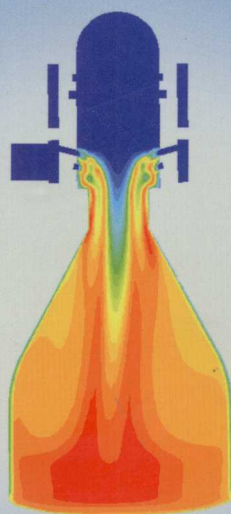


高炉高风湿 技术进展

Advanced Process on the High Temperature Blast Technology for Blast Furnace

国宏伟 张建良 杨天钧 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

TF54
02

013032235

高炉高风温技术进展

国宏伟 张建良 杨天钧 编著



北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2013



北航

C1639494

TF54
02

内 容 提 要

本书在高风温热风炉仿真研究和高风温热风炉控制专家系统开发的基础上,系统论述了高炉高风温的实现技术,重点讨论了由低热值高炉煤气实现高风温的理论与实践,并涉及高风温输送、高炉使用高风温等难题,以达到安全应用高风温技术节能降耗的目的。

本书适用于高等学校冶金类本科生和研究生的教学,可以作为高等学校的相关专业教材,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高炉高风温技术进展/国宏伟,张建良,杨天钧编著. —北京:
冶金工业出版社, 2013. 3

ISBN 978-7-5024-5654-2

I. ①高… II. ①国… ②张… ③杨… III. ①高风温—高等学校—教材 IV. ①TF544. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012) 第 242052 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcbs@cnmip.com.cn

责任编辑 刘小峰 常国平 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-5654-2

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2013 年 3 月第 1 版, 2013 年 3 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 17.75 印张; 344 千字; 274 页

56.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿信箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

钢铁工业是支撑我国国民经济发展的基础产业，粗钢产量已连续十余年居世界首位。钢铁工业也是高能耗、高排放产业，其能耗占我国能源消费的17%左右，是国家节能减排的重点。炼铁工序能耗占钢铁能耗的70%左右，是钢铁节能减排的重点。尽管吨钢综合能耗下降一半，但是与国家“十一五”规划提出的降低20%的节能目标还有一定差距。近年来，国内钢铁企业品种结构趋同、经济效益下滑，钢铁企业的竞争从产品竞争发展到能源、资源、成本的竞争。

高炉高风温具有降低焦比、降低燃料比和降低生产成本等作用，是炼铁节能的关键技术。据统计，每提高风温100℃，可降低焦比3%~7%。国外先进高炉风温在1250℃以上。2007年国内高炉的平均风温1125℃，与国际先进高炉风温比较，还有较大的差距。高风温技术因国家及企业节能减排、产业示范等需要曾被列为“2007年国家重大产业技术开发专项”。作为实现钢铁行业“十二五”单位工业增加值能耗和CO₂排放量降低18%目标的重点技术，高风温技术应予以研究和推广。

高炉高风温技术是一项综合技术，首先需要热风炉能够获得高温热风，然后将高温热风安全地输送到高炉，最后需要高炉能够承受及使用高风温。三个环节缺一不可。针对高风温的获得、输送和使用的问题，主要对应研发内容为热风炉高风温技术、热风管道高风温输送技术和高炉高风温操作技术，这些技术已应用在国内某大型钢铁企业大型高炉开展的1280℃高风温试验攻关，并已将高炉高风温技术研究开发成果应用于其他大型高炉上。

高炉高风温技术主要研发内容包括:

(1) 热风炉高风温技术。重点研发了低发热值煤气高效利用、热风炉系统仿真、智能控制和防止拱顶炉壳晶间应力腐蚀断裂四项关键技术。

(2) 热风管道输送高风温技术。重点研发了高风温管道配套设备并建立管道监控系统。

(3) 高炉高风温操作技术。重点研发了理论燃烧温度控制、风口监测、精料、煤粉混吹和煤气流分布控制技术,解决了全烧高炉煤气高风温的稳定供应、输送和高炉高风温稳定操作等问题。

