



节能减排技术丛书



感应加热与节能

——感应加热器(炉)的设计与应用

五洲工程设计研究院 付正博 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



节能减排技术丛书

感应加热与节能—— 感应加热器（炉） 的设计与应用

五洲工程设计研究院 付正博 编著



机械工业出版社

感应加热是一项既节能又环保的先进技术。感应加热器（炉）适合毛坯形状简单、生产批量大的毛坯件的锻造、热冲压，工件的热处理及军工、汽车、拖拉机、铁路机车车辆等行业的工厂、企业用于金属加热与熔化等。本书系统地介绍了感应加热技术，包括感应加热与节约能源、感应加热的物理基础、金属的感应加热、感应加热的方式（工频、中频）、感应加热的计算原理、感应器的设计计算，汇编介绍了40种典型的在各行业中应用的感应加热器（炉）。

本书可供从事感应加热设备设计、使用与节能工作的工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

感应加热与节能：感应加热器（炉）的设计与应用/付正博编著. —北京：机械工业出版社，2008.9

（节能减排技术丛书）

ISBN 978-7-111-25028-9

I. 感… II. 付… III. 感应加热设备—节能—设计 IV. TM924.52

中国版本图书馆CIP数据核字（2008）第134028号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

责任编辑：邝 鸥 版式设计：霍永明

责任校对：李秋荣 责任印制：乔 宇

北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）

2008年10月第1版第1次印刷

169mm×239mm·17.25印张·332千字

0 001—4 000册

标准书号：ISBN 978-7-111-25028-9

定价：30.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
销售服务热线电话：（010）68326294

购书热线电话：（010）88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：（010）68351729

封面无防伪标均为盗版

序

本书是作者在五洲工程设计研究院从事工业炉设计 50 余年的经验总结。本书理论联系实际，将设计实践经验总结上升为理论是本书的特点之一。本书的另一特点是与当前国家“节能减排”战略部署紧密相连，对感应加热提出了一系列的节能措施，推荐了一批新炉型，满足了机械制造行业的毛坯锻造、热冲压、工件的热处理以及有色与黑色金属行业金属加热与熔化的需要。根据当前节能减排形势，我们向从事工业炉行业和节能工作的工程技术人员、广大读者推荐本书。

作者所在的五洲工程设计研究院是国家一所多专业、多门类的重点、大型国防工程建设设计研究院。工业炉设计自 20 世纪 50 年代初就是院重点专业之一，为此院将工业炉专业列入了重点扶植计划，在人力上重点配置，在物力上重点分配，在财力上重点保证。鉴于工业炉设计大多数是非标准设备设计，因此工业炉的设计与制造、设计与调试的两个相结合就显为重要。院在接受工业炉设计任务前或完成工业炉设计任务后，均要组织设计人员深入工厂和试验基地，以完善设计。院在 50 余年的工业炉设计项目中，深得受援国和国内企业的好评。与此同时院也培养了一批有真才实学的专家。本书作者（获国家发明二、三、四等奖，国务院特殊津贴获得者、研究员级高级工程师）付正博就是其中之一。院鼓励各门类专家总结经验，编写著作、论文，带徒弟，以促进各专业、门类技术专长的推陈出新、持续发展。本书的出版，就充分体现了院的良好激励政策和浓厚的学术气氛。适逢五洲工程设计研究院建院 55 周年，本书的出版也为院献上一份贺礼。

本书共分 12 章，比较系统地对感应加热技术进行了介绍，包括：感应加热与节约能源、感应加热的物理基础、金属的感应加热、感应加热的计算原理、感应加热的方式（工频、中频）、感应器的设计计算，汇编介绍了 40 种典型的在各行业中应用的感应加热器（炉）等。

感应加热器（炉）适合毛坯形状简单、生产批量大的毛坯件的锻造、热冲压、工件的热处理及金属熔化的军工、汽车、拖拉机、铁路机车等行业的工厂、企业使用。

感应加热器（炉）是一项既节能又环保的先进技术，它与燃油工业炉、天然气工业炉、燃煤工业炉、电阻炉相比，有以下优点：

(1) 加热速度快，可以成倍地提高加热设备的生产效率，并可与其他工艺

设备组成连续的生产线。

(2) 加热时间短、效率高，感应器（炉）的效率可达 60%~70%，感应熔炼炉的效率可达 65%~75%，而火焰炉（燃油工业炉、燃天然气工业炉、燃煤工业炉）的加热效率仅为 20% 左右，电阻炉加热效率只有 40% 左右。

(3) 采用感应加热方法进行锻造加热时，由于加热速度快，加热时间短，毛坯产生的氧化皮烧损率为 0.5%~1%，而火焰炉产生的氧化皮烧损率为 3%，感应加热炉比火焰炉节材 2%。

(4) 热加工车间若使用感应加热器（炉）后，由于散热损失少，车间温度大大降低（按标准划分，该车间就可划为非高温车间），改善了劳动条件。又由于感应加热不产生烟气和烟尘，净化了车间的工作环境。

本书不但对本专业技术人员有参考价值，而且对非本专业技术人员入门学习感应加热专业、短时间掌握感应加热技术，能起到事半功倍的作用。本书中不当之处，敬请广大读者批评指正。

五洲工程设计研究院（兵器工业第五设计研究院）专家委员会主任 王心力

五洲工程设计研究院（兵器工业第五设计研究院）专家委员会委员 孙振安

目 录

序

第1章 感应加热与节约能源	1
1.1 感应加热炉加热的单位产品耗电量	2
1.2 感应炉加热与油炉加热的节能经济比较	3
1.3 感应炉加热与电阻炉加热的节能经济比较	5
1.4 火焰炉与感应炉联合加热方式	8
1.5 连铸钢坯的感应加热	8
1.6 感应加热节能的途径	9
第2章 感应加热的物理基础	11
2.1 电阻	11
2.2 磁场	14
2.3 磁感应强度与磁通	14
2.4 磁导率	15
2.5 磁场强度	16
2.6 全电流定律	16
2.7 铁磁物质	17
2.8 电磁感应与电磁感应定律	18
2.9 集肤效应	19
2.10 电流穿透深度	20
2.11 圆环效应	21
2.12 邻近效应	22
2.13 涡流	23
第3章 金属的感应加热	24
3.1 感应加热设备的组成	24
3.2 加热过程中金属物理性能的变化	24
3.3 毛坯加热时所需的功率	27
3.4 电流频率的选择	34
3.5 磁导率的确定	36
3.6 感应加热的温度分布	38
3.7 感应加热时间的计算	42
3.8 均温时间的确定	54
3.9 感应器的总效率	56

第4章 毛坯的感应加热方式与炉型	57
4.1 毛坯的分类	57
4.2 毛坯的感应加热方式	57
4.3 毛坯感应加热炉的炉型	58
第5章 毛坯感应加热用的感应器	64
5.1 螺旋形感应器	64
5.2 缝状感应器	68
5.3 扁圆形感应器	69
5.4 异形感应器	70
5.5 有导磁体的感应器	71
5.6 线圈导体截面尺寸的选择	76
5.7 感应器的制造工艺	78
第6章 感应加热的计算原理	79
6.1 纵向磁场中的圆柱形导体	79
6.2 螺旋形感应器上的电压	82
6.3 圆柱形导体吸收的功率	84
6.4 螺旋形感应线圈的磁通	85
6.5 纵向磁场中的矩形截面导体	86
6.6 矩形截面导体吸收的功率	88
6.7 矩形截面导体上的磁通	89
6.8 矩形感应线圈的磁通	90
6.9 矩形感应线圈的阻抗	91
6.10 空心圆柱形导体吸收的功率	94
6.11 感应加热的电磁力	97
第7章 感应器的设计步骤	103
7.1 感应器设计的几个问题	103
7.2 感应器的设计计算步骤	105
7.3 计算举例	109
第8章 中频感应器的设计计算	113
8.1 计算的已知条件	113
8.2 电流频率的选择	113
8.3 加热时间的确定	113
8.4 感应器主要尺寸的确定	114
8.5 毛坯加热所需的功率	114
8.6 电参数的计算	115
8.7 感应线圈的冷却水计算	119
8.8 计算举例	119

第 9 章 工频感应器的设计计算	124
9.1 计算的已知条件	124
9.2 毛坯加热所需的功率	124
9.3 磁场强度的计算	125
9.4 磁通的计算	125
9.5 感应线圈匝数的计算	126
9.6 感应线圈上电流的计算	127
9.7 线圈导体截面积的计算	127
9.8 导磁体截面积的计算	128
9.9 感应器的电效率	129
9.10 感应器的功率因数	130
9.11 补偿电容器的容量	130
9.12 感应线圈的冷却水计算	131
9.13 计算举例	135
第 10 章 无芯感应熔炼炉的设计计算	142
10.1 炉子容量与坩埚几何尺寸的确定	142
10.2 电流频率的选择	144
10.3 炉料消耗的功率	145
10.4 电参数的计算	146
10.5 导磁体的计算	149
10.6 感应线圈的冷却水计算	151
10.7 计算举例	151
第 11 章 工频供电与三相平衡器	160
11.1 供电方式	160
11.2 工频感应器的“T”型接线	161
11.3 三相平衡器	163
11.4 电压的波动对加热温度的影响	167
第 12 章 感应加热在工业上的典型应用	168
12.1 往复式工频感应加热炉	168
12.2 大钢棒步进式中频感应加热炉	171
12.3 二次感应加热锻造	175
12.4 复铜钢板工频感应加热轧制	178
12.5 铁路机车车轴锻前工频感应加热炉	181
12.6 变截面圆筒件感应调质处理	184
12.7 小管高频感应加热口部退火	186
12.8 冷轧辊工频感应加热淬火	188
12.9 电动机转子感应加热与轴热套	192

12.10	三工位齿轮热装工频预热装置	196
12.11	飞轮齿圈工频感应预热热装	200
12.12	感应加热回转炉	202
12.13	等截面钢管感应热处理	204
12.14	黑色与有色金属感应加热挤压	208
12.15	钢棒连续感应加热炉	214
12.16	钢板气割边缘工频感应加热回火	216
12.17	钢带感应热处理	218
12.18	钢管焊缝的工频感应热处理	219
12.19	轴承内圈工频加热热装与热卸	220
12.20	机车轮箍与车轮的工频感应热处理	222
12.21	端部中频感应加热退火	225
12.22	钢棒料工频感应加热兰脆下料	226
12.23	钢饼与铜饼的中频感应加热	228
12.24	钢绞线中频感应稳定化处理	230
12.25	变截面工件的感应加热	230
12.26	感应熔炼炉	231
12.27	工频感应加热在化工行业的应用	244
12.28	弹体涂漆前工频感应预热	247
12.29	半成品中频感应加热正火	248
12.30	钎杆端部中频感应加热	249
12.31	容器焊缝的感应加热热处理	250
12.32	小钢管中频感应热处理	251
12.33	曲轴锻造的工频感应加热	253
12.34	500kg多用途中频感应熔炼炉	254
12.35	弹簧热绕前中频感应加热	254
12.36	特殊形状工件感应加热热处理	255
12.37	中频感应加热弯管	256
12.38	高频感应加热在光缆制造中的应用	257
12.39	精密感应加热在医学上的应用	258
12.40	金属带材横向磁通感应加热	261
参考文献		265

第1章 感应加热与节约能源

节约资源是我国的基本国策。节约能源，提高能源利用效率，保护和改善环境，促进经济社会全面协调可持续发展，是我国当前的一项战略任务。温家宝总理在2007年全国节能减排工作会议上指出“淘汰落后产能是实现节能减排目标的重要手段”。要大力淘汰能耗高、污染环境的落后工艺、设备与技术，加快节能技术的开发，大力推广、应用节能、环保的新工艺、新设备、新技术与新产品，同时还要充分利用余热余压。

在我国黑色金属、有色金属、机械制造、汽车、军工等行业，热加工车间的加热设备，其热能的消耗很大，加热效率很低。毛坯热成型前的加热、工件的热处理以及有色金属与黑色金属的熔化多采用油炉、天然气炉、电阻炉，少数采用感应加热炉与感应熔炼炉，也还有工厂使用煤炉进行毛坯的加热，其能耗高，对环境的污染严重。随着我国工业的发展，产品质量要求的提高，节能降耗与环保的严格要求，已由火焰炉加热逐步向电加热方向发展。

感应加热是一项先进的技术，与火焰炉和电阻炉加热相比较，其主要优点有：

(1) 加热速度快，可以成倍提高加热设备的生产率，可与其他工艺设备组成连续的生产线。

(2) 加热时间短，效率高，感应加热炉的效率可达60%~70%，感应熔炼炉的效率可达到65%~75%，而火焰炉的加热效率仅有20%左右，电阻炉的加热效率只有40%左右。

(3) 采用感应加热方法进行热成型前加热时，由于加热速度快，加热时间短，毛坯产生的氧化皮烧损率为0.5%~1%，而火焰炉的金属烧损率为3%，感应加热炉比火焰加热炉节约材料2%，同时提高了锻造模具的使用寿命。

(4) 热加工车间若使用感应加热炉，由于散热损失少，车间温度大大降低，改善了车间的劳动条件。又由于感应加热不产生烟气和烟尘，净化了车间工作环境。

但是在一个感应器里能加热的毛坯尺寸有限，不像火焰炉与电阻炉那样灵活通用。因此，感应加热适合毛坯形状简单、品种少、产量大的产品零件的生产。

由于感应加热具有以上所述优点，以及人们对节能减排认识的逐步提高，现实生产中已越来越多地采用节能环保的新工艺、新设备、新技术，淘汰落后的工艺、设备和技术。

在电加热方面，毛坯热成型前的加热很少使用电阻炉，因为毛坯的加热温

度较高，受电热元件的限制，所以主要就是用感应加热。在热成型前感应加热毛坯已用于毛坯的锻造、热冲压、热挤压与热剪下料等工艺上。

在工件的热处理方面，由火焰炉加热转向电阻炉加热。对于工件形状比较简单的如等截面钢管、弹体与药筒的孟子以及容器的焊缝等，已使用感应加热进行正火、退火与调质热处理。

在较低温度的预热方面，是在电阻炉与油浴炉中进行预热，现已采用感应加热进行轴承内圈的热装、热卸与电动机转子和轴的热套等。

在钢铁与有色金属的熔炼方面，现已采用中频与工频感应熔炼炉。

在用感应加热的同时，还应注意节能减排。对感应器的冷却水应充分利用，对毛坯锻造成型后的余热应尽可能充分利用。因为毛坯成型后表面温度降低，而中心部分温度较高，可利用感应加热速度快的优势，对毛坯进行补充加热，使毛坯表面迅速达到再加工所需的温度，从而充分利用毛坯本身的余热，其节能效果明显。

在我国黑色金属、有色金属、机械制造、汽车、军工等行业里，老厂的技术改造与新厂的建设，对毛坯的热成型与工件的热处理，以及对黑色金属与有色金属的熔炼选用感应加热的方式进行加热，都是为了节约能源，改善环境与提高产品的质量与数量。而感应加热这门技术本身就是一项节能、环保的技术，关键在于人们如何利用这门技术于生产实际中，以达到节能降耗与改善环境的目的。

1.1 感应加热炉加热的单位产品耗电量

热成型毛坯包括黑色与有色金属毛坯，在采用感应加热时，由于使用不同的电流频率，其单位产品耗电量亦不同。表 1-1 列出了采用中频感应加热钢坯到 1250℃ 时的单位产品耗电量的分配情况，表 1-2 列出了工频感应加热炉加热几种金属的单位产品耗电量，表 1-3 列出了感应加热炉与感应熔炼炉的平均加热效率。从表 1-1 ~ 表 1-3 的数据可以看出加热毛坯时感应加热炉的总效率可以达到 60% ~ 70%。表 1-4 列出了室式锻造加热炉的热消耗量，从表中数据看出室式锻造加热炉加热钢坯的效率只有 15.6%。表 1-5 列出了两段式连续加热炉的热消耗量，从表中数据看出两段式连续加热炉毛坯加热的效率有所提高，但也仅为 30%。从加热效率来看，感应加热炉的加热效率要比火焰加热炉的高。

表 1-1 中频感应加热炉加热钢坯时耗电量的分配比例数 (1250℃)

项 目	各项耗电量 / (kW · h/t)	占总功率的比例 (%)
总功率	400	100
钢坯	240	60
感应器	120	30

(续)

项 目	各项耗电量/(kW·h/t)	占总功率的比例 (%)
中频变压器	20	5
变压器	8	2
电容器	2	0.5
其他(导轨等)	10	2.5

表 1-2 工频感应加热炉加热几种金属毛坯时的单位产品耗电量

材料	加热温度/℃	单位产品耗电量/(kW·h/t)
铝	450	250~280
黄铜	750	180~210
纯铜	850	230~260
钢	1000	240~300
钢	1250	320~400

表 1-3 感应加热炉与感应熔炼炉的平均加热效率 η

材 料	炉型		
	无心熔炼炉	有心熔炼炉	感应加热炉
钢、铸铁	0.65~0.75	0.75~0.95	0.6~0.7
纯铜	0.4~0.5	0.7~0.9	0.3~0.4
黄铜	0.55~0.65	0.7~0.9	0.4~0.5
铝	0.45~0.55	0.7~0.9	0.35~0.45
铝合金	0.5~0.6	0.7~0.9	0.45~0.55

表 1-4 火焰炉——室式锻造加热炉的各项热消耗分配比例

项 目	占炉子总热量的比例 (%)	项 目	占炉子总热量的比例 (%)
钢坯加热有效热	15.6	通过炉门的散热损失	10
通过炉墙的散热损失	20.4	烟气带走的热损失	54

表 1-5 火焰炉——两段式连续加热炉的各项热消耗的分配比例

项 目	占炉子总热量的比例 (%)	项 目	占炉子总热量的比例 (%)
钢坯加热有效热	30	通过炉门的热损失	1.5
烟气带走的热损失	47	通过砌体的热损失	1.2
冷却水带走的热损失	14.7	其他热损失	5.6

1.2 感应炉加热与油炉加热的节能经济比较

某厂在锻压生产中,对精锻机提供的热毛坯,原是在烧油的台车式加热炉

里加热,为了提高产品的质量与节约能源而采用往复式工频感应加热炉加热。现以此为例,对毛坯用工频感应炉加热与用油炉加热作经济比较。

毛坯的材质为合金钢,经机械加工后为空心管状毛坯,其外径为 $\phi 320 \sim \phi 580\text{mm}$ 等5种规格尺寸,加热温度 $1080 \sim 1150^\circ\text{C}$ 。精锻机对空心毛坯的加热质量要求较高,外圆氧化皮厚度小于 2mm ,内孔氧化皮厚度小于 1mm ,毛坯的径向温差不大于 30°C ,轴向温差小于 90°C 。原用的烧油台车式加热炉炉底面积为 $3\text{m} \times 7\text{m} = 21\text{m}^2$,后改用的往复式工频感应加热炉,其功率为 $900 \sim 1000\text{kW}$ 。

1. 锻件的质量

毛坯经往复式工频感应加热炉加热后温度的均匀性较好,经多次测量,毛坯在出炉前径向温差 $\leq 30^\circ\text{C}$,轴向温差 $\leq 90^\circ\text{C}$,满足了精锻机对毛坯加热的要求。以 $\phi 331\text{mm}$ 的毛坯为例,经往复式工频感应加热炉加热后精锻出的锻件,其合格率为 93.2% ,经台车式加热炉加热后精锻出的锻件,其合格率为 50% 。

2. 能源消耗的比较

用往复式工频感应加热炉加热 $\phi 331\text{mm}$ 的毛坯,其平均耗电量为 $671\text{kW} \cdot \text{h}/\text{件}$,工业用电的价格为 $0.8 \text{元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,加热一件毛坯花费的电费为 537元 。用台车式加热炉加热 $\phi 331\text{mm}$ 的毛坯一件耗轻柴油 0.54t ,轻柴油的价格为 $5000 \text{元}/\text{t}$,加热一件毛坯花费的燃料费为 2700元 。毛坯用往复式工频感应加热炉加热比用台车式加热炉加热一件毛坯少用 2163元 的能源费。

3. 毛坯的氧化问题

由于感应加热的速度较快,加热时间短,毛坯的氧化皮较少,仍以 $\phi 331\text{mm}$ 毛坯的加热为例,其加热时间为 70min ,经现场测量,毛坯的氧化皮厚度,外圆为 $0.1 \sim 0.3\text{mm}$,内孔为 $0.05 \sim 0.1\text{mm}$,约占毛坯质量的 $0.2\% \sim 0.4\%$ 。毛坯用台车式加热炉加热,其加热 $\phi 331\text{mm}$ 毛坯的加热时间为 10h ,毛坯的氧化皮厚度 $1 \sim 3\text{mm}$,约占毛坯质量的 $1\% \sim 3\%$ 。

$\phi 331\text{mm}$ 的毛坯经往复式工频感应加热炉加热以后,其氧化皮厚度按 0.225mm 计算,烧损量为 2.74kg ,合金钢的价格 $5000 \text{元}/\text{t}$,则毛坯经往复式工频感应加热炉加热的金属烧损损失为 13.7元 。 $\phi 331\text{mm}$ 毛坯经台车式加热炉加热后,氧化皮厚度按 1.67mm 计算,烧损量为 20.4kg ,金属的烧损损失为 102元 。一件 $\phi 331\text{mm}$ 的毛坯经往复式工频感应加热炉加热后的金属材料烧损损失比用台车式加热炉加热的金属材料烧损损失少 88.3元 。

4. 设备折旧费与大修费

精锻机每天按两班作业,以每班生产 $\phi 331\text{mm}$ 毛坯 24件 计算,一天可生产 48件 。

往复式工频感应加热炉设计为 4台 ,每班每台往复式工频感应加热炉可以加热毛坯 6件 , 4台 往复式工频感应加热炉两班可加热毛坯 48件 ,满足精锻机

的生产要求。

用 3m × 7m 的台车式加热炉，每炉装 φ331mm 毛坯 12 件，每炉加热、锻造及辅助时间共需 14h，第一炉锻完后重新装炉加热需 10.5h，要满足精锻机两班生产 48 件毛坯，必须配有 4 台台车式加热炉。

4 台往复式工频感应加热炉投资约 1200 万元，4 台台车式加热炉投资约 384 万元，与台车式加热炉配套的供油系统投资约 414 万元（以 150 万元计），若每年加热 2000 件 φ331mm 毛坯，设备折旧费与大修费按综合折旧率 6.47% 计算，此项费用加热一件 φ331mm 毛坯用往复式工频感应加热炉比用台车式加热炉高

$$[1200 - (384 + 150)] \times 10^4 \times 0.0647 \times \frac{1}{2000} \text{元/件} = 215.5 \text{元/件}$$

5. 管理费与人工工资费

由于台车式加热炉有供油系统，在加热前还需要对毛坯内孔进行堵塞，因此用台车式加热炉加热毛坯需要增加人工工资费、管理费与材料费，合计每件毛坯以 150 元计算。

用往复式工频感应加热炉加热一件 φ331mm 毛坯的费用为

$$537 \text{元} + 13.7 \text{元} + 215.5 \text{元} = 766.2 \text{元}$$

用台车式加热炉加热一件 φ331mm 毛坯的费用为

$$2700 \text{元} + 102 \text{元} + 150 \text{元} = 2952 \text{元}$$

以每年生产 2000 件 φ331mm 毛坯计算，用往复式工频感应加热炉加热毛坯比用台车式加热炉加热毛坯要节约成本

$$(2952 - 766.2) \text{元/件} \times 2000 \text{件} = 4371600 \text{元}$$

在这里只进行了成本的经济分析，还应看到毛坯用往复式工频感应加热炉加热对车间环境的改善作用，因为用燃油的台车式加热炉加热时，散于车间的热量很大，特别是台车拉出炉外装卸料时大量的热量散出，使工人的劳动条件恶化。

1.3 感应炉加热与电阻炉加热的节能经济比较

感应炉加热与电阻炉加热的能源都是电，耗电量的多少主要决定于加热设备的加热效率。现以某厂复铜钢板热轧前的加热为例，进行感应炉加热与电阻炉加热的节能经济比较。

复铜钢板的尺寸见图 1-1，铜板包在钢板上，经加热后进行轧制，使铜板与钢板粘合在一起成为复合钢板。

在工厂里复铜钢板的生产原来是使用两台推杆式电阻炉进行热轧前的加热，一台推杆式电阻炉生产使用，另一台推杆式电阻炉维修待用。毛坯的加热温度

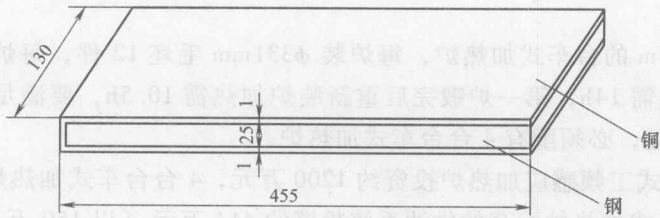


图 1-1 复铜钢板

900℃，推杆式电阻炉的生产率为 2 件/min，为了提高生产率就必须增加推杆式电阻炉的台数，由于受生产车间的面积限制，不可能再增设推杆式电阻炉而采用工频感应加热的方式对复铜钢板进行加热。

复铜钢板在用推杆式电阻炉加热之前，铜板与钢板均经过酸洗处理，然后铜板包在钢板的外面，并用薄钢片包住复铜钢板的四周，以减少铜板和钢板的接触面与空气接触，同时在炉内还通有 CO 保护气体，以保证在加热过程中铜板与钢板的表面不氧化，轧制后铜片与钢板粘合良好。为了便于将复铜钢板从推杆式电阻炉的进料端推入，经过炉膛加热后推出，复铜钢板放在一个托盘上，复铜钢板之间还用垫铁分开以便热的辐射与对流。推杆式电阻炉加热复铜钢板到 900℃，生产率 2 件/min 时，加热时间 240min，其单位产品耗电量为 348kW·h/t。

复铜钢板在工频感应加热之前，铜板与钢板也经过酸洗处理，然后铜板包在钢板的外面，但在复铜钢板的四周不用包薄钢片。复铜钢板加热用的工频感应加热炉见图 1-2，复铜钢板是叠放在感应器中，复铜钢板之间垫有一块 3mm 厚的不锈钢板，以免复铜钢板之间互相粘连。在加热时，工频感应加热炉里通有 CO 保护气体，使得热轧后的复铜钢板的铜片与钢板粘合良好。复铜钢板在工频感应加热炉中加热至 900℃，生产率提高到 4 件/min，加热时间为 12min，总功率 700kW，单位产品耗电量 235kW·h/t。

1. 电能消耗的比较

复铜钢板用推杆式电阻炉加热的单位产品耗电量为 348kW·h/t，用工频感应加热炉加热的单位产品耗电量 235kW·h/t。用工频感应加热炉加热比用推杆式电阻炉加热复铜钢板少用电 113kW·h/t，按年产 10000t 复铜钢板计算，每年节约电能 113×10^4 kW·h。同时，推杆式电阻炉在公休时还须进行保温，启动时还须提前数小时升温，这也消耗不少的电能与人工。

2. 保护气体消耗量

推杆式电阻炉的炉膛空间大，净空约 3m³，CO 保护气体的消耗大，工频感应加热炉的感应器空间很小，净空约 0.03m³，CO 保护气体的消耗量要小很多。

3. 辅助材料的消耗

复铜钢板工频感应加热炉取消了在推杆式电阻炉加热时用的托盘与垫铁，

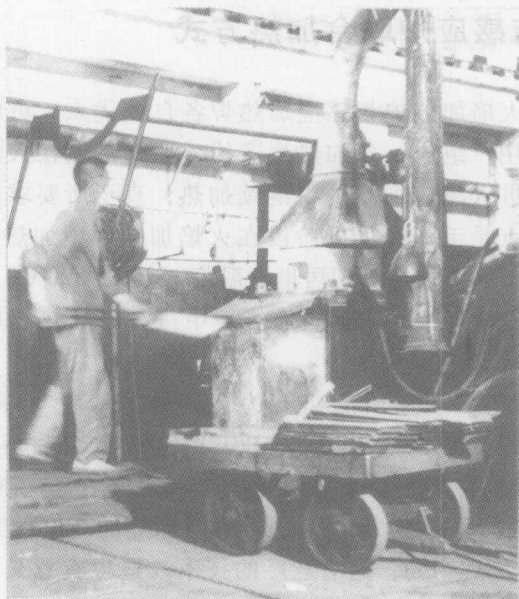


图 1-2 复铜钢板工频感应加热炉

也不用薄钢片包住复铜钢板的四周。由于薄钢片只能使用 2~3 次就报废了，所以薄钢片的消耗量很大。但是复铜钢板在用工频感应加热炉加热时，在复铜钢板之间使用了一块 3mm 厚的不锈钢板。

4. 占用车间生产面积

推杆式电阻炉占用车间生产面积 37.6m^2 ，而工频感应加热炉占用车间生产面积 6m^2 ，同时复铜钢板的生产率还从 2 件/min 提高到 4 件/min。当两台推杆式电阻炉拆除后车间的生产面积得到改善。

5. 操作人员数量

复铜钢板用工频感应加热炉生产比用推杆式电阻炉生产少用三名操作人员。

6. 使用灵活方便

复铜钢板用工频感应加热炉生产，使用灵活方便，可以按需要随时启用或停炉，大大地减少了生产前的准备时间，重新启用炉子只需要 12min 即可进行正常生产。推杆式电阻炉如果出现故障，再启用备用的推杆式电阻炉时，要将冷炉加热到 900°C 就需要很长时间，还要消耗大量电能。

7. 改善车间环境

复铜钢板采用工频感应加热炉进行生产，大大地改善了车间环境，作业区的温度比用推杆式电阻炉生产下降了 10°C 左右，改善了工人的劳动条件。

1.4 火焰炉与感应炉联合加热方式

为了充分发挥火焰加热炉与感应加热炉各自的优点，可以将火焰加热炉与感应加热炉联合使用，组成一条加热生产线，即将毛坯在火焰加热炉中加热到居里点温度，然后进入感应加热炉中继续加热，直至所要求的加热温度。这种联合加热方式的优点是毛坯在低温阶段在火焰加热炉中加热，其温差大，加热速度会快一些，由于只要求加热到居里点温度（750~800℃），毛坯表面氧化很少，而在800℃以后的加热是在感应加热炉中进行，加热速度较快，加热时间短，毛坯的氧化量减少。

毛坯加热到1250℃所需要的热能为 $240\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ ，若感应加热的效率为65%，则毛坯加热的单位产品耗电量为 $370\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ 。当毛坯在火焰加热炉中加热到780℃，其吸收的热能相当于 $150\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ 。毛坯在感应加热炉中从780℃加热到1250℃需要热能为 $90\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ ，这时感应加热的效率约为60%，毛坯加热的单位耗电量为 $150\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ ，这对老厂的技术改造很有意义。当原有毛坯的锻造是火焰加热炉加热时，其加热时间长，毛坯的氧化皮较厚，锻造成型的产品质量较差，模具的使用寿命不高，若要废去火焰加热炉用感应加热炉代替，按生产率1000kg/h计算，需选用500kW的电源。若保留火焰加热炉，另增加一台感应加热炉进行联合加热，感应加热炉的电源可减少到160~250kW，这就充分利用了原有的设备，又发挥了感应加热的优势，减少了毛坯加热时的氧化损失，提高了模具的使用寿命与锻造产品的质量。

1.5 连铸钢坯的感应加热

目前国内外的一些钢厂已采用连续铸钢工艺，连铸坯离开连铸机后送到轧机前，其表面温度降低到约800℃，而中心部分温度约有1050℃，由于温度较低，不能进行轧制，只好把连铸坯切断后堆放起来，或者是放在均温炉里继续加热。对于这样的连铸坯，其平均温度约为925℃，若在生产线上就进行补充加热，使连铸坯从925℃加热到1250℃，即可进行轧制。由于连铸坯表面温度低，中心部分温度较高，而感应加热是从表面先热，热量向中心传导，所以连铸坯采用感应加热进行补充加热然后继续进行轧制，是一个节约能源的好办法，充分地利用了毛坯的余热，国外的很多钢厂已经实现了该工艺。

连铸坯从925℃加热到1250℃所需要的热量相当于 $60\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ ，若感应加热的效率为50%，其单位耗电量为 $120\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ ，这样可以节约能源68%。图1-3为连铸坯感应加热装置的外观图，感应器的数量决定于连铸坯的生产率。为了