

高等学校教材·专著类系列丛书

铁合金生产节能 及精炼技术

TIEHEJIN SHEGNCHAN JIENENG
JI JINGLIAN JISHU

栾心汉 唐琳 李小明 候苏波 编著

铁合金是冶金、化工、机械工业的重要原料，是资源、能源的消耗大户。铁合金工业能耗约占全国总发电量的2%，是钢铁工业电耗的1/3。过去由于冶炼炉容量小，装备水平低，工艺技术落后和经营管理不善等原因，与铁合金生产先进的国家相比，我国的铁合金生产单位能耗高；一批中小企业与少数国内先进企业相比，能耗差距也很大。这一切均表明我国铁合金冶金节能潜力巨大。研究生产同样数量的铁合金产品或产值，消耗尽可能少的能源，或者说用相同数量的能源生产出更多更好的铁合金产品或产值，引导循环经济发展模式，是编写本书的初衷。

本书从铁合金节能的主要途径入手，分述了矿热炉设计参数选择、电气设备、机械设备、炉子结构及电极等与冶金节能的关系。本书重点突出了下述内容：电炉冶炼高牌号硅铁、工业硅、高碳锰铁、硅锰合金和高碳铬铁在精料、循环利用和冶炼工艺方面的节能技术和措施；铁合金精炼技术及其增效节能的意义。本书可作为冶金工程专业辅助教学用书，也可作为铁合金生产人员和管理人员进行技术培训和素质教育的专门教材，也可供铁合金企业工程技术人员和管理人员阅读参考。

西北工业大学出版社

铁合金生产节能 及精炼技术

栾心汉 唐 琳 李小明 侯苏波 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书共分 10 章,从铁合金节能的主要途径入手,分述了矿热炉设计参数、电气设备、机械设备、炉子结构及电极等与冶金节能的关系。包括电炉冶炼高牌号硅铁、工业硅、高碳锰铁、硅锰合金和高碳铬铁在精料、循环利用和冶炼工艺方面的节能技术与措施,以及铁合金精炼技术与增效节能的意义。

本书可供冶金工程专业作为辅助教学用书,同时可作为铁合金生产人员和管理人员进行技术培训的教材,也可作为有关工程技术人员及管理人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

铁合金生产节能及精炼技术/栾心汉等编著. —西安:西北工业大学出版社,2006. 6
ISBN 7-5612-2098-7

I. 铁… II. 栾… III. ①有色冶金炉—节能—技术—高等学校—教材②铁合金(炼钢原料)—精炼—高等学校—教材 IV. ①TF806②TF6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 064592 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西向阳印务有限公司

开 本:787 mm×960 mm 1/16

印 张:17.25

字 数:377 千字

版 次:2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月第 1 次印刷

印 数:1~3 000 册

定 价:35.00 元

前 言

铁合金是冶金、化工、机械工业的重要原料,是资源、能源的消耗大户。铁合金工业能耗约占全国总发电量的 2%,是钢铁工业电耗的 1/3。过去由于冶炼炉容量小,装备水平低,工艺技术落后和经营管理不善等原因,与铁合金生产先进的国家相比,我国的铁合金生产单位能耗高;一批中小企业与少数国内先进企业相比,能耗差距也很大。这一切均表明我国铁合金冶金节能潜力巨大。研究生产同样数量的铁合金产品或产值,消耗尽可能少的能源,或者说用相同数量的能源生产出更多更好的铁合金产品或产值,引导循环经济发展模式,是编写本书的初衷。

本书从铁合金节能的主要途径入手,分述了矿热炉设计参数选择、电气设备、机械设备、炉子结构及电极等与冶金节能的关系。本书重点突出了下述内容:电炉冶炼高牌号硅铁、工业硅、高碳锰铁、硅锰合金和高碳铬铁在精料、循环利用和冶炼工艺方面的节能技术和措施;铁合金精炼技术及其增效节能的意义。本书可作为冶金工程专业辅助教学用书,也可作为铁合金生产人员和管理人员进行技术培训和素质教育的专门教材,也可供铁合金企业工程技术人员和管理人员阅读参考。全书分 10 章,第 1 章的 1.3 节和第 8,9 章由李小明编写,第 7,10 章由唐琳编写,其他各章由栾心汉和侯苏波编写。全书由栾心汉统稿。

本书在编写过程中得到有关文献资料作者、业界同仁,特别得到朱兴发、杨华康先生的支持和帮助,谨此一并致谢。

由于编者水平所限,书中疏误失当之处在所难免,诚望不吝批评指正。

编著者

2006 年 3 月

目 录

1 绪 论	1
1.1 能源	1
1.2 铁合金冶金节能	2
1.3 铁合金产品标准	10
1.4 铁合金生产主要技术经济指标	59
2 铁合金电炉设备与节能	61
2.1 矿热炉参数选择	61
2.2 电气设备与节能	67
2.3 机械设备与节能	71
2.4 炉体构造与节能	73
2.5 电极与节能	75
3 硅铁生产与节能	80
3.1 硅铁生产概述	80
3.2 硅铁物料平衡及热平衡计算	89
3.3 硅铁冶炼节能途径	98
3.4 硅铁冶炼工艺节能	99
4 工业硅生产与节能	108
4.1 概述	108
4.2 工业硅生产的配料计算	117
4.3 工业硅生产的节能途径	118
5 锰铁生产与节能	135
5.1 概述	135
5.2 电炉生产高碳锰铁工艺选择	136
5.3 高碳锰铁物料平衡计算	137