本书在多年理论研究的基础上,结合首钢高炉高风温工业试验(2007年国家发改委重大产业技术开发专项课题),系统论述了高炉高风温的实现技术,重点讨论了由低热值高炉煤气实现高风温的理论与实践,并且涉及高风温输送、高炉使用高风温等难题,以达到安全应用高风温技术节能降耗的目的。

感谢首钢张福明、马金芳、陈冠军、毛庆武、倪革、竺维春、郑敬先等专家关于低热值煤气获取高风温、管道输送技术以及高风温的应用等诸多方面提供的宝贵资料,特别感谢工业试验期间的精诚合作。

北京科技大学王筱留教授、武钢于仲洁教授、中国金属学会王维兴教授等对书中内容进行了详细审阅,并提出了许多的宝贵意见。本书在编写过程中还得到了北京科技大学陈杉杉博士、孔德文博士、以及白亚楠、杨阳、裴义、曹英杰、杜申、吴小兵等研究生的帮助和支持,在此一并致以诚挚的谢意。

由于水平所限,加之经验不足,书中不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编著者
2012年12月

目 录

1 绪论	1
1.1 国内外热风炉风温现状	1
1.2 提高热风炉风温面临的问题	3
1.2.1 燃烧温度对热风炉寿命的影响	3
1.2.2 拱顶温度的控制	3
1.2.3 热风炉操作制度	3
1.2.4 热风炉结构和管路系统	3
1.2.5 蓄热式格子砖	4
1.3 我国高风温技术的进步	5
2 高温热风炉的仿真研究	6
2.1 热风炉数值仿真研究方法	6
2.1.1 内燃式热风炉特点以及研究重点	6
2.1.2 数值模拟方法	9
2.1.3 大型高炉热风炉的预热炉流场仿真研究	19
2.2 大型高炉热风炉的燃烧室仿真模拟	23
2.2.1 燃烧器煤气通道仿真研究	23
2.2.2 燃烧器助燃空气通道仿真研究	31
2.2.3 燃烧器联合燃烧室的燃烧状态仿真研究	33
2.2.4 小结	36
2.3 大型高炉热风炉燃烧器烧嘴优化设计	36
2.3.1 燃烧器烧嘴倾角优化仿真	36
2.3.2 燃烧器烧嘴个数优化仿真研究	47
2.3.3 燃烧器烧嘴面积优化仿真	56
2.3.4 小结	63
2.4 高效格子砖仿真模拟	63
2.4.1 格子砖仿真研究	64
2.4.2 格子砖的参数对温度场的影响	77

2.4.3	几何形状对格子砖温度场的影响	84
2.4.4	烟气性质对格子砖温度场影响的讨论	90
2.4.5	小结	96
3	高温热风炉控制专家系统	99
3.1	热风炉控制系统的研究与开发	99
3.1.1	热风炉传统控制系统	100
3.1.2	基于数学模型的热风炉控制系统	101
3.1.3	热风炉智能控制系统	102
3.2	热风炉拱顶温度控制模型	105
3.2.1	操作参数对拱顶温度的影响	106
3.2.2	操作参数对燃烧效率的影响	107
3.2.3	拱顶温度及燃烧效率回归模型	108
3.2.4	燃烧模型验证及分析	108
3.2.5	热风炉燃烧优化	110
3.2.6	小结	111
3.3	热风炉烟气排放控制模型	111
3.3.1	出口烟气温度假设	112
3.3.2	烟气温度回归方程系数确定	114
3.3.3	烟气排放控制模型验证	115
3.3.4	小结	116
3.4	热风炉热平衡残热推断模型	116
3.4.1	残热推断模型构建	117
3.4.2	最佳热收入和最佳热支出的确定	118
3.4.3	热风炉数据采集	120
3.4.4	热平衡残热计算原理	121
3.4.5	热平衡残热计算结果及分析	122
3.4.6	小结	124
3.5	热风炉专家控制系统	125
3.5.1	热风炉专家控制系统结构设计	125
3.5.2	专家控制模型燃烧制度设计	125
3.5.3	热风炉操作工艺程序	127
3.5.4	模糊推理专家系统规则设计	128
3.5.5	小结	133

