



工业炉设计手册

第3版

王秉铨 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

工业炉设计手册

第3版

主 编 王秉铨
副主编 宋湛苹 孙昌楷 姜生远
参 编 尹桐文 高仲龙 张先棹



机械工业出版社

本手册是在第2版的基础上,作了删节和补充。第3版主要论述了机械工厂及部分冶金工厂用工业炉的基本原理和设计方法,详尽地提供了工业炉及其附属装置的结构类型和设计计算资料。全书共17章,主要内容有设计方法介绍、传热计算、燃料与燃烧计算、钢材加热、燃料消耗量计算、燃烧装置、预热器、筑炉材料与炉衬设计、炉前管道、排烟系统、炉用结构件、炉用机械、常用炉型设计、电阻炉及可控气氛炉设计、热工测量与控制、环境保护等。内容丰富、翔实,文字简明,数据可靠,附有大量图表,全书采用了最新国家标准和统一的科技名词术语。

手册可供从事工业炉设计、研究、制造及维修人员使用,也可供大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

工业炉设计手册/王秉铨主编. —3版. —北京:机械工业出版社, 2010.5

ISBN 978-7-111-29582-2

I. 工… II. 王… III. 工业炉-设计-手册 IV. TK175

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第012644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:余茂祚 责任编辑:余茂祚

版式设计:霍永明 责任校对:姚培新 程俊巧

封面设计:赵颖喆 责任印制:杨曦

北京京丰印刷厂印刷

2010年4月第3版·第1次印刷

184mm×260mm·65.5印张·2插页·2157千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-29582-2

定价:130.00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

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

第3版前言

《工业炉设计手册》是我国目前唯一一本集工业炉设计研究、制造维修和操作管理于一体的技术性手册，是设计研究部门多年实际工作的总结和技术成就的积累，又是生产企业多年运行实践的验证结论，因此可以说是一本技术含量高，技术内容翔实可靠，设计指导性强和便于应用的设计手册。

手册的编写方法贯彻了理论与实践的结合和简明实用的原则，以图表为主导，辅以文字论述，图文并茂，便于阅读和应用。“传热计算”、“燃料与燃烧计算”、“钢材加热”各章节，是掌握工业炉基础知识的理论性内容；“燃料消耗量计算”、“预热器”、“筑炉材料与炉衬设计”、“炉用结构件”、“炉用机械”、“排烟系统”各章节所提供的计算方法、计算公式及计算例题，则是工业炉设计的核心技术内容；“常用炉型设计”展现了我国常用工业炉的水平现状，显示了这些炉型的结构特点及其设计计算方法，是帮助读者设计工业炉时的实例；“热工测量与控制”、“环境保护”所述内容是实现工业炉自动化和贯彻国家环保政策所必须掌握的技术措施或规定。

1996年《手册》第2版发行以来，工业炉技术不断取得了进步，特别是高温空气低氧燃烧技术得到迅速发展。同时与工业炉设计相关的各种技术标准也相继进行了更新换代，因此亟需对手册的第2版进行修订。本次修订所遵循的原则是，补充新技术，删减不适用技术，采用最新国家标准。增写了蓄热式炉和蓄热式烧嘴的设计内容，补充了低 NO_x 烧嘴、火焰可调烧嘴和燃烧机等新装置，以及其它一些新技术内容；更改了所有旧技术标准和旧技术名词术语，变更了图表中各种单位的标注方法。另外，本手册中涉及到气体体积、气体流速、气体密度等参数，凡未注明者，皆指气体在标准状态下的数据。

在第3版编写工作中，全体参编人员认真对待，积极付出，确保了编写质量。感谢责任编辑余茂祚对编写工作的全面指导和积极帮助。书中存在的错误和不当之处，敬希读者指正。

编 者

第2版前言

《工业炉设计手册》第1版自1981年10月出版发行以来，在手册内容、编写形式、设计方法的技术深度和实用性方面深受广大读者的欢迎，对工业炉设计、研究、制造、维修和操作具有一定的指导和参考作用。鉴于十几年来工业炉技术有了很大的发展，开发了不少新炉型、新材料和新装置，为此亟需对手册进行修订，以适应工业发展的需要。

手册的修订再版仍然贯彻了简明、实用的原则，以图表为主，辅以必要的文字论述为基本编写形式。增写了传热计算、热工测量与控制、步进式炉、罩式炉、真空炉、输送带式炉等新的章、节；在炉用机械一章中增写了机械零件和装出料机设计；在预热器一章中增写了喷流预热器、片状预热器和热管预热器的设计计算；在煤炉一节中增写了往复炉排、链式炉排、下饲式炉排、蠕动式炉排等新技术内容；在筑炉材料与炉衬设计一章中增写了耐火纤维炉衬和耐火浇注料等新材料的应用技术；在冲天炉一节中增写了卡腰冲天炉、热风冲天炉和富氧送风技术；在台车式炉一节及炉用结构件一章中分别介绍了炉门压紧装置和台车堵缝装置的设计。全书采用了最新国家标准，统一了名词术语，淘汰了旧产品和旧标准。

手册编写过程中先后召开了编写工作会议和审稿会议，得到了机械工业部设计研究院，机械工业部第一、第二、第五设计研究院，冶金部北京钢铁设计研究总院，航空工业规划设计研究院，上海市机电设计研究院，北京科技大学，大连远东工业炉窑开发公司等单位在委派编写人员和提供资料方面所给予的大力支持，责任编辑余茂祚在协助主编统稿方面作了大量的工作，谨在此一并表示感谢。

限于编者的水平，书中存在的错误和不足之处敬希读者提出宝贵意见，使手册不断得到充实和提高。

编 者

编写分工表

章 节	名 称	编 写 人
第 1 章	设计概论	王秉铨
第 2 章	传热计算	高仲龙
第 3 章	燃料与燃烧计算	姜生远
第 4 章	钢材加热	王秉铨
第 5 章	燃料消耗量计算	尹桐文
第 6 章	燃烧装置	宋湛苹
第 7 章	预热器	张先棹
第 8 章	筑炉材料与炉衬设计	姜生远
第 9 章	炉前管道	王秉铨
第 10 章	排烟系统	
第 11 章	炉用结构件	姜生远
第 12 章	炉用机械	范震声
第 1 节	炉用机械零件	
第 3 节	台车牵引机构	
第 4 节	炉门升降机构	
第 5 节	推拉料机	
第 2 节	台车	范建兴
第 6 节	液压传动	殷经星
第 13 章	常用炉型设计	王秉铨
第 1 节	室式炉	
第 3 节	井式炉	
第 11 节	坩埚炉	
第 2 节	台车式炉	尹桐文
第 4 节	振底式炉	孙昌楷
第 5 节	环形炉	
第 6 节	步进式炉	戎宗义
第 7 节	罩式炉	
第 8 节	煤炉	史竞
第 9 节	冲天炉	李恩林
第 10 节	室式干燥炉	姜生远
第 12 节	蓄热式炉	杨泽未
第 14 章	电阻炉	武静轩
第 1 节	概述	
第 2 节	电热元件	
第 3 节	空气循环电炉	
第 4 节	盐浴炉	
第 5 节	真空电阻炉	
第 6 节	输送带式炉	殷经星
第 15 章	可控气氛炉	孙昌楷
第 16 章	热工测量与控制	王治国
第 17 章	环境保护	杨泽未
附录		王秉铨 曹田力

目 录

第3版前言

第2版前言

第1章 概论..... 1

第1节 设计概论..... 1

1 简介 1

2 炉型分类 3

3 工业炉组成 5

4 设计原则 5

5 设计原始资料 6

6 设计计算 6

第2节 炉型选择..... 8

1 燃料选择 8

2 预热器选择 9

3 燃烧装置选择..... 10

4 炉衬材料选择..... 11

5 排烟方式选择..... 11

第3节 工业炉节能 12

1 工业炉能源消耗状况..... 12

2 工业炉节能计算..... 13

3 节能途径及措施..... 14

参考文献 22

第2章 传热计算 23

第1节 基本概念 23

1 传热的基本方式..... 23

2 温度场与热态..... 23

3 热流密度和传热系数..... 23

第2节 稳定态传导传热 24

1 导热的基本定律..... 24

2 平壁稳定态导热..... 24

3 圆筒壁稳定态导热..... 25

4 球壁稳定态导热..... 26

第3节 对流传热 26

1 影响对流传热的因素..... 26

2 基本公式..... 27

3 对流传热过程的数学描述..... 27

4 相似理论在对流传热上的应用..... 27

5 自然对流传热..... 29

6 强制对流传热..... 30

7 沸腾和冷凝过程的传热..... 33

第4节 辐射传热 34

1 热辐射的基本概念..... 34

2 辐射能的吸收、反射和透过..... 34

3 黑体辐射的基本定律..... 35

4 灰体及实际物体的辐射与吸收..... 36

5 辐射能在空间的分布..... 37

6 封闭体系内表面间的辐射传热..... 39

7 气体的辐射..... 41

8 气体和通道壁的辐射传热..... 45

第5节 综合传热 46

1 气体与表面间的传热..... 46

2 气体通过墙壁向另一气体的传热..... 46

3 火焰炉内的综合传热..... 51

第6节 不稳定态传导传热 53

1 概述..... 53

2 分析解法及单值条件..... 53

3 表面温度为常数时半无限厚平板的 加热或冷却..... 55

4 表面温度为常数时有限厚物体的 加热或冷却..... 56

5 表面温度呈直线变化的加热或冷却..... 57

6 表面热流密度为常数时物体的加热或 冷却..... 59

7 周围介质温度为常数时的加热或 冷却..... 60

8 周围介质温度为常数时薄材的加热或 冷却..... 63

9 数值解法..... 63

参考文献 64

第3章 燃料与燃烧计算 65

第1节 燃料 65

1 固体燃料..... 65

2 液体燃料..... 70

3 气体燃料..... 75

第2节 燃料燃烧计算 81

1 燃料燃烧..... 81

2 燃料发热量计算..... 85

3 空气系数..... 86

4 燃烧所需空气量计算..... 87

5 燃烧生成气量及燃烧生成气密度的

计算.....	87	4 用热平衡法计算燃料消耗量	152
6 燃烧温度的计算.....	89	5 热平衡分析与工业炉节能	156
第3节 燃料换算	94	参考文献.....	163
1 换算公式.....	95	第6章 燃烧装置	164
2 计算举例.....	96	第1节 煤气烧嘴.....	164
参考文献	96	1 煤气烧嘴分类与特性	164
第4章 钢材加热	97	2 高压喷射式烧嘴	166
第1节 基本概念	97	3 低压涡流式烧嘴	179
1 热交换过程.....	97	4 天然气半喷射式烧嘴	182
2 炉温.....	97	5 大气式煤气烧嘴	184
3 锻造加热.....	98	6 焦炉煤气扁烧嘴	185
4 热处理加热.....	99	7 扩散式烧嘴	186
5 “薄钢材”与“厚钢材”	101	8 热煤气烧嘴	186
6 炉内温度位差与钢材截面温差	101	9 平焰烧嘴	188
7 加热、均热与保温时间	101	10 高速烧嘴.....	196
8 计算参数	102	11 自身预热烧嘴.....	198
第2节 加热时间简易计算.....	105	12 火焰可调烧嘴.....	200
1 恒温炉内加热	105	13 蓄热式烧嘴.....	202
2 热流密度不变情况下加热	106	第2节 油嘴.....	204
3 表面温度不变情况下加热	107	1 油嘴分类与特性	204
第3节 加热时间计算图表.....	109	2 低压油嘴	206
1 恒温炉内的加热时间	109	3 高压油嘴	214
2 台车式炉内的钢锭加热时间	112	4 转杯式油嘴	223
3 连续式炉内钢材加热时间	115	5 燃油燃烧机	225
第4节 少无氧化加热.....	121	第3节 煤粉烧嘴.....	226
1 少无氧化加热工作原理	121	1 煤粉燃烧的条件与特点	226
2 少无氧化加热炉示例	121	2 煤粉烧嘴分类	227
3 少无氧化加热计算	122	参考文献.....	232
4 计算例题	123	第7章 预热器	233
参考文献.....	129	第1节 预热器用途及选用.....	233
第5章 燃料消耗量计算	130	1 预热器用途	233
第1节 炉底（或容积）热强度指标	130	2 预热器选用	235
1 砂型及砂芯干燥炉热强度指标	130	3 提高预热器使用性能的措施	236
2 塞杆烘炉及烘包器热强度指标	131	第2节 间壁式预热器的设计.....	236
3 各种加热炉热强度指标	131	1 概述	236
4 室式及台车式热处理炉热强度指标	132	2 设计要点	237
5 井式热处理炉热强度指标	132	3 基本计算公式	241
6 燃油或燃煤气热处理用盐浴炉容积		4 间壁式预热器设计计算	246
热强度指标	132	第3节 蓄热式预热器的设计.....	265
7 燃油或燃煤气熔铜坩埚炉热耗指标	132	1 概述	265
第2节 单位热耗指标.....	133	2 蓄热式预热器的设计	266
第3节 热平衡计算.....	136	3 基本计算公式	267
1 热收入项	136	4 蓄热式预热器设计计算举例	269
2 热支出项	136	第4节 热管式预热器的设计.....	270
3 炉子热效率计算	152	1 概述	270

2 热管式预热器的设计	270	参考文献	340
3 基本计算公式	271	第9章 炉前管道	341
4 热管式预热器设计计算举例	272	第1节 炉前煤气管道设计	341
参考文献	273	1 设计范围	341
第8章 筑炉材料与炉衬设计	274	2 计算流速	341
第1节 耐火制品	274	3 设计要点	341
1 工业炉对耐火制品的要求	274	4 管件	343
2 耐火制品的分类	274	5 阀门选用及其布置	346
3 耐火制品的性能	275	6 放散吹扫系统	346
4 通用耐火砖的形状尺寸	287	7 管道支架	347
第2节 耐火纤维	294	8 管道阻力计算	348
1 概述	294	9 施工及检验说明	349
2 耐火纤维制品分类	294	第2节 空气管道设计	350
3 耐火纤维的性能	296	1 设计范围	350
4 耐火纤维增强涂料	298	2 设计要点及设计数据	350
5 耐火纤维粘结剂	298	3 风机	351
第3节 不定型耐火材料	298	4 施工及检验说明	355
1 定义	298	第3节 燃油管道设计	357
2 不定型耐火材料使用类型	299	1 设计范围	357
3 不定型耐火材料分类	299	2 燃油流速及阀门选用	358
4 耐火泥浆	303	3 设计要点	359
第4节 隔热材料	305	4 阻力计算	360
1 隔热材料的主要性能	305	5 施工及检验说明	362
2 硅藻土质隔热材料	305	6 U形膨胀节	362
3 石棉制品	307	第4节 炉前冷却水管道设计	362
4 岩棉、矿渣棉及其制品	308	1 水的计算流速及阀门选用	362
5 硅酸钙制品	308	2 设计要点	362
6 蛭石及其制品	309	3 施工及检验说明	363
7 水泥轻骨料浇注料	310	参考文献	363
8 水玻璃轻骨料浇注料	310	第10章 排烟系统	364
9 膨胀珍珠岩浇注料制品	311	第1节 车间烟道	364
第5节 普通筑炉材料	311	1 烟道布置	364
1 烧结普通砖（红砖）	311	2 烟道计算	364
2 水泥	311	第2节 烟囱	379
3 砂	312	1 排烟方式	379
4 常用胶粘剂	312	2 烟囱布置	380
5 促凝剂	315	3 烟囱高度与直径计算	380
6 铸石制品	315	第3节 喷射排烟计算	382
7 常用筑炉材料的体积密度、热导率和 比热容	316	1 带扩散段喷射器计算	382
第6节 炉衬设计	317	2 简单喷射器（无扩散段）	385
1 炉衬设计的一般要求	317	参考文献	386
2 砖砌体设计	317	第11章 炉用结构件	387
3 纤维炉衬计算	332	第1节 炉架	387
4 耐火纤维炉衬结构	337	1 概述	387
		2 炉架计算	387

3 钢材选用	396	3 电动炉门升降机构	510
第2节 台车轨道与砂封装置	397	4 气动炉门升降机构	520
1 台车轨道	397	第5节 推拉料机	521
2 砂封装置	403	1 推料机主要参数计算	522
第3节 操作平台及扶梯	405	2 炉内导轨	522
1 平台结构	405	3 料盘	523
2 扶梯结构	406	4 摇杆连杆式推拉料机	523
3 平台结构计算	410	5 螺旋式推料机	527
第4节 炉口装置	411	6 摩擦式出料机	531
1 室式炉用炉口装置	411	7 气、液压缸式推拉料机	535
2 台车式炉用炉口装置	414	第6节 液压传动	537
3 井式热处理炉用炉口装置	421	1 炉用机械液压回路	538
4 室式干燥炉用炉口装置	422	2 液压件的选择与设计	542
第5节 烟道闸门	422	3 计算举例	563
1 烟道闸门分类	422	参考文献	565
2 烟道闸门配件	423	第13章 常用炉型设计	566
参考文献	426	第1节 室式炉	566
第12章 炉用机械	427	1 概述	566
第1节 炉用机械零件	427	2 设计计算	571
1 轴	427	3 炉型结构	573
2 键联接计算	433	4 计算举例	575
3 直齿轮和锥齿轮弯曲强度计算	434	第2节 台车式炉	576
4 起重用短环链及链轮	439	1 概述	576
5 板式起重链及链轮	442	2 设计要点	582
6 套筒滚子链及链轮	444	3 砖砌炉衬台车式炉炉型结构	583
7 钢丝绳选用及滑轮卷筒设计	449	4 耐火纤维炉衬台车式炉炉型结构	588
8 钝轮、销齿传动	460	5 高速烧嘴台车式炉炉型结构	593
9 螺旋传动	465	第3节 井式炉	594
10 螺栓联接强度计算	469	1 概述	594
11 吊杆、吊板及吊叉强度计算	470	2 设计计算	594
12 各种传动副的机械效率	472	3 炉型结构	595
第2节 台车	472	第4节 振底式炉	599
1 台车类型	472	1 概述	599
2 台车结构	474	2 设计计算	603
3 台车车架的设计计算	475	3 炉型结构	607
4 台车行走机构的设计计算	483	4 计算举例	614
第3节 台车牵引机构	486	第5节 环形炉	615
1 牵引机构主要参数的确定	486	1 概述	615
2 牵引机构的设计	487	2 设计计算	616
3 牵引机构牵引装置的设计计算	500	3 炉型结构	618
4 机架及基础设计	503	4 炉底传动和装、出料方式	623
5 台车行程限位	506	第6节 步进式炉	624
第4节 炉门升降机构	507	1 概述	624
1 概述	507	2 设计计算	626
2 手动炉门升降机构	507	3 炉型结构	630

4 步进机构	635	1 金属电热元件	741
5 步进式炉实例	641	2 非金属电热元件	755
第7节 罩式炉	645	3 管状电热元件	770
1 概述	645	4 红外电热元件	775
2 炉型结构	645	第3节 空气循环电炉	778
3 炉子主要组成部分	652	1 炉型	778
4 设计计算	658	2 热工计算	781
第8节 煤炉	664	3 电热元件计算	784
1 概述	664	4 电热元件的安装	786
2 燃煤方式及装置	664	5 空气循环装置设计	786
3 供风方式	671	第4节 盐浴炉	793
4 炉膛设计	671	1 电极盐浴炉	793
5 排烟口结构	672	2 硝盐炉设计	804
6 炉型示例	673	第5节 真空电阻炉	810
第9节 冲天炉	679	1 概述	810
1 概述	679	2 加热功率计算	812
2 炉型结构	682	3 电热元件计算参数	814
3 热量平衡计算	689	4 炉膛隔热装置	818
4 其它常用参数	691	5 高压气淬炉冷却时间计算	819
第10节 室式干燥炉	694	6 炉壳	819
1 概述	694	7 真空系统设计	826
2 炉型示例	694	8 金属表面净化	843
3 炉型结构	696	第6节 输送带式炉	843
4 设计计算	701	1 炉型分类	843
5 计算举例	702	2 炉用机械结构设计	846
6 热风发生装置	703	参考文献	848
第11节 坩埚炉	707	第15章 可控气氛炉	849
1 概述	707	第1节 可控气氛	849
2 设计计算	708	1 钢铁与炉气氛间的化学反应	849
3 坩埚的选用	709	2 炉气氛的碳势控制	852
第12节 蓄热式炉	709	3 可控气氛分类	852
1 概述	709	4 可控气氛的选择	855
2 蓄热式燃烧装置	712	5 可控气氛的用量	856
3 换向装置	719	6 原料与用量	857
4 蓄热式炉的设计	723	第2节 炉型类别及特点	864
参考文献	731	1 炉型类别	864
第14章 电阻炉	732	2 可控气氛炉特点	866
第1节 概述	732	第3节 炉用材料与构件	867
1 电阻炉分类	732	1 炉子砌体	867
2 炉型	732	2 加热元件	868
3 炉膛尺寸计算	737	3 风机	876
4 安装功率计算	738	4 防爆装置	876
5 安装功率的分配	739	5 火封装置	878
6 炉衬设计	740	6 窥视孔	879
第2节 电热元件	741	7 供气	879

8 排气	880	3 NO _x 抑制技术	949
9 可控气氛的取样	881	4 SO ₂ 净化技术	950
10 烧净	881	第3节 噪声控制	951
第4节 可控气氛热处理炉机组	882	1 噪声源	951
1 室式多用炉热处理机组	882	2 噪声危害	952
2 推杆式炉热处理机组	887	3 噪声的环保和卫生标准	952
参考文献	893	4 噪声的物理量度	953
第16章 热工测量与控制	894	5 控制噪声的基本方法	954
第1节 热工参数测试技术	894	6 工业炉常用消声器分类	954
1 温度测量	894	7 风机房噪声控制示例	958
2 压力测量	899	参考文献	960
3 流速流量测量	900	附录	961
4 成分分析	903	附录A 几种火焰炉最基本的操作规程	961
5 热流密度测量	905	1 燃煤炉操作规程	961
6 物位测量	906	2 燃煤气炉操作规程	961
7 火焰监测	907	3 燃油炉操作规程	961
8 高温工业电视技术	908	附录B 炉子烘烤	962
第2节 显示、调节仪表和执行器	909	1 烘炉步骤	962
1 显示仪表	909	2 烘炉曲线	962
2 调节仪表	911	3 烘炉方法	964
3 执行器	913	4 烘炉操作	964
第3节 工业炉控制系统	916	附录C 热参数计算式及选用表	965
1 概述	916	1 部分热参数近似计算式	965
2 常规仪表控制系统	916	2 热参数选用表	966
3 DCS 集散控制系统	917	附录D 全国各省区主要城市海拔、计算	
4 PLC 可编程序控制系统	919	温度及大气压力	984
5 FCS 现场总线控制系统	920	附录E 高电阻电热合金及一些物体的	
第4节 控制系统检测、调节和典型控制	922	热参数	989
1 工业炉检测与控制项目	922	附录F 火焰炉热工参数测定方法	995
2 系统调节	927	1 烟道内冷空气吸入率计算	995
3 工业炉典型控制	928	2 炉膛内空气系数 α 的计算	995
参考文献	931	3 预热器性能的测定	996
第17章 环境保护	932	4 炉子生产能力和炉子生产率的计算	996
第1节 消烟除尘	932	5 金属烧损率的测定与计算	996
1 工业炉烟尘来源	932	6 炉子热效率的测定与计算	996
2 烟尘排放标准	932	7 流量的测定与计算	999
3 除尘器	933	附录G 盛钢桶、浇包参考尺寸	1006
4 冲天炉除尘	935	附录H 局部阻力系数(ξ)表	1007
5 煤炉除尘	945	附录I 炉衬材料图例	1019
第2节 有害气体净化	947	附录J 工业炉及附属装置设计、研究、生产	
1 有害气体的来源	947	单位一览表	1020
2 大气污染物排放标准	948		

第1章 概 论

第1节 设计概论

1 简介

1.1 工业炉用途

在工业生产中,利用燃料燃烧产生的热量,或者将电能转化成热量对工件或物料进行加热的设备,称为工业炉。锅炉也是一种工业炉,但习惯上把锅炉和其它一些能源转换设备,如焦炉、煤气发生炉等不包括在工业炉范围内。

机械工业应用的工业炉有多种类型。在铸造车间有熔炼金属的平炉、冲天炉、坩埚炉、感应炉、电阻炉、电弧炉、真空炉等;在锻压车间有对钢锭或钢坯进行锻前加热的各种加热炉和消除应力的热处理炉;在热处理车间,有改善工件力学性能的各种退火、正火、淬火和回火的热处理炉;在焊接车间有压制前的钢板加热炉和焊后热处理炉;在粉末冶金车间还有烧结金属的加热炉等。

工业炉的技术进步对工业的发展起着十分重要的作用。炉子的结构类型、加热工艺、热工控制和炉内气氛都直接影响加工后的产品质量。在锻造加热炉内,提高金属的加热温度,可以降低工件的变形阻力,但温度过高又会引起晶粒长大、氧化或过烧,严重影响工件质量。在热处理加热过程中,如果把钢加热到临界温度以上的某一点,然后突然冷却,就能提高钢的硬度和强度;如果加热到临界温度以下的某一点缓慢冷却,则又能使钢的硬度降低而使韧性增加。为了获得尺寸精确和表面光洁的工件,或者为了减少金属氧化以达到保护模具、减少加工余量等目的,可以采用各种少无氧化加热炉。在敞焰少无氧化加热炉内,利用燃料不完全燃烧产生还原性气体,在其中加热工件可使氧化烧损率降低到0.3%以下。可控气氛炉是使用人工制备的气氛通入炉内以进行气体渗碳、碳氮共渗、光亮淬火、正火、退火等热处理工艺,从而达到改变金相组织、提高工件力学性能的目的。在流动粒子炉中,利用燃料的燃烧气体,或外部施加的其它流化剂,强行流过炉床上的石墨粒子或其它惰性粒子层,工件在粒子层中能实现强化加热,也可进行渗碳、氮化等各种无氧化加热。在盐浴炉内,用熔融

的盐液作为加热介质,可防止工件氧化和脱碳。

在冲天炉内熔炼铸铁往往受到焦炭质量、送风方式、炉料情况和空气温度等条件的影响,使熔炼过程难于稳定,不易获得优质铁液。热风冲天炉能有效地增高铁液温度、减少合金烧损、降低铁液氧化率,从而能生产出优质铸铁。随着无芯感应炉的出现,冲天炉有逐步被取代的趋势。感应炉的熔炼工作不受任何铸铁等级的限制,能够从熔炼一种等级的铸铁,很快转换到熔炼另一种等级的铸铁,而且更有利于提高铁液质量。一些特种合金钢,如超低碳合金钢以及轧辊和汽轮机转子用钢,需要将平炉或一般电弧炉熔炼出的钢液,在精炼炉内通过真空除气和氩气搅动去除杂质,进一步精炼出高纯度、大容量的优质钢液。

1.2 性能参数分析

反映炉子热工性能的主要参数是,炉子装载量、炉子生产能力、炉子生产率、单位热耗、炉底热强度与炉子热效率等。

1.2.1 炉子装载量

每一加热周期内,一次可装入炉内的工件或物料重量,称为炉子装载量,单位为吨(t)。对于干燥炉,一次装入炉内的物料(砂箱、砂型、砂芯等)体积占炉室容积的百分数,称为炉子填充率。炉子装载量或填充率代表了炉子负荷量大小,也是计算炉体结构及基础承载能力的因数之一。

1.2.2 炉子生产能力

对于加热炉和热处理炉,按单位时间计算的炉子加热能力,称为炉子生产能力,单位为千克/时(kg/h);对于冲天炉则习惯称为炉子熔化率,单位为吨/时(t/h)。炉子升温速度越快,则生产能力越高。

1.2.3 炉子生产率

对于加热炉和热处理炉,按单位时间、单位炉底面积计算的炉子加热能力称为炉子生产率,单位为千克/(米²·时)[kg/(m²·h)];对于冲天炉则习惯称为炉子熔化强度,单位为吨/(米²·时)[t/(m²·h)]。炉子装载量越大,升温速度越快,则炉子生产率越高。一般情况下,炉子生产率越高,则加热每千克工件的单位热量消耗也越低,所以要降低能源消耗,首先应该满负荷生产,尽量提高炉子生产率。

1.2.4 单位热耗与炉底热强度

在一个加热周期内,加热每千克工件所消耗的热

量,称为工件的单位热耗,单位为千焦/千克(kJ/kg)。单位热耗与炉子生产率相乘即为炉底热强度,单位为千焦/(米²·时)[kJ/(m²·h)]。利用单位热耗与炉底热强度指标可较为准确地计算炉子燃料消耗量。要降低燃料消耗除应满负荷生产、尽量提高炉子生产率以外,还要减少炉子砌体的蓄热和散热损失、水冷构件热损失、各种开口辐射热损失、逸出炉外烟气和吸入炉内冷空气造成的热损失,以及离炉烟气带走的热损失等。

1.2.5 炉子热效率

工件或物料加热时吸收的有效热量与供入炉内的热量之比,称为炉子的热效率,用下式表示

$$\eta = \frac{100Q_y}{Q_g} = 100 \left(1 - \frac{Q_s}{Q_g} \right) \quad (1-1)$$

式中 η ——炉子热效率(%);

Q_y ——工件或物料吸收的有效热量(kJ/h);

Q_g ——供入炉内热量(kJ/h);

Q_s ——各项损失热量之和(kJ/h)。

炉子的有效热量与加热工艺有关,不同炉子有效热量的计算式如下:

1. 对于间断式加热炉

$$Q_y = G(c_c t_c - c_r t_r) \quad (1-2)$$

式中 G ——炉子生产能力(kg/h);

t_c, t_r ——工件出炉与入炉时温度(°C);

c_c, c_r ——工件出炉与入炉时的平均比热容[kJ/(kg·°C)]。

2. 对于连续式加热炉

钢材在炉内的高温段升至最高加热温度,然后以较低温度由均热段出炉,此时

$$Q_y = G(c_j t_j - c_r t_r) \quad (1-3)$$

式中 c_j ——钢材最高加热温度时的平均比热容[kJ/(kg·°C)];

G ——炉子生产能力(kg/h);

t_j ——钢材的最高加热温度(°C)。

3. 对于熔化炉

$$Q_y = G[c_g(t_r - t_g) + R + c_y(t_c - t_r)] \quad (1-4)$$

式中 G ——炉子熔化率(kg/h);

c_g, c_y ——物料在固态和液态下的平均比热容[kJ/(kg·°C)];

t_g, t_r, t_c ——物料入炉、熔化和出炉温度(°C);

R ——物料的熔化潜热(kJ/kg)。

4. 对于干燥炉

$$Q_y = Gc(t_c - t_r) + g(h_c - h_r) \quad (1-5)$$

式中 G ——被干燥物料干态重量(kg/h);

c ——物料平均比热容[kJ/(kg·°C)];

t_c, t_r ——物料出炉与入炉温度(°C);

g ——水分蒸发量(kg/h);

h_c ——出炉温度下水蒸气比焓(kJ/kg);

h_r ——入炉温度下水的比焓(kJ/kg)。

连续式炉比间断式炉的热效率高,因为连续式炉的生产率高而且是不间断工作的,炉子工作处于稳定状态,没有周期性的炉墙蓄热损失。还由于炉内带有一个预热炉料区段,烟气部分余热为冷工件所吸收,降低了离炉烟气温度从而使离炉烟气带走的热损失减少。提高炉子热效率的基本措施是,尽可能连续生产和满负荷工作,要设置预热器对助燃空气和燃料进行预热以回收烟气余热,采用低热容和低热导率的轻质或超轻质耐火材料以减少炉墙蓄热、散热损失。

为了提高炉子的热工性能,除必须根据工艺要求、预热器及炉用机械形式、燃料及燃烧装置类别、适宜的炉子排烟方式等设计优良的炉型结构外,还需对炉温、炉压进行自动控制,对燃料与助燃空气量进行自动比例调节。需要指明,实现炉子最佳性能不能单独依靠自动控制来实现,还应有严格的操作管理制度。

高性能工业炉的技术含量应体现在要达到下述三个目标:

- 1) 炉子节能或减少 CO₂ 排放量 30% 以上。
- 2) 设备紧凑化,要求炉子尺寸减少 20% 以上。
- 3) 降低 NO_x 排放量,要求达到环保排放标准。

在目前大力推进节能环保并重的形势下,建造高性能工业炉的关键技术是采用与发展高温空气低氧燃烧技术,它具有高效节能和低 NO_x 排放的双重优越性。该项技术比旧有格子砖蓄热技术在性能上提高了许多倍。旧有蓄热室体积庞大,大型台车式加热炉蓄热室占地下深度 5~7m,空气预热温度 600°C,排烟温度 550°C,余热回收率上限约 50%,换向时间 15~30min,突出优点是能保证足够高的炉温和加热速度,但明显缺点是炉温波动大、钢锭氧化严重,测得炉内气氛空气系数达 1.25。新型蓄热式高温空气低氧燃烧技术用陶瓷球(直径 15~20mm)或陶瓷蜂窝体(孔距 4~5mm)为蓄热体,体积大为减小,空气预热温度 1000~1100°C,排烟温度 150°C 左右,换向时间 20~100s,余热回收率 85% 左右,炉温均匀,钢坯氧化轻微。

高温空气低氧燃烧技术具有以下特征：

- 1) 高温高速空气入炉后卷吸烟气，形成含氧量小于21%的低氧气氛，燃料在低氧气氛下燃烧使NO_x生成量减少。
- 2) 换向阀频繁换向，炉内燃料交替燃烧，促使炉内温度和气氛均匀。
- 3) 由于高温高速空气助燃，提高了炉气温度，强化了对流换热，缩短了钢材加热时间。
- 4) 由于蓄热效率高，排烟温度降至150℃左右，最大限度地提高了余热回收率。

到目前为止，蓄热式高温空气低氧燃烧技术的应用在我国已初具规模。1995年包头钢铁公司建成了四台蓄热式均热炉，使用混合煤气，炉温达1380℃，空气煤气双预热950~1100℃，排烟温度 $t \leq 150^{\circ}\text{C}$ ，节能41%，产量提高30%以上。

韶关钢铁公司三轧分厂建成一台6.9m×14m蓄热式加热炉，燃高炉煤气，煤气空气双预热1000℃，排烟温度 $t \leq 150^{\circ}\text{C}$ ，炉子热效率72%，钢坯单耗1.13GJ/t，氧化烧损0.7%。

通过工厂实际验证，采用蓄热式高温空气低氧燃烧技术，使炉子节能30%以上、炉子尺寸减少20%以上、NO_x排放达标成为可能。

蓄热式高温空气低氧燃烧技术已日臻完善，既有高效蓄热式炉，也有高效蓄热式烧嘴，应用该项技术会使我国工业炉技术水平取得飞跃发展。

2 炉型分类

1) 按供热方式工业炉分为两类：①火焰炉，或称燃料炉，是用各种燃料的燃烧热量在炉内对工件或物料进行加热。②电炉，是在炉内将电能转化为热量对工件或物料进行加热。

火焰炉所用燃料来源广泛，价格较便宜，便于因地制宜地建造不同结构和不同用途的炉子，在妥善操作和科学管理的条件下有利于降低生产费用。但火焰炉难于实现精确控制，易造成环境污染，热效率也较低。电炉的最大特点是炉温均匀，便于实现自动控制，加热质量好。电阻炉一般没有烟尘和噪声危害，多用于工艺要求严格的加热工艺中。

2) 按热工制度，工业炉也分两类：①间断式炉，又称周期式炉，其特点是炉膛内不划分温度区段，炉子按一班或两班生产，在每一加热周期内炉温是变化的，如各种室式炉、台车式炉、井式炉、罩式炉等。②连续式炉，其特点是炉膛内划分温度区段，一般由预热、加热（高温）、均热（保温）三个区段组成，炉子为三班连续生产，在加热过程中每一区段内的温度可认为是不变化的，如二段或三段连续式加热炉、推杆式加热炉和热处理炉、环形炉、步进式炉、振底式炉、冲天炉及石灰窑等。

3) 按供热方式、温度制度、生产用途和炉型结构特点分类的常用炉型见表1-1。

表 1-1 常用炉型分类表

特 性 炉 型	炉温/℃	结 构 特 点	生 产 用 途	热 源
室式加热炉	1250 ~ 1350	室状炉膛,开闭式炉门	小批工件加热	各种燃料及电
室式热处理炉	650 ~ 950		小批工件热处理加热	
开隙式加热炉	1250 ~ 1350	室状炉膛,缝式炉口	成批小工件加热	
台车式加热炉	1250 ~ 1300	室状炉膛,活动炉底	小批钢坯(锭)加热	
台车式热处理炉	650 ~ 1150		小批工件热处理加热	
井式热处理炉	650 ~ 1100	圆形井状炉膛,开闭式炉盖,吊挂装料	细长件(轴、杆)热处理加热	
连续式热处理炉	650 ~ 950	机械推料,或为机械化炉底输料	工件成批连续热处理加热	
推钢式连续加热炉	1250 ~ 1350	推钢机推料、出料。炉底为滑轨式,炉膛分预热、加热、均热等区段	工件成批连续加热	
罩式炉	650 ~ 1100	炉体为一罩子,或炉底不动,炉罩移动,或炉罩不动,炉底移动	工件成批热处理加热	
步进式炉	650 ~ 1300	分步进梁式和步进底式两种。工件置于步进机构固定梁上,通过上升、前进、下降、返回等动作将工件由进料端移至出料端	钢材轧前或锻前加热,也用于工件热处理加热	各种燃料

(续)

炉 型 \ 特 性	炉温/℃	结 构 特 点	生 产 用 途	热 源
环形炉	850 ~ 1300	由环形炉膛和回转炉底组成,是首尾相接的连续式炉	钢材轧前或锻前加热,也用于工件热处理加热	各种燃料及电
振底式炉	850 ~ 1100	室状炉膛,通过驱动机构使炉底加速前进,然后急剧减速,使工件借助惯性向前滑动,直至移出炉外	多用于铸锻件淬火、正火、回火加热	
辊底式炉	850 ~ 1100	室状炉膛,炉底由炉辊及传动机构组成,依靠炉辊转动将工件由进料端移出炉外	工件热处理加热	
蓄热式炉	900 ~ 1300	采用独立设置的蓄热室或蓄热式烧嘴,可将空气或煤气预热至 1000 ~ 1100℃ 高温,排烟温度降至 150℃。以陶瓷小球或蜂窝体构筑蓄热室	用于各类型加热炉,也可用于高温热处理炉	各种燃料
可控气氛炉	830 ~ 960	分室式、井式、罩式、输送带式等多种形式。它由手动或气、液、机械传动	在既定温度下向炉内通入人工制备气氛以达到某种热处理目的,如气体渗碳、碳氮共渗、淬火、退火等	各种燃料及电
开合式差温热处理炉	1000 ~ 1100	立式或卧式两半炉膛,利用传动小车将炉膛拉开或闭合	将轧辊表面快速加热后淬火,增加表面硬度	煤气,燃料油
木材干燥室	100 ~ 120	台车式炉底,室式炉身	干燥木材	蒸汽,电
油漆干燥室	100 ~ 150	室式炉身,用机械连续进出料	工件漆膜干燥	
隧道窑	900 ~ 1450	炉底由多台小车组成,钢坯或陶瓷(砖坯)放在小车上加热,炉内分几个区段,炉长达 100m 以上	钢坯连续加热,或陶瓷连续烧结	各种燃料
倒焰窑	1300 ~ 1450	火焰由下部燃烧室升至窑顶,再由窑顶经窑内制品,倒流至窑底烟道排出窑外	烧制陶瓷、耐火材料及砖、瓦	
砂型(或砂芯)干燥炉	300 ~ 500	室状炉膛,活动炉底	烘干砂芯或砂型	
铁合金烘炉	700 ~ 800	室状炉膛,活动或固定炉底	烘烤铁合金	
烘包器	700 ~ 1000	烧嘴装在包子顶部敞开或密闭加热	烘烤铁(钢)液包	煤气、燃料油
塞杆烘炉	250 ~ 350	封闭炉膛,塞杆吊挂烘干	烘烤盛钢桶塞杆	各种燃料
冲天炉	铁液 1350 ~ 1500	立式炉膛,连续加料	熔炼铸铁	主要为焦炭
平炉	钢液 1600 ~ 1700	炉膛为一熔池,带有加热空气、煤气的蓄热室	熔炼碳钢等	煤气,燃料油

(续)

特 性 炉 型	炉温/℃	结 构 特 点	生 产 用 途	热 源
石灰窑、白云石窑	1300	立式炉身,连续加料	焙烧生石灰及白云石	主要为焦炭
坩埚炉	900 ~ 1300	炉膛内置有坩埚,炉体固定或可倾转	在坩埚内熔化有色金属	各种燃料
电阻炉	650 ~ 1300	电阻丝(带)为加热元件	多用于金属热处理加热	电
电弧炉	1100 ~ 1700	通过金属电极或非金属电极(石墨)产生电弧加热	金属和非金属熔炼和精炼	
真空炉	300 ~ 1400	在接近真空状态下通过电热元件加热	金属热处理、钎焊、烧结及熔炼	
感应炉	200 ~ 1600	高频、中频、工频、感应圈加热装置	金属加热和熔炼	
盐浴炉	600 ~ 1300	通过金属电极在盐液中加热	金属无氧化热处理加热	

3 工业炉组成

工业炉由炉衬、炉架、燃烧装置（或电热元件）、预热器、炉前管道、排烟系统、炉用机械等部分组成。

1) 炉衬，或称砌体，是用耐火材料、隔热材料和某些建筑材料砌筑或敷设成的炉膛、燃烧室、排烟道等炉体部位。炉衬的作用是使工业炉在加热或熔炼过程中能承受高温热荷、抵抗化学侵蚀、减少热量损失并具有一定的结构强度，以保证炉内热交换过程的正常进行。

2) 炉架是炉体的钢结构部分，由支柱、拉杆、炉墙钢板、拱脚梁、炉顶框架及固定构件的各种型钢组成。炉架的作用是固定炉衬并承受其部分重力，侧支柱与拱脚梁承受砖砌拱顶的水平推力，前后支柱则用以承受砌体的热胀力和某些构件的重力。

3) 燃烧装置是实现燃料燃烧过程用以向炉内提供热源的设备，因此它是火焰炉的核心部分。燃烧装置除应保证在规定的热负荷条件下实现完全燃烧，或根据特殊的加热要求实现不完全燃烧以取得规定的燃烧气体成分外，还应保证燃烧过程稳定以及火焰的方向，形状、刚度和铺展性要符合炉型及加热工艺的要求。

4) 预热器用以回收炉子烟气余热，达到节约燃料、提高炉温、加快升温速度的目的。以锻造加热炉为例，炉温要求 1300℃，当使用发热量为 5000kJ/m³ 的发生炉煤气时，只能达到约 1200℃ 的炉温，而利用烟气余热将助燃空气预热到 400℃ 时，则可达到 1320℃ 的炉温，且由于回收了热量，可节约燃料 20% 左右。

5) 炉前管道是指与相应车间管道相连接的附属子单台炉子的管道部分，用作炉用燃料、燃烧所需空气以及构件冷却用水的输送和均量分配。

6) 排烟系统是由产生抽力的排烟装置（烟囱、引风机或喷射器）或排送烟气的烟道所组成，用以将炉内烟气排出炉外。它是保证排烟通畅和火焰炉正常运行的重要条件。

7) 炉用机械是炉子组成部分中的机械运行部件，如台车式炉的台车和台车牵引机构、步进式炉的步进机构、输送式炉的输送带（链）及其传动机构、推钢（杆）式炉的推钢机和出钢机、各种炉门升降及压紧机构等。炉用机械是体现工业炉的机械化程度的，不但要保证装出料方便和运行可靠，还要为实现炉子自动化操作创造条件。

4 设计原则

1) 工业炉设计必须符合国家有关技术政策，炉子的技术性能应能满足生产工艺要求。

2) 运用不断发展的热工及机械理论，例如，燃料燃烧、流体力学、传热学、机械原理、材料力学等，指导炉子的设计工作，引进并吸收国外工业炉先进技术，不断完善和提高炉子的技术性能和机械化自动化程度。

3) 炉子结构尺寸应根据生产实践或科学试验数据加以确定，不应照旧有结构按比例放大或缩小。

4) 设计新的炉型结构时，要选用新材料、新装置以改进炉子结构。例如，尽量采用适合炉子性能特点和方便施工的各种新型耐火材料和隔热材料，选用各种新型燃烧装置和余热回收装置，以提高炉子的热效率、提高产品质量、降低燃料消耗、改善操作维修