80mm	80-60mm	60-40mm	40-30mm	30-20mm	20-10mm	<10mm
2002年	入炉	10.63	32.3	38.86	13.76	3.51	1.16	
	风口		16.27	32.63	20.03	17.27	8.09	5.70
2003年	入炉	9.39	29.64	41.53	13.18	4.72	1.54	
	风口		9.69	22.47	15.86	22.91	15.86	13.22

注：此数据来自更换冷却设备时风口塌落焦炭。

4.2 矿石粒度与低温还原粉化率

文献指出透气性指标 软熔层：矿石层：焦炭层=1:4:52，高炉中矿石是可控制气流走向最直观的方法。而矿石在炉内对煤气的阻损取决于粒度分布、孔隙度大小和在块状带的爆裂粉化程度。几次矿石粒度-10mm达到20%以上，或低温还原粉化率高于40%时，压差明显升高，顶温低窄，料速加快，减压后透气性指数无明显好转。入炉粉末的增多引起边缘自动加重，采用缩小矿批、减轻焦炭负荷、疏导边缘煤气的方法，可达到改善顺行的效果。资料介绍国外高炉的解刨与模型试验曾提出在冶炼强度或炉喉平均气流速度超过一定范围后，加在边缘的矿石对煤气流会产生很强的抑制作用，也可能引起中心焦炭的先行流化。因此，当矿料质量劣化时要高度重视粉末效应带来的不良后果。2005年以来，首钢通过改造矿筛、烧结矿喷洒CaCl2技术，入炉结矿小于5mm已低于3%，低温还原粉化率降至35%以下，矿料对顺行的破坏明显减弱，使布料制度有条件向多环位、大批重发展。

表 5　结矿指标

		$RDI_{+6.3}$%	$RDI_{+6.3}$%	$RDI_{-3.15}$%	5－10mm%	＜5mm%
自产烧结矿	2004	29.24	59.46	40.60	14.40	1.93
	2005	42.35	67.56	32.44	13.16	1.62
矿山烧结矿	2004	35.69	66.66	33.37	25.40	13.06
	2005	43.42	70.37	29.63	20.67	10.64

4.3　合理运用矿批

矿批的使用仅是上部装料制度的一部分，不可做为调整目的，它是服务于顺行、指标的灵活手段。研究表明，大矿批须有足够大的炉喉直径、精料做保证。一高炉矿批随原料变化在 50 吨－60 吨之间波动，原料条件恶化时，小矿批适应，改善时，大矿批提高稳定性。实际操作中，并非具备两个必要条件后即可任意扩大批重，尚需兼顾炉缸工作状态、风量水平、煤气分布等诸多因素。武钢专家樊哲宽强调，较大的鼓风动能可以用较大的批重与之适应，这一点与精料下炉缸相应活跃、鼓风动能自然提高是一致的。而煤气的合理搭配将直接影响矿批使用效果。以 2005 年为例，批重并不是越大越改善煤气利用，当扩大批重同时加重两头煤气时，可以起到提高利用率的作用，当因矿石落点问题引起煤气分布失衡，无论哪边过重或过轻，扩大矿批将加剧失衡状态，煤气利用进一步破坏。均衡煤气分布下依靠增大批重单纯控制单方向煤气是无效的。

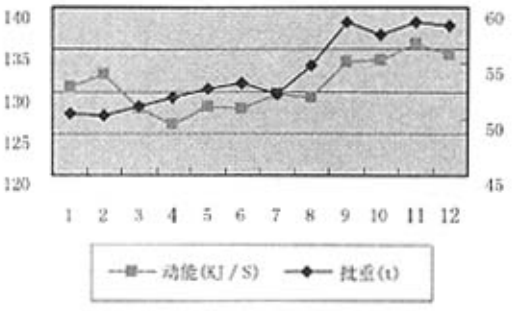

图 4　2005 年批重－动能图

4.4　对一高炉煤气形态的讨论

理论界普遍认可的四种典型煤气分布分为边缘发展型、双峰型、中心发展型、平坦型。随高炉大型化、精料化，边缘发展型业已淘汰。平坦式因对原料条件极为苛刻的要求，世界范围内也仅是理想化的追求目标。以对原料条件精度要求程度区分，双峰型和中心发展型更适于国内现有条件，而真正能够长期满足中心发展型原料结构的企业也属凤毛麟角。基于此，首钢一号高炉结合炉型与原料条件，形成双峰式煤气分布在实际应用中更显合理。做为一种弹性很强的煤气形态，依据不同时期的原料质量与炉况需求，通过灵活控制径向各点 CO_2 值，使其分布在双峰型与近似中心发展型之间过渡转换，料面形状向“平台－V 型”靠拢。调整上遵循先顺行后降耗的原则，即料差时不盲目追求煤气利用率，料好时改善间接还原降低综合消耗。实际操作中，关键在于控制双峰面积和谷值高低，这一点直接影响顺行水平与煤气利用(图 5)。双峰面积增大意味着横截面气、固接触良好，面积小则利于两道煤气发展，为顺行创造条件。细节上要重视边缘与中心的搭配，为保证炉缸的长期活跃，中心值低于边缘值 2%～4%是合理的，但要防止出现翘翘板现象，即中心愈来愈轻，边缘愈来愈重。降耗过程中往往希望在 1、5 点不增加的同时得到较高的 2、3、4 点，这是不现实的，由于炉料与煤气的逆向运动，不同条件下堆角平坦程度无法控制，不影响顺行下适当加重边缘和中心值是允许的，但要力争形成两道窄而强的通路，同时要考虑 CO_2 值是随负荷加重自然提高的，切忌轻负荷下过分追求过高的煤气利用。一炉炉喉摄像证实，当圆周呈均匀光带，中心火柱粗大时综合消耗高，圆周呈均匀窄带光环，中心火柱相对细高有力时，即有顺行又有很好的煤气利用。

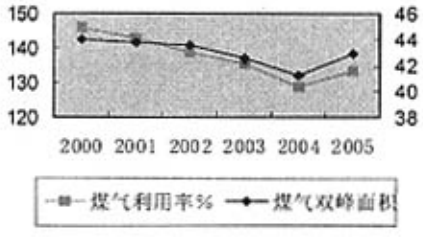

图 5　2000－2005 年煤气双峰面积与煤气利用率的对应关系

5　布料设备对煤气的影响

5.1　倒罐与倒转

一炉炉顶料罐为并罐式双料罐。首钢专家 80 年代就指出，从料管流出的炉料沿对侧中心喉管壁滑落，

料流落点在溜槽上形成椭圆形轨迹，导致炉料圆周分布不均。生产中倒罐前后顶温形态、料尺深浅变化明显，周期性规律很强，由于煤气出路的突然转换，炉内压力波动加大，如遇顺行基础欠缺时，倒罐还会造成压力突然冒尖或料尺呆滞。长期以来，为减少溜槽倒转、倒罐对压量关系的影响次数，分别将周期延长为200批、80批，但始终无法从根本上解决料面偏析问题。2004年5月溜槽的正反转缩短为理论最小周期1.5批，倒罐缩短为半个冶炼周期20批，影响幅度大为降低。

5.2 节流阀γ角及溜槽α角精度

首钢一高炉节流阀板已使用11年，磨损严重，漏料问题不仅减短了下密胶圈寿命周期，更使布料圈数产生较大偏差。由于γ角开度将按自动程序根据上一次料空时间进行1°自学习，而漏料量不固定或炉料粒度频繁变化总使布料时间超出正常偏差范围，最后一圈非多即少。为解决此问题，利用每次例休对阀板补焊、改变γ角自学习工艺中的时间计算，使布料稳定性好转。2005年11月更换了阀板，并计划缩小γ角调整幅度到0.5°，以应对原料粒度的不稳定。在控制径向炉料落点方面，2005年4月将α角精度由0.5°提升到0.25°，布料准确性明显改善。

6 送风制度对煤气分布的影响

6.1 静动态下料面形状不同

早在50年代开始，国内炼铁界即相继提出上下部调剂相结合的论点。多年实践证明煤气分布乃至炉喉料面形状是上部布料与下部送风双重作用的结果。首钢一高炉实测发现，相同布料角度下，静、动态的料面分布差异巨大，不同风速、动能下料面形状亦有区别。历次喷涂后的原始料面与正常运转下的料面形态并无严格的可比性，但存在一定的基本规律，即静态布料的堆尖明显靠近中心部位，且易形成倾角约30°的富士山形料面，中心高、边沿低。正常生产后，堆尖逐步向外推移，演化为径向距炉墙近2m、稍有坡度的环形平台，而中心则为直径约2.5m的凹斗(图6)，与煤气分布形态基本吻合。

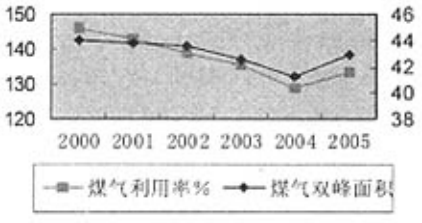

图6 动静态料面示意图

6.2 下部参数引起的煤气分布演变

一高炉风口配置为28×Φ130mm+2×Φ120mm，下斜3°，风量规范5100±50m³/min，顶压1.96Kg/cm²，随原料条件、负荷、煤比水平的变化，风速动能不同，二者控制范围分别为255－275m/s、125－140KJ/s，理论燃烧温度2050℃以上，操作中要求全风全风温，以保持良好的炉缸工作状态。当炉料改善，煤比增加到130Kg/T时，风速动能达到上限，中心气流发展，综合燃料比上升，高炉利用系数降低，适当采取抑制中心的上部调整，消除因煤气搭配失衡造成的能量损失。而长期风速动能处于下限时，则要密切关注十字测温的中心温度，必要时进行中心疏导，力争维持600－800℃。高炉由低风速向高风速缓慢过渡过程中，煤气流速增大，一方面要适时配置合理顶压加以控制，另一方面要防止炉顶煤气速度增加后引起的中心焦层膨胀，中心矿焦比降低，否则一旦形成固定通路，矿石向中心的移动将受到明显限制，因此必须及时进行上部调剂与之配合。

6.3 煤比变化中的煤气控制

喷煤对高炉气体运动状况的影响体现在煤气流分布的变化上。一高炉长期喷吹阳泉煤，固定碳81.8%，灰分9.5%，生产实践与理论计算都表明，随煤粉量增加，由煤燃烧所形成的煤气增加量超过焦炭燃烧和直接还原产生的煤气减少量，而煤气体积的膨胀必然引起气流阻损增加，采取两条通路利于缓解压差的升高。2005年以来在提高煤比的过程中，为保证风口前端煤粉的燃烧率，风温达到极限水平1175℃，适当富氧0.6%，煤比接近130Kg/T时，理燃仍可维持2050℃以上，基本满足煤粉燃烧率的要求。高燃烧率后的气流穿透能力增强，反映在实际中是中心气流得到发展，中心温度达到750℃以上。而进一步增加煤比，或煤粉在风口回旋区燃烧的比率增加后对边缘、中心气流的变化规律尚待进一步探讨。

7 结语

(1)矮胖型高炉经过有效煤气控制可以达到高产低耗目的；

(2)煤气形态的调整应同步于炉料与送风制度的改变；

(3)改善煤气利用不可与加重焦炭负荷发生冲突，不同焦炭负荷存在与之匹配的煤气利用率；

(4)矮胖型高炉在焦炭改善后中心煤气易于发展；

(5)下部送风制度的调整会引起料面形状与气流分布的变异；

参考文献：

1. 樊哲宽，高炉风口鼓风动能问题的研究，中国炼铁三十年，1978
2. 杨永宜，高炉内煤气分布和炉料运动研究的新进展，炼铁，1983，No.1
3. 刘云彩，高炉布料规律
4. 王国雄等，现代高炉粉煤喷吹
5. 由文泉，实用高炉炼铁技术

作者：张思斌　首钢炼铁厂一高炉　高级工程师　联系电话 010－88291621

(上接第 327 页)

表 2　高炉技经指标

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
系数	2.863	3.553	3.553	3.627	3.606	3.446	3.303	3.535	3.608	3.751
综合焦比	559.36	540	525.37	522.10	515.1	517.04	523.95	514.66	508.34	509.64
煤比	0	33.48	84.39	104.49	137.56	130.78	101.79	123.19	123.08	131.62
焦丁	0	0	0	0	11.27	19.73	30.84	32.01	35.83	24.23

认识了该高炉的症结所在，摸索出了适合该炉的基本操作制度，确定了“高顶压快速回风操作法”，解决了大型模块高炉炉况恢复难的问题。为我炉经济技术指标的优化打下了坚实的基础。