

杜鹤桂教授论文选

——庆祝杜鹤桂教授八十寿辰

二〇〇五年八月二十三日

杜鹤桂教授论文选

—庆祝杜鹤桂教授八十寿辰

江苏工业学院图书馆
藏书章

二〇〇五年八月二十三日

序

“你用执着的热情，开垦冷漠的荒原；你像清澈透明的甘泉，浇灌干涸的土地；你像润物无声的细雨，滋润焦渴的心田。你能把愚昧变成文明，你能让愁眉化为笑颜。为了民族的明天，你把一腔热血奉献！”

有人用这样的语言来歌颂老师，这正是发自我们内心的对杜老师情感的自然流露。

杜鹤桂教授，1949年毕业于天津北洋大学冶金系，1953年毕业于东北工学院冶金系研究生班并留校任教，教授、博士生导师，时任炼铁教研室主任、钢铁冶金系主任。是国务院学位委员第二、三届学科评议组成员；中国金属学会第五届常务理事；炼铁学会副理事长；辽宁省金属学会常务理事；炼铁学术委员会主任。

作为国内外著名的炼铁专家，杜鹤桂教授50年来在炼铁领域的科学研究及技术创新方面取得令人瞩目的成就，为我国钢铁工业的发展和科技进步做出了卓越贡献。

五十年代末，杜鹤桂教授首次提出高炉“吹透强化”理论。旨在使高温煤气流吹透中心，保持炉缸工作均匀、活跃、稳定，奠定了高炉强化和下部调节的理论基础，成为国内外高炉下部调节共同遵守的准则。

六十年代，杜鹤桂教授首先在鞍钢总结出高炉喷吹燃料的经验，首次研究出未燃煤粉在炉内的行为以及煤粉热解过程等一系列研究成果，为我国推广高炉喷吹烟煤铺平了道路。

高炉冶炼钒钛磁铁矿为誉为“镜中之花”，曾是可望不可及的世界性难题。六十年代初，杜鹤桂教授在马钢255高炉上组织承德钒钛磁铁矿的冶炼试验(渣中 TiO_2 15~18%)，率先提出烧结矿高碱度，适宜炉温的操作方针，使高炉生产基本做到渣铁畅流、生铁合格，给承德钢铁厂生产带来生机，为攀枝花钒钛磁铁矿冶炼指明方向，从而为攀钢建设提供了科学依据。

八十年代以来，杜鹤桂教授在实验室进行高炉无钟布料模拟研究，掌握了其布料规律。1994年提出无钟布料“平台”理论，认为平台的形成和宽度是强化冶炼、提高煤气利用的重要环节。这一理论在攀钢、酒钢等高炉上得到很好运用，获得重大突破。

九十年代初，他承担国家重点攻关项目“包头特殊矿高炉富氧喷煤技术”。通过研究，提出包钢特殊矿高炉氧煤喷吹燃烧机理，合理炉料结构，中心加焦等理论依据和工艺参数，对实现喷煤比150kg/t和包钢高炉特殊矿冶炼的突破性进展，做出了突出贡献。

杜鹤桂教授是我国钢铁冶金炼铁学科的奠基人之一，是东北大学钢铁冶金学科带头人，1952年参加组建国内第一个炼铁专业，该专业1981年

被批准为国内首批钢铁冶金博士点，杜鹤桂教授被评为国内首批钢铁冶金学科博士生导师。1986年被评为国家重点学科。

杜鹤桂教授长期从事教学工作，为国家培养数以千计高级钢铁冶金技术人才。培养了硕士和博士研究生60余名，可谓桃李满天下。

他不断总结炼铁技术的新经验、新动态、新发展，著书立说。在国内外学术刊物上发表论文260余篇，其中多篇被评为优秀论文，被EI等收录100多篇。出版专著、教材13本，译著5本。

半个世纪以来，面对国内外炼铁事业的日益发展，他时刻关注并加以研究，呕心沥血，不断提出新思路，总结新技术，为我国炼铁技术的发展作出了重要贡献。先后撰写编著了《高炉炼铁》、《现代炼铁学》、《炼铁工艺计算手册》、《高炉冶炼钒钛磁铁矿原理》、《中国炼铁三十年》等，并获省部级以上的科技奖12项，其中国家发明一等奖一项（集体），国家科技进步一等奖一项，国家科技进步二等奖一项。这是他奉献给炼铁事业的宝贵财富。

这部《论文集》收录的120篇论文涉猎了高炉强化、钒钛矿冶炼、炼铁综合技术等方面的内容，反映了当今世界国内外炼铁技术工艺的最新发展，文字简洁，理论性强，值得广大炼铁工作者研读借鉴，这凝聚着老一代科技工作者对炼铁事业的不懈追求和无私奉献精神，也折射出了他的坚强意志和崇高信仰。相信这部《论文集》的出版必将对我国炼铁新技术、新工艺的不断完善与发展产生重要影响，大有裨益。

老骥伏枥，志在千里。杜鹤桂教授是我们的老前辈，老领导，德高望重，是国内公认的理论联系实际的炼铁专家，先后到日、美、德、澳、加拿大等国访问讲学，受到高度评价。受教多年，获益匪浅，仅以真诚的祝福作为本序的结语。