5.4 高碳锰铁热平衡计算	144
5.5 高碳锰铁生产工艺节能途径	146
6 铬铁生产与节能	156
6.1 概述	156
6.2 碳素铬铁冶炼	158
6.3 碳素铬铁的含硫问题	159
6.4 冶炼碳素铬铁的节能途径	160
7 锰硅合金生产与节能	163
7.1 富锰渣	163
7.2 锰硅合金	177
8 铁合金生产循环利用节能技术	199
8.1 概述	199
8.2 铁合金电炉余热回收与利用	201
9 几项铁合金冶金节能新技术	208
9.1 变压器低压侧无功初偿	208
9.2 低频供电矿热炉	209
9.3 现代直流矿热炉	211
10 铁合金精炼技术	215
10.1 硅铁的精炼技术	215
10.2 工业硅的精炼技术	228
10.3 锰铁合金的精炼技术	233
10.4 铬铁合金的精炼技术	245
主要参考书目	269

1 绪 论

1.1 能 源

所谓能源就是自然界中能够提供某种形式能量的物质资源。它们种类繁多,按形成条件可分为两大类:一类是自然界中以天然形态存在的能量资源,如原煤、石油、天然气、核燃料、水能、风能、太阳能、地热能、潮汐能等,称为“一次能源”,即天然能源;另一类是由一次能源直接或间接转换为其他种类和形式的能源,如煤气、焦炭、煤油、汽油、柴油、重油、电力、蒸汽、激光等等,称为“二次能源”,即人工能源。“一次能源”依其成因又可分为三类:一是来自地球以外的天然能源。它主要是太阳能,包括直接来自太阳的辐射能量和间接来自太阳的能量。如各种植物通过光合作用,把太阳能变为化学能储存在植物体内,并为人类和动物界的生存提供了能源。如煤炭、石油、天然气等矿物燃料,乃是埋于地下的动植物经过漫长的地质年代形成的。再如风能、水能和海洋波力也是由太阳能转换而来。二是地球本身蕴藏的能源。如海洋和地壳中储藏的核燃料所含的原子能、地球内部的热能等。三是来自地球和其他天体的引力作用产生的能源。例如地球、月球和太阳之间有规律的运动造成的相对位置周期性的变化,它们之间产生的引力使海水涨落而产生的潮汐能。“一次能源”还可以根据其能否“再生”而分为两类,即再生能源和非再生能源。再生能源是指能够重复产生的自然能源,如太阳能、水能、风能、海洋能、潮汐能等等,这些能源可经久使用。非再生能源指的是那些经过亿万年形成的,短期内无法恢复的能源,如原煤、原油、天然气和核燃料等,这些能源开采一点少一点,迟早将被用完。

按使用性质可把能源分为燃料能源和非燃料能源两种。燃料能源包括矿物燃料(煤、油、气等)、生物燃料(木柴、沼气等)以及核燃料(铀、钚等)三种。非燃料能源包括水能、风能、潮汐能等。

另外,根据能源的技术状况能源还可分为常规能源和新能源。在不同的历史时期和一定的科学技术水平下,已被人们广泛应用的能源叫做常规能源。目前常规能源包括煤炭、石油、天然气、水力和核裂变能。当今世界能源消耗全部靠这五大能源供应。新近正在开发的能源叫新能源,其技术尚未完全成熟或投资成本尚高,应用受到限制,如太阳能、地热能、风能、海洋能、核聚变能。

从能源的使用和管理角度看,能源具有应用广泛性、供应连续性、形式转换性和不可储存性等特点。

我国的能源资源比较丰富,可称得上是一个能源大国,已探明的煤炭资源有 $6\,000\times 10^8$ t,可采用储量为 $1\,000\times 10^8$ t,占世界可采储量的 $1/6$,石油和天然气资源,在大力进行勘探中,资源数量可望进一步增加,水力资源更加丰富。从常规能源的总储量看,无疑是世界上拥有丰富能源的国家,但我国人口多,按可采储量计算,人均能源占有量只有相当于世界平均数的 $1/2$ 、美国的 $1/10$ 、苏联的 $1/7$ 。加之能源结构和能源消费结构很不合理,前者(能源结构)虽在逐年发生可喜变化,但迄今仍以煤炭为主;后者(能源消费结构)则是工业、交通等部门的消费占有绝大比重。

能源是人类进行一切活动所必须消耗的资源。历史上任何一代人都为寻找或获取能源而付出代价。社会越发展,人们所消耗的能源就越多,能源的消耗增加,推动了社会的发展。能源的开发利用与人类社会的发展有着极密切的关系。

