



煤 粉 燃 料 在 炼 铁 方 面 的 应 用

赠阅

首 钢 设 计 院
石 钢 研 所

一 九 七 七 年

TF 538.6
3

目 录

前 言.....	1
第一章 降低焦炭消耗的途径.....	1
第二章 喷吹煤粉配合使用天然气的理论根据.....	11
第三章 煤粉燃料的使用试验.....	33
第四章 高炉喷吹与制备煤粉设备的研究和改进.....	54
第五章 高炉喷煤粉过程的检测与自动化.....	84
附：液力——气力输送工程计算方法.....	104

1752/28



A793825

煤粉燃料在炼铁方面的应用

前 言

综合喷吹，包括提高风温至1300—1500℃，富氧鼓风（富氧量至35—40%），增加辅助燃料重油、天然气的用量等，是进一步提高炼铁效率的有效途径之一。目前，为广泛利用煤粉燃料展现了广阔的前景。这主要是由于冶金焦的缺乏，其价值和需要量的增长，以及煤粉燃料的利用效率不断提高，而且顿巴斯具有大储量适合于高炉喷吹用煤等原因所造成的。

实践证明，喷吹煤粉与使用重油和天然气不同，它不引起高炉炉缸温度的明显变化，不增加炉缸气体量，因此可以代替相当一部分焦炭（在风口区域燃烧200公斤煤粉/每吨生铁，可代替30—40%焦炭）。

在供煤线的耐磨性显著提高并掌握了风力送粉器，通过风口和直风管向高炉喷煤的方法、连续控制通过风口的送煤量和设备自动化以后，建立喷煤粉可靠工艺设备的任务已经解决。掌握向炉缸喷吹天然气和煤粉时的炼铁工艺是最困难的任务。

长期工业性试验的结果，证实了所制订工艺具有很高的经济效益。在进行工作时，参考了苏联国内外工厂和研究单位在掌握喷煤粉炼铁工艺方面的经验。

参加在顿涅茨冶金厂建立炉缸喷煤粉装置和掌握喷煤粉时高炉炼铁工艺工作的有：顿涅茨黑色冶金科学研究所（顿涅茨克城）、钢铁工厂设计院（哈尔科夫城）、乌拉尔黑色冶金工业动力托拉斯、乌克兰黑色冶金工业动力托拉斯（哈尔科夫）、东南黑色冶金工业动力托拉斯、全苏分析仪表科学研究所（基辅），全苏同位素仪表科学研究所（里加）和铸造问题研究所。

第一章 降低焦炭消耗的途径

焦炭，是炼铁炉料中最昂贵的，同时也是最短缺的原料。据统计，在苏联生铁成本中焦炭占40%到60%，因此，焦比的大小对生铁的成本有决定性的影响。降低焦比随之而来的就是高炉生产率的提高、生铁质量的改进、单位生铁基建投资的减少以及焦煤需要量的降低。

不断降低焦比，无论在苏联，还是在外国，都是炼铁生产工艺发展最显著的特点。日本钢铁工业的发展，就是有代表性的一个例子。日本由于没有自己的煤炭资源，降低焦比更是提高其竞争力最有效的方法。日本由于顺利解决了铁矿石的准备和富化中的一

系列问题，加大了高炉容积和广泛采用液体燃料，1971年焦比降到了445公斤。

在苏联焦比达到440—480公斤的冶金厂有切列波维茨、查波罗什、克里沃罗克等。苏联工业发展规划考虑进一步大力降低焦比。按照苏联国民经济发展的第九个五年计划，1975年乌克兰各冶金企业生产生铁的焦比应比1970年降低6.5%。

对苏联一些先进冶金厂关于改进炼铁工艺的经验进行分析后发现，最近20年来大幅度降低焦比和提高高炉生产率，首先是由于烧结矿用量增加到90—100%，渣量减少到350—450公斤/吨生铁，灰石耗量减少到0—50公斤/吨生铁，风温提高到1100°—1200°C，喷吹天然气和富氧鼓风，生铁中硅量和锰含量分别降到0.6和0.2%，炉顶压力由0.8提高到1.7—2.1表压，气体化学能的利用率从0.30—0.37提高到0.45—0.48。其中的某些降低焦比的措施，如增加烧结矿的使用量，降低生石灰的使用量，提高风温风压，降低生铁中硅、锰含量等，实际上已经被充分利用。

近来，又提出了某些可以大大改善炼铁技术经济指标的新措施，包括：

1. 使用预还原炉料。这项措施的高效率，首先是由Н.И. 克拉萨夫提出的。目前，使用金属化程度达到90%的新型原料的试验性冶炼证实了进一步大幅度降低焦比和提高高炉生产率的可能性。提高炉料金属化程度10%，焦比降低6.8—7.4%，高炉生产率提高4.4—100%。

广泛采用这项措施，取决于能否找出一个可靠的生产率高的经济的方法以获得金属化炉料，取决于投资量，取决于用于预还原所消耗燃料的数量和价值。

2. 增加高炉容积。高炉容积从1957年的1300—1386增加到了1972年的2000—3200米³，这不仅增加了生铁产量，而且降低了单位产品的基建投资，提高了机械化程度，提高了劳动生产率。容积增加，可以使气流和热制度更加稳定，从而更有效地利用炉缸气体，相应降低焦比。这已被切列波维茨、克利沃罗克冶金厂及苏联和国外大型高炉的实践所证明。

