

周建男 周天时 编著

利用红土镍矿

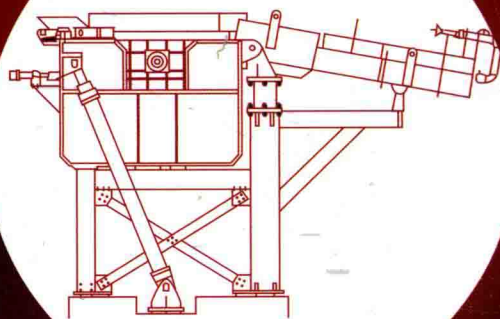
冶炼镍铁合金及不锈钢

LIYONG

HONGTU NIEKUANG

YELIAN NIETIE HEJIN

JI BUXIUGANG



化学工业出版社

周天时 周天 编著

利用红土镍矿 冶炼镍铁合金及不锈钢

LIYONG HONGTU NIEKUANG
YELIAN NIETIE HEJIN JI BUXIUGANG



化学工业出版社

· 北京 ·

本书结合镍铁合金及不锈钢的生产实践以及作者多年的现场实践经验，在介绍红土镍矿基本知识的基础上，全面介绍了红土镍矿矿床和矿物、镍铁合金及不锈钢冶炼的生产工艺、原辅材料、装备等知识，对不锈钢精炼等工艺细节进行了详细的介绍，特别是对东南亚红土镍矿矿床和矿物及用其冶炼镍铁和奥氏体不锈钢的原理和工艺进行了详细说明，同时结合企业的生产实际，列举了典型的工艺案例和生产线生产情况。可以给读者提供全面而实用的指导。

本书可供冶金领域技术人员，设计、研发人员以及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

利用红土镍矿冶炼镍铁合金及不锈钢/周建男，周天时编著. —北京：化学工业出版社，2015.12

ISBN 978-7-122-25365-1

I. ①利… II. ①周…②周… III. ①镍铁-铁合金熔炼-研究 IV. ①TF644

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 240315 号

责任编辑：刘丽宏

文字编辑：颜克俭

责任校对：吴静

装帧设计：刘丽华

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011）

印刷：北京永鑫印刷有限责任公司

装订：三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张28 $\frac{3}{4}$ 字数792千字 2016年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：148.00 元

版权所有 违者必究

镍的发现距今仅 200 多年。1863 年法国加尼埃首次在新喀里多尼亚发现含镍 7%~8% 的红土镍矿，即氧化镍矿，1875 年开始开采，矿石送往法国、德国冶炼，是世界上最早用鼓风炉炼镍的矿石。加尼埃将矿石加石膏和煤进行还原冶炼，还原后得到镍铕。在烧掉了硫之后，将得到的氧化镍在固态用碳还原。1886 年发现克里斯顿矿床，从而发现了世界闻名的萨德伯里超大型铜镍硫化物矿床，1901 年露采出矿。从此世界镍的冶炼用矿由氧化镍矿-红土镍矿转向硫化镍矿，使硫化镍矿冶炼技术得到了较快发展。

根据 Ashok D Dalvi 等学者 2004 年在加拿大勘探开发者协会年会 (PDAC) 上发布的资料，全球陆地已查明的镍储量为 22300 万吨，其中硫化镍矿为 6200 万吨 (平均品位 0.58%)，占 27.8%；红土镍矿 (氧化矿) 的储量占世界陆基镍资源总量的 72.2%，约为 16100 万吨 (平均品位 1.28%)。用红土镍矿生产的镍金属年产量占世界原生镍年产量在逐年增加，从 1970 年的 28% (72% 为硫化镍矿生产) 经 30 多年发展，目前大于 50%。随着硫化镍矿资源的日趋枯竭，红土矿将是未来镍的主要来源。又据英国 MEPS 报告：2014 年全球不锈钢粗钢产量 4100 万吨，同比上升 7.6%。2015 年将达到 4300 万吨，同比上升 4.9%。

随着全球不锈钢产量的逐渐提高，特别是奥氏体不锈钢产量的巨大提高，导致了对镍铁的巨大需求。反之，由于利用红土镍矿冶炼镍铁的工艺逐渐成熟及其廉价的成本，又推升了不锈钢的进一步发展。由于矿热炉的大型化及其与干燥、预还原工序的完美结合 (如 RKEF 工艺)，使得矿热炉 (热镍铁水)+转炉 (或电炉) 短流程工艺冶炼奥氏体不锈钢成为可能。早在 30 多年前，日本太平洋金属公司八户工厂开发了用液态 FeCr、FeNi 原料直接冶炼不锈钢方法。为了降低能耗，他们放弃用电炉或 LD 炉作初炼炉的做法，而直接用 FeCr、FeNi 铁水在 AOD 炉内进行吹炼，获得成功并用于正常生产中 (参见 8.4.17 一节)。

本书共分 8 章，内容包括：镍及冶炼技术概述、红土镍矿、高炉冶炼镍铁、鼓风炉熔炼镍铁及镍铕、矿热炉冶炼镍铁、回转窑 (直接还原法) 冶炼镍铁、镍铁合金精炼和不锈钢冶炼。在第 1 章里简述了镍的发现、发展、用途、镍矿资源及镍的火法和湿法冶炼技术，同时介绍了用红土镍矿火法冶炼高品位镍铁、铁、镍、“半钢”、钢及不锈钢的工艺技术；在第 2 章中介绍了红土镍矿矿床与矿物以及东南亚 4 个红土镍矿矿床，其中重点介绍了印尼北科纳威镍矿床的矿区地理及地质情况、矿床地质特征、矿物质量特征和矿床成因；第 3 章介绍了氧化还原的基本规律、镍铁还原反应以及烧结生产原理、工艺、装备和高炉生产原理、工艺、装备，同时列举了目前国内 6 个高炉冶炼镍铁指标情况及 2 个高炉镍铁冶炼工厂实例；第 4 章介绍了鼓风炉熔炼工艺原理，特别是还原硫化熔炼工艺原理，介绍了鼓风炉熔炼流程及设备，重点列举了 4 个熔炼镍铁及镍铕工厂；第 5 章介绍了铁合金冶炼原理 (如选择性还原原理等)、生产方法 (如高炉法、矿热炉法等)，介绍了硅、锰、铬系合金的生产、铁合金生产主要技术经济指标等以及矿热炉生产镍铁的冶炼原理、生产