愿杜老师：事事顺心，健康长寿！

庆祝杜鹤桂教授八十诞辰
《杜鹤桂教授论文选》编辑委员会

2005年8月23日

主要科研成果

成果(项目)名称	获奖情况					主要合作者
	奖别名称 (国家、省、部)	等级	排名	年份	证书号码	
钒钛磁铁矿高炉强化冶炼新技术	国家科技进步奖	一等	8*	1999	10-1-001-08	攀钢
	国家冶金工业局 科技进步奖	特等	8*	1998	1998-001-8	攀钢
攀枝花高炉冶炼钒钛磁铁矿 科研试验	国家发明奖	一等(集体)	主研	1987	00123	攀钢等
包头特殊矿高炉富氧喷煤技术	国家科技进步奖	二等	主研	1995	10-2-006-05	包钢
	冶金部科技进步奖	一等	主研	1993	93-006-05	包钢
鞍钢高炉喷吹烟煤工业试验研究	冶金部科技进步奖	一等	主研	1993	93-005-04	鞍钢
高炉矿焦混装	冶金部科技进步奖	二等	1	1989	89-032-01	济钢
	山东省科技进步奖	二等	1	1989	2-67-1	济钢
攀钢四高炉无料钟炉顶 多环布料试验研究	四川省科技进步奖	二等	3	1996	96-2-0211	攀钢
首钢试验高炉解剖研究	冶金部科技成果奖	二等	主研	1981	(82)冶科学 第735号	首钢等

出版教材、专著

著作名称	出版时间	排名	主要合作者	出版社名称	著作类型
高炉冶炼钒钛磁铁矿原理	1996	1	杨兆祥等	科学出版社	专著
高炉炼铁技术	1990		邓守强等	冶金工业出版社	专著
高炉矿焦混装技术论文集	1990	主编	虞蒸霞等	济南出版社	编著
中国炼铁三十年	1981	主编	成兰伯等	冶金工业出版社	编著
炼铁工艺计算手册	1979		鞍钢	冶金工业出版社	编著
烧结技术-热风烧结部分	1993		谢良贤等	云南人民出版社	编著
国外现代炼铁工业	1979		杨永宜等	冶金工业出版社	编著
现代炼铁学	1959	常务主编	东北大学炼铁教研室	冶金工业出版社	编著
高炉炼铁(上、中、下)	1979	主编	东北大学炼铁教研室	冶金工业出版社	全国通用教材

杜教授培养的研究生名录

姓名	毕业时间	学位	现工作单位	联系方式
安云沛	1965	硕士	原鞍钢技术中心	
陈绍峰	1992	博士	芬兰坦佩尔大学 研究员	
崔福兴	1966	硕士	原抚顺市冶金局副局长	0413-6688566
刁日升	1990.7	博士	攀钢炼铁厂 总工程师	13808148440
丁学勇	1984	硕士	东北大学教授(在国外)	
丁跃华	1988.1	硕士	昆明理工大学材料与冶金工程学院教授	
窦力威	1995.5	硕士	鞍钢新钢铁公司经理助理	13352110016
杜钢	1981	硕士	东北大学钢铁冶金研究所 教授	13478316203;
	1986.3	博士		
冯英育	1985	硕士	壹胜百模具(北京)有限公司(总经理)	
宫峰	1990	博士	广东珠海市教育学院副院长 珠海市城市职业技术学院副院长 党委副书记	
郭霜洪	1989	硕士	沈阳中辽三普电池有限公司副总	13681103035
郭兴敏	1984	硕士	北京科技大学理化系副主任 教授	13681103035
	1992	博士		
郭燕昌	1988.7	博士	本钢技术中心 主任 教授级高工	13304149029
赫英伦	1981	硕士	鞍山热锻研究 高级工程师	已故
	1997.3	博士		
胡宾生	1990.11	博士	河北理工大学 教授	13503157045
黄威林	1994.6	硕士	鞍钢	
李伏桃	1983	硕士	日本三菱商事株式会社重机部中国代表	13601980671
林成城	1993.3	硕士	上海宝山钢铁公司 高级工程师	13661535153
	1997	博士		
林仁灿	1966		原新铁厂副总	
刘新	1983.3	硕士	东北大学钢铁冶金研究所 副教授	024-83680780
	1987	博士		
刘万山	1993.12	博士	鞍钢技术中心 副主任高级工程师	13904128652
刘隰祯	2000.3	硕士	上海交大博士生毕业	62934704
马喜明	1995.3	硕士	沈阳东软公司	13600880878