人类社会形成后,在漫长的历史时期内,木柴一直是燃料消费的基本来源。直到 18 世纪开发了利用煤炭的技术,使得将热能转化为机械能日益迫切。在人们对热能深入开发的基础上,出现了蒸汽机。蒸汽功能的应用点燃了工业技术革命的火把,它为社会大生产创造了条件。发电机的发明,电能的应用是能源科学的一次重大革命,它使人类进入了电气化时代。

到 20 世纪,随着石油的大量开采和利用,使工业朝精密化、集约化和经济化方向迈进。原子能的应用标志着人类社会向原子时代迈进。

回顾历史,18 世纪英国开始的工业革命,是由煤炭的开发和利用推进的。20 世纪 60 年代日本经济的高度发展和人民生活水平的提高,是从中东购进大量的石油能源开始的。历史事实表明,每一种新能源的发展与利用,都将引起人类社会的飞跃发展和进步,把社会生产力推向一个新的水平。

在现今的人类社会中电能消耗的多少,仍然是某个地区、国家劳动生产率高低、科学发达程度以及人民生活水平的高低的标志。

能源的开发与高效利用,是衡量一个社会和国家经济实力乃至可持续发展的重要标志。

节能的科学含义就是应用技术上可行,经济上合理,环境和社会可以接受的方法,有效地利用能源资源。为达此目的,要求从开发到利用全过程中,获得高的能源利用率。节能不是简单的资源消耗数量的减少,更不应影响社会活力,降低生产和生活水平与质量,而是要充分发挥能源利用效率,力求以最少数量的能源消耗,获得最大的经济效益,为社会创造更多可供消费的财富,从而达到发展生产,改善生活的目的。节约能源的经济概念是:生产出同样数量的产品或产值,要用尽可能少的能源消费量,或者说,以同样数量的能源,生产出更多更好的产品或产值。

1.2 铁合金冶金节能

1. 概述

一种或一种以上的金属或非金属与铁组成的合金称为铁合金。例如,硅铁是硅与铁的合

金，锰铁是锰与铁的合金。

铁合金不仅是钢铁工业的重要原料之一，还被广泛地应用于铸造工业、有色冶金和化学工业中。

铁合金的品种和产量，反映一个国家钢铁工业的规模、钢的品种结构和钢铁材料性能发展等。一般说来，铁合金产量高、品种多的国家其钢铁工业也较发达。铁合金产量一般为钢产量的3%左右。

随着近代科学技术的发展，太空、原子能工业、机械、电子、石油、化工等工业对冶金工业不断提出新的要求，使铁合金工业在品种、质量、生产工艺和装备水平上都有较大发展，铁合金品种繁多，分类方法颇多，一般按下列方法分类：

(1) 按元素种类划分：有硅、锰、铬、钒、钛、钨等系列。

(2) 按含碳量划分：有高碳、中碳、微碳、超微碳等品种。

(3) 按生产方法划分：

① 高炉铁合金：如高炉碳素锰铁、低硅锰合金、低硅铁等。

② 电炉铁合金：分为粗炼电炉铁合金，包括碳素锰铁、碳素铬铁、各种牌号硅铁、硅锰合金、硅铬合金、硅钒合金、硅铝合金、磷铁等等；精炼电炉铁合金，包括中碳、低碳和微碳铬铁、低碳锰铁，精炼钒铁等。

③ 金属热法铁合金：如金属铬、钼铁、钛铁、硼铁、铌铁、锆铁、高钒铁等。

④ 真空固态还原法铁合金：超微碳真空铬铁、氮化铬铁、氮化锰铁等。

⑤ 转炉铁合金：转炉中碳铬铁、转炉低碳铬铁、转炉中碳锰铁等。

以上分类包括了绝大多数的一般铁合金品种，此外还有一些特殊铁合金，如氧化物压块、发热铁合金等等。从分类也可以看出，电炉铁合金，尤其是粗炼部分包括的品种最多，且生产数量最大，约占铁合金产量的70%以上，因而可以看做铁合金生产的主体。

目前铁合金品种按主要元素分类，已有20多个类别，其中硅、锰、铬三大类合金的产量占铁合金总产量的85%，其他还有铝、镍、钨、钼、钒、钛、锆、铌、钴、硼、磷、硒、碲、钙、锶、钡、镁等元素和铁以及其他元素组成的合金。有些产品，诸如金属锰、铬、硅以及某些氧化物（如氧化钼、钨酸钙）和碳化物（如碳化钒）也都算作铁合金产品。

随着炼钢技术的发展与钢品种的增加，铁合金的品种结构也相应改变，新品种不断增加：① 炼钢中更多地采用了连续铸钢，使锰硅合金耗用量增多。② 氩氧炼钢设备增多，使得低碳铬铁在铬铁消耗中的比例逐年下降，高碳铬铁比例上升。③ 由于钙有良好的脱氧和脱硫作用，以及它能改变钢中夹杂物的形态，使硅钒铁合金的用量增多。含钙和含钒的多元硅系合金的应用也日益广泛。④ 不锈钢和低合金钢的产量不断增长，对铬、镍、钒、铌、钼、钛和稀土等铁合金需求量以较快速度增长。⑤ 含有钒、镁、锶、稀土的硅系复合脱氧剂、孕育剂与铸铁球化剂以及作为合金元素添加用的氧化物、碳化物、氮化物等新的铁合金品种研制成功并投入市场。⑥ 为满足钢包合金化和喷射冶金的需要，近几年各种粒状、粉状铁合金以及多种成分的压块铁合金与发热铁合金投入工业生产。