工艺装备技术,其中对回转干燥筒、回转窑、矿热炉和镍铁粒化装置做了较详细的叙述,列举了9个镍铁生产工厂;第6章重点介绍了回转窑直接还原法炼铁之回转窑粒铁法的原理及工艺、回转窑粒铁法冶炼镍铁的4个工厂;第7章讲述了铁合金精炼、镍铁精炼原理、方法及装备,列举了9个镍铁精炼工艺实例;第8章较系统地介绍了不锈钢分类、钢号、性能、钢种的发展、不锈钢的腐蚀、奥氏体不锈钢、不锈钢冶炼原理、工艺装备、不锈钢连铸技术等。重点介绍了7个300系不锈钢生产工艺实例和5个节镍型奥氏体不锈钢生产工艺实例。

本书经锱铢积累,在山西河津、辽宁沈阳用时两年四个月写成。本书内容涉及了地质学的矿物与岩石、钢铁冶金、氧化铝冶金(炼铁、铁合金冶炼)及炼钢和有色冶金的硫化矿冶金。写作过程中,编者参考和引用了国内外红土镍矿山、镍铁冶炼厂、不锈钢厂调研资料及有关书籍和论文,谨向有关作者致以深深的谢意。编者对建设中宝滨海镍业镍铁项目并对本书编著给予帮助和鼓励的中国中钢集团股份有限公司副总经理宫敬升,中钢滨海实业有限公司副总经理康忠,中宝滨海镍业有限公司副总工程师樊魁博士、总经理助理丰志辉,吉林铁合金有限公司总经理刘维国,广西铁合金有限公司总经理黄海胜,中钢集团吉林机电设备有限公司总经理计鹏,中钢集团洛阳耐火有限公司总经理薄均,中国冶金规划院副院长刘晓氏,中国瑞林工程技术有限公司(南昌有色冶金设计研究院)副总经理徐赤农、刘雪珂,副总工程师唐尊球及总设计师叶逢春、黄永青、杨小伟,中国恩菲工程技术有限公司教授卢笠渔、李曰荣,东北大学教授薛向欣,赫氏工程咨询(上海)有限公司戴刘韵、邓华、黄卫华先生及庄燕女士,云南省有色地质局三〇八队三代队长罗玉福(副局长)、谭木昌及王凯,罕王实业有限公司董事局主席杨敏,山西达康科工贸集团有限公司总裁王小峰一并表示感谢。

编者还要感谢乌克兰国家冶金学院院长 виличкр、萨道夫·尼克教授(中宝滨海镍业有限公司特聘技术顾问),乌克兰钛科设计研究院副院长 АЛександров,乌克兰帕布什镍厂厂长 Nikita Novikov、工程师策利克(中宝镍业特聘矿热炉冶炼专家)。

限于编者水平及冶金工艺装备技术的快速发展,书中难免有不足之处,殷切希望读者批评指导。

周建男 周天时

2015年2月23日于抚顺

第 1 章 镍及冶炼技术概述**1**

- 1.1 镍的发现、性质及主要用途 4
 - 1.1.1 镍的发现和镍业发展 4
 - 1.1.2 镍的性质 6
 - 1.1.3 镍的用途 6
- 1.2 红土镍矿资源 7
 - 1.2.1 世界红土镍矿资源 7
 - 1.2.2 中国红土镍矿资源 9
- 1.3 镍的冶炼技术 9
 - 1.3.1 火法冶炼 11
 - 1.3.2 湿法冶炼 20
 - 1.3.3 红土镍矿的其他处理工艺 25
 - 1.3.4 气化冶金-羰基法炼镍 26
- 1.4 用红土镍矿火法冶炼高品位镍铁、铁、镍、“半钢”、钢及不锈钢 26
 - 1.4.1 高品位镍铁、金属镍、铁、钢的生产 26
 - 1.4.2 “半钢”的冶炼 28
 - 1.4.3 奥氏体不锈钢冶炼 28

第 2 章 红土镍矿**30**

- 2.1 红土镍矿矿床及矿物 30
 - 2.1.1 红土镍矿矿床 32
 - 2.1.2 红土镍矿矿物 36
- 2.2 东南亚红土镍矿矿床简介 45
 - 2.2.1 印尼北科纳威镍矿床 45
 - 2.2.2 印尼摩洛湾利县镍矿床 51
 - 2.2.3 菲律宾迪纳加特群岛瓦伦西亚镍矿床 52
 - 2.2.4 缅甸达贡山镍矿 53

第 3 章 高炉冶炼镍铁**56**

- 3.1 氧化还原的基本规律 56
 - 3.1.1 氧化转化温度 56
 - 3.1.2 分解压与氧位 57
 - 3.1.3 直接还原反应与间接还原反应 59
 - 3.1.4 直接氧化反应与间接氧化反应 60
 - 3.1.5 化学反应等温方程 60
 - 3.1.6 活度及活度相互作用系数 62

3.2 镍铁还原反应	63
3.2.1 镍、铁还原	63
3.2.2 其他元素的还原	66
3.2.3 红土镍矿还原反应动力学	68
3.3 烧结	69
3.3.1 烧结生产工艺及设备	69
3.3.2 烧结矿质量	71
3.3.3 烧结反应过程	72
3.4 高炉冶炼过程及特点	78
3.4.1 高炉内各区域反应状况	78
3.4.2 燃烧反应	80
3.4.3 炉缸煤气成分	82
3.4.4 燃烧带与回旋区	83
3.4.5 炉渣的作用及造渣过程	85
3.4.6 高炉脱硫	91
3.4.7 炉料与煤气运动	94
3.4.8 高炉内能量利用	97
3.4.9 镍铁形成	101
3.4.10 铁水预处理	101
3.5 高炉设备及生产工艺	107
3.5.1 高炉主体设备	107
3.5.2 辅助设备	112
3.5.3 高炉生产工艺	115
3.5.4 生产主要技术经济指标	117
3.5.5 小高炉冶炼镍铁的优势	123
3.6 高炉镍铁冶炼工厂举例	125
3.6.1 高炉冶炼低镍镍铁工厂	125
3.6.2 高炉冶炼中镍镍铁工厂	126

第4章 鼓风炉熔炼镍铁及镍硫

129

4.1 鼓风炉熔炼工艺原理	130
4.1.1 还原硫化熔炼工艺	130
4.1.2 还原硫化熔炼分解反应	131
4.1.3 还原硫化熔炼还原反应	132
4.1.4 还原硫化熔炼硫化反应	132
4.1.5 造钼熔炼造渣	134
4.2 鼓风炉熔炼及设备	135
4.2.1 鼓风炉熔炼流程	135
4.2.2 鼓风炉的工艺技术操作	136
4.2.3 鼓风炉分类及结构	138
4.3 鼓风炉熔炼镍铁及镍硫工厂举例	139
4.3.1 新喀里多尼亚多尼安博冶炼厂	139
4.3.2 俄罗斯列什厂	141
4.3.3 日本住友公司四阪岛别子冶炼厂	142

4.3.4 中国营口某炉料有限公司	144
-------------------------	-----

第5章 矿热炉冶炼镍铁 145

5.1 铁合金冶炼	146
5.1.1 铁合金冶炼原理	146
5.1.2 铁合金生产方法	151
5.1.3 硅、锰、铬系合金的生产	153
5.1.4 铁合金生产主要技术经济指标	162
5.2 矿热炉生产镍铁	163
5.2.1 冶炼原理	165
5.2.2 镍铁生产工艺	180
5.2.3 矿热炉镍铁生产工艺介绍	184
5.3 生产装备技术	184
5.3.1 回转干燥筒	184
5.3.2 回转窑	188
5.3.3 矿热炉	200
5.3.4 镍铁粒化装置	221
5.4 工厂举例	236
5.4.1 塞罗马托莎冶炼厂	237
5.4.2 多尼安博冶炼厂	238
5.4.3 日向冶炼厂	240
5.4.4 拉里姆纳冶炼厂	243
5.4.5 帕布什镍厂	245
5.4.6 Falcondo 镍铁厂	250
5.4.7 滨海某镍业有限公司	251
5.4.8 福建某镍业有限公司	257
5.4.9 中色镍业有限公司	259

第6章 回转窑(直接还原法)冶炼镍铁 262

6.1 直接还原法炼铁	262
6.1.1 直接还原铁发展概况及用途	262
6.1.2 直接还原铁的生产工艺技术	263
6.2 回转窑直接还原法炼铁	267
6.2.1 回转窑直接还原法发展	268
6.2.2 回转窑直接还原工作原理	269
6.2.3 回转窑直接还原工艺	271
6.3 回转窑粒铁法	275
6.3.1 回转窑粒铁法的原理	276
6.3.2 回转窑粒铁法的工艺	277
6.4 回转窑粒铁法冶炼镍铁	284
6.4.1 日本大江山冶炼厂镍铁冶炼工艺	286
6.4.2 北海某公司镍铁冶炼工艺	291
6.4.3 辽宁某公司镍铁冶炼工艺	293
6.4.4 南通某公司镍铁冶炼工艺	296

7.1 铁合金精炼	299
7.1.1 硅铁精炼	299
7.1.2 锰铁精炼	300
7.1.3 铬铁精炼	300
7.2 镍铁精炼	300
7.2.1 精炼原理及方法	300
7.2.2 精炼工艺实例	300
7.3 镍铁精炼设备	308
7.3.1 氧气转炉	308
7.3.2 GOR 炉	312
7.3.3 ASEA-SKF 钢桶炉	314

8.1 不锈钢的力学性能和物理性能	315
8.1.1 不锈钢的力学性能	315
8.1.2 不锈钢的物理性能	318
8.2 不锈钢的腐蚀	318
8.2.1 均匀腐蚀	319
8.2.2 局部腐蚀	319
8.3 奥氏体不锈钢	321
8.3.1 奥氏体不锈钢中的相	321
8.3.2 合金元素对奥氏体不锈钢组织和性能的影响	323
8.3.3 奥氏体不锈钢的性能特点	326
8.4 不锈钢冶炼原理	332
8.4.1 不锈钢氧化熔炼的热力学	332
8.4.2 脱碳反应	335
8.4.3 硅的氧化和还原	338
8.4.4 锰的氧化和还原	339
8.4.5 铬的氧化和还原	339
8.4.6 脱磷反应	340
8.4.7 脱硫反应	342
8.4.8 脱氧反应	345
8.4.9 选择性氧化	348
8.4.10 真空和惰性气体搅拌	352
8.4.11 钢中的气体	354
8.4.12 钢中非金属夹杂物	355
8.4.13 不锈钢冶炼工艺及设备配置	357
8.4.14 电弧炉冶炼不锈钢	362
8.4.15 AOD 炉冶炼不锈钢	371
8.4.16 VOD 炉冶炼不锈钢	379
8.4.17 利用镍铁作母料的奥氏体不锈钢冶炼工艺	381
8.5 不锈钢连铸技术	384

8.5.1	连铸工艺技术	384
8.5.2	连铸设备	389
8.5.3	不锈钢宽板坯连铸工艺装备技术举例	397
8.5.4	不锈钢板坯连铸机采用的新技术	409
8.6	不锈钢生产厂冶炼工艺举例	412
8.6.1	300系不锈钢工艺实例	413
8.6.2	节镍型奥氏体不锈钢工艺实例	417
8.6.3	几点说明	421

附录一	铁合金分类及牌号	423
------------	-----------------	------------

附录二	不锈钢分类、钢号、性能及钢种的发展	431
------------	--------------------------	------------

参考文献	444
-------------	------------

第 1 章

镍及冶炼技术概述

红土镍矿（即氧化镍矿）床是由含镍的岩石在热带或亚热带经长期风化浸淋蚀变富集而成。如以含镍橄榄石为主的橄榄岩，在含有 CO_2 酸性地面水的长期作用下，橄榄岩被分解，镁、铁及镍进入溶液；硅则趋向于形成胶状悬浮液向下渗透；铁逐渐氧化并很快呈氢氧化铁沉淀，最终失去水而形成针铁矿和赤铁矿，少量镍、钴也一起沉淀。铁的氧化物沉淀在地表，而镁、镍及硅则留在溶液中进入地表层下，与岩石或土壤作用被中和之后呈含水硅酸盐沉淀下来。由于镍比镁优先沉淀，故在沉淀的矿石中的镍镁比高于溶液中的镍镁比，因此镍得以富集。由于溶入及沉淀多次发生，故一般红土镍矿中含镍可由原矿的 0.5% 富集至 1.5%~4%。这个富集过程可能经历了几千年到几百万年。

由于矿床风化后铁的氧化，矿石呈红色，所以称为红土镍矿。矿床上部铁多、镍较低、硅少、镁少、钴稍高；矿床的下部，由于风化富集，硅多、镁多、铁低、镍较高、钴较低。

基于风化淋滤作用的结果，根据红土风化壳的矿化剖面结构和主要载镍矿物学特征，可将红土镍矿床分为 3 种类型：硅酸盐型、黏土型和氧化物型。

由于钢铁工业快速发展，特别是奥氏体不锈钢产量的巨大提高，导致对镍和铁的大量需求，且不需要将镍和铁作进一步的分离，这样使得镍铁的大量生产成为可能。利用红土镍矿冶炼镍铁也正适应了这个要求。据有关报告，目前世界上镍储量的 72% 为红土镍矿，原生镍年产量 50% 以上源自红土镍矿。

利用红土镍矿冶炼镍铁，进而利用镍铁冶炼不锈钢、含镍合金钢、含镍合金铸铁及镍基高温合金等，尤其以热镍铁水为主要炉料进而冶炼不锈钢、含镍合金钢是未来含镍、铁元素金属材料冶金的重要方向。

当今世界，钢铁生产的工艺流程经过长期的发展和选择，只剩下两种主要的流程，即以氧气转炉炼钢工艺为中心的钢铁联合企业生产流程和以电炉炼钢工艺为中心的小钢厂生产流程。通常习惯上人们把前者叫做长流程（图 1-1），把后者叫做短流程（图 1-2）。

长流程工艺就是：从矿石原料开始，主要有三种：铁矿、煤、石灰石，铁矿经采矿、选矿、烧结或球团。煤经过洗煤、配煤、焦化得到焦炭。石灰石入高炉做造渣溶剂。以上三种主要原料入高炉冶炼得到液态铁水。高炉铁水经过铁水预处理（或不经过）入氧气转炉吹炼、再经二次精炼（或不经过）获得合格钢水，钢水经过凝固成型工序（连铸或模铸）成坯或锭，再经轧制工序最后成为合格钢材。由于这种工艺流程生产单元多，规模庞大，生产周期长，因此称此工艺流程为钢铁生产的长流程工艺。

短流程工艺就是：将回收再利用的废钢（或其他代用料），经破碎、分选加工后，经预热

直接加入电炉中，电炉利用电能作热源来进行冶炼，再经二次炉外精炼，获得合格钢水，后继工序同长流程工序。由于这种工艺流程简捷、生产环节少、生产周期短，因此称此工艺流程为钢铁生产的短流程工艺。

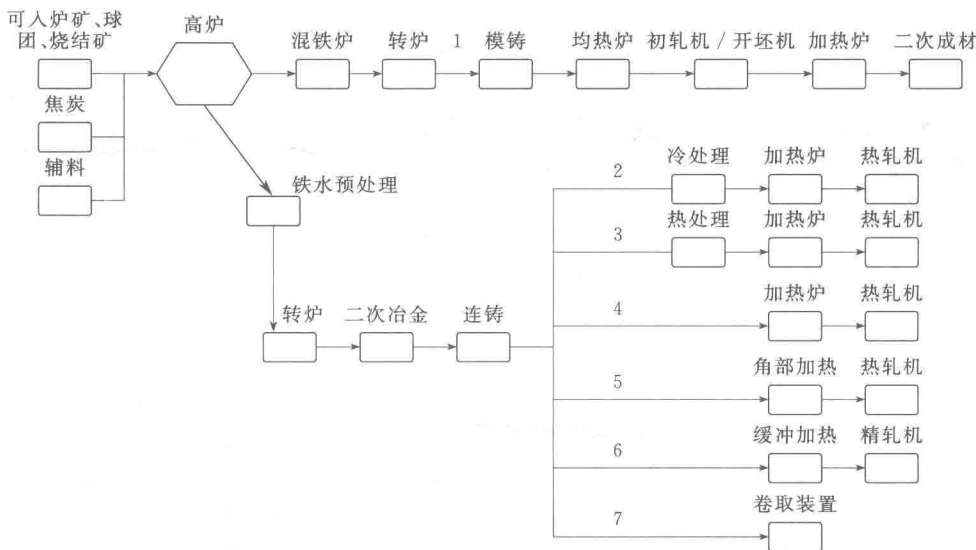


图 1-1 高炉-转炉-轧钢流程(长流程)

- 1—模铸钢锭冷装轧制；2—连铸坯冷装炉轧制；3，5—连铸坯热送轧制；
4—无缺陷连铸坯直接热装炉轧制；6—薄板坯连铸连轧；7—薄带连铸



图 1-2 钢铁生产短流程工艺

传统意义上的转炉炼钢是利用高炉铁水为原料，因高炉炼铁周期很长，故将高炉-转炉流程称为长流程；传统意义上的电炉炼钢是利用废钢铁等固体钢铁料为原料而非高炉铁水，故将废钢铁-电炉流程称为短流程。然而，随着钢铁冶金技术的迅猛发展和降低生产成本的要求，特别是电炉冶炼周期与连铸周期匹配的刚性要求，向电炉中加高炉铁水（比如 30%~70%）；向转炉中加熔融还原铁水、矿热炉含镍、铬、锰等铁合金熔液的工艺，改变了传统意义上的长、短流程的定义。

实质上，长、短流程的根本区别是看是否利用高炉铁水炼钢：是，就是长流程；否则就是短流程。利用高炉镍铁作为主炉料冶炼不锈钢工艺是长流程工艺，利用矿热炉镍铁作为主炉料冶炼不锈钢工艺是短流程工艺。

利用红土镍矿冶炼镍铁合金有四种主要方法，即高炉法、鼓风炉法、矿热炉法和回转窑直接还原法。镍铁主要用于不锈钢冶炼，通常被做成铸铁块或粒化铁冷态加入炼钢炉中，作为铁合金添加剂使用。矿热炉、高炉生产的镍铁产品，或将热镍铁水作为主炉料兑入转炉或 AOD 炉直接冶炼不锈钢。

2005 年以来，中国红土镍矿冶炼发展迅猛，在冶炼技术上不断进展，规模不断扩大，镍铁和奥氏体不锈钢产量互为推动、互为前提。2012~2014 年全球、中国镍矿产量、镍产量、镍铁产量及不

锈钢产量见表 1-1。2013 年中国不锈钢产量 1927 万吨，占世界产量的 50%。2013 年全球产镍 194.3 万吨，中国 70.1 万吨，其中镍铁镍贡献量 48 万吨，超过 10 年前 2003 年的世界镍铁产量 28.2 万吨（表 1-2）。2014 年全球产镍预计 194.4 万吨，中国 68 万吨，其中镍铁镍贡献量 45 万吨。

表 1-1 2012~2014 年全球、中国镍矿产量、镍产量、镍铁产量及不锈钢产量

单位：万吨

项 目	2012 年	2013 年	2014 年
1 中国镍矿产量	9.33	9.13	9.5
2 中国原生镍	56	70.1	68
3 其中：镍铁产量	36	48	45
4 中国不锈钢粗钢产量	1637	1927	2150
5 全球镍矿产量	238.2	263.1	205.8
6 全球原生镍产量	175	194.3	194.4
7 全球不锈钢产量	3553.6	3888.4	4233.7
8 中国红土镍矿进口量(实物量)	6500	7067	5300

注：第 1~4 行数据来源于有色协会和安泰科；第 5、第 6 行数据来源于国际镍研究组（INSG）；第 7 行数据来源于麦格理 Macquarie。

表 1-2 1998~2005 年世界镍铁产量（含镍量）

单位：万吨/a

年份/年	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
镍铁	21.8	20.7	21.7	23.2	26.5	28.2	28.2	29.3

2005~2008 年中国镍铁产量（含镍量）见表 1-3。

表 1-3 2005~2008 年中国镍铁产量（含镍量）

单位：万吨/a

年份/年	2005	2006	2007	2008
镍铁	0.2	3	8.5	6

2009~2014 年中国镍铁（含镍量）、不锈钢产量见表 1-4。

表 1-4 2009~2014 年中国镍铁（含镍量）、不锈钢产量

单位：万吨/a

年份/年	2009	2010	2011	2012	2013	2014
镍铁(含镍量)	10	16	25	36	48	45
不锈钢	900	1200	1460	1637	1927	2150

2004~2014 年中国不锈钢系列变化情况如图 1-3 所示，2014 年预计产量 2150 万吨，其中 300 系 53%、200 系 27%、400 系 20%。

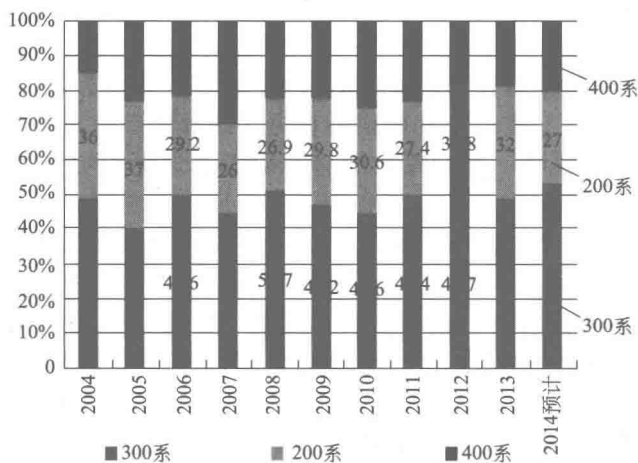


图 1-3 2004~2014 年中国不锈钢系列变化情况

1.1 镍的发现、性质及主要用途

1.1.1 镍的发现和镍业发展

镍作为金属发现之前,含镍合金就被应用了,使用镍的时间可追溯到公元前300年左右。古代埃及和古代中国都曾用含镍很高的陨铁作器物,我国公元前206年以前就已掌握了冶炼白铜(即铜镍锌合金,含Cu 52%~80%,Ni 5%~35%,Zn 10%~35%)的技术。公元前200年在西南亚古国巴克特利亚,就已经通用了一种铜镍合金制成的硬币(含约77%铜、约20%镍、1%钴、1.5%铁)。德国于1825年、美国于1857年、比利时于1860年也制成了铜镍硬币。

镍作为合金虽然早已为人们所利用,但是镍的发现距今仅200多年。1751年,瑞典矿物学家A. F. 克朗斯塔特(A. F. Cronstedt)首先制得了不纯的金属镍,他把这种新发现的元素叫做镍,但25年后这个发现才被证实,直到1804年里希特发展出了一种可提取出纯金属镍的方法。镍的工业发展很慢。1840~1845年间,全世界每年仅生产镍约100t。1863年法国加尼埃首次在新喀里多尼亚发现含镍7%~8%的氧化镍矿(硅镁镍矿),用加尼埃的名字命名。1875年开始开采,由于当地燃料、熔剂缺乏,劳力不足,矿石送往法国、德国冶炼,是世界上最早用鼓风炉炼镍的矿石。加尼埃将矿石加石膏和煤进行还原冶炼,还原后得到镍铈,从而使原矿中的少量镍得到了富集。在烧掉了硫之后,将得到的氧化镍在固态用碳还原。1856年A. P. 萨尔得在加拿大定子午线时发现在萨德伯里地区罗盘读数偏斜,随后,据此在附近检查,从铁帽上(即克里斯顿矿体顶盘)采样分析发现含Ni 1%、Cu 2%的矿石,但因交通不便,未引起注意,至1883年才开展工作,于1886年发现克里斯顿矿床,从而发现了世界闻名的萨德伯里超大型铜镍硫化物矿床,1901年露采出矿。从此世界镍的冶炼原料由氧化镍转向硫化镍。

在19世纪70~80年代,由于帕克斯、马博和赖利伊在用镍作为钢的添加剂的研究方面获得了成果,弗莱特曼在锻造镍方面取得了进步,镀镍工艺在亚当工作的基础上得到了发展,使得镍的需求量急剧增长。1885年法国和英国制造了第一批含镍装甲板,1889年美国海军规定用镍钢制作装甲板,直到1920年之前镍几乎仅仅用于军事目的。

1890年左右,英国发展了郎格尔-蒙德的羰基法制镍工艺。19世纪末20世纪初,电解含镍溶液的方法出现了,发展出了许宾尼特隔膜电解槽法。

20世纪50年代出现用硅铁部分还原氧化矿生产镍铁的方法。

20世纪50年代初期,镍铁冶炼得到了广泛的普及。新喀里多尼亚矿优质的化学和矿物成分、工艺的简易促进了镍铁冶炼在法国多尼安博工厂和日本的远东工厂、希腊、巴西以及其他国家工厂的快速开发和运用。富含镍的原矿石促进了国外镍铁生产的快速发展。依次经过脱硅、脱铬、脱碳、脱硫和脱磷,富含镍铁的这类矿石通过电炉冶炼,确保得到镍含量高于20%的成品。

苏联十月革命后,因寻找勘探乌拉尔山脉镍矿的需要,乌法列集团应运而生,在其基础上于1933年成立了第一家国有镍厂。在乌拉尔中南部及乌克兰进行的镍矿寻找与勘探工作为列什镍厂(1936年)、“南乌拉尔镍”(1938年)以及帕布什镍厂(1972年)的建设与运行创造了条件。这些企业的成功生产以及矿产的足够储备让人们有理由认为,红土镍矿在未来将以更大的强度进入材料生产的范畴。20世纪80年代红土镍矿冶炼成镍铁的工业加工,不仅在俄罗斯进行,而且在新喀里多尼亚、日本、希腊、巴西、多米尼加共和国、美国进行。

我国古代已大量生产并使用了“白铜”——锌镍铜合金,但新中国成立前没有镍冶炼工业。

我国镍工业起步于 1953 年。在金川镍矿被发现之前, 中国一直被外国认为是“贫镍国”, 一些国家也趁机对我国实行镍封锁, 以此制约我国现代工业的发展。1953 年, 上海冶炼厂成功地用直火蒸发法从铜电解废液中制得粗硫酸镍, 接着又进行了从粗硫酸镍中提取金属镍的试验, 1954 年生产出电解镍 75kg, 试验取得了成功。我国镍工业始于 1957 年, 四川省会理的力马河镍矿的开采 (尽管生产规模较小), 填补了我国镍工业的空白, 在当时缓和了我国“镍荒”。1958 年, 甘肃省地质局发现金川 (即白家嘴子) 镍矿。金川镍矿、磐石镍矿于 1963 年、1964 年相继投产, 这在很大程度中解决了我国对镍的需要。到了 20 世纪 90 年代, 由于新疆喀拉通克镍矿、云南金平镍矿及吉林赤柏松镍矿的开发和投产, 更使我国镍工业的发展上了一个新台阶。

我国镍铁生产始于 20 世纪 60 年代, 是从利用由阿尔巴尼亚进口积存、长期未用的红土镍矿 (化学成分见表 1-5) 开始的。经上海大学、吴江市东大铸造有限公司、原上钢一厂等单位共同努力, 在小型高炉实际冶炼出含镍铬生铁并在一些不锈钢厂应用, 效果良好。上海大学和原上钢一厂在 255m³ 高炉上用澳大利亚铬铁矿进行了冶炼含铬生铁工业性试验, 在此基础上又和吴江市东大铸造有限公司合作, 在其 158m³ 高炉上进行工业化生产。采用原料除阿尔巴尼亚红土镍矿外, 还有不锈钢轧钢铁皮和提镍尾渣等, 块矿直接入炉, 粉矿在 2 台 32m² 烧结机上制成烧结矿后入炉。

采用阿尔巴尼亚红土矿, 并配加 8%~10% 不锈钢轧钢铁皮冶炼时, 所得含镍、铬生铁成分如表 1-6。回收率为镍 98.24%、铬 94.31%, 焦比为 706kg/t 镍铁。

表 1-5 阿尔巴尼亚红土镍矿的化学成分

单位: %

种类	TFe	FeO	Ni	Cr	S	P	Mn	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	烧损
粉矿	50.4	1.03	0.96	2.12	0.022	0.027	0.14	6.48	2.46	1.33	3.68	7.36
块矿	52.5	1.03	0.78	2.35	0.023	0.023	0.13	5.05	2.65	0.89	3.04	7.39

表 1-6 东大铸造公司产含镍、铬生铁化学成分

项目	TFe	S	P	Mn	Si	Ni	Cr	C
成分/%	87.6	0.041	0.062	0.4	1.43	1.68	4.08	饱和

由于镍铁产品成本低, 而镍价格又不断飞涨, 因而利用红土镍矿冶炼镍铁的工艺迅速得到推广, 使得从印度尼西亚和菲律宾等地进口红土镍矿量不断增加。但是, 随着红土镍矿的推广使用, 矿石价格也逐渐上升。

2005 年以来我国利用红土镍矿冶炼镍铁产业发展迅猛。早期借用原有炼铁小高炉 ($\leq 300\text{m}^3$) 直接转产和转型的铁合金矿热炉 (6300~12500kW) 生产镍铁。高炉产能较大: 高炉系数为 1~2.5t/(m³·d), 但含镍品位较低: Ni 2%~8%, 焦比高: 650~1800kg/t。电炉镍铁品位较高: Ni 10%~15%, 但电耗高: 约 5000kW·h/t 镍铁。

目前我国镍铁生产厂家在 70 家以上。以山东、江苏、内蒙古、广西、福建居多。其中山西、江苏、河南、广西、福建、山东等地以高炉厂家为主, 同时电炉厂家虽少, 但规模较大。而内蒙古、宁夏地区基本上均是电炉镍铁。2010 年前, 我国镍铁生产是以转型的小矿热炉和小高炉为主要。优点是投资少、转产快、企业多、供量大, 但总的来说生产工艺落后、企业规模小、产品质量低、污染重、能耗高、不适应镍铁市场的激烈竞争, 正面临未来几年遭淘汰的险境。作为工艺先进、技术成熟、大型现代化的 RKEF 工艺镍铁厂目前已出现。

目前中国镍铁生产处于大型矿热炉起步和高炉生产技术趋于成熟阶段。

① 大型矿热炉起步阶段。a. 大型回转窑取代土烧、烧结机、小回转窑等旧有设备, 与大型矿热炉匹配。b. 25.5~36MW 大容量专用电炉取代铁合金小型矿热炉进入成熟期。c. 物料预处理、回转窑焙烧还原、热料输送、专用电炉和精炼等技术得到应用。d. RKEF 工艺实现,

如赫氏技术的鼎信、达贡山中色镍业，乌克兰技术的中宝镍业。e. 产品质量提高、能耗降低、污染减少。

② 高炉生产技术趋于成熟。a. 利用系数提高，焦比下降，硫、磷得到有效控制。b. 成本控制能力较强，获得不锈钢母液的成本较低。c. 450m^3 高炉镍铁水与 AOD 炉联合不锈钢冶炼工艺得到极大发展。

同时，我国镍铁冶炼管理、科技、生产操作队伍不断壮大；产、学、研，特别是黑色冶金（钢铁）工业的高炉炼铁技术、矿热炉熔炼铁合金技术及有色工业的炼镍和镍铁技术不断地融和，使得镍铁熔炼理论、实践得到了进一步深入发展。

未来镍铁生产的主流工艺应该是 RKEF 工艺。自 20 世纪 50 年代，人们开始采用 RKEF 方法使用红土镍矿冶炼镍铁。使用这种方法冶炼的产量在持续增长。依靠大功率矿热炉，目前单位产量所需要的成本已经大为降低，而且用更少的炉子就达到了预定产量。RKEF 工厂的趋势是：由一个大喂料量回转窑和一台大电炉组成一条线，再由若干这样的生产线组成多条生产线。目前，世界的基准是一条 RKEF 生产线由高能喂料回转窑和 80MW 电炉组成的系统，每年能处理大约 130 万吨红土镍矿。有人提出一条由每小时处理干矿 240t 的回转窑和 120MW 组成的 RKEF 生产线，每年能处理 200 万吨干矿，如果矿的品质是 2%，按收得率 90% 计，那么一条线每年生产 36000t 镍的镍铁。如果工厂建设一条复线，产能将达到 72000t。在运用“遮弧”（shielded-arc）冶炼代替传统的电极浸入式（Immersed Electrode）操作（见图 5-11）以及在电炉侧墙上安装水冷铜装置等措施基础上，上述设想是可以达到的。

1.1.2 镍的性质

镍是一种化学元素。化学符号 Ni，原子序数 28，相对原子质量 58.69，位于元素周期表第 4 周期第 VIII B 族中，是铁系元素组的最后一个元素，同时又与铜毗邻。由于其在元素周期表中的位置决定了镍及其化合物的一系列物理化学性质。一方面镍的许多物理性质与钴、铁相似；另一方面在亲氧和亲硫方面又接近于铜。

镍是银白色金属，熔点 $(1453 \pm 1)^\circ\text{C}$ ，沸点 2732°C ，密度 $8.90\text{g}/\text{cm}^3$ ，液体密度 $7.9\text{g}/\text{cm}^3$ 。有铁磁性和延展性，能导电和导热。

常温下，镍在潮湿空气中表面形成致密的氧化膜，不但能阻止继续被氧化，而且能耐碱、盐溶液的腐蚀。块状镍不会燃烧，细镍丝可燃，特制的细小多孔镍粒在空气中会自燃。加热时，镍与氧、硫、氯、溴发生剧烈反应。细粉末状的金属镍在加热时可吸收相当量的氢气。镍能缓慢地溶于稀盐酸、稀硫酸、稀硝酸，但在发烟硝酸中表面钝化。

镍的主要化合物有 4 类，即镍的氧化物、硫化物、砷化物和羰基镍。镍的氧化物有 3 种： NiO 、 Ni_3O_4 和 Ni_2O_3 ；镍的硫化物有 4 种： NiS_2 、 Ni_6S_5 、 Ni_3S_2 和 NiS ；镍的砷化物有 2 种： NiAs 和 Ni_3As_2 ；羰基镍：Ni 与 CO 生成的 $\text{Ni}(\text{CO})_4$ 。

1.1.3 镍的用途

由于镍具有良好的机械强度和延展性，难熔耐高温，并具有很高的化学稳定性，在空气中不氧化等特征，因此是一种十分重要的有色金属原料，被用来制造不锈钢、高镍合金和合金结构钢，广泛用于飞机、雷达、导弹、坦克、舰艇、宇宙飞船、原子反应堆等各种军工制造业。在民用工业中，镍常制成结构钢、耐酸钢、耐热钢等大量用于各种机械制造业。镍还可作陶瓷颜料和防腐镀层，镍钴合金是一种永磁材料，广泛用于电子遥控、原子能工业和超声工艺等领域，在化学工业中，镍常用作氢化催化剂。

近年来，在彩色电视机、磁带录音机和其他通信器材等方面镍的用量也正在迅速增加。总之，由于镍具有优良性能，已成为发展现代航空工业、国防工业和建立人类高水平物质文化生

活的重要战略元素。

1.2 红土镍矿资源

镍矿在地壳中的含量为 0.01%，已知含镍矿物约 50 余种。海底的锰结核中镍的储量很大，是镍的重要远景资源。镍矿床主要分为两大类：岩浆型硫化镍矿和风化型红土镍矿（氧化镍矿）。

硫化镍矿主要以镍黄铁矿 $[(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8]$ 、紫硫镍铁矿 $(\text{Ni}_2\text{FeS}_4)$ 、针镍矿 (NiS) 等游离硫化镍形态存在，有相当一部分镍以类质同象赋存于磁黄铁矿中。 Ni^{2+} 具强烈亲硫性。在岩浆结晶早期，在镍含量一定的前提下，镍在岩石中的富集程度取决于硫的逸度。当有足够的硫时，镍与硫及似硫物（砷、锑）形成含镍硫化物，在硅酸矿物结晶前分离出来，形成镍的硫（或砷）化物（如针镍矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、红砷镍矿、砷镍矿、镍华）。也即含镍的铁高、镁高、硅低的辉长岩类以岩浆形式并入地表，与紧密伴生的硫化物一起，冷凝形成硫化镍矿床。硫化镍矿床普遍含铜，常称含铜硫化镍矿床。除铜外，一般常伴生有铁、铬、钴、锰、铂族金属、金、银及硒和碲等元素。硫化镍矿床的矿石按硫化率，即呈硫化物状态的镍 (S_{Ni}) 与全镍 (T_{Ni}) 之比将矿石分为：原生矿石 $S_{\text{Ni}}/T_{\text{Ni}} > 70\%$ ；混合矿石 $S_{\text{Ni}}/T_{\text{Ni}}$ 为 $45\% \sim 70\%$ ；氧化矿石 $S_{\text{Ni}}/T_{\text{Ni}} < 45\%$ 。硫化镍矿石按镍含量可分为下列三个品级：特富矿石 $\text{Ni} \geq 3\%$ ；富矿石 $1\% \leq \text{Ni} < 3\%$ ；贫矿石 $0.3\% \leq \text{Ni} < 1\%$ 。富矿石及贫矿石需经选矿，特富矿石可直接入炉冶炼。

红土（型）镍矿（Nickel Laterites）是指热带或亚热带气候条件下，超基性岩遭受强烈化学风化作用，镍从含镍的硅酸盐矿物中分解出来，随地表水往下渗透，并在风化壳中新生成富含镍的次生矿物，使原来呈分散状态的镍得到富集，从而形成可供工业利用的风化壳型镍矿床。红土镍矿主要可分为两大类：硅酸盐类（最常用的存在形式是硅镁镍矿）和含镍褐铁矿。氧化镍矿石按氧化镁含量分为：铁质矿石 $\text{MgO} < 10\%$ ；铁镁质矿石 MgO 为 $10\% \sim 20\%$ ；镁质矿石 $\text{MgO} > 20\%$ 。

世界镍资源主要有来源于硫化物型矿和红土型矿。其中前者主要分布在加拿大、俄罗斯、澳大利亚、中国和南非等国；后者主要分布在赤道附近的古巴、新喀里多尼亚、印度尼西亚、菲律宾、巴西、哥伦比亚以及多米尼加等国。

1.2.1 世界红土镍矿资源

关于报道世界镍资源总量的文献较多，各文献统计数据差异较大。据美国地质调查局 (USGS) 的统计数据显示（表 1-7），2008 年世界镍储量为 7000 万吨，储量基础为 1.5 亿吨。

表 1-7 2004~2008 年世界镍储量和储量基础

单位：万吨金属量

国家或地区	镍储量					镍储量基础				
	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年
澳大利亚	2200	2200	2400	2400	2600	2700	2700	2700	2700	2900
博茨瓦纳	49	49	49	49	49	92	92	92	92	92
巴西	450	450	450	450	450	830	830	830	830	830
加拿大	480	490	490	490	490	1500	1500	1500	1500	1500
中国	110	110	110	110	110	760	760	760	760	760
哥伦比亚	83	83	83	83	140	110	110	110	110	270
古巴	560	560	560	560	560	2300	2300	2300	2300	2300
多米尼加	72	72	72	72	72	100	100	100	100	100
希腊	49	49	49	49	49	90	90	90	90	90