聂大志	1987.3	硕士	工商银行信贷管理部 副总经理	13501020271
乔瑞夫	1998	博士	沈阳工业大学 副教授	024-25402373
曲彦平	1997.5	博士	沈阳工业大学 教授	13940265391
沈峰满	1992.1	博士	东北大学教授 教务处副处长	13904012856
	1984.6	硕士		
王铁	1989	硕士	武汉科技大学 (移居加拿大)	
王殿君	1991.4	硕士	本钢副总, 本钢技术中心(总工办)	0414-7828665
王国雄	1989.5	博士	澳大利亚昆士兰大学 研究员	
魏国	1996	硕士	东北大学钢铁冶金研究所 副教授	13066621023
	2002.9	博士		
吴俐俊	1990	硕士	上海交通大学工程热物理研究所	13912549917
吴勇来	1991	硕士	宜兴市振球矿料公司副总	13801518230
谢国海	1988	硕士	山东日照钢铁有限公司总工 炼铁厂厂长	
徐桂英	1988	硕士	北京科技大学特种陶瓷与粉末冶金研究开发中心; 研究员	010-67431176
	1995.5	博士		
徐国涛	2000.5	博士	武钢技术中心 高工	136219273
徐万仁	1996	博士	宝钢技术中心前沿技术研究所; 高工	13817226340
薛向欣	1990.6	博士	东北大学教授 校长助理 科研处处长	13909813905
杨俊和	2000.3	博士	上海应用技术学院 教务处处长 教授	13621924734
游锦洲	1999.9	博士	上海大学钢铁冶金重点实验室研究员	13311808818
余艾冰	1985.1	硕士	澳大利亚新南威尔士大学 教授	
	1989	博士		
余仲达	1986.1	硕士	日本(耐火材料公司) 驻中国代表	
张子平	1992	硕士	澳大利亚新南威尔士大学 研究员	
	1999	博士		
赵玉森	1966	硕士	原辽宁省冶金厅厅长	
郑少波	1998.8	博士	上海大学钢铁冶金重点实验室 教授	13004180001
周明顺	2004.8	博士	鞍钢技术中心 高级工程师	13358666403
邹安华	1988.7	硕士	广东钢铁江钢铁有限公司	13822143193

(按姓氏笔画排序)

目 录

第一部分 高炉强化冶炼.....	1
强化高炉的理论和实践.....	1
高炉强化的重要环节.....	20
高炉富氧鼓风生产试验.....	28
高炉喷吹现状及经验.....	43
高炉自冷式氧油喷枪冶炼试验.....	60
大型高炉强化的几个问题.....	72
高炉软熔带对气流分布影响的研究.....	80
软熔带对高炉强化冶炼的影响.....	90
高炉强化后不稳定的焦矿分层问题.....	97
高炉软熔带的生成及气体力学特性的研究.....	106
高炉初渣流动规律的研究.....	112
高炉合理批重的表达式.....	123
高炉软熔带的研究.....	131
高炉下部炉料运动与渣铁排放的模拟研究.....	146
北台 300m ³ 高炉大料批分装试验总结.....	155
高炉喷吹煤粉燃烧过程的研究.....	161
高炉无钟炉顶布料的模拟试验研究.....	170
高炉无钟炉顶中炉料运动的理论解析.....	180
高炉喷煤未燃煤粉吹出的取样研究.....	187
高炉喷煤未燃煤粉炉内行为的试验研究.....	193
高炉无钟炉顶节流阀处料流特性.....	201
无钟炉顶中炉料运动及料流轨迹的研究.....	206
等离子条件下碳燃烧动力学的研究.....	212
高炉无钟炉顶布料料面形状的模拟研究.....	215
济铁 100m ³ 高炉矿焦混装冶炼试验.....	220
无料钟炉顶高炉布料气流分布模拟研究.....	226
钟式高炉料流轨迹问题的研究.....	232
碱金属对酒钢高炉冶炼的影响.....	240
高炉富氧大喷吹加喷水煤浆技术.....	251
高炉矿焦混装试验研究.....	253

酒钢高炉渣排碱脱硫实验研究.....	260
混装矿焦块状带透气性数学模型及应用.....	268
高炉新型热指数模型.....	273
酒钢高炉碱金属危害的控制.....	278
高炉矿焦混装的应用和推广.....	286
高炉漏斗式炉顶的开发与应用.....	293
高炉喷吹煤粉热解特性及富氧燃烧的研究.....	299
高炉矿焦混装的理论分析与生产实践.....	306
高炉矿焦混装配加球团的实验研究.....	311
高炉氧煤喷吹技术讲座.....	318
高炉风口直吹管预燃煤粉一维数学模型方程.....	338
高炉风口直吹管预燃煤粉模拟实验和计算.....	344
催化剂对煤粉燃烧特性的影响.....	347
高炉无料钟多环布料参数的确定.....	352
高炉无钟布料的重要环节——平台的形成.....	356
高炉无钟布料落点轨迹的实验研究.....	361
高炉氧煤喷吹单独供氧与综合强化燃烧的研究.....	366
提高煤粉燃烧率的试验研究.....	370
助燃剂对煤粉燃烧等性能的影响.....	373
包钢高炉渣含氟和碱金属限量的实验研究.....	377
富氧方式对煤粉燃烧性能影响的研究.....	384
高炉喷吹氧煤流组合分布的研究.....	390
离散单元法高炉无钟炉顶布料模拟研究.....	396
煤粉热分解特性及添加助燃剂的影响.....	402
矿物质对高炉焦炭溶损反应的催化作用.....	408
煤粉燃烧性能与颗粒结构分维的关系.....	412
第二部分 钒钛矿冶炼.....	417
钒钛磁铁矿的还原、软化和滴落特性的研究.....	417
高炉冶炼钒钛烧结矿软熔带的研究.....	422
高炉冶炼钒钛磁铁矿合理炉料结构的研究.....	431
攀钢 3 号高炉大料批分装可行性研究.....	440
高炉泡沫渣成因的研究.....	448
含 TiO ₂ 熔渣与铁液之间钛的行为.....	453
Ti 在渣-Fe 间迁移过程的研究.....	459
攀钢高炉炉顶布料模型的研究.....	465