随着铁合金工业生产规模的不断扩大,对各种矿石原料的用量逐年增加,各国对贫矿和粉矿进行了大量开发利用。对贫矿采用水法、火法进行精选,以提高矿石品位,去除各种杂质,对粉矿采用多种成块方法加以有效地利用,均收到良好效果。

利用封闭炉回收的煤气,经净化处理后引入回转窑或竖窑,预热或预还原各种入炉原料。利用矮烟罩或半封闭炉的高温废气进行原料的预热,降低原料中水分,富集矿石的有用成分,去除矿中杂质,还可带大量物理热入炉。预还原是将入炉前的矿石(或配入适量的还原剂)预先还原使其高价氧化物转变成低价,且生成部分碳化物,以减少冶炼时化学能的消耗。原料经预处理后各品种电耗对比情况如下:

高碳锰铁(采用块矿或粉矿烧结预处理):

封闭式电炉	冷料	约 2 500 kW · h/t
封闭式电炉	热料	约 2 000 kW · h/t

铬铁:

敞开式电炉	块状	约 4 200 kW · h/t
封闭式电炉	预热炉料	约 2 800 kW · h/t
封闭式电炉	预还原后炉料	约 2 200 kW · h/t

锰粉在带式烧结机上烧结成块,或烧结成球团,有的采用冷黏结球团或冷压球团。铬铁的熔点较高,使用烧结法有一定的困难,目前多采用球团法。日本和南非有些厂家使用预还原后的金属化热球团,大幅度降低了高碳铬铁冶炼电耗。使用铬矿冷压块料冶炼高碳铬铁和硅铬合金都很成功,这种方法简单易行,投资较少。

硅铁生产的原料制备,主要是选用优质碳素还原剂。对硅石和含铁材料的化学物理特性目前也予以重视。用压块料冶炼硅铁仍处于半工业性试验阶段,据说有节能效果,但尚未应用于工业生产。

为适应大容量电炉操作电压的提高和炉料电阻相应降低的问题,应设法提高炉料比电阻;对中、小容量的电炉也采用提高炉料比电阻来提高熔池功率。为此,各国铁合金工作者继续重视还原剂的选择和其他提高炉料电阻的措施,在入炉粒度组成和多种还原剂搭配使用方面进行了试验研究。法国 BOZEL 公司,在硅钙合金生产中,采用的还原剂有近十种之多;苏联也大力推行添加半焦、硅石焦等多种还原剂的应用;我国试用了气煤焦及低灰分低铝低磷的大同兰炭等优质还原剂,在硅 75 的生产中,取得电耗降低到 8 000kW · h/t 以下的良好效果。

原料预处理的目的是对贫矿进行精选和扩大粉矿的应用外,主要在于改善炉料的透气性,控制入炉原料的粒度组成,减少成分波动,提高炉料比电阻,使炉况和生产工艺相应稳定,以便把成熟、固定的工艺参数编入程序,采用计算机控制整个冶炼过程,达到提高劳动生产率,改善操作条件和节约能源的目的。

以氧代电,以氧气和氩气等作气源进行转炉顶吹和复合吹炼,冶炼中低碳铬铁、中碳锰铁,我国已试验成功,并形成生产能力。日本创有水岛法、新泻法等不用电或少用电等新工艺冶炼中碳锰铁。我国还利用摇包进行硅铬合金的炉外脱碳和贫化中锰炉渣预精炼等,均取

得节能、增效的良好效果。经摇包精炼后中锰渣中的锰含量可由 15% 降低到 5% 以下, 使中锰的冶炼电耗降低 50%, 产量提高 50%~80%。采用炉外喷粉、吹气等技术对合金进行精炼, 可降低杂质含量, 提高合金纯度, 如硅铁的降铝和锰铁降硫、磷。

热装工艺: 在铁合金精炼产品的生产中, 采取将锰矿、石灰石预熔化成半熔体, 热装入炉炼制中碳锰铁; 将铬矿、石灰石在回转窑中进行 1 100~1 200℃ 的高温煅烧, 热装入炉精炼铬铁, 均取得电耗大幅度降低的良好效果。

等离子熔炼是一种很有发展前途的技术。由于等离子体温度很高, 能充分满足大多数铁合金冶炼过程中还原温度、金属与炉渣熔点高的要求, 且能使碳热还原过程中, 碳和氧化物迅速溶于炉渣中, 因而反应速度快, 炉子所需容积较一般矿热电炉要小得多。等离子炉可以直接使用粉状矿石和劣质粉煤, 不需任何预处理, 原料加料速度和炉子功率可直接任意控制, 以得到平稳的熔炼条件, 不存在电极消耗问题。由于上述优点, 近几年利用等离子炉冶炼铁合金已取得很大进展, 在较大的试验规模上已应用于炼制钼铁、钒铁、铬铁。此外, 还试验了处理锰铁炉渣以制取低碳锰铁。南非在 1.4 MV·A 的等离子炉上生产高碳铬铁, 铬回收率达到 98%。

继续开发新品种, 发展多元复合铁合金、压块复合铁合金、氧化物炼钢、发热铁合金、定量包装铁合金、芯线铁合金、合格粒度铁合金和各种合金粉剂。

铁合金矿热炉发展的总趋向是电炉大型化, 大量建造能够回收煤气或炉气余热的封闭、半封闭电炉, 利用计算机控制冶炼过程以及所采用的电炉部件和辅助设备高效、耐用、无事故。

国内外新建用于生产硅铁、高碳锰铁、锰硅合金、高碳铬铁的电炉, 其容量普遍增大。20 世纪 60 年代投产的电炉, 变压器容量在 25~40 MV·A, 有的达到 60 MV·A。20 世纪 70 年代投产的大炉子一般在 40~75 MV·A, 目前世界上最大的硅铁电炉和高碳铬铁电炉容量为 105 MV·A, 最大的高碳锰铁电炉为 81 MV·A, 锰硅电炉为 88 MV·A。大炉子具有热效率高、产品质量稳定、劳动生产率高和单位产品投资低的优点, 因而产品成本比小炉子低。但铁合金电炉容量没有进一步增大的趋势。因为炉子越大, 功率因数越低, 并且自焙电极直径太大, 难以维护, 给高效率正常运行带来困难。我国已建成几台 25 MV·A 的铁合金电炉, 正在建造变压器容量为 40 MV·A 的大型电炉。国外的一些大型硅铁电炉如表 1-1 所示。

表 1-1 国外大型硅铁电炉

国别	生产厂家	电炉容量 MV·A	电炉类型	产品种类	投产日期
美国	联合碳化公司	75	敞口炉	75% FeSi	1975 年
	阿什塔不拉厂	60	半封闭炉, 两台炉共用一台计算机	45% FeSi	1969 年
	埃洛依厂	55	矩形六电极电炉, 结晶硅用计算机闭环控制		1975 年
	俄亥俄铁合金公司 菲洛厂	60	敞口旋转炉	50% FeSi	

续 表

国别	生产厂家	电炉容量 MV·A	电炉类型	产品种类	投产日期
挪威	埃肯公司 布雷曼杰厂	51	敞口旋转炉, 计算机控制	75%FeSi	1971 年
	埃肯公司 沙顿厂	52.6	计算机闭环控制	75%FeSi	1973 年
日本	矢作钢铁厂	60 45	敞口旋转炉, 计算机 控制配料封闭炉	50%FeSi 50%FeSi	1971 年 1968 年
	揖斐川电气 工业公司	45	敞口旋转炉	75%FeSi	1970 年
瑞典	艾尔科公司	75	半封闭旋转炉, 余热锅炉, 计算机控制配料系统	75%FeSi	1972 年
法国	乙炔与电冶金公司	96	半封闭旋转炉, 计算机闭环控制	75%FeSi	1978 年
西班牙	蒙仲厂	75	半封闭旋转炉, 余热利用, 计算机控制配料、加料系统	75%FeSi	1977 年
南非	黑色金属公司	48	固定、敞口炉	75%FeSi	1972 年
冰岛	格伦达垣基础铁厂	48	半封闭旋转炉	75%FeSi	1980 年
苏联	耶尔马科夫 铁合金厂	63	封闭旋转炉, 计算机 控制冶炼	45%FeSi	1976 年
		(81)		60%FeSi	1978 年
		33		45%FeSi	1978 年
西德	德马克公司	57	半封闭旋转炉, 计算机控制 配料、加料系统	75%FeSi	

国外大型电炉一般采用全封闭形式, 以进行煤气的回收利用。采用封闭电炉的另一原因是解决炉气净化, 减少环境污染。因为一般敞口电炉的炉气量比封闭炉大数十倍, 所用净化设备及抽气设备庞大得多, 动力消耗也大得多, 所以将电炉的敞口操作改为封闭系统操作可

节能。一台 $8\text{ MV} \cdot \text{A}$ 锰硅电炉封闭后煤气回收量可达 $1\,600 \sim 2\,500\text{ N} \cdot \text{m}^3/\text{h}$ 。

对难以进行全封闭的高硅质金合电炉，一般采用半封闭或矮烟罩形式，并进行炉气余热的回收利用。这种结构的电炉具有以下优点：减少净化炉气量（达 $3\text{ N} \cdot \text{m}^3/\text{h}$ ）；可以使用粗料生产，电炉生产率高，单位电耗下降；由于炉口温度高，使捣炉容易进行；由于采用矮烟罩等半封闭式，使电炉周围的环境得到改善。

熔炼硅的半封闭炉的单位炉气量为 $3\text{ N} \cdot \text{m}^3/\text{kW} \cdot \text{h}$ ，温度为 $700 \sim 900\text{ }^\circ\text{C}$ ，可以采用蒸汽、热水、电能或几种相混合的形式回收利用其显热。

硅铁冶炼的热平衡表明，从炉内排出的炉气量几乎等于输入电炉的电量。如果利用炉气的热量生产蒸汽，则其回收利用的效率可高达 80% 。

由于自动控制水平的不断提高，电炉容量日益增大，新建的大型铁合金电炉大都应用计算机控制技术。电子计算机主要应用于电炉的热力控制和工艺控制，即重点控制电气参数（电流、电压）、电极插入深度、电极压放和碳平衡，以及辅助系统，包括配料与供料系统调整、气体净化和水汽、余热锅炉等系统的控制。

应用电子计算机控制，可使配料准确度由人工配料的 $\pm 5\%$ 提高到 $\pm 1\%$ ；单位电耗降低 $5\% \sim 12\%$ ；平均负荷增大 $6\% \sim 11\%$ ；电炉作业时间提高 2.5% ；生产率提高 10% 左右。由于电炉运行稳定，产品质量得以提高。苏联的尼柯波尔铁合金厂在 $63\text{ MV} \cdot \text{A}$ 锰硅封闭炉上应用电子计算机控制配料系统，用中子仪自动调整焦炭配比，收到很好的经济效益。

此外，空心电极的应用即粉料通过空心电极加入炉内可提高炉缸的电阻，增大电极的插入深度，从而提高功率因数，提高反应速度，电极消耗量可降低 50% ，减少断电极事故。空心电极技术目前已在我国大型电炉上采用，收到良好效果。

直流矿热炉由于阳极效应等原因，使直流炉内功率集中，热效率高，故比交流矿热炉有较高的生产效率、较低的电能和电极消耗，经济效果明显。近年来，这一技术的应用在国内外发展迅速，特别是在原有交流矿热炉的基础上进行改造很有进展，这主要是因为改造费用较低，改造工作可以利用大修资金与原有交流矿热炉大修同步，减少停炉时间。另一方面旧有交流矿热炉数量很大，这样开展矿热炉交流改直流的技术改造有巨大经济效益。

矿热炉大电流系统的电抗值占整个炉子回路的 $75\% \sim 80\%$ 。降低电源频率可使电流回路的电抗值下降，从而降低无功损耗，提高有功功率和功率因数。理论和实践表明，低频电源矿热炉综合了交（工频）直流炉的特点，使炉子燃弧稳定，能量集中，热效率高，电极焙烧好，生产效率高，产品质量改善。但在理论研究与实际应用方面尚存在一些急待解决的问题。

2. 铁合金冶金工艺理论要点

铁合金冶炼伴随着金属溶液的形成，根据 R. N. 弗列克尔提出的液体金属和合金的准结晶结构理论：原子液体中的排列有序程度比固体金属低，其原因是液体金属有空位，其数目在温度接近熔点时约为总数的 10% 。如果在室温下密集原子排列的晶格中的相邻数目等于 12，则在接近熔点的高温条件下其数目减少为 11，即出现一个原子空位。

实验确定,在液态金属熔池中存在不同原子间的化学作用。一些性能如黏度、密度、电导、表面张力和溶液组分的活度都是根据体系的状态图而变化的,金属溶液这些特征的等温线重复着固相结构和成分的特征。这表明在金属溶液中存在着离解度不大的原子群,这些准结晶群称做碎屑或群聚、复合体、群体等。它指的是这样的质点群:在其极限范围内保持着近序。与外部的相互作用相比,类似的构成具有更强的内部联系,因此可以认为熔体是由大量成分和性能不同的单个碎屑组成的,研究含硅铁熔液性能可以确定,熔体中存在着相应于化合物 FeSi , 共晶体 $\text{FeSi} + \text{Si} + \text{Fe}$ 和 $\text{FeSi} + \text{Si}$ 的区域,未发现质点在溶液中是杂乱无章排列的。当使用碳作还原剂时,锰、铬、铁和其他金属可能是金属熔体。氧化物也可以存在于溶液或化合物中。当金属由固态转变为液态时,质点的配位及其相互布置虽有变化却变化不大。金属由固态转变为液态质点间距离的变化不大于 2%,密度、体积、熵值的变化也不大。

矿热炉冶炼中,电极的插入深度与炉渣的形成条件和物化性能紧密相关,后者又取决于炉料入炉配置。矿热炉连续生产铁合金时,炉内经常充满配置好的炉料,随着其熔化、还原和排出产物,炉料不断下沉,又继续加入新批料。炉料中液相的温度决定于构成炉料矿物的熔点。如冶炼高碳锰铁时,炉料中锰矿熔点较低,故 MnO 与 SiO_2 的相互作用在距离炉子料面不太深(150~200 mm)的料柱面即已发生,形成渣熔体。当冶炼硅铁、高碳铬铁时,由于硅石、铬矿等的熔点较高,液相在料柱的较低水平面上出现,而在电极下端形成气腔,产生电弧(低温等离子)。H. J. 热尔杰夫曾确定气腔的大小,如在 $16.5 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 的矿热炉上冶炼 45%Si 的硅铁时,气腔体积为 $1.9 \sim 1.0 \text{ m}^3$;冶炼 75%Si 的硅铁时气腔体积为 $2.4 \sim 1.5 \text{ m}^3$;冶炼 90%Si 的硅铁时气腔体积为 $3.6 \sim 3.2 \text{ m}^3$ 。

为了确保矿热炉顺行,必须采用热炉底和冷料面工艺制度。为此必须控制电极深插和较高的炉料比电阻。而此情况下通过炉料的电流很小。

通过炉料的电流和经过电极下端气腔的电弧电流之比在很大程度上取决于电炉的几何尺寸和电参数。H. J. 热尔杰夫所进行的专门测量指出,功率为 $10.5 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 的敞口矿热炉冶炼 45% Si 的硅铁时,电弧电流为 40 kA,占总电流的 40%,通过炉料的电流占 60%。而功率为 16.5 MVA 的敞口矿热炉同样冶炼 45%Si 的硅铁,其电流值为 58.6 kA,占总电流的 70%,流经炉料的电流占 30%。当 $10.5 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 的敞口矿热炉冶炼 75% Si 的硅铁时,电弧电流达总电流的 70%,而炉料电流只占 30%。其原因是冶炼 75% Si 的硅铁比冶炼 45% Si 的硅铁炉料具有更大的比电阻。炉内电流分配还取决于炉渣的形成条件,出现液相的炉内温度越低则炉料比电阻越小,经过炉料的电流越大而电弧电流比例越小。

成渣条件将影响炉料熔化温度和熔化速度,以及氧化物还原温度和速度之间的比例,如果炉料的熔化温度大大低于氧化物的还原温度,则炉子底部直到中部将充满大量与碳还原剂混合的熔体,结果高温区上移,甚至料面出现液态熔体。致力于发展电弧功率,以促进电极下空腔的高温 and 炉内还原过程的顺行至关重要,特别是冶炼须在高温条件下还原的合金品种。为此必须严格控制所确定的炉料组成(成分和粒度),避免炉内固定碳含量上升。通常

在冶炼硅铝时炉料中的配碳量按理论计算为氧化物完全还原所需量的 95%~97%。在另外情况下,如冶炼高碳锰铁等在不太高温条件下还原的合金时,则采用所谓“无弧”操作制度,即基本上类似一种电阻炉熔炼,此时电极埋入熔渣中,在电极表面和熔渣接触处由于局部温度高而形成了气腔,显微电弧时隐时现。这种功率不大的电弧有利于改善矿热炉冶金指标。而发展电弧功率使炉温过高会增大锰的蒸发损失,此时控制熔渣低的比电阻是有益的。渣中钙、镁氧化物含量提高(即熔渣碱度提高)会使熔渣比电阻降低。

在铁合金生产中根据其物理化学性质采用了各种类型的碳质还原剂,按现行技术条件和标准评价还原剂还不能够全面地说明其质量,尚须根据铁合金的生产品种、方法,矿热炉的功率和结构,还原过程温度,还原剂灰分的化学组成及灰份的含量和成分,炉料电阻及其随温度的变化,相对于实际氧化物的化学活性,还原剂颗粒的比表面变化,依温度为转移的石墨化性能,等等,加以综合评定。还原剂的性质及其应用于实际生产的合理性究竟如何,取决于工业条件下的试验。碳质材料的石墨化能力是表明其化学活性的指标,是作为还原剂的极重要的性质,石墨是碳质材料经热处理得到的,石墨化会降低碳的化学活性,降低其比电阻和比表面,从而降低其还原氧化物的能力。比如采用容易石墨化的石油焦冶炼硅铁和硅铝合金,尽管由于石油焦灰分含量低有利于冶炼低铝硅铁和低铁的硅铝合金,但因其比电阻和化学活性低而影响了冶炼电耗和生产效率。

在矿热炉埋弧冶炼中最重要的炉料性质是比电阻。其他条件相同的情况下比电阻取决于碳质还原剂和其他炉料的粒度组成。混合炉料的比电阻经理论分析认为,两种组分的比表面不变,随着还原剂和主炉料(矿石)块度的减小,混合料的比电阻增大;如果碳质还原剂的粒度减小而主炉料块度不变且其份额减少,则混合料的比电阻降低。

过分减小炉料的粒度降低料柱的透气性,因而可能导致炉况恶化。实践中炉料粒度组成是通过研究各种粒度组成下炉子的实际运行结果加以调整的。

在矿热炉上埋弧冶炼铁合金,要求以尽可能大的炉料比电阻,减少炉料的导电电流分率,增加电弧电流分率,以获得集中于炉子下部的高温热源。比电阻的绝对值与还原剂中的灰分和挥发物的浓度有关,一般来说,碳质材料挥发物含量高,其比电阻亦大,比如,半焦的平均比电阻比冶金焦高 $10 \sim 10^4$ 倍。为此,采取不同种类还原剂搭配使用的办法,可在很大程度上改变炉料电阻和均衡由还原剂灰分带入铁合金某些元素的有益或有害作用。如前所述,石油焦比电阻值很低,会使铁合金生产率降低,电耗增加;但由于石油焦灰分含量低,适当使用它可降低硅铁中铝的含量。炼焦使用的煤料气煤配比较高($\geq 60\%$)时所得焦炭以及延长焦化时间所生产的焦炭具有较强的冶金反应能力和比电阻。冶炼硅铁时单独采用无烟煤或与木炭、焦炭混合作用效果良好。煤有很高的比电阻,在原煤中配入一定比例的硅石生产的硅石焦,其电阻值颇高。原煤中配入铁质炉渣或氧化铁皮生产的焦炭具有较高的机械强度。

1.3 铁合金产品标准

下述我国铁合金产品标准，包括已颁布的国家标准、黑色冶金行业标准和原冶金部部颁标准。对于暂无正式标准颁布的，按铁合金厂制订的企业标准或暂定技术条件列出。

一、国家产品标准

1. 硅铁 (GB 2272—87)

本标准适用于炼钢和铸造作脱氧剂或合金元素加入剂用的硅铁。

(1) 牌号和化学成分。硅铁按硅及其杂质含量，分为 16 个牌号，其化学成分应符合表 1-2 的规定。

表 1-2 硅铁牌号和化学成分

牌 号	化学成分 / (%)							
	Si	Al	Ca	Mn	Cr	P	S	C
	范围	≤						
FeSi90Al1.5	87.0~95.0	1.5	1.5	0.4	0.2	0.04	0.02	0.2
FeSi90Al3	87.0~95.0	3.0	1.5	0.4	0.2	0.04	0.02	0.2
FeSi75Al0.5-A	74.0~80.0	0.5	1.0	0.4	0.3	0.035	0.02	0.1
FeSi75Al0.5-B	72.0~80.0	0.5	1.0	0.5	0.5	0.04	0.02	0.2
FeSi75Al1.0-A	74.0~80.0	1.0	1.0	0.4	0.3	0.035	0.02	0.1
FeSi75Al0.5-B	72.0~80.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.04	0.02	0.2
FeSi75Al1.5-A	74.0~80.0	1.5	1.0	0.4	0.3	0.035	0.02	0.1
FeSi75Al1.5-B	72.0~80.0	1.5	1.0	0.5	0.5	0.04	0.02	0.2
FeSi75Al2.0-A	74.0~80.0	2.0	1.0	0.4	0.3	0.035	0.02	0.1
FeSi75Al2.0-B	74.0~80.0	2.0	1.0	0.4	0.3	0.04	0.02	0.1
FeSi75Al2.0-C	72.0~80.0	2.0		0.5	0.5	0.04	0.02	0.2
FeSi75-A	74.0~80.0			0.4	0.3	0.035	0.02	0.1
FeSi75-B	74.0~80.0			0.4	0.3	0.04	0.02	0.1
FeSi75-C	72.0~80.0			0.5	0.5	0.04	0.02	0.2
FeSi65	65.0~<72.0			0.6	0.5	0.04	0.02	
FeSi45	40.0~47.0			0.7	0.5	0.04	0.02	

需方如对化学成分有特殊要求,可由供需双方另行协商供货。

(2) 物理状态。硅铁浇铸厚度: FeSi75 系列各牌号硅铁锭不得超过 100 mm; FeSi65 锭不得超过 80 mm。硅的偏析不大于 4%。

硅铁供货粒度应执行表 1-3 的规定。

1-3 硅铁供货粒度

级 别	规格/mm	筛上物和筛下物之和/(%)
一般块状	未经人工破碎的自然块状	<20 mm×20 mm 的数量<8
大粒度	50~350	不大于 10
中粒度	20~200	不大于 10
小粒度	10~100	不大于 10
最小粒度	10~50	不大于 10

注: FeSi45 小于 20 mm×20 mm 的数量不得超过总重的 15%。

需方如对供货粒度有特殊要求,可与供方协商解决。

2. 硅钙合金 (YB/T 5051—97)

本标准适用于炼钢、合金冶炼作复合脱氧剂和铸铁生产中作孕育剂的硅钙合金。

(1) 牌号和化学成分。硅钙合金按钙、硅及杂质含量不同,分为 5 个牌号,其化学成分应符合表 1-4 的规定。

根据需方要求,经双方协议可生产对表中元素含量有特殊要求的产品。

表 1-4 硅钙合金牌号和化学成分

牌 号	化学成分/(%)					
	Ca	Si	C	Al	P	S
	≥		≤			
Ca31Si60	31	55~65	1.0	2.4	0.04	0.05
Ca28Si60	28	55~65	1.0	2.4	0.04	0.05
Ca24Si60	24	55~65	1.0	2.5	0.04	0.04
Ca20Si55	20	55~60	1.0	2.5	0.04	0.04
Ca16Si55	16	55~60	1.0	2.5	0.04	0.04

(2) 物理状态。硅钙合金应呈块状供货,最大块重不得超过 10 kg,小于 15 mm×15 mm 的碎块数量不得超过该批总重的 10%。

需方对供货粒度和粒度组成有特殊要求时,可与供方商定。

3. 工业硅技术条件 (GB 2881—91)

本标准适用于在矿热炉内用碳质还原剂与硅石熔炼所生产的工业硅。此种工业硅主要用