3. 使用辅助燃料。苏联从1957—1965年使用重油和天然气炼铁，使焦比降低了7—15%，高炉生产率提高了5%，然而，取得的结果应该看作只是一般的。近年来所完成的调查揭示了通过进一步完善炼铁工艺制度，在增加辅助燃料用量的同时配合以提高风温、富氧鼓风等措施，就可以大大提高使用辅助燃料的效果。

用于炼铁的辅助燃料

现在已知有80种以上的不同添加剂，其中大部分是燃料。附加的燃料可分为气体的、液体的和固体的三类。最有代表性的是气体燃料，包括焦炉煤气、裂化煤气、高炉煤气、天然煤气、天然气和其它气体以及重油、石油、固体燃料的热解产物、纯CO、H₂、CH₄等。

天然气在炼铁中获得最广泛的应用。而其它气体，由于短缺、昂贵或效果差，看来在近十年内不会获得广泛的利用。使用气体、液体或固体燃料的热还原气，无疑比使用未经处理的冷气效果要好。亚速钢厂和新土尔斯克厂进行的试验证实了这点。

比利时的乌哥尔城的试验高炉，同时向炉缸内喷吹650—750米³/吨生铁热还原气和

57—155公斤/吨生铁重油，取得了最大的经济效果，使焦比从660公斤降到了375公斤，降低了43%，同时还提高了高炉的生产率。

使用热还原气暂时还未超出试验阶段。为广泛采用这项工艺，首先应该找出获得氧化成分最少的裂化气的可靠经济的办法，找出把加热到1200℃以上气体送入高炉的办法，并且从理论上和通过试验，检查这项工艺比直接使用未处理附加燃料有多大的优越性。

因此，当前对于使用最广泛和最易于得到的天然气做出评价，具有最现实的意义。

在石油、煤焦油、矿物油、汽油、煤油膏、重油等液体燃料中，在苏联国内外，重油获得了最广泛的应用，重油的资源比较雄厚并且在不断扩大。

其它液体燃料的喷吹装置和喷吹效果，与重油相同。

固体燃料中，喷吹各种类型的煤粉，获得了最广泛的应用。其它如炭黑、石油焦、泥煤半焦、泥煤等固体燃料，由于短缺和效果差，未获得广泛应用，而且看来在短期内也不会获得广泛的应用。

因此，近年来可以在高炉炼铁中得到广泛应用的附加燃料主要是天然气、重油和煤粉。这几种燃料不仅因聚状态不同，而且一系列物理化学和热力学性能也不一样。下面我们分别加以讨论。

天然气 使用天然气的效果在很大程度上取决于在提高风温，降低温度、富氧鼓风等决定炉缸温度制度和可以补偿天然气对炉缸较大的冷却影响的措施方面，是否能够进一步挖出潜力。

A. H. 拉姆假设喷吹天然气时理论燃烧温度可能降低200度以下。广泛的实践证明了理论燃烧温度降低50—150度的合理性。进一步降低，则导致炉况变坏。顿涅茨冶金厂和德涅伯尔捷尔任斯基冶金厂进行的试验表明，在没有补偿的情况下，提高天然气的用量超过最优值，反而会引起焦比升高，也就是说，在某具体工艺条件下，当天然气消耗量达到最优值时，降低焦比的可能性就被完全利用了。同时，在有温度补偿时，使用天然气的效果显著增长。例如，1959年美国的一个试验高炉，当风温提高665度（提高到1340℃）时，天然气的使用量从风量的1.32增加到7.81%，使焦比降低了284公斤，或40%，同时高炉生产率提高很多。

1969年克利沃罗兹冶金厂的一个高炉，天然气使用量从98.6米³/吨提高到139.6米³/吨，首先是由于风中的氧含量从23.8%增加到了29.1%。天然气对于焦比的置换系数约为1公斤/米³（按算焦比为435公斤/吨生铁——乌克兰条件下的最低水平）。

在切列波维茨、日丹诺夫（亚速钢厂）、依那基也夫、新土尔斯克冶金厂进行的试验，同样证明了使用天然气配合富氧鼓风的良好效果。

重油 在苏联使用重油炼铁的第一批试验，是在1960年在秋索夫斯基冶金厂进行的。取得效果后，1963年10月秋索夫斯基厂、别列茨基厂、卡拉干达厂和苏联东部其它厂的高炉先后采用重油炼铁。

使用重油炼铁的工艺在苏联受到节制，主要是由于天然气炼铁同样有效，而且工艺

简单、可靠。

按照B. H. 斯达尔申诺夫的数据, 在风温和湿度不变的条件下, 重油使用量为40—80公斤/吨生铁时, 焦比降低4.3—8.8%, 高炉生产率提高1.9—8.8%, 重油对焦炭的置换系数为1.52—3.02公斤/公斤。

在国外, 每吨生铁喷吹40—100公斤重油, 焦比降低8—20%, 高炉生产率提高2—25%。在国外使用重油的效果高于苏联, 首先是由于有温度补偿, 而且原始冶炼强度比较低。

使用重油和天然气的实践, 完全证实了这项新工艺的效果同对于辅助燃料对炉缸温度制度的冷却影响进行补偿的可能性二者之间的正比关系。根据П. 依舍别克的文章, 在没有温度补偿时在重油用量为25—50公斤/吨生铁时效果最大。继续增加重油使用量, 将导致高炉生产率的显著降低, 同时置换系数变坏。在具有温度补偿(或其它补偿)时, 可以增加重油用量至100公斤以上, 同时保持较高的生产率和较好的置换系数(见图1)。

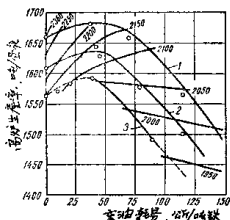


图1 高炉生产率与风温和重油用量的关系曲线

1——风温, 1100—1150℃

2——风温, 1000—1050℃

3——风温, 900—950℃

(图中数字及相应曲线为炉缸气体理论燃烧温度)

现代高炉的生产实践, 也证明了补偿对于使用重油效果的决定性影响。例如, 日本“八幡制铁”某厂喷吹重油86.2公斤/吨生铁, 提高风温94度, 富氧鼓风至22.6%, 焦比降低了201公斤/吨生铁或31.4%, 在试验阶段焦比达到了439公斤/吨生铁。由于喷吹重油, 高炉工作保持了较好的经济性能, 显著改善了对煤气化学能的利用, 煤气中的CO₂从12.3%提高到17.1%。法国君克厂大型高炉的实践经验也是具有代表性的。在喷吹重油90公斤/吨生铁, 风温1170—1250℃, 鼓风中氧和湿度在一般情况下焦比为384—244公斤/吨生铁。在这种情况下使用重油, 保证了高炉的生产率为3711—3800吨时, 焦比下降18—20%。

煤粉 利用煤粉炼铁以降低焦比的首批试验, 在苏联于1948年、1955年、1956年先后在德涅伯尔捷尔任斯基和新土尔斯克冶金厂炼硅铁和锰铁时进行。六十年代在美国、日本、法国、英国、比利时都进行了试验。

利用喷煤粉炼铁这项工艺进展缓慢, 首先是由于制备和喷吹煤粉所用的装置复杂和价值昂贵引起的。在这项工艺发展的最初阶段, 这种情况造成使用天然气和重油更具有竞争力。虽然如此, 至1967年资本主义国家仍已有22座高炉装配了制备和喷吹煤粉的装置。使用煤粉并不总是经常伴随着温度补偿, 即使这样, 也没有影响大幅度降低焦比这

10—25%，同时保持煤对焦炭置换系数等于或大于1，并且提高高炉生产率 and 降低成本。

美国阿什兰冶金厂大型高炉喷煤粉装置长期工业生产实践经验最有说服力。1400米³容积高炉在生产率为2300吨/日，喷吹煤粉132公斤/吨生铁，使焦比降低了28.0%，降到了439公斤，置换系数1.1。每吨生铁成本降低了1.4美元。在1966年和1967年8个月期间共向高炉炉缸喷吹了11.0万吨煤粉。喷煤粉期间用自然空气鼓风，风温保持在930℃，1971年美国有四部喷煤粉工业装置进行生产。

由此可见，从理论计算到试验和工业生产都证实了喷吹天然气、重油和煤粉的经济效果，在最适合的工艺条件下可以使焦比降低20—30%。

根据具体条件，选用哪一种辅助燃料，取决于多种因素：1) 这种燃料的资源情况，及其价格与其它燃料和冶金焦的比例关系；2) 是否具备喷吹此种燃料的可靠设备；3) 高炉的工艺条件。

美国阿什兰厂喷煤粉工业装置工作情况的发展以及顿涅茨冶金厂制备的类似装置在1968—1972年期间顺利生产以后，可以认为建立喷吹煤粉可靠装置的问题已经解决。因此，从设备角度看，目前使用天然气和重油与使用煤粉比较已不具有优越性。

总之，前面所述，也不足以据此得出有利于使用这种或那种燃料的结论，在类似情况下使用这种或那种辅助燃料的经济效果，取决于其物理化学性能以及这些性能对高炉热工制度和气流运动规律的影响。

使用天然气、重油、煤粉炼铁的效果比较

天然气、重油、煤粉的基本特性列于表1。这几种燃料的差别，首先表现在可燃组分一炭与氢的含量上，它决定不同的C/H比，天然气和重油的C/H比为3—6，煤是5—25。

天然气、重油、煤粉基本特性

表1

	萨拉托夫天然气	重油	贫煤精粉
化学组成，%			
C	76	85.4—87.4	76.49
灰分	—	0.1—0.3	11.0
S	—	0.8—1.3	1.71
挥发分	100	—	7.49
水分	—	3.6—7.8	0.38
氢发生量，米 ³ /公斤(米 ³)	2.01	1.28	0.46
增加辅助燃料用量时理论燃烧温度的降低，度/米 ³	4.85	3.6	1.3—1.6
C/H 比	3	6—7	17—35
工作物质燃烧热，大卡/公斤	7840—7940	9690—9740	6000—6500

由于天然气和重油的C/H比低，因此大量热耗费于炭氢化物的分解上，燃烧产物量

大，理论燃烧温度比较低，所以如此是因为与喷吹煤粉比较在喷吹这些燃料时必须有很大的热补偿。

天然气和重油的C/H比有些差异，可由重油含水量较高（一般为3—10%）抵销，含水量较高不仅会降低这种燃料的燃烧温度，而且也增加燃烧产物。而煤粉燃料一般水分很低，只有0.5%以下，挥发分10%，在燃烧前所需消耗的热量要低2—4倍。这就决定了煤粉燃料工艺上的根本优越性。

下面我们研究一下使用气体、液体和固体燃料炼铁所获得的效果方面的分析比较和试验工作。

英国比斯公司完成的工作，用分析方法确定了使用不同种类附加燃料的效果。计算中假定在喷吹燃料时理论燃烧温度和按炉缸气体发生量的冶炼强度保持不变，按两种情况——风温提高100°和25%富氧鼓风计算出的结果，见表2。