高炉初始滴落渣氧位对渣中 TiO_2 还原的研究	472
高钛渣中 FeO 还原对 Ti(C,N) 生成的抑制作用	480
恒氧位 1500°C 渣-铜液间元素的氧化与平衡	487
攀钢 4 号高炉无料钟炉顶烧结矿粒度分布规律及数学模型	490
攀钢高炉大料批分装的试验研究	496
生铁中硅钛氧化规律的研究	503
SiO_2 对 TiO_2 还原的抑制作用	510
恒氧位下渣—熔 Cu 间 Ti 和 Si 的传输	518
Ti(C,N) 对高炉冶炼的影响	521
高炉型含钛炉渣中 MnO 对 TiO_2 还原的影响	527
含 TiO_2 熔渣离子团结构与体相粘度和密度的关系	533
高炉型钛渣中 V_2O_5 对 TiO_2 还原的抑制	538
渣中 TiC 氧化规律	542
炼铁高炉内 Ti(C, N) 生成的研究	546
攀钢高炉矿焦混装软熔性能的研究	550
攀钢高炉渣铁氧势测定实验研究	556
MnO 高钛渣的脱硫能力	563
攀钢高炉煤粉混加添加剂的实验研究	567
含钛高炉渣铁侵蚀炉衬的显微结构分析	572
高炉型高钛熔渣离子团结构与粘度的关系	578
钒钛高炉渣对炉衬材料的侵蚀研究	583
高炉含钛物料护炉问题的探讨	588
高碱金属钒钛渣对高炉炉衬材料的侵蚀研究	593
第三部分 高炉综合技术	601
本溪自熔性贫团矿的初步研究	601
降低焦比的新途径——高炉喷吹还原气	615
酒钢烧结矿软熔性能的研究	630
Si_3N_4 结合的 SiC 质砖衬的蚀损行为	637
高炉用碳化硅砖的碱蚀机理	642
鞍钢 6 号高炉碳化硅砖蚀损的研讨	649
小球团烧结工艺的基础研究	655
焙烧磁铁矿球团碳酸盐分解对氧化过程影响的动力学分析	660
高炉用氮化硅结合的碳化硅砖热震实验研究	664
烧结过程铁酸钙的生成速度	668
含铁炉料在还原过程中软熔行为的研究	673

用含碳球团矿生产的直接还原铁的特性.....	678
热风烧结原理及工艺.....	682
高炉炉身下部内衬用耐火材料的研究及较为合理的评价方法和应用.....	691
Si ₃ N ₄ -SiC 耐火材料的碱蚀动力学.....	695
铝炭砖的抗氧化性能.....	698
高炉冷却水腐蚀性及其缓蚀研究.....	702
CaO-Fe ₂ O ₃ 混合层内反应初期铁酸钙生成的动力学研究.....	706
含氟烧结矿冷强度制约因素分析及改进措施.....	711
含炭耐火材料抗碱侵蚀机制及探讨.....	715
面向 21 世纪的炼铁技术.....	721
PGC-高炉煤气分析仪的研制与应用.....	730
高炉漏水自动检测系统的研究.....	734
冷却水光磁协同处理技术.....	737
煤基海绵铁生产工艺实验室研究.....	741
高炉冷却水光磁处理的研究.....	746
低氟烧结矿微气孔的形成机理及对烧结矿强度的影响.....	753
焦炭的粒焦反应性.....	757
煤基直接还原铁防再氧化新工艺.....	762
冶金焦在高炉内微观结构的变化.....	766
瓦斯泥用于鞍钢球团生产的探讨.....	770
炼铁环境控制及高炉长寿的重要环节.....	775
鞍钢烧结优化配矿研究.....	781

第一部分 高炉强化冶炼

强化高炉的理论和实践

杜鹤桂

前言

1958年在党的领导下,在钢铁战线上出现了许多奇迹,钢铁的产量不但翻了一番,而且一些技术经济指标亦攀上了世界高峰。本溪钢铁公司第一钢铁厂(以下简称本钢一厂)去年9月后,高炉月平均利用系数都在2.2以上,今年4月份平均已达到到2.320,个别天曾达到2.708,打破了世界记录,其他如本钢第二钢铁厂、太钢、鞍钢、石钢等大、中型高炉利用系数都已靠近、赶上或将超过世界最先进的水平。

高炉利用系数大大的提高是和高炉的强化分不开的。近年来,国外以及我国的一部分高炉工作者认为过分地提高冶炼强度,会导致炉况不顺,甚至会引起结瘤,因此,希望保持中等的冶炼强度,从而降低焦比来强化高炉。由此,在大跃进前,我国大部分大、中型的高炉,强度都在0.9~1.05之间,利用系数平均在1.2~1.3。去年大跃进以来,本钢、太钢的高炉工作者,冲破了这些指标,冶炼强度由1.0,提高到1.6(提高50%以上),创造了世界高炉生产的新纪录,并为强化高炉作出了杰出的贡献。

本文以本钢高炉为基础,对强化高炉理论和实践进行一些探讨,重点在如何提高冶炼强度和降低焦比的问题,并提出如何更进一步提高利用系数的一些意见。

1 强化高炉的主要关键

高炉强化后就提高了利用系数,而利用系数和冶炼强度,焦比有着密切的关系,它可以以下公式来表示:

$$k = \frac{i}{c}$$

式中: k —高炉利用系数, t 生铁/ m^3 高炉有效容积/昼夜; i —冶炼强度, t , (燃烧焦炭量)/ m^3 高炉有效容积/昼夜; c —焦比, t , (焦炭)/ t 生铁。

