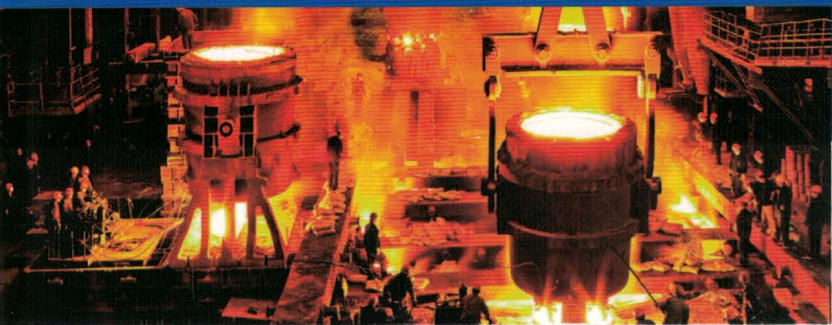


简明 JIANMING

铸铁熔炼 手册



宋强 王录才 主编
《简明铸铁熔炼手册》编写组 编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



简明铸铁熔炼手册

《简明铸铁熔炼手册》编写组 编
主编 宋 强 王录才
参编 杨思一 梁秋生 王荣峰
李长龙 刘 峰



机械工业出版社

本手册立足于现代化铸铁熔炼技术和生产实际问题，系统地介绍了熔炼原理、炉型结构、配套设备与工具、炉料与筑炉材料、熔炼工艺、熔炼过程检测与控制、环境保护及排放物回收利用等内容。

本手册的读者对象为铸造工厂、设计院所的熔炼技术人员，熔炼设备使用、设计、制造、试验研究、操作、生产管理的各类人员，也可供大专院校的师生、研究人员阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

简明铸铁熔炼手册/宋强, 王录才主编. —北京: 机械工业出版社, 2017. 3

ISBN 978-7-111-56253-5

I. ①简… II. ①宋… ②王… III. ①铸铁件-熔炼-技术手册
IV. ①TG250. 2-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 044303 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 何月秋 责任编辑: 何月秋 王彦青 王良

责任校对: 刘志文 刘岚 封面设计: 马精明

责任印制: 李飞

北京铭成印刷有限公司印刷

2017 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·35.5 印张·875 千字

0001—2000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-56253-5

定价: 169.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88361066

读者购书热线: 010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

教育服务网: www.cmpedu.com

前 言

作为世界铸造大国，我国正以稳健的步伐向铸造强国迈进，实现铸造强国的目标是我国广大铸造工作者长久以来的梦想。作为铸造行业的基础和龙头产业，铸铁件的发展在实现铸造强国梦想中具有举足轻重的作用。一直以来，由于产业结构不合理，先进的生产手段研发、推广不力，使我国的铸铁件生产处于产品档次低、资源消耗大、环境污染重、效益差的落后状态。改革开放尤其是进入 21 世纪后，随着铸造企业数量的逐年增加，我国铸造业得到了迅猛发展。一大批针对铸铁件生产新技术的研发和卓有成效的推广应用，对促进我国铸造产业的迅猛发展发挥了积极的作用。

铸铁件具有种类繁多、性能广泛、需求量大的特点，因此生产工艺技术复杂，尤其是铸铁熔炼工艺，不但对铸件的质量、成本有巨大的影响，而且由于影响铁液质量和成本的因素多而复杂，导致对熔炼设备尤其是熔炼技术的依赖性很大。这种情况促进了熔炼技术向优质高效、节能降耗、安全环保的现代化要求发展。近年来，随着符合我国生产条件、具有自主知识产权并融汇世界先进技术各种熔炼装置和熔炼技术不断出现，也对铸造工作者提出了更高的要求，只有更好地掌握技术，正确地操作和管理熔炼设备及熔炼过程，才能达到技术、经济的高指标。本手册着眼于当代我国铸铁件生产发展的实际，力求全面反映我国铸铁熔炼的先进技术和实践经验，搜集、选择了与我国铸铁熔炼密切相关的资料，以满足广大读者的需求，为铸铁熔炼生产提供指导和参考，是一本从事铸铁熔炼工作人员人手必备的实用工具书。

本手册立足于现代化铸铁熔炼技术和生产实际问题，系统地介绍了熔炼原理、炉型结构、配套设备与工具、炉料与筑炉材料、熔炼工艺、熔炼过程检测与控制、环境保护及排放物回收利用等内容。本手册的读者对象为铸造工厂、设计院所的熔炼技术人员，熔炼设备使用、设计、制造、试验研究、操作、生产管理的各类人员，也可供大专院校的师生、研究人员阅读。

本手册编委会由来自高校、科研单位和企业的七位热心铸铁熔炼事业的专家、教授和工程技术人员组成。其中各章编写分工如下：绪论和第 1 章由佳木斯大学宋强编写；第 2 章由佳木斯大学宋强和山东理工大学杨思一编写，第 3 章由刘峰编写，第 4 章和第 8 章由李长龙编写，第 5 章由太原科技大学王荣峰编写，第 6 章由太原科技大学王录才编写，第 7 章由山西经纬精密机械制造有限公司梁秋生编写，全书由宋强、王录才统稿。