25%富氧鼓风，风温固定和用各种不同附加料时的高炉工作指标，表2

指 标	原始数据	辅 助 料 种 类					
		石油	610 煤粉	无烟 煤粉	蒸汽	甲烷	焦炉 煤气
用量，公斤/吨生铁	—	69	119	167	49.3	38	47.6
焦比，公斤/吨生铁	657	540	530	460	650	570	569
节约焦炭，公斤/吨生铁	—	118	129	194	3.5	86.5	88
置换系数， 公斤辅助料/公斤焦炭	—	0.59	0.90	0.86	13.09	0.41	0.53
置换系数，大卡焦炭/大卡辅助料	—	0.90	0.97	0.98	—	0.81	0.82
煤气成分，%							
CO ₂	15.5	18.1	18.0	17.9	18.4	18.4	18.4
CO	25.9	26.6	27.4	27.5	28.0	26.0	25.9
H ₂	1.0	3.5	2.8	2.7	2.7	3.9	4.3
CO/CO ₂	1.67	1.47	1.52	1.54	1.52	1.42	1.41
生产率可能提高%，%	—	12.8	12.0	13.5	9.3	13.1	14.1

无论是第一种还是第二种情况，使用无烟煤对降低热比效果都最好，无烟煤的用量比甲烷和重油高2—4倍，节约焦炭量高1.2—1.7倍。同时，高炉生产率提高的幅度也大，为13.5%，从煤气中CO₂含量和CO/CO₂比值可以看出，对炉缸气体还原能的利用也有最大的改善。

法国调查研究人员为沙斯冶金厂完成的分析工作中假定，炉缸气体热含量及单位时间的发生量、氢和炭的氧化物的利用率、炉气温度以及热损失（与水分有关的和散入周围环境的）均保持不变。从表3中所列数据可以看出单位放热量最大的首先是无烟煤，其次是挥发分比较大的煤和石油。喷吹这些燃料的经济效果，与它们的热含量成正比。

英国研究人员按斯坦顿冶金厂的条件进行的工作，也得出相仿的结论。

向高炉炉缸喷吹石油和不同辅助燃料的效果

表 3

燃 料	每公斤燃料在辅助燃料最佳节约焦炭， 炉缸放出的热量，大卡	用量，公斤	公 斤	置换系数， 公斤焦炭 公斤燃料
	量，大卡	量，公斤	公 斤	公 斤
焦 炭	1995	—	—	—
石 油	1440	46	66.7	1.45
无烟煤	1792	110	116	1.05
肥 煤	1620	85	90	1.06
气 煤	1561	81	79	1.06
焰 煤	1268	73	73	1.0
40%石油 + 60%气煤	1437	73	73	1.18

原书参考文献95、112、118中所获得的结果，应认为只是对使用不同燃料所取得效果的定性评价，因为所述评价方法中有明显的不足之处。它们共同的缺点是不能严格计算气体的利用程度(η_{CO} 、 η_{H_2})和直接还原指标 r_d 改变的情况，从而不能严格计算出焦比的变化。从高炉实践中知道，在喷辅助燃料时这些主要指标发生变化，并且与燃料的种类有关。我们认为，如果严格计算 r_d 、 η_{CO} 、 η_{H_2} 等指标的变化，计算焦比会明显变化。正像一系列著作中所采用的那样，从单位时间内炉缸煤气发生量（按气体的冶炼强度）固定的条件出发，可以相当近似地评价高炉生产率的变化。在明显降低（大于10%）焦比的情况下，由于炉料透气性变坏（其他条件不变）按气体的冶炼强度降低。在高炉喷吹辅助燃料时，应以炉内一定区域的煤气压降固定为前提条件来更严格地计算高炉生产率的变化。

许多试验证实用分析方法得出的关于使用煤粉燃料的工艺优点结论，在一些文献中都分析了使用天然气和重油的效果。从表4中可以看出，这两种燃料中哪一种都没有明显的优越性，因为二者的物理化学性能非常接近。

使用天然气和重油时的高炉生产指标

表 4

指 标	喷 重 油		喷 天 然 气	
	马 钢	下塔吉尔	马 钢	下塔吉尔
原焦比，公斤/吨生铁	596—607	620—598	595—607	607
燃料消耗				
重油，公斤/吨生铁	22	20—30		
天然气，米 ³ /吨生铁			50.0	62.7
焦比降低，公斤/吨生铁	39	31—53	56	56
焦比降低，%	6.5	6.3—7.4	9.6	9.2—9.75
高炉生产率变化	- 1.8	0.2—1.2	+ 0.6	0.5—0.7
风温变化，度	± 23	+ (50—91)	+ 4	+ (90—105)
富氧程度变化，%	0	0	0	+ 0.1
置换系数，公斤/公斤，公斤/米 ³	1.8	1.4—1.56	1.03—1.16	0.9—1.09

热风制度没有明显变化情况下使用辅助燃料的效果

表 6

指 标	辅 助 燃 料			
	焦炉煤 气[10]	天 然 气 [42]	重 油 [1.7]	煤 粉 [111]
附加燃料用量*	40.9	30—85	20—30	132
原焦比, 公斤/吨生铁	607	572	598—620	571
焦比降低, 公斤/吨生铁	42	65—70	31—53	132
焦比降低, %	6.9	11.2—12.0	6.3—7.4	23.2(至28)
置换系数, 公斤/公斤; 米 ³ /公斤	103	0.86	1.40—1.56	1.0
生产率变化, %	+0.5	0+2.2	0.2—1.2	无数据
风温变化, 度	-20	+6—6	50—91	无变化
鼓风湿度变化, 克/米 ³	+6.5	(-9.5)~(+2.2)	无数据	无变化
鼓风含O ₂ 变化, %	+0.8	无变化	无变化	"

*天然气、煤气换算至米³/吨生铁, 重油、煤粉—公斤/吨生铁

表 5 中列出了在不同冶金厂使用天然气、重油和煤粉燃料的结果。在所进行的研究中原始焦比为 571—620 公斤/吨生铁。决定使用辅助燃料效果的主要因素—风温和湿度以及鼓风中含氧量, 都未改变。这可以说明, 经济效果首先取决于燃料的种类。使用天然气、重油和煤粉, 在没有炉缸温度补偿的情况下, 焦比降低了 6.3—12.0%, 高炉生产率提高了 0.2—2.2%。在这种情况下当使用煤粉量达到 132 公斤/吨生铁时, 焦比降低 28%。除理论计算结果外, 试验也证明了在没有对冷却影响的热补偿时, 喷煤粉对降低焦比的效果比其它燃料要高一倍。

美国阿什兰冶金厂长期工业生产实践, 也证明了喷吹煤粉比喷吹重油和天然气具有更明显的经济性[91、93、105、108]。作者证

实, 喷吹煤粉比喷吹重油或天然气更合算 5—9 倍。煤粉可代替的焦炭百分比, 比天然气和重油高 2—1 倍。应当指出, 对于煤炭工业中心的美国阿什兰冶金厂使用煤粉是有利的。

在乌克兰的条件下, 有价值的是分析出使用天然气配合重油或煤粉的效果。A. A. 巴其宁(顿巴斯黑色冶金科学研究院)的著作就讨论了一个问题。计算是按保持理论燃烧温度的条件进行的。从图 2 可以看出, 在保持鼓风各参数的条件下, 用煤粉代替天然气效果更好。在保持天然气用量 50 米³/吨生铁不变的情况下, 喷吹 100 公斤/吨生铁煤粉, 可保证降低焦

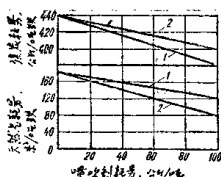


图 2 用煤粉(1)或重油(2)代替部分天然气时焦比的变化
(鼓风含氧 27%; $t_{\text{风}} = 1100^{\circ}\text{C}$)

比60公斤。在相仿的条件下用重油代替天然气可降低焦比43公斤和减少天然气消耗80米³/吨生铁。

1970年我们在顿涅茨冶金厂3号高炉条件下完成了对配合使用天然气和煤粉经济效果的评价工作。有关计算是由顿巴斯黑色冶金科学研究院3.K.阿法那西也夫完成的。由于条件关系计算中假定喷吹煤粉时不能改变热风制度以便对燃料的冷却影响进行热补偿,焦炭中的单位炭含量由煤粉中单位炭含量代替,氢气发生量保持不变。计算贫煤、半无烟煤、长焰煤(表6)分别进行。

用于喷入高炉的各种煤的化学组成, %

表6

	C	H	S	O ₂	N ₂	灰分	水分
长焰煤	62.1	4.50	2.37	9.55	1.31	17.3	1.0
贫煤	72.3	3.37	1.84	1.12	1.20	18.3	1.0
无烟煤	76.8	1.46	1.23	1.23	0.65	16.3	1.0

从图3可以看出,用煤粉代替天然气经济上是合算的,喷吹100公斤/吨生铁煤粉,焦比降低90—130公斤/吨生铁,天然气消耗降低20米³/吨生铁,燃料的价值降低0.3—3.0卢布/吨生铁。

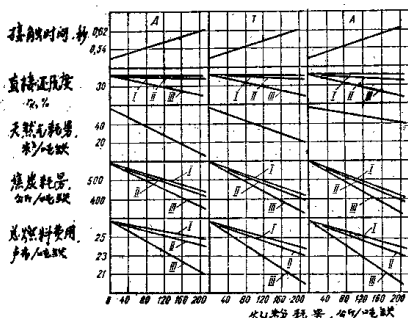


图3 高炉冶炼各主要技术经济指标与煤粉用量的关系曲线

а——长焰煤, T——贫煤, A——无烟煤, I——指标下降, I——0

II——煤粉用量每100公斤/吨生铁下降2%

III——煤粉用量每100公斤/吨生铁下降5%

此外，顿涅茨、查布罗什和波兰的古特、福洛利安等冶金厂的工业性生产实践，也完全证明了配合使用天然气和煤粉的高经济效果。喷吹20—80公斤煤粉，焦比降低3.5—15.0%，天然气消耗降低5.5—18米³，燃料价值降低1—8卢布。煤粉对焦比的置换系数，常在1以上，高炉生产率和生铁质量没有明显改变。综合喷吹的实际经济效果比单独喷吹天然气效果要高一倍[53、60、120]。

最后，再分析一下关于喷吹不同种煤粉在工艺上的优缺点和经济效果问题。

根据[92]喷吹含炭量最高的煤粉时焦比降低的幅度最大。其中，喷吹无烟煤与喷吹气煤比较，可多节约焦炭30%。

按美国研究人员根据斯坦顿厂的条件计算的数据，用挥发分为27.2—33.3%的煤代替挥发分为6.2—6.9%的贫煤，在高炉生产率实际不变的情况下，焦比降低幅度从87.5—86.5公斤/吨生铁减小到69.5—77.0公斤/吨生铁[16]。关于喷吹挥发分较小的煤优越性更大的结论，也被其它一些研究者加以证实[98、99、117]。