由公式表明,提高冶炼强度和降低焦比是强化高炉,提高利用系数决定性的途径。

根据上列公式计算出在不同系数时,冶炼强度和焦比的关系(表1,图1)亦可说明这一点。

由表1和图1表明,不同的冶炼强度和焦比都可以达到一定水平的利用系数,但要达到较高的利用系数(2.0以上),光靠单方面来进行都是比较困难的。如本钢一厂高炉,目前月平均利用系数已到2.3,如果不是积极来提高冶炼强度,单靠降低焦比,自然要比今天低得多。

因此要使高炉更进一步的跃进,就应该贯彻提高冶炼强度和降低焦比双管齐下的方针。如依据本钢现有条件,设法将焦比降低到 500~550kg/t 生铁,冶炼强度提高到 1.67~1.83 就可将利用系数提高到 3.33。

2 提高冶炼强度

2.1 关于提高冶炼强度的极限问题

长期以来,冶炼强度提不高的原因在于:有人认为,提高冶炼强度会升高焦比,“过吹”会使炉况不顺,甚至我国有的高炉工作者认为“过吹”是使高炉结瘤的重要原因,因此大都主张维持中等冶炼强度来操作,但这些都为本钢、太钢、鞍钢等高炉实践所冲破了。

提高冶炼强度是否应有极限?只有当往高炉内吹入大量的风,将炉料从炉顶吹出(高压例外),或产生严重的管道气流,或料下降的速度使煤气来不及还原矿石,这时再提高冶炼强度就不允许了。当然,冶炼条件的不同,提高冶炼强度的数值是不一样的,因此,一般来说,提高冶炼强度距离极限还远得很。我们如采用高炉上下部的调剂,加强原料的准备处理,同时采用高压操作等措施,可以解决管道气流,炉料自炉顶吹出等问题。此外,象湖北麻城县“黄继光”土高炉,冶炼周期只有 34 分钟^[1],本钢等高炉虽然冶炼周期平均下降到 4.5~5h^[2],但和木炭高炉,尤其和“黄继光”土高炉比较,还差得很远,同时矿石还原的速度不全决定于时间,而更重要的是决定于矿石和煤气接触的表面积。因此,考虑因冶炼强度提高后,矿石来不及还原亦是没根据和必要的。

2.2 影响提高冶炼强度的几个因素

提高冶炼强度的技术措施,首选要改善料柱的透气性,其次扩大氧化带,尽量设法将炉中心“穿透”,利用高炉上下部调节法来减少煤气上升浮力,达到合理的煤气流,当然在提高冶炼强度的同时,尽量要设法降低焦比,同时力求高炉工作不过分恶化,使之顺行。

表 1 在各种不同系数时,冶炼强度(t/m³)与焦比的关系

利用系数 t/m ³ d	焦比 kg/t						
	800	750	700	650	600	550	500
4.0(0.25)	3.20	3.00	2.80	2.60	2.40	2.20	2.0
3.33(0.30)	2.66	2.50	2.34	2.17	2.00	1.85	1.67
2.86(0.35)	2.28	2.14	2.00	1.86	1.71	1.57	1.43
2.50(0.40)	2.00	1.87	1.75	1.68	1.50	1.37	1.25
2.00(0.50)	1.60	1.50	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00
1.67(0.6)	1.34	1.25	1.17	1.09	1.00	0.92	0.84
1.25(0.8)	1.0	0.94	0.88	0.81	0.75	0.69	0.63

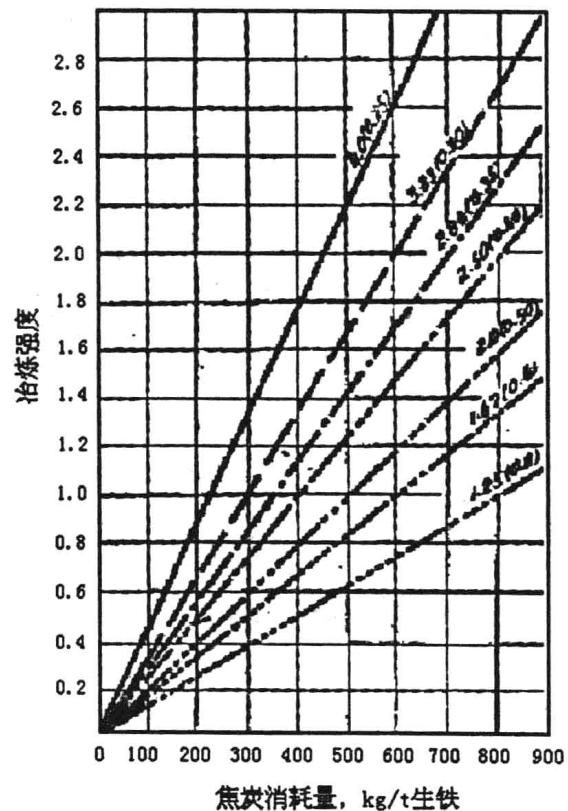


图 1 在各种不同利用系数时冶炼强度与焦炭消耗量的关系

影响提高冶炼强度的主要因素为：

2.2.1 料柱透气性

料柱透气性在高炉各部分所受影响是不一样的。高炉熔化区以上料柱的透气性决定于固体料的物理性质(强度、块度、开始软化温度及其软化层厚度等)，熔化区以下的料柱透气性决定于焦炭质量，炉渣性质(渣量和初渣粘度)，此外，加大鼓风和煤气速度，使煤气上升浮力增加，因而增加了压力损失，这些虽然和料柱透气性没有直接关系，但如能改善料柱透气性，自然亦有助于减少因风量增加所加大的压力差。