3.6 结论	133
4 由低发热值煤气获得热风炉高风温的途径	135
4.1 低发热值煤气高效利用的现状	135
4.1.1 钢铁企业的煤气资源	135
4.1.2 低发热值煤气利用技术	135
4.2 低发热值煤气在高风温热风炉的应用	140
4.2.1 大型高炉热风炉的助燃空气高温预热技术	140
4.2.2 高风温合理操作参数研究	143
4.3 干法除尘技术	147
4.3.1 干法除尘技术概述	147
4.3.2 大型高炉干法除尘技术	148
4.3.3 小结	153
4.4 结论	153
5 高风温热风炉耐火材料及晶间应力腐蚀研究	154
5.1 热风炉耐火材料研究	154
5.1.1 第一阶段改进情况概述	154
5.1.2 第二阶段改进情况概述	156
5.2 热风炉晶间应力腐蚀研究	161
5.2.1 概述	161
5.2.2 晶间应力腐蚀开裂机理	161
5.2.3 晶间应力腐蚀开裂形态	162
5.2.4 晶间应力腐蚀开裂产生的原因	162
5.2.5 预防晶间应力腐蚀开裂的方法	165
5.2.6 防止晶间应力腐蚀开裂的实例	169
5.2.7 2号高炉热风炉抗晶间应力腐蚀措施	169
6 高风温热风炉热风管道输送技术	171
6.1 第一阶段改进情况概述	171
6.1.1 耐火材料的改进	171
6.1.2 耐火衬结构的改进	171
6.1.3 设备的改进	172
6.2 第二阶段改进情况概述	172

6.2.1	耐火材料的改进	172
6.2.2	耐火衬结构的改进	173
6.2.3	热风管道钢结构的改进	174
6.2.4	热风系统设备的改进	175
6.2.5	小结	175
7	高风温在大型高炉的应用	177
7.1	高风温条件下的高炉合理煤气流分布研究	177
7.1.1	煤气流分布对高炉生产和长寿的影响	177
7.1.2	煤气流分布的影响因素	178
7.1.3	煤气流分布的调节手段	187
7.1.4	小结	198
7.2	高风温对高炉理论燃烧温度的影响	199
7.2.1	理论燃烧温度的控制措施	199
7.2.2	理论燃烧温度的计算方法	201
7.2.3	模型设计与算法实现	215
7.2.4	软件计算结果与分析	226
7.2.5	风口循环区燃烧温度监测装置的开发	228
7.2.6	小结	234
7.3	高风温条件下高炉操作技术	235
7.3.1	高风温条件下风口初始煤气量的变化研究	235
7.3.2	高风温条件下提高喷煤量	237
7.3.3	高风温条件下的高炉精料	251
7.3.4	炉缸透气性、透液性研究	256
7.3.5	高炉送风制度研究	264
7.3.6	小结	269
参考文献		270

1 绪 论

1.1 国内外热风炉风温现状

近年来,中国金属学会炼铁分会对 133 座不同容积高炉的 441 座热风炉的状况进行了调查。调查表明,我国热风炉的形式以内燃式为主,但传统的内燃式热风炉已不能适应高温的需要。近几年,新建的高炉大部分都采用各种顶燃式、外燃式和改良型内燃式热风炉。如宝钢高炉配备的是日本新日铁外燃式热风炉,武钢等高炉配备的是内燃式热风炉,京唐 5500m³ 高炉采用俄罗斯卡卢金顶燃式热风炉。这些热风炉的风温能够达到 1200℃ 以上。热风炉风温状况的调查数据见表 1-1 ~ 表 1-3。