在本手册的编写过程中，许多单位提供了宝贵的资料、意见与建议，《铸造设备与工艺》杂志编辑部协助完成书稿的打印，在此一并表示感谢！

由于编者水平所限，书中的不当与疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

《简明铸铁熔炼手册》编写组

目 录

前言	
绪论	1
第 1 章 铸铁的种类、牌号及熔炼	
要求	10
1.1 灰铸铁	10
1.1.1 牌号	10
1.1.2 熔炼要求	13
1.2 球墨铸铁	18
1.2.1 牌号、化学成分及性能	18
1.2.2 球墨铸铁的熔炼要求	20
1.3 蠕墨铸铁	24
1.3.1 牌号	24
1.3.2 组织及性能	24
1.3.3 熔炼要求	25
1.4 可锻铸铁	26
1.4.1 牌号	26
1.4.2 熔炼要求	28
1.5 合金铸铁	29
1.5.1 分类	29
1.5.2 合金铸铁的化学成分	30
1.5.3 牌号	32
1.5.4 熔炼要求	34
第 2 章 冲天炉熔炼	42
2.1 熔炼原理	42
2.1.1 熔炼热量的产生	42
2.1.2 热量交换	50
2.1.3 影响焦炭燃烧及铁液温度的因素	59
2.1.4 熔炼过程中铁液成分的变化	65
2.2 冲天炉的基本型式	78
2.2.1 冲天炉的分类	78
2.2.2 冲天炉的主要类型	79
2.3 配套设备及选用	86
2.3.1 送风系统	86
2.3.2 水冷系统中循环冷却水的水质要求	94
2.3.3 配料、加料系统	95
2.3.4 浇包	102
2.3.5 渣处理系统	104
2.3.6 烟尘净化系统	105
2.4 冲天炉主要工艺参数的选择	108
2.4.1 供风强度和风压的选择	108
2.4.2 底焦高度的选择	110
2.4.3 冲天炉配料计算	113
2.4.4 层焦量的选择	118
2.4.5 层熔剂量的选择	120
2.5 冲天炉的操作和控制	121
2.5.1 材料准备	121
2.5.2 冲天炉准备	126
2.5.3 浇包及工具准备	133
2.5.4 熔炼过程及控制	142
第 3 章 感应炉熔炼	157
3.1 感应熔炼原理	157
3.1.1 电磁感应加热的基本原理	157
3.1.2 炉料的熔化	163
3.1.3 铁液的过热	167
3.1.4 铁液成分的变化	167
3.2 感应炉类型	169
3.2.1 工频炉	169
3.2.2 中频炉	172
3.2.3 变频炉	176
3.3 配料、加料设备	179
3.4 感应炉的操作和控制	181
3.4.1 炉衬砌筑	181
3.4.2 浇包及工具准备	194
3.4.3 熔炼过程及控制	195
第 4 章 双联熔炼	209
4.1 双联熔炼的主要形式和特点	209
4.1.1 双联熔炼的主要形式	209
4.1.2 双联熔炼的主要特点	213
4.2 双联熔炼炉的合理选配	213
4.2.1 对保温炉的要求	213
4.2.2 坩埚式感应保温电炉的特点	214
4.2.3 沟槽式感应保温电炉的特点	214

4.2.4 双联熔炼炉选配的主要依据	214	5.7.8 铬钼冷硬铸铁	252
4.2.5 双联熔炼炉容量的选配	215	第6章 炉料及修炉材料	253
4.3 双联熔炼的操作工艺及应用实例	217	6.1 金属炉料	253
第5章 铁液的炉前处理	219	6.1.1 生铁	253
5.1 铁液净化及炉外脱硫	219	6.1.2 废钢铁	256
5.1.1 铁液净化	219	6.1.3 常用铸造铁合金	257
5.1.2 炉外脱硫	219	6.2 铸铁熔炼添加材料	268
5.2 铁液质量的炉前检测	221	6.2.1 铁液孕育剂	268
5.2.1 三角试片法	221	6.2.2 铁液脱硫剂	271
5.2.2 激冷型法	222	6.2.3 球化剂	272
5.2.3 圆柱阶梯试样法	223	6.2.4 增碳剂	272
5.2.4 经验观测分析法	223	6.2.5 熔剂	273
5.2.5 炉前快速金相分析	223	6.3 燃料	275
5.2.6 炉前热分析法测定碳、硅含量 ..	224	6.3.1 焦炭	275
5.3 孕育处理	224	6.3.2 燃油	278
5.3.1 孕育的目的	224	6.3.3 燃气	279
5.3.2 孕育剂的化学成分、性能及孕育 方法	224	6.3.4 煤粉、无烟煤与焦炭挥发物等 指标的对比	281
5.3.3 孕育处理的方法及操作要点	225	6.4 耐火材料	282
5.4 球化处理	226	6.4.1 耐火材料的分类	282
5.4.1 球化剂、孕育剂	226	6.4.2 耐火材料的性质	284
5.4.2 球化孕育处理	227	6.4.3 耐火制品的牌号、砖号、分型及 形状尺寸	291
5.4.3 球墨铸铁的炉前检验	232	6.5 隔热材料	299
5.4.4 球墨铸铁的典型铸造缺陷及其 防止	233	6.5.1 膨胀蛭石及其制品	299
5.5 蠕化处理	238	6.5.2 硅藻土及其制品	300
5.5.1 蠕化剂及处理方法	238	6.5.3 石棉及其制品	300
5.5.2 蠕化剂的应用实例	239	6.5.4 矿渣棉、岩棉及其制品	300
5.5.3 蠕化孕育处理的操作要点	240	6.5.5 膨胀珍珠岩及其制品	302
5.5.4 炉前、炉后控制与检测	240	6.5.6 硅酸钙绝热制品	302
5.5.5 常见缺陷分析及解决方法	243	6.5.7 黏土质隔热制品	304
5.6 可锻铸铁炉前处理与控制	244	6.5.8 高铝质隔热制品	304
5.6.1 炉前处理	244	6.5.9 氧化铝质隔热制品	305
5.6.2 可锻铸铁炉前控制	245	6.5.10 耐火陶瓷纤维及其制品	306
5.6.3 常见缺陷分析及防治措施	247	6.6 黏结材料(耐火材料用结合剂)	310
5.7 冲天炉熔炼合金铸铁炉前控制	248	6.6.1 结合剂的分类及选用原则	310
5.7.1 磷铜钨耐磨铸铁	248	6.6.2 铝酸钙水泥	311
5.7.2 稀土磷钒钛耐磨铸铁	249	6.6.3 水玻璃结合剂	312
5.7.3 硼耐磨铸铁	249	6.6.4 磷酸及磷酸盐结合剂	312
5.7.4 铋铜耐磨铸铁	250	6.6.5 亚硫酸纸浆废液结合剂	315
5.7.5 高钨抗磨铸铁	250	6.6.6 酚醛树脂结合剂	315
5.7.6 中锰抗磨球墨铸铁	251	6.6.7 沥青结合剂	316
5.7.7 铝硅耐热球墨铸铁	251	6.6.8 硅溶胶结合剂	317

6.6.9 纤维素结合剂	318	7.5 铁液成分炉前快速检测	398
6.6.10 硅酸乙酯结合剂	318	7.5.1 取样	398
6.6.11 ρ - Al_2O_3 结合剂	319	7.5.2 快速试样法	400
6.6.12 硫酸铝结合剂	319	7.5.3 热分析仪	403
6.6.13 氯化物结合剂	319	7.5.4 直读光谱仪	404
第7章 熔炼检测与铁液质量控制	321	7.5.5 高频红外碳硫仪	410
7.1 金属炉料检验	321	7.5.6 自动快速碳、硫分析仪及三元素 分析仪	411
7.1.1 金属炉料的采样和制样	321	7.6 铸件质量检测	413
7.1.2 生铁中锰、磷、硅的联合测定	327	7.6.1 化学成分检验	413
7.2 焦炭性能检测	328	7.6.2 金相检测	414
7.2.1 焦炭试样的取样和制样	328	7.6.3 力学性能检测	435
7.2.2 焦炭水分的测定	331	7.6.4 宏观检验	443
7.2.3 焦炭灰分的测定	332	7.6.5 无损检测	446
7.2.4 焦炭挥发分的测定	334	第8章 环保及资源综合利用	449
7.2.5 焦炭固定碳的计算	335	8.1 除尘	449
7.2.6 焦炭含硫量的测定	336	8.1.1 冲天炉有害物排放	449
7.2.7 焦炭反应性的测定	339	8.1.2 感应电炉有害物排放	450
7.2.8 焦炭强度的测定	340	8.1.3 设备系统及其选择	451
7.2.9 焦炭气孔率的测定	342	8.1.4 设备系统运行维护	506
7.3 熔剂检验	343	8.2 排放物的循环利用	508
7.3.1 主要熔剂石灰石	343	8.2.1 铸造粉尘的回吹	508
7.3.2 X 射线荧光光谱仪	344	8.2.2 炉渣的资源化及其产品	519
7.3.3 X-荧光能谱仪	345	8.2.3 熔渣利用(渣棉及其制备)	520
7.3.4 X-荧光波谱仪	346	8.2.4 烟气的余热利用	521
7.3.5 X-荧光光谱分析非金属试样的 制备	346	8.2.5 冲气炉烟气的处理及其产品	523
7.3.6 X 射线荧光光谱分析——在铸铁 熔炼原辅材料检测中的应用	347	附录	525
7.4 熔炼过程检验	348	附录 A 铸铁件相关标准	525
7.4.1 温度的检测	348	附录 B 冲天炉相关标准	536
7.4.2 风量的检测	368	附录 C 感应电炉相关标准	542
7.4.3 送风压力的检测	380	附录 D 气体和粉尘的基本性质参数	544
7.4.4 熔化率	386	附录 E 流体力学数据	549
7.4.5 炉气成分的检测	388	附录 F 常用物理化学数据	557
7.4.6 炉渣成分的检测	394	参考文献	561

绪 论

1. 铸铁熔炼的基本要求

对铸铁熔炼的基本要求可概括为优质、高效、安全。

1) 铁液质量优良。铁液的化学成分符合铸件要求, 非金属夹杂物和气体含量少, 有较高的出炉温度和良好的液态合金结构。

2) 对炉料的适应性强。在炉料中大量使用废钢铁和低质炉料时, 能较好地控制铁液质量。

3) 资源消耗少。熔炼所需要的燃料、电力、熔剂、耐火材料、辅助材料的消耗率尽可能低; 熔炼过程中金属元素的烧损少。

4) 资源综合利用。熔炼过程中产生的热量、熔渣、烟气应能充分地回收利用, 提高收益、保护环境。

5) 熔炼效率高, 炉况稳定, 熔化速度较快。

6) 操作安全。设备、工艺及操作的故障率低, 生产条件好。

7) 可实现自动化、智能化控制。

2. 铸铁熔炼设备

可用于铸铁熔炼的设备种类较多, 如使用不同燃料的冲天炉, 感应电炉, 电弧炉等。不同类型的熔炼炉, 性能特点各异, 熔炼效果也不相同。应用历史最长、规模最大的是冲天炉, 感应炉次之。

(1) 冲天炉

1) 类型。冲天炉的类型可从炉体基本结构、炉膛形状、送风温度、加热方式、炉龄等多方面划分。表 0-1 从炉体基本结构归纳了我国冲天炉发展过程中出现的主要炉型。这些不同类型的冲天炉, 在不同的生产条件、不同的设计理念下产生。这些冲天炉的结构和性能存在很大差别, 但是从熔炼的效果看, 主要还是铁液质量及其稳定性的差别。随着熔炼技术的进步和生产的发展, 有些类型的冲天炉已逐渐淡出, 具有优质高效、节能降耗、安全环保特点和更高性能指标的先进冲天炉, 正在越来越多地用于生产。

表 0-1 冲天炉主要炉型

炉 型	结构特征	性能特点
勺炉(搀炉)	勺型炉缸上叠放一段炉身组成, 炉身下部设置一个大倾角风口, 炉缸两侧有短轴支撑在基础支架上, 炉缸后侧设置长柄, 用以倾转炉体、倒出铁液	结构简单, 操作方便, 但修炉不方便。炉料预热差, 出铁温度较低, 铁液质量不稳定。用于低牌号单件小批量铸件生产。熔化率通常小于 2t/h
三节炉	仅有炉身和炉缸。炉缸、风口段和预热段三段叠放组成炉身。采用两排至多排风口侧送风, 主风口倾角 45°左右。缩小主风口处炉径为曲线炉膛特点, 俗称“卡腰三界炉”	熔化率为 1~2t/h, 用于小批量铸铁件生产。性能优于勺炉, 可满足普通灰铸铁和部分球墨铸铁的熔炼要求, 为简易型冲天炉。氧化带热量集中, 有较高的热效率和铁液温度, 节焦效果好。修炉不够方便

(续)

炉 型	结构特征	性能特点
多排小风口冲天炉	由炉身、炉缸、炉台组成,通常设置前炉。风口超过三排,其中主风口一排,通常设置在第2或第3排,风口比低于5%,风口排距为150~250mm。曲线炉膛	具有较高的燃烧比,底焦截面热量分布较均匀,适合使用强度低、灰分大的低质焦不易更高。单班制生产。层焦比为1:10时,铁液温度可达1400℃,炉内热量不够集中。氧化气氛重,元素烧损及成分波动较大,炉料中废钢比例受限
两排大间距风口冲天炉	由炉身、炉缸、炉台组成。配置前炉或分渣器。两排风口,风口比为3%~5%。主风口多设置在上排,主辅风口比为3:7~5:5,可采用常炉衬或薄炉衬	炉内热量较集中,氧化气氛较轻。层焦比为1:10时,铁液温度可达1450℃,要求使用质量较好的焦炭和炉料。可熔炼高强度灰铸铁、球墨铸铁、白口铸铁等,用于单班制或两班制批量产品生产
中央送风冲天炉	炉体组成同两排大间距风口冲天炉,送风柱从炉底中心插入炉内,风口开设在送风柱的柱面和端面。通常用于容量较大的冲天炉	炉壁效应小,可使用低质焦炭。底焦燃烧充分,底焦截面热量分布均匀,铁液温度较高。氧化气氛严重,元素烧损大。用于单班制、批量铸件生产
一排风口冲天炉	炉体由炉身、炉缸、炉台、抽气段、加料段等组成,配置外热风系统、除尘系统、加料系统、水冷系统、控制系统等。通常采用水冷插入式风口和无炉衬结构,实现长炉龄熔炼。用于单班制、两班制时,可采用常炉衬、薄炉衬和普通风口	炉内热量集中,氧化带温度高,氧化气氛弱,元素烧损轻,铁液质量好。炉况稳定,易操作。炉气燃烧比低,一氧化碳体积分数超过12%,宜采用外热风回收炉气化学热,提高熔炼性能。可用于不同批量生产,熔炼各种灰铸铁、球墨铸铁、白口铸铁及部分合金铸铁

2) 冲天炉参数

① 熔化率 (q): 冲天炉在单位时间内熔化铁液的质量, 单位为 t/h (吨/小时)。

② 熔化强度 (S): 熔化区炉膛单位横截面积的熔化率, 单位为 t/h · m² (吨/小时 · 平方米)。

③ 炉膛直径: 冲天炉的炉膛直径包含熔化区炉膛直径 (记作 $D_{\text{熔}}$)、风口区炉膛直径 (记作 $D_{\text{风}}$)、炉膛平均直径 (记作 $D_{\text{均}}$) 等。炉膛直径随着炉衬的侵蚀和炉况的变化, 也会改变。

④ 有效高度 (H): 炉膛内可供炉料预热、熔化与铁液过热的总高度。标记为第一排风口中心面到加料口或炉气抽出口下缘之间的垂直距离。

有效高度应使炉气的热量充分预热炉料。

⑤ 风口比 ($\Sigma f/F$): 风口总面积 (Σf) 与炉膛某处横截面积 (F) 之比。采用不同炉膛横截面积时, 可表示为风口区的风口比、熔化区的风口比、平均风口比。

风口比的大小影响入炉风速, 从而影响炉内气流分布的均匀性和送风的动力消耗。

⑥ 铁液温度 (T): 指出铁时, 在出铁口前 300mm 处出铁槽中测得的铁液温度 (℃)。

⑦ 风量及送风强度。

a. 入炉风量 (Q): 单位时间送入底焦内的标态空气量, 单位为 Nm³/min (标立方米/分钟)。

b. 送风强度 (W): 主风口区或熔化带炉膛单位横截面积的送风量, 单位为 m³/h · m² (立方米/小时 · 平方米)。使用时应说明送风强度所对应的位置, 送风强度可表示为下式:

$$W = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

式中 D ——熔化带炉径或主风口区炉径 (m)。

⑧ 风压：冲天炉送风时，风机输出的压力。送风系统中，不同位置压力不同，冲天炉风箱中的压力反映了冲天炉的送风阻力，是分析、控制炉况的重要依据之一。

⑨ 风温：指进入风口的送风温度。

⑩ 铁焦比：熔炼的铁液与消耗的焦炭的质量比。批料量与层焦量之比称为层铁焦比；一个熔炼周期中，熔炼的铁液与消耗焦炭的总质量比，称为总铁焦比。也常用铁焦比的倒数表示该项参数，称为焦铁比。

⑪ 焦耗量、焦耗率：熔炼 100kg 铁液消耗的焦炭量，单位为 kg 焦/100kg 铁，以百分比表示时称为焦耗率。

⑫ 碳耗量、碳耗率：熔炼 100kg 铁液消耗的焦炭中碳的质量，单位为 kg 碳/100kg 铁，以百分比表示时称为碳耗率。

⑬ 层焦量：一个配料、加料周期中，加入冲天炉的焦炭量，单位为 kg。

⑭ 批料量：一个配料、加料周期中，加入冲天炉的金属炉料量，单位为 kg。

⑮ 底焦高度：第一排风口中心至最下面一批金属炉料的垂直距离。

⑯ 元素烧损率 (k_i)：熔炼中某元素的烧损减少量 (ΔQ_i) 占炉料中该元素的总质量 (Q_i) 的百分比。表示为

$$k_i = \Delta Q_i / Q_i; \Delta Q_i = Q_i - q_i$$

式中 q_i ——铁液中该元素的质量。

⑰ 元素增加率：铁液中某元素熔炼增加的质量，占炉料中该元素总质量 (Q_i) 的百分比。

3) 冲天炉的熔炼特点

① 工艺性能：

a. 生产能力及对产量的适应性。目前熔化率从 1t/h 到 100t/h 的冲天炉都在生产中应用，如果生产需要，熔化率也可小于 1t/h 和大于 100t/h。任何一种规格的冲天炉，其熔化率都可在相应范围内调整而不影响其正常熔炼，调整幅度达 10%~20%，因此单台冲天炉可以在产量上满足任何生产规模的需要。由于冲天炉的综合效益随着熔化率的增大而提高，大容量、长炉龄、外热风冲天炉的综合效益更高，因此大批、大量生产更适合采用冲天炉。

b. 对产品的适应性。冲天炉能熔炼铸铁，其中包括灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁、白口铸铁和部分合金铸铁及铁合金，也可用于熔化某些石料。冲天炉的出炉铁液温度可控制在 1500℃ 左右，能满足不同质量和结构铸件的浇铸。

c. 对生产方式的适应性。冲天炉是连续熔炼，铁液以一定的流量从炉内连续流出，连续熔炼的时间可从数小时到数十天；可满足各种工作制度的要求。尤其对于平行作业的生产方式，冲天炉更适宜。

② 对环境保护的影响：

a. 主要污染。冲天炉排放的污染物主要是灰尘和有害气体，灰尘中大颗粒物的比例很大，其中主要是焦炭颗粒。冲天炉的污染物排放在厂房之外，除尘装置可以较彻底地解决冲天炉烟气的污染问题。

b. 能源需求。冲天炉多以焦炭为燃料，每吨铁液的焦炭（固定碳质量分数为 85%）消耗量在 100kg 左右，完全燃烧发热量为 2896MJ，折合消耗标煤 125kg。随着电力结构的变

化，冲天炉的能源结构也将随着改变，例如采用等离子加热送风的冲天炉，焦炭的消耗量可减少 60% 以上，相应的污染物排放量也将大幅度减少。以焦炭或碳床实现冶金目的，以非焦燃料提供热量的冲天炉已有成功的先例，正在进行提高性能及实际应用可行性的研究。在保证熔炼性能的前提下，改善冲天炉的能源结构将使冲天炉的优越性更加显著。

③ 设备结构及配套装置对熔炼的影响。不同结构及配套装置的冲天炉，其性能有明显的差别。生产中可以根据铸件的牌号、产量、炉料的成分和质量、生产方式等要求选择适当的冲天炉结构及配套装置。冲天炉有很强的结构和配套适应性，从常温送风、常炉衬、单班制人工操作冲天炉到外热风、无炉衬、长炉龄、自动化冲天炉，有多种多样的冲天炉系统可供选择。

④ 热效率及余热回收。从能源利用率看，冲天炉的热效率约为 40%~60%，散失热量的回收具有较强的可行性。烟气热量回收利用、铸造粉尘回吹造渣、熔渣制棉技术已有成功的应用。

⑤ 冶金性能及铁液质量。冲天炉内由 1700℃ 以上的高温和焦炭、熔渣、炉气构成的冶金环境对铁料和铁液的成分变化发挥着积极的作用。通过工艺控制，可实现增碳增硅、大幅度减少合金元素的烧损、降低增硫率。尤其较大容量的外热风长炉龄冲天炉，稳定并提高铁液质量的能力更强。在冲天炉内，虽然铁液的过热时间仅有几分钟，但由于铁液呈液滴和细小的流股，有充足的表面积与焦炭、熔渣、炉气接触，实现充分的吸热升温 and 物质传递。铁液过热温度可达 1600℃；出炉铁液的硫含量可控制在 0.06%（质量分数）以下；铁液和熔渣的流动性很好，有利于金属氧化物从铁液向渣中转移；铁液在炉内的过热时间短，铁液中有 0.005%（质量分数）左右的氧和 0.06%（质量分数）左右的硫，它们的高熔点化合物可作为形核基底，出炉后，铁液中自生晶核较多，通过孕育处理，细化晶粒的作用对于高牌号灰铸铁更显著。

(2) 感应炉

1) 基本工作原理。利用导电线圈产生的交变磁场，使处于磁场中的金属炉料中产生感应电流，加热熔化炉料、过热金属液，达到熔炼的目的。

根据法拉第电磁感应定律，当线圈通过交变电流时，线圈内产生的感应电动势表示为

$$E = Nd\Phi/dt$$

式中 E ——感应电动势 (V)；

N ——感应线圈匝数；

$d\Phi/dt$ ——磁通量的变化率。

处于交变磁场中的金属炉料，在感应电动势的作用下，炉料内部产生感应电流，受电阻作用产生热量。根据焦耳-楞次定律，热量表示为

$$Q = I^2 R t$$

式中 Q ——炉料内产生的热量 (J)；

I ——感应电流 (A)；

R ——金属炉料的电阻 (Ω)；

t ——通电时间 (s)。

2) 类型。感应炉按工作电流的频率可分为工频感应炉，频率为 50Hz；中频感应炉，频率 >50~10000Hz；高频感应炉，频率 >10000Hz。

按炉体结构,感应炉分为有芯和无芯两类。有芯感应炉为熔沟式结构,感应圈包围与坩埚连通的熔沟,熔沟里的铁液被感应加热,靠热量传递加热坩埚里的炉料。无芯感应炉的感应圈包围坩埚,直接加热坩埚里的炉料。

常用感应炉的型号参考表 0-2。

表 0-2 常用感应炉的型号

电源频率	用途	型号	额定容量 /t	额定电压 /V	额定功率 /kW	耗电量/ (kW·h/t)	备注
工频	熔炼	GW1-360	1	500	360	650	耗电量计算条件:常温 炉料入炉,至 1450℃ 铁液 出炉
		GW1.5-500	1.5	750	500	610	
		GW3-800	3	1000	800	590	
		GW5-1300	5	1000	1300	580	
		GW10-2500	10	2000	2500	560	
		GW20-3800	20	3000	3800	530	
		GW30-6000	30	3000	6000	520	
	GW50-12000	50	3000	12000	520		
	保温	GW3-480	3	750	480	—	
		GW5-730	5	750	730	—	
		GW10-1000	10	650	1000	—	
		GW20-1700	20	2000	1700	—	
		GW30-2700	30	2000	2700	—	
	GW50-5400	50	2000	5400	—		
中频	熔炼	GW0.15-150	0.15	750	150	780	耗电量计算条件:常温 炉料入炉,至 1600℃ 铁液 出炉
		GW0.25-250	0.25	750	250	760	
		GW0.5-400	0.5	1400	400	720	
		GW1-800	1	1400~2500	800	620~650	
		GW1.5-1200	1.5	1400~2500	1200	590~630	
		GW2-1500	2	1400~2500	1500	590~610	
		GW3-2000	3	2300~2500	2000	580~600	
		GW5-3000	5	2300~2500	3000	580~600	
	GW7-4000	7	2500	4000	580~600		
	保温	GWB3	3	380/1500	350	49	
		GWB5	5	380/1500	550	44	
		GWB7	7	380/1500	750	43	
		GWB10	10	380/1500	1000	42	
GWB10		10	660/2500	1000	40		
GWB15	15	660/2500	1500	39			
GWB20	20	660/2500	2000	38			

3) 熔炼特点

① 炉料升温熔化和铁液过热的热量产生于炉料内部,热源热量损失较少,热效率高,铁液升温快,而熔化速度较慢。铁液过热温度调节方便,容易稳定控制出铁温度。

② 便于对铁液采用渣保护,元素烧损少,铁液中非金属杂质和气体含量少,铁液成分易于准确控制,且由于电磁搅拌作用,铁液化学成分和温度均匀,可熔炼高合金铸铁。

③ 通过配料可以方便地控制铁液成分。

④ 烟尘排放量较少,便于环境保护。

⑤ 冶金性能差,对炉料的洁净度、形状及块度都有较严格的要求,铁液中合金元素不易做减量操作。

感应炉的最高温度为 1600℃，不及冲天炉，在使用增碳剂时，难以高度溶解分散，结晶时易形成片块状石墨；铁液的过热时间长，又有电磁搅拌，可作为共晶结晶的外来晶核因溶解而大量减少。硫的质量分数约为 0.03%，氧的质量分数约为 0.002%，作为形核基底的氧化物、硫化物过少，铁液的过冷度增大，在相同的碳当量下，比冲天炉高 40~50℃，铸件的细薄处易出现白口，切削性能差；铸件的收缩倾向大，厚壁部分易产生缩松、缩孔；采取通常的孕育手段作用不明显，须采用大剂量、强效孕育剂及多次孕育。

由于冶金能力差，感应炉对炉料的适应性远不如冲天炉。必须使用洁净无锈的炉料，配料的成分要求严格。用低碳炉料熔制高碳铸铁时，对增碳剂的性质和增碳量均有较严格的限制，因此炉料中废钢的比例也受到限制，冲天炉却可全部用废钢作炉料熔炼高碳铸铁。感应炉配料中，原生铁的比例不能高，原生铁中的粗大石墨片在感应炉的温度条件下，难以完全溶于铁液，形成细小的石墨晶粒，在铁液结晶时，作为结晶核心形成初生石墨。这些石墨呈块片状，对铸铁的力学性能有不良影响。通常感应炉原生铁用量在 10%左右，如超过 20%，铸铁的力学性能将难以保证。

生产球墨铸铁和高牌号灰铸铁时，为避免产生遗传性，回炉料的比例也不宜过高。

(3) 非焦炭冲天炉 我国对于非焦炭冲天炉的研究做了大量的工作，取得了丰富的成果。在生产中，曾经得到不少应用。现阶段虽然已极少应用，但非焦冲天炉适应一定生产条件的一些优点，仍为其中在生产中采用提供了可行性。非焦冲天炉的燃料可以是天然气、煤气、燃油、煤粉、焦粉、页岩粉等。

非焦炭冲天炉的类型主要有底置燃烧室冲天炉和侧置燃烧室冲天炉两类。底置燃烧室设置在炉子下身，与炉料间采用水冷栅床隔开。燃烧室产生的高温炉气通过栅床加热熔化炉料。在栅床上放置一定厚度的传热介质，将炉气的部分热量传给铁液，对铁液进行过热。铁液暂存在燃烧室或前炉内。侧置燃烧室设置在装料炉身的旁侧，燃烧室与炉身下部有过桥连通。高温炉气经过桥进入炉身，加热炉料。铁液经过桥流入燃烧室，在燃烧室下部的熔池中暂存并被继续过热。燃烧室有立式和卧式两种，采用水冷外壳可延长燃烧室炉衬寿命。过桥是影响炉龄的薄弱环节，采用水冷过桥或卧式旋转燃烧室，是解决炉龄问题的可行办法。

非焦冲天炉的燃料有多种选择，可以充分利用地域条件，降低燃料费用及熔炼成本。燃料的燃烧过程易实现自动调节和控制，燃料燃烧充分，化学热损失极少。

炉料和铁液的吸热是在其与炉气、换热介质的接触和炉壁、炉气和换热介质热辐射作用下实现的。因此提高出铁温度的根本方法是提高炉气温度。以往在非焦冲天炉应用中，由于受耐火材料耐火度及使用寿命的限制，难以提高出铁温度，在一定程度上制约了非焦冲天炉的推广应用。

非焦冲天炉的冶金性能较差。炉气的氧化性较强，又没有焦炭这样的冶金介质存在，硅锰的烧损大，铁液脱碳，增硫量仅后铸件总硫量 20%~30%，有利于熔炼低碳、低硫铁液。

创造具有较强冶金性能的非焦冲天炉是其发展应用中需要解决的问题。近年来，国内外开展的碳床天然气冲天炉试验研究为该问题的解决找到了一条可行之路。用焦炭或碳素材料代替炉栅上的陶瓷换热介质，合理地控制碳的燃烧方式，实现以天然气热量为熔炼热源、以碳素材料作为冶金介质，形成类似焦炭冲天炉的熔炼过程，可以大幅度降低焦炭消耗。

3. 我国铸铁熔炼现状及发展趋势

(1) 冲天炉应用现状及发展趋势

1) 应用现状。发达国家对冲天炉的发展围绕减少热量浪费、充分利用余热、开发新热源、自动化熔炼控制、高标准治理废气等方面展开,把主攻的方向集中在大型现代铸造企业所需的外热风冲天炉上,开发出各具特色的热风装置和除尘装置。如埃夏换热器、恩德瑟姆换热器、等离子加热器、泰森裂化清洗器、组合湿法除尘器、文式除尘器等。

发达国家冲天炉大都以大熔化率、单排插入式铜质水冷风口、外热风长炉龄冲天炉为主,热风温度一般为 $400\sim 600^{\circ}\text{C}$,其热源为冲天炉自身的炉气。为了进一步节能降耗,20世纪80年代,开始在炉气热回收的基础上增设等离子加热器,可把热风温度提高到 1000°C 左右,大量减少了焦耗量和送风量,炉子的热效率及单位能耗铁液产量均得到较大提高。配以感应电炉对铁液进行双联熔炼,可以在炉料中大量使用轻薄废钢。炉子的熔化率一般为 15t/h 以上, $40\sim 70\text{t/h}$ 的冲天炉已在多个国家广为应用, 100t/h 的大型冲天炉也已超过10台。

配套设备普遍比较完善,尤其是熔炼过程中自动检测控制系统的应用,使冲天炉的性能在稳定的工艺参数下得到最佳发挥。良好的焦炭和炉料质量为冲天炉的稳定正常运行提供了物质保障。由于国家对环保的要求日趋严格,现在各厂家不但在冲天炉上普遍配置了除尘系统,而且已越来越多地实现污染排放物的回收利用。例如在插入式风口上增设辅助燃料系统,把冲天炉烟尘、焦炭的粉末、树脂砂粉尘反吹回炉内,使其中含量很高的可燃成分燃烧发热,矿物成分进入炉渣,以便于资源化利用。

炉气热回收装置有两种形式不同的系统。一种是炉气直接进入燃烧室燃烧,高温烟气经换热器后再进入除尘装置净化,烟气的物理热和化学热都在换热器得到了利用;另一种是炉气先经过高效湿法除尘系统除尘、降温,再进入燃烧室燃烧后,在换热器内加热空气。经冷却净化的炉气,物理热已损失殆尽,仅利用烟气中一氧化碳的化学热预热空气。

在我国,近年来,铸铁件年产量快速增长,2010年已超过2000万t,现役冲天炉20000多台,平均单台年产量不足 1000t , 5t/h 以下小型炉占有较大数量。两排大间距风口、常温或自热送风常炉衬冲天炉仍为大多数。近五年来,在以前引进、改造国外长炉龄、外热风冲天炉的基础上,研制开发了符合我国生产条件、具有自主知识产权的水冷长炉龄冲天炉和新型顶置、旁置外热风冲天炉,制定了国家标准和机械行业标准,形成了系列化,目前正以较快的速度发展。 10t/h 以上的较大型炉,水冷无衬、薄衬炉的数量逐年上升,正逐渐成为铸铁熔炼的主力炉型。随着机械制造业的迅猛发展,冲天炉炉料中废钢,尤其是薄废钢、钢铁切屑的比例有较大的增加,要求炉温更高,还原性更强,适应该种炉料的外热风冲天炉的快速发展是必然的。冲天炉自动化配加料装置、连续分渣及渣粒化装置、烟气净化装置、熔炼参数在线检测装置等配套设施被越来越多的企业所采用,生产大批量、高牌号、复杂铸件的企业,普遍采用冲天炉—感应炉双联熔炼。我国的冲天炉熔炼水平正在向优质高效、节能降耗、减排环保的现代化目标迈进。

目前,我国小熔化率冲天炉的数量逐渐减少,而中大熔化率、长炉龄、外热风冲天炉正以前所未有的速度发展;实现在线检测及自动化配料、加料的冲天炉数量在快速增长;配备烟气净化装置的冲天炉比例也在快速上升。一批水平较高的现代化大型铸造企业已初步形成,担负着大批量铸件的生产,并成为出口铸件的生产厂。但以我国铸铁件产量而论,目前大容量、长炉龄、外热风冲天炉所占比例还是太少;自动化检测控制系统配套率不高,加之高水平的操作人员缺乏,致使冲天炉普遍处于较低水平的运行状态;烟气净化系统采用率

低，已配置除尘装置的，也有相当数量因为缺乏正常的维护管理而没有完全发挥作用。排放物的回收利用仅处于初级起步阶段；铸造焦炭和冲天炉用材料的保障体系还不完备；相当多的企业管理水平较低，缺乏对冲天炉熔炼质量和成本的系统分析和控制。这些问题正在引起行业的重视，并将在社会和经济发展中，随着科技进步、管理水平的提高和行业结构的合理调整而逐步得到解决。

2) 我国冲天炉熔炼的发展趋势

① 根据国家发展与改革委员会、国家科学技术部、国家环境保护部于 2005 年联合发布的《国家鼓励发展的资源节约综合利用和环境保护技术》的 65 号文件，列入了外热风冲天炉，为我国在冲天炉上开展炉气余热回收利用、减少焦炭消耗、提高铁液质量提供了政策导向和宝贵的发展契机，加速扩大外热风冲天炉的应用将成为我国今后冲天炉发展的主要目标。外热风冲天炉将以长炉龄为主，并逐步向大容量发展，以便更好地发挥外热风冲天炉节能降耗、优质高效及减排环保的优点。预热送风的热源基本来自冲天炉炉气的物理热和一氧化碳的化学热，也可以用以电为热源的预热送风，如等离子热风。

② 在今后相当长的时期内，仍将继续使用两排大间距冷风和自热送风冲天炉，以满足单班制熔炼生产的需要。随着两班制熔炼的日益增多，水冷薄炉衬在两排大间距冲天炉中的比例将快速增长；随着小容量冲天炉数量的大量减少，常炉衬冲天炉的比例将大幅度下降。

③ 在大批量生产车间，将越来越多地采用冲天炉—感应电炉双联熔炼，因为这是保证铁液质量稳定的好方法。

④ 以自动化、智能化装置为核心的冲天炉操作系统将得到越来越多的应用。通过熔炼过程参数优化及跟踪控制实现最佳质量和最低成本熔炼的方法将被更快开发应用。

⑤ 在洁净炉料和电力供应均有保障的条件下，熔化率不大于 5t/h 的小型冲天炉，将被中频感应电炉所替代，少部分新的铸铁生产企业将直接选用中频感应电炉熔炼。当选定感应电炉熔炼后，要特别注意如何改善其产品切削性能的研究。大容量冲天炉的增长和感应炉的替代将使小型冲天炉的数量大量减少，使我国铸铁熔炼设备的结构向综合效益合理的方向迈进。

⑥ 在天然气产地，开发应用水冷炉栅式天然气冲天炉将得到重视。由于在炉内设置了焦炭床，其冶金性能与焦炭冲天炉相当。在创造了必要的冶金环境条件下，其他非焦炭冲天炉在具备条件的企业仍有应用空间。

⑦ 环保设施的配套率将得到不断地提高，稳定达到污染物排放量国家标准的冲天炉数量将较快增加。以回收利用为主要方法的污染排放物的无害化、资源化处理将得到越来越多的重视，铸造粉尘反吹和炉渣产品化的规模将会扩大，随着冲天炉容量的扩大，烟气中 CO_2 、 SO_2 等气体的分离及回收利用将更具可行性。

⑧ 大量培养不同层次的冲天炉技术人才将得到重视，并以不同的形式得以实现。

⑨ 与冲天炉有关的标准、制度、法规建设将不断加强和完善。尤其单位产量能量消耗、材料消耗、污染物排放量等的标准将由推荐性标准向强制性标准过渡；污染物产品化的相关标准将被制定。

(2) 感应炉的发展趋势 感应电炉作为熔炼设备在铸铁熔炼和双联熔炼中应用已有几十年的历史。我国制造和应用工频炉和中频炉也有了丰富的经验，在感应器结构、变频技术、集成控制、多炉体供电、零负载启动、循环冷却技术等诸多方面都取得了令人瞩目的进

步，采用感应炉熔炼和保温的厂家越来越多。

用于熔炼的感应炉，目前可制造的单台容量可达近百吨，能满足大规模生产的需要。但电力装机容量的扩大常常是诸多企业难于逾越的障碍，因此，现阶段感应炉更适合中小规模的生产。

感应炉可熔化常用的各种牌号钢铁和有色金属。仅就铸铁件生产而言，感应炉对产品的适应性优于冲天炉，感应炉能熔炼多种高合金铸铁，而冲天炉不能。

感应炉更适宜阶段工作制的生产方式。采用多台感应炉组合，通过控制熔炼和出铁顺序的办法也可用于平行作业的生产方式，但多台组合将带来能耗、配套设施及占地面积的增加并加重生产管理的负担。

与工频感应炉相比，中频感应炉的功率密度大，无相平衡装置，占地少、设备及土建费用低，已是感应炉的首选类型。而有芯工频炉基本作为保温炉应用。

中频炉的应用，无论是单独熔炼，还是双联熔炼，都有发展、扩大的趋势。随着电力结构向高效、环保方向发展，这种趋势将会更加显著。其发展方向应是：

- 1) 降低电能损耗、漏磁损耗和热量损耗，提高比功率，进一步提高电效率和热效率，实现快速熔炼。
- 2) 连续调整功率，更好地适应熔炼期间对升温、保温能力的优化分配与合理要求。
- 3) 一套电源向两个以上炉体供电，按需要分配向各炉体分配功率，实现各炉体间不同的熔炼工艺配合，实现整体连续熔炼，满足平行工作制对铁液连续供应的要求。
- 4) 改变炉体结构，采用变直径炉膛，适应大块度炉料的直接使用，提高熔化速度。
- 5) 采用变频电源，适应熔炼期间各阶段对加热速度和电磁搅拌作用的不同要求，提高中频炉熔炼性能。缩短熔化时间，减少炉料的遗传性和增碳、调整合金含量带来的铁液质量问题。
- 6) 熔炼过程自动化、智能化。电器系统可根据设定的优化熔炼要求，自适应调控熔炼过程的参数，高效完成熔炼的全过程。