我们根据本钢几座高炉，在不同冶炼强度时，高炉边缘煤气静压力的数据，得出沿高炉高度各层的压力降曲线(图 2、3)。

由图 2、3 表明，随着冶炼强度的提高，沿整个高炉高度上压头损失亦随之升高，其中尤以高炉下部为显著。

因此，要很好地提高冶炼强度，首选在于改善上下部料柱的透气性，尽可能使上下部料柱的压力损失减少。改善料柱透气性的途径有：

(1) 烧结矿过筛和焦炭分级，以及分级后的单级入炉：去年 2 月起，本钢一厂将 <5mm 的烧结矿筛去，同时在一、二两铁厂进行焦炭分级(<40mm 的筛去)，这样对改善炉料上部的透气性是有效的，筛分后效果根据一铁厂统计，焦炭和烧结矿分级后产量约提高 15%，最近又将焦炭大小块分别加入高炉(25~60mm 加入 2 高炉，>60mm 的加入 1 高炉)，有效利用系数得到显著地提高(约增产 7~8%)，从 5 月初，1 高炉平均利用系数在 2.5 以上，而 5 月 5 日创 2.708 新纪录，这和焦炭分级，单级入炉分不开的。1958 年 4 月份二铁厂开始焦炭过筛，产量平均提高 6~8%，焦比平均降低 4%。

(2) 减少渣铁比，改善造渣制度：去年以来，本钢一厂混合矿品位的提高大致可分三个阶段：1958 年 1~4 月为 46~48%；5~6 月提高到 50~51%。7 月以后则提高到 52~53%，因此，渣量就大大减少。由于减少了渣量，无疑地就减少了高炉下部炉渣对煤气通过的阻力，因而允许提高冶炼强度。从图 4 看出，本钢一厂 1、2 高炉渣铁比自去年 1、2 月最高的 760kg 降低到 10 月的 470~480kg，冶炼强度得到显著的提高(提高 20~30%)，尤其按 1 高炉 1958 年 4、5、6、8 月的月平均值(见图 5)，这就显得特别明显，因为正是这一时间，矿石品位得到不断提高的。

本钢一厂高炉，去年 2 月，4 月已分别进行烧结矿过筛，焦炭分级，而操作制度除炉顶调剂外，在 10 月前变更不是不大的，因此我们认为在降低渣量过程中，其他冶炼条件基本变化不大，这样就可根据图 4、5，大致找出渣量和冶炼强度相互绝对量的关系(表 2)。

表 2 说明，本钢高炉减少渣量对提高冶炼强度是起了积极的促进作用。去年年末和今年第一季度，原料条件没有改善但冶炼强度不是不断提高，这是采用了其他措施所致(以后讨论)。因为有的冶炼因素没有考虑在内，表 2 计算的值当然还有误差的。

本钢高炉一年多来，几乎全部使用熟料(烧结矿、团矿)，而高碱度自熔性烧结矿(碱度 $\text{CaO}/\text{SiO}_2 \approx 1.0 \sim 1.5$)，占配料比的 80~95%。这样的高炉内不但本身增加了料柱的透气性，

而铁的氧化物在高炉内亦很易还原。由于人造富矿还原性好，矿石开始软化温度就可提高。

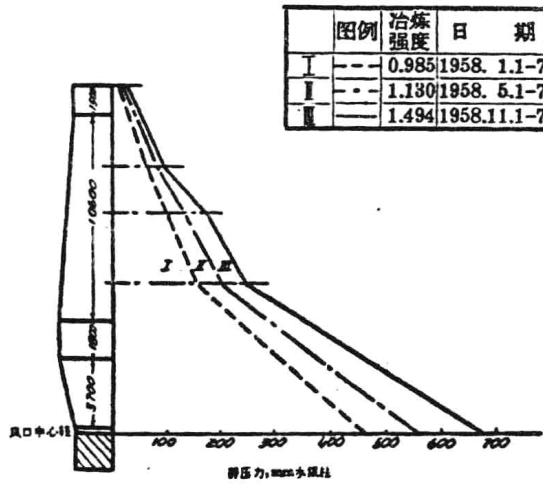


图2 不同冶炼强度时，煤气静压力的变化(本钢一厂)