表 1-1 废气温度状况

废气温度/℃	≤350	350 ~ 400	410 ~ 480
高炉数	65	37	30
比例/%	49.24	28.03	22.73

表 1-2 燃烧热风炉用煤气状况

煤气种类	高炉煤气	高炉煤气 + 焦炉煤气	高炉煤气 + 转炉煤气
高炉数	112	20	1
比例/%	84.21	15.04	0.75

表 1-3 预热状况

预热状况	双预热	单预热空气	单预热煤气	无预热
高炉数	35	31	5	62
比例/%	26.31	23.31	3.76	46.62

从表 1-1 ~ 表 1-3 的调查数据可以发现,有 50.76% 的热风炉废气温度已超过了传统的控制值 (不大于 350℃), 并且有 22.73% 热风炉废气温度大于 410℃。由此可见,采用废气来预热热风炉燃气,可成为提高热风炉热效率的一种途径;另外,应严格控制热风炉烟气温度,保护热风炉使用寿命。针对我国 80% 以上高炉热风炉使用全高炉煤气,而高炉煤气热值随燃料比的降低而日趋贫化,其热值不足将成为限制风温提高的主要因素之一。此外,被调查的高炉仅 30% 的热风炉实现了双预热,在缺少高热值煤气的条件下,通过助燃空气和煤气预热方式

提高物理热量, 弥补化学燃烧热量的不足, 这将是提高风温的实施措施。

据统计, 目前我国约有 870 多家炼铁企业, 而炉容超过 1000m^3 的高炉仅有 200 余座, 企业数量多但是产业集中度低。近年来, 随着我国高炉炼铁技术的高速发展, 在利用系数、焦比、煤比、入炉矿品位等方面与国际先进水平的差距在缩小, 但在风温指标上却进步缓慢。近年来我国重点钢铁企业的热风平均温度见表 1-4。

表 1-4 国内重点钢铁企业高炉平均风温

年 份	2007	2008	2009	2010	2011	2012 (上半年)
热风温度/ $^{\circ}\text{C}$	1125	1133	1158	1160	1179	1189

由表 1-4 可知, 近几年我国重点钢铁企业风温水平在逐年稳定上升^[1], 2012 年前半年比上年提高了 10°C , 达到了 1189°C , 增长幅度较大。2011 年我国重点钢铁企业: 宝钢 (1205°C)、首钢 (1217°C)、邯钢 (1185°C)、唐钢 (1178°C) 等十余家企业风温水平较高。而多数企业风温仍然在 1150°C 以下, 如沙钢 (1132°C)、包钢 (1092°C) 等, 风温最低的是本钢 (1065°C)。目前, 国际先进钢铁企业的热风温度平均为 1235°C (见表 1-5), 少数达到了 1350°C , 与此相比我国整体差距仍然尚大。由此可见, 我国钢铁工业风温整体水平亟待提高。

表 1-5 国外重点钢铁企业高炉风温

钢铁企业	高炉	容积/ m^3	风温/ $^{\circ}\text{C}$	钢铁企业	高炉	容积/ m^3	风温/ $^{\circ}\text{C}$
霍戈文艾默尔顿	7 号	4200	1260	日本钢管福山厂	4 号	4228	1196
法国布莱厂	2 号	$\phi 12\text{m}$	1250		5 号	4663	1217
	3 号	$\phi 9.2\text{m}$	1200	新日铁君津厂	3 号	4063	1300
蒂森斯韦尔根	1 号	4607	1234		3 号	4063	1202
切烈波维茨	5 号	5580	1228	克虏伯曼内斯曼	A 号	$\phi 10.3\text{m}$	1269
				平 均			1235

现代热风炉的发展方向是:

- (1) 高风温, 热风温度 $1250^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ 。
- (2) 高热效率, 总热效率不低于 85%。
- (3) 长寿命, 一代寿命不低于 25 年^[2]。

目前, 国外不少高炉长期使用的风温已超过 1250°C , 而且俄罗斯 RPA 钢铁厂采用吸附法将煤气转化为富含 CO 的高热值煤气。而北美和欧洲的一些钢铁厂正在研制采用等离子技术来进一步提高风温。

近年来, 国外也广泛地利用余热回收^[3,4], 达到提高风温、降低能耗的目的。热风炉废气温度虽然只有 350°C 左右, 但废气量大, 带走的热量仍相当多^[5,6],

利用热风炉废气的热量来预热热风炉的煤气或助燃空气是有效地节约炼铁能耗、提高风温的措施之一^[7]。

目前,发达国家的高炉热风炉自动控制都包括完善的基础自动化和过程自动化,其中过程自动化主要是监控和设有热量和换炉等优化的数学模型,对提高热效率、节约能源、提高风温以及保护设备和延长炉子寿命有重要作用^[8]。

1.2 提高热风炉风温面临的问题

1.2.1 燃烧温度对热风炉寿命的影响

国外曾经有少数高炉的风温达 1350℃,但在该风温下,拱顶温度可达 1500℃,燃烧室的火焰温度为 1550 ~ 1600℃,燃烧产生的 NO_x 等大幅度升高,引起热风炉炉壳晶间腐蚀严重^[9,10],因此风温又退回 1250℃。根据热风炉耐火材料的限制,将热风炉燃烧室拱顶温度控制在 1420℃ 以下,达到 1280℃ 的风温水平是提高风温面临解决的问题之一。

1.2.2 拱顶温度的控制

随着高炉操作水平的提高,部分企业的燃料比已经降到 450 ~ 480kg/t,因而高炉煤气热值不足 3000kJ/m³,采用全高炉低热值煤气燃烧,火焰温度只有 1200℃,不能提供 1280℃ 的风温。

利用前置换热器或小热风炉加热助燃空气,高炉热风炉自身预热助燃空气,利用烟道废气、高炉煤气和助燃空气的双预热等新工艺都可提高燃烧温度^[11~13]。例如:烟道废气温度若达到 450℃,采用热管或热媒换热器,可将高炉煤气和助燃空气双预热到 250℃,依靠附加物理热量可以使燃烧室火焰温度达到 1400 ~ 1450℃,从而保证热风炉拱顶温度达到 1350 ~ 1400℃,送风温度可稳定在 1200 ~ 1250℃ 之间。但是若达到 1280℃ 的风温,则需要确定合适的高炉煤气和助燃空气预热温度,并且对拱顶温度的控制更为严格。

1.2.3 热风炉操作制度

缩小热风温度与拱顶温度之间的温度差,限制拱顶温度 1400℃ 左右条件下,尽可能提高风温。通常缩小温度差的技术主要依靠缩短送风周期,如由 70min 缩短为 50 ~ 60min。但是这种方法局限性较高,提高风温更需要综合性方法,才能有效缩小热风温度与拱顶之间的温度差,并维持高风温的稳定性。

1.2.4 热风炉结构和管路系统

现有的热风炉结构都可提供 1200℃ 风温,但从长寿、高效角度分析,外燃式或顶燃式热风炉更容易实现。俄罗斯卡卢金顶燃式热风炉和宝钢外燃式热风炉稳

定地提供 1200℃ 以上风温达 20 年以上。高风温热风炉的管路系统中,要重视关键部位的材料使用和结构设计,可基本保证 1200℃ 以上高风温时管道送风安全^[14,15]。但当风温超过 1250℃ 后,现有的热风炉结构和管道系统已经达到极限,需要进一步深入研究热风炉的温度分布以及各部分耐火材料的适应性。

1.2.5 蓄热式格子砖

提高蓄热式格子砖的蓄热性能是缩小热风温度和拱顶温度差的一个关键技术措施,它通过加强热风炉内格子砖与气流之间的热交换,充分满足高风温热量需求后,与热风炉操作制度相辅相成,综合利用,才能够有效缩小热风温度和拱顶温度差,达到提高风温的目的。

提高热风炉鼓风温度将带来良好的经济效益。它不仅可以降低高炉冶炼的消耗,而且有利于增加喷煤量。因此,它对于降低高炉生产的能耗和成本有深远的意义。国内某大型钢铁企业 1 号高炉在 1958 年 5 月平均风温就达到了大约 1027℃^[16],但直到 2005 年,我国重点企业平均的高炉风温还在 1000 ~ 1080℃ 的水平上徘徊。热风炉燃料化学热不足、高温热源供应短缺是造成我国热风温度长期徘徊的主要原因之一。

现代高炉冶炼技术的进步给热风炉提高风温带来了高温热源短缺的困难。它主要体现在两方面:一方面是由于钢铁企业后工序焦炉煤气用户的用量增大,使得许多企业严重短缺高热值煤气,而热风炉燃料只能依赖高炉煤气;另一方面是高炉煤气随着燃料比的降低日趋贫化。现在,操作良好的高炉,其高炉煤气的发热值还不足 3000kJ/m³。

为了获得高风温,保证热风炉的拱顶温度达到足够高的水平是完全必要的。以掺杂高热值煤气的途径提高拱顶温度虽然是最简单易行的方法,但在我国绝大多数企业内难以实施,大多数企业以 100% 的高炉煤气作为热风炉燃料,并通过预热煤气和助燃空气的办法来提高拱顶温度。与此同时,生产实践证明,在不同企业的热风炉上,燃烧末期最高拱顶温度与送风温度之差存在很大差距。在传统的以格子砖为蓄热体的热风炉上,这一温差达到 180 ~ 200℃,而许多小型的以耐火球为蓄热体的热风炉上却只有 80 ~ 100℃。在分析大量操作数据的基础上,结合我国国情,确定了热风炉设计目标^[17]:以 100% 高炉煤气为燃料,在尽可能提高拱顶温度的同时,强化热风炉的换热过程,缩小拱顶温度与送风温度之间的差值,改善操作制度,可实现热风炉向高炉供给 1250 ± 50℃ 风温的目标。

在实践上述设计目标的过程中,依靠国内的技术力量,经过不断的努力,我国高炉风温水平有明显提高。我国重点企业的高炉平均风温由 2006 年的 1100℃ 提高到 2007 年的 1125℃、2008 年的 1127℃ 和 2009 年的 1158℃。

1.3 我国高风温技术的进步

为了提高风温,确保向热风炉提供足够高的拱顶温度是完全必要的。近年来,我国高炉较为广泛地采用了下列技术:

- (1) 高炉采用富氧鼓风或掺烧转炉煤气,以提高热风炉燃料的化学热;
- (2) 利用热风炉废气的余热通过换热器对煤气和助燃空气进行预热;
- (3) 采用辅助热风炉强化预热空气;
- (4) 附加燃烧炉强化预热煤气和助燃空气。

上述技术措施实施的结果为:利用热风炉废气余热通过换热器对煤气和助燃空气进行预热的热风炉,获得了 1200℃ 的风温;采用辅助热风炉强化余热助燃空气的热风炉,获得了 1300℃ 的风温。

在这里,特别应该指出以下两点:一是不管采用任何手段,拱顶温度不要超过 1420℃,因为超过此值将在燃烧过程中大量生成氮氧化物(NO_x)。在热风炉条件下低 NO_x 燃烧技术尚未得到良好的解决之前,热风炉操作以拱顶温度控制在不超过 1420℃ 为宜。二是关注热风炉系统的热利用效率。现在控制 CO_2 的排放量已经提到议事日程,热风炉是高炉煤气消耗大户,减少煤气消耗量、提高热利用效率是高炉工作者责无旁贷的义务。

为了强化热风炉的换热过程,减小最高拱顶温度与送风温度之间的差值,采用以下技术措施:

(1) 以改进格子砖的设计为前提。开发了我国自己的格子砖系列,使得能够在维持蓄热室砖质量不变的前提下,加大了热风炉的加热面积,强化了热风炉的换热过程。目前,在统计大量实践数据的基础上,形成了一套优化格子砖的设计方法,利用这一方法,可以实现格子砖的加热面积、砖重、操作制度以及制造质量的相互统一。

(2) 采用耐热铸铁作为热风炉炉算的材质,提高热风炉的废气温度。与此同时,利用较高温度的热风炉废气,通过换热器对煤气和助燃空气进行预热。控制换热器的排气温度降到 150~160℃。这样,热风炉既提高了拱顶温度,又可以维持在高热效率的状态下工作。

(3) 促进气流分布均匀,提高格子砖的利用效率。在我国现役的热风炉中,内燃式、顶燃式和外燃式热风炉样样俱全。多年来,对各种形式热风炉的热交换过程、烟气和鼓风气流的流动状况进行了深入研究。在不少热风炉上采取了相应的保证气流分布的措施,提高了格子砖的利用效率。正是由于对热风炉温度场和流场的深入研究,改进了热风炉的设计,基本结束了多年来对热风炉结构形式的争论。

2 高温热风炉的仿真研究

2.1 热风炉数值仿真研究方法

2.1.1 内燃式热风炉特点以及研究重点

目前,世界上已建内燃式热风炉 140 多座,我国已引进 12 座,其结构如图 2-1 所示^[18,19]。

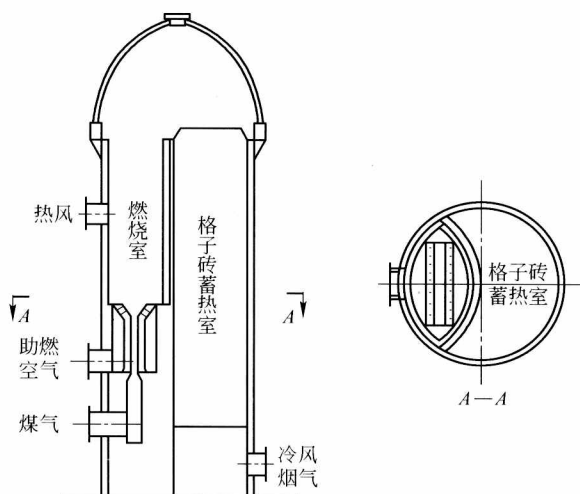


图 2-1 内燃式热风炉结构

2.1.1.1 内燃式热风炉技术特点

内燃式热风炉技术特点如下:

(1) 悬链线拱顶。悬链线拱顶具有良好的静态稳定性,消除了半球形拱顶的弊端,改变 52° 以外非稳定区曲线的方向,依靠拱顶砌体自身的重量和砌体之间的锁紧结构,使拱顶处于整体压紧状态,消除了向外的推力。因此,这种结构能承受温度和送风压力的变化。此外,悬链线拱顶还有以下特点:拱顶下部设置铰接结构,以铰接点为支点进行摆动,吸收拱顶的移动;在砖层中预留均压孔以消除压差,保持砖层两侧受力平衡;拱顶与热风炉墙体脱开,使墙体能自由膨胀上升,不触及拱顶;拱顶重量由设在炉壳内壁的金属托架分层支撑;在拱顶内衬

与墙体之间设置滑动缝，避免墙体与拱顶内衬相对位移产生阻力破坏作用；气体流场和温度场分布合理，气体在蓄热室断面上均匀分布。

(2) 合理的燃烧室结构。采用“眼睛形”燃烧室，既可以缩小燃烧室隔墙长度、增加蓄热室的有效面积，又可以改善烟气进入格子砖的分布。燃烧室采用“板块”式结构砌筑，把燃烧室砌体分成几个区段，区段之间设置滑动缝，使各区段砌体自由膨胀，消除了不均匀膨胀的应力破坏。在燃烧室与其相邻的砌体之间，采用滑动结构，使燃烧室独立于热风炉内。

(3) 自立式隔墙结构。隔墙是大型弧面结构，采用“板块”式砌筑方式，消除拐点应力造成的开裂现象。采用多层隔热结构的隔墙，降低隔墙的温差。隔墙内设置分散膨胀缝和集中膨胀缝。在与隔墙相邻的部位，以滑动结构代替刚性连接，消除砌体整体位移时的阻力。在隔墙中安装耐热钢板，避免隔墙出现通道，消除气体短路。

(4) 矩形陶瓷燃烧器。热风炉燃烧器结构是热风炉的关键部件，其结构优化设计将直接影响热风炉的流场、温度及压力分布，同时影响热风炉的整体使用寿命；热风炉格子砖在单位时间内具有足够的热交换量，是确保高风温的必要条件。因此，高风温项目主要侧重于高效燃烧器及新型高效格子砖研究。

2.1.1.2 内燃式热风炉研究重点

A 高效燃烧器研究

内燃式热风炉采用的燃烧器是矩形燃烧器^[20]（见图 2-2），它有两条通道，中心为煤气通道，煤气从通道底部进入。通道底部安装有一个阻流墙，用来改善煤气在通道中的分布。空气出口对称布置在煤气出口两侧，由多个矩形通道排列组合而成，出口有一倾角，使空气和煤气交叉混合。每两个对称的空气出口组成一个小单元，与煤气进行有效的混合，形成一个燃烧单元。燃烧器燃烧强度大、效率高、自调性好，能适应大范围燃烧功率的变化。

高风温研究基于热风炉燃烧室仿真计算模型，比较分析热风炉烧嘴在不同倾角、个数和面积条件下，燃烧室的温度场和流场分布的状况，确定最佳的热风炉烧嘴倾角、个数，并总结出烧嘴面积改变对燃烧室燃烧的影响规律。

高效燃烧器研究重点如下：

(1) 热风炉结构应保证燃烧期烟气气流速度分布以及温度场分布合理、均匀，且气流高速区以及高温区不能出现在格子砖面边缘，保护热风炉大墙结构，延长热风炉寿命。

(2) 热风炉结构应使送风期的冷风速度分布合理、均匀，有效带走格子砖在燃烧期内蓄积的热量，这样才能使热

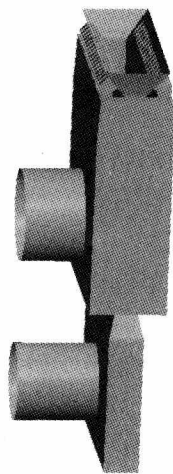


图 2-2 矩形燃烧器

风炉产生高温且最大限度节能。

(3) 设计的热风炉结构应保证燃烧产生气流中 CO 在燃烧室内分布少, 并使气流在进入格子砖前燃烧完全, 能够起到节能和高风温的作用。

通过对热风炉燃烧、传热和流动过程的压力、温度和速度等参数分析, 判断其分布的合理性, 达到进行优化选型的目标, 从而可以大大减少试验投资。

B 格子砖砖型结构的研究

目前格子砖类型很多, 有五孔、七孔、十九孔、三十九孔、梅花状等类型, 可根据热风炉蓄热要求进行选择。格子砖的砖型结构对提高传热效率和降低热风炉投资起着重要的作用。我国热风炉蓄热室采用的砖型经历了平板砖—五孔砖—七孔砖的发展过程。七孔砖的应用已经有近 20 年的历史。

目前, 常见的格子砖多为六边形砖, 中心五圆孔的砖型有 5 孔、7 孔、17 孔 (即常见的蜂窝型), 也有方形孔砖。国内常用格子砖热工特性见表 2-1。

表 2-1 国内常用格子砖热工特性

砖 型	格孔尺寸 /mm × mm	格子砖 厚度/mm	1m ³ 格子砖 加热面积 σ/m^2	活面积 ϕ /m ² · m ⁻²	填充系数 ($u_k = 1 - \phi$)	1m ³ 格子砖质量 G/kg	当量厚度 S/mm
平板型	60 × 60	40	19.82	0.298	0.702	1474	54.2
波纹平板型	60 × 60	40	26.4	0.36	0.64	高铝砖, 1728	53.3
						黏土砖, 1408	
五孔高铝砖	52 × 52	80	24.65	0.33	0.67	1809	38
五孔黏土砖	50 × 70	80	28.73	0.432	0.568	1250	39.536
五孔硅砖	55 × 55	80	30.6	0.41	0.59	1120	38.6
七孔高铝砖	$\phi 43$	90	38.07	0.4093	0.5907	1535.8	31.02

单位体积换热面积和单位体积质量是格子砖两个最重要的特性参数, 是由格孔流体直径和活面积两个基本参数决定的。单位体积换热面积是保证在单位时间内格子砖和流体之间具有足够的热交换面积, 单位体积质量是保证有充足的热储量。格子砖优化的前提是在相同单位体积质量条件下获得更大的换热面积。

单位格子砖的蓄热面积决定着蓄热室的大小; 单位格子砖的有效通道面积又称为活面积, 取决于气体流动状态和对流传热。

单位格子砖的砖占体积, 即填充系数 $u_k = 1 - \phi$, 它是蓄热的热容量指标, 决定着一个燃烧器蓄热室内的格子砖能蓄多少热量。

格子砖的当量厚度是将砖量完全平铺在蓄热面之间形成的砖厚, 它可以说明格子砖在热交换中的利用程度, 当量厚度越小, 热量利用得越好。

格孔的当量直径或水力学直径是异型孔换算成相当于圆孔时的直径。