法国进行的长期工业性试验，证明了无论喷吹劳它令含挥发分34.5%、灰分7.9%、硫0.8%、水分1.9%的煤，还是喷吹欧文产地的含挥发分6.6%、灰分9.3%、硫0.6%、水分1.1%的贫煤，都获得了很好的经济效果。

从所获得的经济效果一节约焦炭19.2和19.5%来看，从分别喷吹108和110公斤/吨生铁时换算成同等条件的置换系数（1.03和1.09）来看，都不足以得出有利于贫煤或长焰煤的结论[16、95]。因此可见，理论上计算出的有利于含炭量高的煤种的结论，没有被试验所证实。所获得的相矛盾的结果，看来可能是由于对煤粉挥发分对指标 γ_d 和焦比的影响没有严格计算的缘故。

对于高炉喷吹天然气和煤粉时使用哪一种煤更有利的问题，解决得比较明确。下面我们分析喷吹挥发分煤与喷吹天然气相比较的优越性。从经济评价的角度，可以认为煤挥发份中的氢在热耗方面与天然气中的氢是等效的，正如煤粉中的碳和焦炭中的碳等效是一样的。这个假设是在分析苏联国内外使用煤粉燃料的经验的基础上做出来的[3、2、95、110、118]。

使用天然气炼铁的长期实践经验证明，在天然气用量和焦比之间有一个极限关系47、67、87、115]。因此，在我们所作的计算中假定了单位炉料氢气发生量保持不变的条件。结果，按照计算条件，煤粉的少部分（挥发份）在炉缸消耗代替天然气中的氢，大部分（不挥发炭）代替焦炭中的碳。

按照天然气、煤和焦炭的价格，在高炉使用天然气的情况下，喷吹挥发份含量最少而不挥发炭含量最大的煤粉，可以最大程度降低焦比和生铁成本（见图3）。

关于喷吹煤粉中灰份的含量没有什么争议，虽然喷吹灰份达40%的煤粉的试验也曾比较顺利地完，但是无论计算和实践都证实了喷吹灰份含量最低炭量最高的煤在工艺上和经济上都更合理。含炭量高的煤价格虽然较高，但是喷吹这种煤粉可以取得更高的效果，完全可以补偿。

由于喷吹煤粉对降低炉缸温度和炉缸煤气发生量的不良影响最小，所以在某些特殊

冶炼条件下使用这种燃料是最有利的，甚至是唯一合理的。例如，在冶炼某些特殊品种生铁时要求炉缸温度较高焦比也比较高，喷吹煤粉可以大幅度降低焦比。

使用煤粉冶炼锰铁（新土尔斯克厂）、硅铁（捷尔任斯基厂）、铸造铁（美国斯坦顿厂和美国俄顿厂），都有成功的实践经验。而使用天然气，在同样条件下就不够合理或效果较小，这已从理论上和高炉实践上得到证实[87]。

冶炼铸造铁焦比比较高，如果不可能对辅助燃料的冷却影响进行补偿时，使用煤粉效果最好，不仅可以更大幅度降低焦比，而且可以代替相当部分焦炭。当高炉使用部分金属化炉料时，对于气体还原剂的需要量显著减少，在这种情况下喷天然气是不合理的，喷煤粉则是唯一可能的和有效的，因为这不会引起炉缸温度制度和还原气体发生量产生明显变化。这时，炉缸气体还原能的利用改善了，因为焦比降低了，炉料与还原气体的接触时间增长了。

以上所做分析证明了，使用煤粉燃料与使用重油和天然气相比，具有更明显的工艺上的优越性。由于燃烧产物量低和对炉缸温度制度影响最小，喷煤粉在相同工艺条件下比喷重油和天然气可多降低焦比1—2倍。

理论计算和冶炼试验都证明，用辅助燃料可以代替40%的冶金焦。

我们认为在使用天然气的条件下，进一步降低焦比和提高综合喷吹效果最合理的办法是喷吹煤粉，这样还可以把用于提高风温和富氧鼓风的基建投资和生产费用减少1—2倍。

在冶炼硅铁，锰铁和铸造铁时以及用预还原炉料冶炼炼钢生铁焦比比较高（900—1000公斤/吨生铁）时喷吹煤粉效果是很好的，可以大幅度降低焦比。在这样的条件下喷吹重油或天然气是不合理的，效果较差。

喷吹煤粉，或使用重油、天然气，同时采取相应措施提高炉缸温度和改善冶炼的气体动力制度，效果最大。这样的措施包括：提高风温，富氧鼓风，改善炉料粒度组成，降低熔剂消耗和渣量，提高炉内气体压力等。

第二章 喷吹煤粉配合使用天然气的理论根据

上一章中我们列举的有关论述，有助于对使用不同燃料的效果做出定性分析，大部分这些论述在方法上的缺点，都是所使用的原始条件根据不足[99, 112, 114, 117]。首先是假定了一些重要参数，如理论燃烧温度，单位时间炉缸煤气发生量，煤气还原能的利用率等保持原水平不变。

实践证明，当喷吹各种不同燃料时，上述指标一般都有明显变化，引起高炉工作状况的改变和影响使用这项新技术的效果。本章中我们试图分析一下辅助燃料对温度制度及气体动力制度的影响，找出在各种具体工艺条件下决定喷吹燃料的最大用量和效果的各项参数。

炉内温度的垂直分布和辅助燃料冷却影响的补偿标准

喷吹辅助燃料时气体的理论燃烧温度保持不变这个假设，对于热力设备是符合的，但是对于高炉则没有任何可靠的工艺基础。一般情况下，喷吹的最大经济效果在理论燃烧温度有某些降低时达到。

高炉的生产实践证明，对燃料的冷却影响进行补偿可提高综合喷吹的效果，同时也确定了当理论燃烧温度降低到某水平以下时，高炉炉况变坏。

高炉热工制度在喷吹辅助燃料时可以有上述特点，是因为炉料中还原过程的强化，直接还原率降低，以及由此产生的在生铁、渣形成的后期炉缸需要热量的减少等原因造成的[89]。

下面讨论一下向炉缸喷吹煤粉时做到完全补偿的必要性。

在分析Б·Н·吉塔也夫按炉缸完全热交换的条件得出的方程式的基础上，我们引进必要的理论燃烧温度的概念，就是可以在新的工艺条件下保持原始冶炼产物燃烧的温度（以后简称为必要理论燃烧温度）[33、34]。

假定在原始工艺条件下炉料的最终温度 t_m 。和在新条件下的温度 t_{m1} 保持不变，得出：

$$t_1 = t_H + \frac{W_{m1} K_0 V_0}{W_{m0} K_1 V_1} (t_0 - t_H), \dots\dots\dots (1)$$

式中

t_H ——热交换缓慢区炉料和气体的温度，℃

t_0, t_1 ——原始的和必要的理论燃烧温度，℃

W_{m0}, W_{m1} ——炉料的水当量，大卡/吨

V_0, V_1 ——炉缸气体每吨焦炭的相对出率，

K_0, K_1 ——焦比，公斤/吨生铁

现在讨论一下在利用提高风温或减少渣量以降低焦比时使用公式(1)的情况。因为此时可以认为 $W_{m0} = W_{m1}$ ， $V_0 = V_1$ ，所以方程式可写为：

$$t_1 = t_H + \frac{K_0}{K_1} (t_0 - t_H), \dots\dots\dots (2)$$

可见，在改善冶炼工艺条件和降低焦比时，必要理论燃烧温度增高。这已由高炉生产实践所证明。例如，在焦比为536公斤/吨生铁，风温1100℃，渣量466公斤/吨生铁时，最优理论燃烧温度为2100℃，而在掌握喷吹天然气冶炼工艺焦比为~680公斤/吨生铁时，为1900~1950℃[31]。

富氧鼓风对必要理论燃烧温度的影响，与此相似。当 $W_{m0} = W_{m1}$ ， $K_0 = K_1$ 时，

$$t_1 = t_H + \frac{V_0}{V_1} (t_0 - t_H), \dots\dots\dots (3)$$

分析下部热交换区域的炉料加热条件，就可以得出根据以解释为什么在具体条件下存在有一个可以保证炉料正常加热的允许的最低理论燃烧温度。显然这个温度值的理论

下限，是炉料加热的最终温度（1550—1600℃）。注意到炉料加热过程是在一定的容积和一定的时间内完成的，并且要完成一系列吸热反应等因素，可以肯定在正常冶炼条件下只有在理论燃烧温度与炉料温度之间有一定差值时，炉料加热过程才能完成。

根据试验数据在高炉正常工作时这一差值一般不低于300~500℃。而且，上限相应于低焦比的高炉工作条件。在用煤粉代替部分焦炭的情况下，可以假设焦炭的置换系数等于1，而且单位焦炭与单位煤粉的煤气发生量相等。此时，

$$t_1 = t_H + \frac{W_{m1}}{W_{m0}} (t_0 - t_H), \dots\dots\dots (4)$$

因此，在这种情况下必要理论燃烧温度，首先取决于进入下部热交换区炉料的热含量的变化情况，这种变化情况是由焦炭的相对耗用量和氧化亚铁直接还原度所决定的。根据理论计算和实验数据，使用煤粉燃料时由于显著减少炉料中焦炭配比必然使气体还原剂与氧化铁的接触时间增加，每使用100公斤煤粉， r_d 值相应降低1~4%。公式(4)可以用直接还原率表示：

$$t_1 = t_H + \left(1 - A \frac{r_{d0} - r_{d1}}{r_{d0}}\right) \frac{K_0}{K_1} \cdot \frac{V_0}{V_1} (t_0 - t_H), \dots\dots\dots (5)$$

式中 $A = \left(1 - \frac{0.9}{W_0}\right) \approx 0.7 = \text{常数} \dots\dots\dots (6)$

r_{d0}, r_{d1} ——直接还原率开始和最终值。

考虑到当喷吹煤粉时 $\frac{K_0}{K_1} \cdot \frac{V_0}{V_1}$ 可以等于1，因此有，

$$t_1 = t_H + \left(1 - A \frac{r_{d0} - r_{d1}}{r_{d0}}\right) (t_0 - t_H), \dots\dots\dots (7)$$

总之，在炉缸喷吹化学成份与焦炭相近的煤粉的情况下，必要理论燃烧温度取决于铁的直接还原度的变化情况；如果 r_d 不变，则必要理论燃烧温度也不变（ $t_1 = t_0$ ）， r_d 降低幅度越大，必要理论燃烧温度也越低。根据顿涅茨冶金厂的条件分析二者之间的曲线关系如图4。从图中可以看出，在喷吹贫煤时，每吨生铁每喷用100公斤煤粉，必要理论燃烧温度下降20度。

- a——贫煤
- б——长焰煤

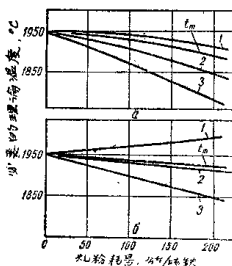


图4 喷吹煤粉时必要理论燃烧温度与煤粉实际用量 t_0 的关系

(直接还原度改变了0(1), 2%(2), 4%(3))

必要理论燃烧温度降低的幅度不大的原因是由于,按照保持单位炉料氢发生量的原始水平计算,大大缩减了天然气的用量;其次是由煤粉挥发份中的氧代替了部分鼓风中的氧,因而减少了鼓风量和单位生铁的炉缸煤气发生量。

喷吹长焰煤比喷吹贫煤和无烟煤必要理论燃烧温度降低的幅度小些,这是由于它的挥发份更多,因此天然气用量缩减的幅度更大。

在保持 T_a 原始水平的情况下喷吹贫煤和无烟煤时,必要理论燃烧温度与“对于该种制度所实际获得的理论燃烧温度”差别不大。当 T_a 降低时必要理论燃烧温度明显低于实际温度。在喷吹长焰煤时如 T_a 保持不变,则必要理论燃烧温度增加(每吨生铁每喷吹100公斤煤粉增加25度)。因此,它与实际温度之间产生明显的差别。在良好的冶炼条件下(每吨生铁每喷吹100公斤煤粉 T_a 降低2~4%),必要的与实际的理论燃烧温度差别不大。因此,正像喷吹天然气一样,喷吹煤粉也伴随着必要理论燃烧温度的降低,并且 T_a 降低越多,降低的幅度越大。

这情况决定了实际的与必要理论燃烧温度之间的最大差值。因此,喷吹高含炭量煤粉,用量在每吨生铁200公斤以下时,补偿燃料冷却影响的措施不是必须的。

当伴随喷吹煤粉 T_a 值的降低幅度达到每吨生铁每100公斤煤粉2~4%时,必要理论燃烧温度下降更加显著,甚至可以使实际的和必要的理论燃烧温度之间出现正差。这将改善炉料的加热条件,改进整个高炉的工作情况。许多高炉的实践,完全证实了以上所得出的结论。

如,阿什兰厂的高炉,风温930℃,理论燃烧温度2000℃,也就是说,对于这样水平的焦比(571公斤/吨生铁)来说,炉缸温度已是最底的了,然而,这并没有妨碍人们用喷吹煤粉的办法把焦比降到439公斤,即降低了28%[91,93]。

1968~1972年间顿涅茨冶金厂进行了一系列喷吹煤粉和天然气的试验,同样证实了大量喷吹煤粉并用少量降低天然气用量对煤粉冷却影响进行补偿的可能性。

总之,煤粉燃料的主要优点就是可以在最少改变热风制度的情况下大量节约焦炭。

使用煤粉燃料有助于将理论燃烧温度提高到最优水平,提高到常常明显高于必要理论燃烧温度的水平。根据许多研究者的资料,在现代工艺条件下冶炼炼生铁时的最优理论燃烧温度为2100℃~2200℃。

将理论燃烧温度提高到最优值,可以改善辅助燃料的燃烧条件,稳定炉料的顺行,改善冶炼产物的加热条件。

喷吹煤粉燃料时用改善热风制度的办法对辅助燃料的冷却影响进行完全的或过剩的热补偿,像喷吹其它燃料时一样是有效的。在所有改变热风制度的措施当中,应该承认提高风温是最有效的。因为它可以带人更多的热量,改善下部热交换区域炉料的加热条件和煤粉燃料的燃烧条件。

关于热交换区的最优高度比,存在着许多不同观点。在我们看来,Б·И·库塔也夫的
•编者注:以下简称实际温度。

观点是比较正确的，他认为在喷吹煤粉时保持热交换区的原始高度是比较合理的，这可以保证对炉缸煤气的物理、化学能的利用率不降低[34]。可以推断，库塔也夫首先是要限制增加上下部热交换区域的高度，而这一高度的增加在降低理论燃烧温度时是不可避免的。应当认为，造成这些区域高度下降的变化因素不仅是允许的，而且是希望的，因为这时必然带来缓慢热交换区高度的增加，这从工艺角度上看是合理的，它有助于：

- 1) 改善间接还原反应的进行和降低 r_{d1} ；
- 2) 降低原始成渣带的水平并使炉料的熔化带和还原带分离。

让我们分析一下煤粉燃料对热交换区高度的影响。

下部热交换区的高度可由以下公式确定。

$$H_H = 3\rho \frac{c_m(1-f)}{d_v \left(\frac{W_m}{W_r} - 1 \right)}, \quad (8, a)$$

式中 ρ ——炉料断面强度

d_v ——外部热传导系数，大卡/米²·时·度

c_m ——1米³炉料热容量

f ——炉料孔隙度米³/米³

根据公式(8)计算出的结果如图5所示，它表明在计算中所取的顿涅茨冶金厂高炉生产条件下，热交换下区高度下降不明显。

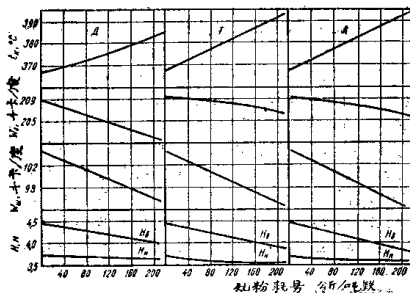


图5 热交换区高度(H_H , H_B)、炉料和煤气的水当量

(W_m , W_r)以及炉顶煤气温度 t_K 与煤粉用量的曲线关系

D——长焰煤； T——贫煤； A——无烟煤