1 高炉有效容积为 333m³

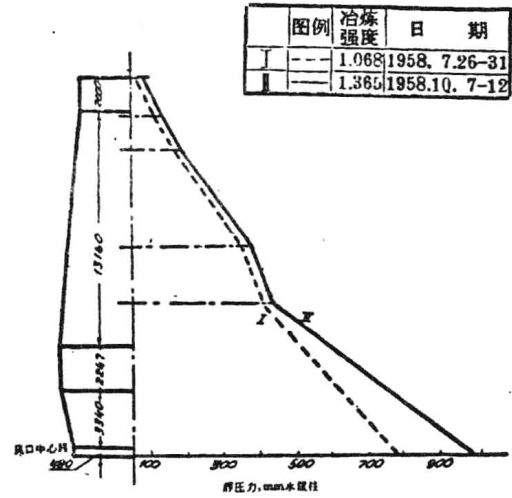
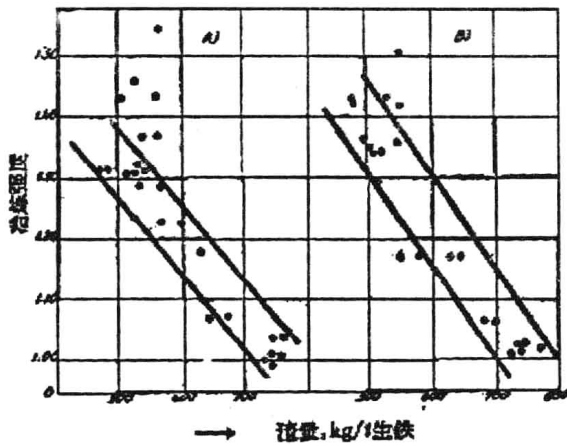


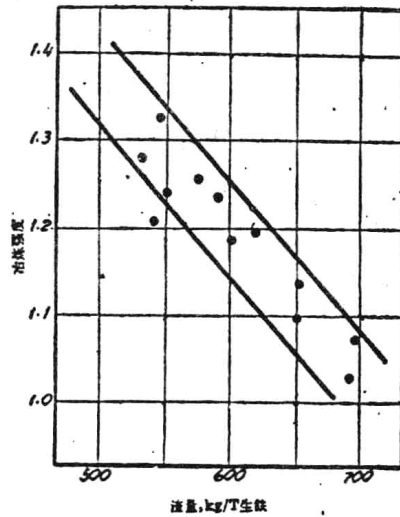
图3 不同冶炼强度时煤气静压力的变化(本钢二厂)

1 高炉有效容积为 917m³



A—本钢一厂1高炉1958年1月至1959年1月，月平均值；B—本钢一厂2高炉1958年1月至1959年1月，月平均值。(□—现厂数据，•—校正数据)

图4 冶炼强度与渣量的关系



本钢一厂1高炉1958年4、5、6、8月月平均值

图5 冶炼强度与渣量的关系

H.H.巴巴利金和ΦA 尤金^[3]根据自熔性烧结矿还原率的不同，得出开始软化温度和软化温度范围的数据如下(表3)。

由表3 试验表明，自熔性烧结矿在高炉内开始软化温度一般平均升高50~60℃，碱度愈高，开始软化的温度亦就愈高，而更主要的是使矿石软化温度范围变窄(由262减至52℃)，这样亦就减薄了矿石软化层的厚度，使煤气通过此层时的阻力减少，因而可允许提高冶炼强度。

本钢自熔性烧结矿内含有2~2.4%的MgO，使高炉渣中MgO保持在6~8%。MgO 烧结矿一方面适当地提高了烧结矿的强度，从而有利于提高料柱的透气性，另外在烧结矿中一般的矿物为CaO·Al₂O₃·SiO₂，CaO·FeO·SiO₂，CaO·FeO·2SiO₂以及[Ca(Fe, Mg)₂Si₃O₉]等，当增加MgO后，就生成2CaO·MgO·2SiO₂等，使FeO、CaO和SiO₂难还原的矿物减少，

这样亦就提高了烧结矿的还原性^[4]。提高烧结矿还原性不但对降低焦比有利，正是上面谈到的，亦可促使提高冶炼强度，此外，MgO 烧结矿还改善了高炉渣的流动性。这样亦减少了高炉煤气通过的阻力，对提高冶炼强度亦是有帮助的，本钢二厂 1958 年第二季度后，炉况顺行，冶炼强度不断提高，和使用高 MgO 渣亦是很有关系的。

表 2 降低渣量和提高冶炼强度相互绝对量的关系

渣量(kg/t 生铁)	平均冶炼强度, t 焦炭/m ³ /昼夜					
	本钢一厂 1 高炉			本钢一厂 2 高炉		
	范围	提高		范围	提高	
		绝对值	%		绝对值	%
750~700	1.01~1.07	0.06	5.94	1.02~1.07	0.05	4.90
700~650	1.07~1.13	0.06	5.61	1.07~1.15	0.08	7.46
650~600	1.13~1.20	0.07	6.20	1.15~1.22	0.07	6.07
600~550	1.20~1.26	0.06	5.01	1.22~1.30	0.08	6.55
550~500	1.26~1.33	0.07	5.56	1.30~1.36	0.06	4.61
平均每降低渣量 50kg 提高冶炼强度		0.06~0.07	5.01~6.20		0.05~0.08	4.90~7.46

表 3 自熔性烧结矿的还原度、开始软化温度和软化温度范围

自熔性烧结矿的还原度, %	54.1	56.5	61.9	64.4	76.9
烧结矿开始软化的温度, ℃	976	998	1024	1021	1049
烧结矿的软化温度范围, ℃	262	204	176	148	52

因此，高炉使用高碱度 MgO 的自熔性烧结矿对改善高炉熔化层上下部料柱的透气性是有好处的，本钢高炉能够提高冶炼强度和此亦是分不开的。

以上几点，亦是本钢高炉从原料准备处理着手，大力改善了料柱的透气性，促使冶炼强度提高的一些主要原因。

2.2.2 煤气流分布

(1) 风量煤气量的影响

提高冶炼强度后，风量、风速、煤气速度都增加，因此亦增大了料柱的压力降。从图 2、3，中看出，冶炼强度提高后，沿高炉高度的静压力降是增大了，尤其在高温下部显得更突出，亦即直接和风量、风速、煤气上升浮力的增大分不开的。压力降愈增大，对提高冶炼强度愈不利，根据 H.M. 札沃龙科夫(МаБороHKOB)^[5]关于散粒体物料层中不稳定紊流的公式，煤气的压力损失是和气流速度流量的 1.8 次方成正比的：

$$\Delta P = A \cdot \omega^{1.8} \cdot r^{0.8} \quad (1)$$

式中：A—常数； ω —气体流量，m³/s；r—气体比重，kg/m³； ΔP —压力损失，kg/m²

当焦比相同时，生成的煤气量和风量成正比，因此(1)式亦可写成：

$$\Delta P = A \cdot V^{1.8} \cdot r^{0.8} \quad (2)$$

式中：V—风量 m³/s。

美国的方宁克(Ф а Н И Н г), 根据测定气体通过液体层所得压力损失的数据, 建议煤气流通过炉料层的压力损失公式为(6)。

$$\Delta P = f' \frac{G^2 LS}{\rho g c \varepsilon^3} \quad (3)$$

式中: ΔP —料层的压力损失, kg/m^2 ; ρ —煤气比重, kg/m^3 和 r 值一样; g_c —常数, 等于 $4.16 \times 10^8 \text{m/h}^2$; L —料层高度, m ; S —固体料的单位表面积, m^2/m^3 ; ε —料层空隙度; $G=V_0\rho$ —通过容器的煤气重量; kg/h , m^2 ; V_0 —煤气通过空间截面的速度, m/h ; f —磨擦系数, 随雷诺规范数等值而改变。

以后由于炉料粒度等的不同, 方宁克将公式(3)修改成:

$$\Delta P = 13 \frac{L}{g c} \mu^{0.3} \frac{[(1-\varepsilon) \cdot \Psi]^{1.3}}{\varepsilon^3} \times \frac{G^{1.7}}{\rho D_s^{1.3}} \quad (4)$$

式中: μ —煤气粘度, kg/ms ; D_s —料的平均粒度, mm ; Ψ —粒度系数一般为 $0 \sim 1$ 。

根据札沃龙科夫和方宁克的公式, 提高冶炼强度的一大阻力是煤气压力降的增大, 同时不是和风量、煤气量成普通的一次方比, 而是和 $1.7 \sim 2$ 次方成正比。这对进一步提高冶炼带来了很大的阻力。

根据本钢高炉, 随着冶炼强度的提高和炉缸炉喉煤气压力降的关系得出表 4 图 6、7。

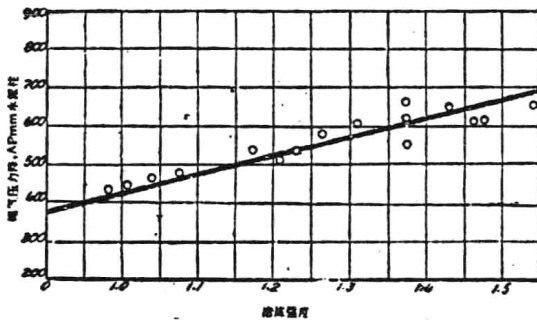
由图 6 表明, 1 高炉冶炼强度和压力降几乎是一条直线, 是一次方的关系:

$$\Delta P_1 = b + (\tan \alpha) i$$

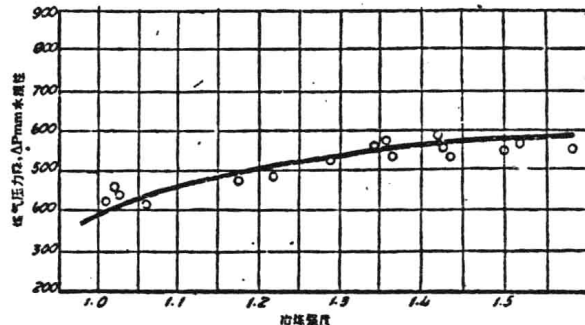
式中: ΔP_1 —高炉上下部压力损失, mm 水银柱; b —常数, 图中等于 375 ; α —一直线斜角, 图中等于 3° ; i —冶炼强度。

因此最后可得出近似方程式:

$$\Delta P_1 = 375 + 0.2309i \quad (\text{mm 水银柱}) \quad (5)$$



本钢一厂 1 高炉 1958.1 至 1959.4, 月平均值
图 6 冶炼强度和高炉内煤气压力降的关系



本钢一厂二高炉 1958.1 至 1959.4, 月平均值
图 7 冶炼强度和高炉内煤气压力降的关系

2 高炉曲线(图 7), 如起点圆心, 则 ΔP 和 i 的关系为:

$$\Delta P_2 = a i^n \quad (\text{式中 } a \text{—常数; } n \text{—为方次}) \quad (6)$$

曲线上有向上弯的趋向, 则 n 小于 1 , 同样, 本钢中心试验室章光安主任算出本钢 4 座高炉压力降和冶炼强度相关的方程式: