

低品位镍红土矿湿法冶金 提取基础理论及工艺研究

Fundamental and Technological Study on
Treatment of Low-grade Nickel Laterite by
Hydrometallurgical Processes

■ 李 栋 郭学益 著 ■



冶 金 工 业 出 版 社
Metallurgical Industry Press

低品位镍红土矿湿法冶金 提取基础理论及工艺研究

Fundamental and Technological Study on
Treatment of Low-grade Nickel Laterite by
Hydrometallurgical Processes

李 栋 郭学益 著



北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2015

内 容 提 要

本书介绍了镍的生产消费、资源特点及处理方法,并针对国内外典型镍红土矿的特点,详细论述了还原焙烧—氨浸、硫酸熟化焙烧—浸出和常压盐酸浸出等不同工艺处理镍红土矿的基本原理及最新研究成果。本书共6章,通过具体实例较为详细地阐述了热力学及动力学研究、工艺参数优化等方面的实验设计和数据处理方法。

本书可供从事有色冶金领域尤其是镍冶金领域的科研、工程技术人员阅读,也可供冶金专业的高等院校学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

低品位镍红土矿湿法冶金提取基础理论及工艺研究/李栋, 郭学益著. —北京:冶金工业出版社, 2015.7

ISBN 978-7-5024-7025-8

I. ①低… II. ①李… ②郭… III. ①红土型矿床—
镍矿床—湿法冶金 IV. ①TF815.32

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第168619号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 张熙莹 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 禹蕊 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7025-8

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2015年7月第1版,2015年7月第1次印刷

169mm×239mm;10印张;194千字;151页

36.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

随着镍硫化矿的深度开采和逐渐枯竭，镍红土矿已经成为全球镍资源开发的重点。镍红土矿主要分布在赤道附近和南北回归线之间的热带国家，包括澳大利亚、新喀里多尼亚、巴布亚新几内亚、菲律宾、印度尼西亚、古巴、巴西等。我国在云南、四川以及青海等地区也发现了可开采型镍红土矿，具有较高的开发和利用价值。

镍红土矿中主要有价金属为镍和钴，但由于其组分复杂，镍、钴相对含量不高，致使矿石选冶有一定难度。尤其是国内的镍红土矿，其品位一般低于国外同类型镍红土矿，开发利用难度较大。因此，针对镍红土矿资源的性质和特点，开展适应性镍钴冶金提取工艺研究具有重要的意义。

低品位褐铁矿型镍红土矿的处理适合采用湿法冶金工艺，其中技术最成熟的工艺是高压酸浸法。该工艺具有镍钴浸出率高、浸出液易处理等优点，但也存在工艺操作难度大、一次性设备投资高等问题。因此，科研工作者在完善高压酸浸工艺的同时也将目光转向了常压湿法工艺，这些工艺包括还原焙烧—氨浸、硫酸熟化焙烧—浸出、常压盐酸浸出、常压硫酸浸出、生物浸出等。

我们近年来在镍红土矿中有价金属提取方面开展了系列研究工作，主要是针对国内外不同地区的低品位镍红土矿开发适应性技术，以实现镍、钴等有价金属的高效选择性提取和铁、镁资源的综合回收。为了总结经验，促进交流，我们将近几年在镍红土矿处理方面的最新研究成果归纳整理成书。全书共分6章，简要介绍了镍的性质与用途、生产与消费及镍红土矿处理工艺，详细论述了还原焙烧—氨浸、硫酸

熟化焙烧—浸出和常压盐酸浸出等不同工艺处理镍红土矿的基础理论及实验研究结果。本书力求理论与工艺相结合，对镍红土矿处理的基本原理进行了系统介绍，同时重点突出了实验设计和工艺研究。本书适宜于从事有色冶金领域尤其是镍冶金领域的科研、工程技术人员阅读，也可作为大专院校相关专业师生的参考书。

田庆华、石文堂、吴展、公琪琪等参与了本书内容的研究工作，为本书的出版贡献了聪明才智。另外，感谢韩国地质资源研究院的朴庚镐教授在相关实验研究方面提供了技术指导，并在本书的撰写过程中提供了建设性意见。

由于作者水平所限，书中不足之处，敬请广大读者批评指正。

作 者
2015 年 5 月

目 录

1 概述	1
1.1 镍的性质及主要用途	1
1.1.1 镍的性质	1
1.1.2 镍的主要用途	2
1.2 镍的生产与消费	2
1.2.1 全球镍的生产与消费	2
1.2.2 中国镍的生产与消费	4
1.3 镍的资源状况	6
1.3.1 镍的发现及开发历史	6
1.3.2 镍的资源特点	6
1.3.3 镍红土矿资源及其开发现状	9
1.4 镍红土矿处理工艺概况	12
1.4.1 火法处理工艺	12
1.4.2 湿法处理工艺	15
1.4.3 生物浸出工艺	21
1.4.4 氯化离析工艺	21
1.4.5 微波浸出工艺	22
1.5 研究背景及主要研究内容	22
1.5.1 研究背景	22
1.5.2 主要研究内容	23
2 实验研究方法	25
2.1 矿石原料	25
2.1.1 矿石来源及矿床特点	25
2.1.2 化学组成分析	26
2.1.3 物相结构分析	26
2.1.4 元素赋存状态分析	28
2.1.5 原料分析结论及适应性工艺选择	30
2.2 化学试剂与实验设备	30
2.2.1 化学试剂	30

2.2.2 仪器设备	31
2.3 实验方法及流程	32
2.3.1 镍红土矿还原焙烧—氨浸实验	32
2.3.2 镍红土矿硫酸化焙烧—浸出实验	32
2.3.3 镍红土矿常压盐酸浸出实验	33
2.4 分析与检测	33
2.4.1 元素分析	33
2.4.2 浸出率计算	35
2.4.3 铁还原度计算	35
2.4.4 样品检测与表征	35
3 镍红土矿还原焙烧—氨浸理论及工艺研究	38
3.1 引言	38
3.2 还原焙烧过程热力学分析	38
3.2.1 热力学数据及计算	39
3.2.2 还原焙烧过程主要反应热力学平衡图	40
3.3 氨浸过程热力学分析	41
3.3.1 热力学数据及计算	42
3.3.2 氨浸过程 $\text{Me-NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ 体系 $E\text{-pH}$ 图	46
3.4 实验结果与讨论	49
3.4.1 原料粒度的影响	49
3.4.2 还原剂用量的影响	49
3.4.3 焙烧温度的影响	50
3.4.4 焙烧时间的影响	53
3.4.5 氨浸温度的影响	53
3.4.6 氨浸时间的影响	54
3.4.7 氨浸 NH_3/CO_2 的影响	56
3.4.8 矿浆浓度的影响	57
3.4.9 通氧速率的影响	58
3.4.10 综合实验	58
3.5 还原焙烧过程优化实验设计	60
3.5.1 响应曲面法介绍	60
3.5.2 实验设计及数据处理	61
3.5.3 还原剂用量与焙烧温度的交互影响	64
3.5.4 还原剂用量与焙烧时间的交互影响	66

3.5.5	焙烧温度与焙烧时间的交互影响	67
3.5.6	优化条件确定	67
3.6	氨浸过程动力学研究	69
3.6.1	动力学理论及方法	69
3.6.2	浸出动力学曲线	70
3.6.3	表观活化能和控制步骤	73
4	镍红土矿硫酸熟化焙烧—浸出理论及工艺研究	76
4.1	引言	76
4.2	硫酸熟化焙烧过程热力学分析	76
4.2.1	热力学数据及计算	76
4.2.2	硫酸熟化焙烧过程主要反应 $\Delta_r G^\ominus - T$ 图	79
4.3	焙烧产物氨浸过程热力学分析	80
4.3.1	热力学数据及计算	81
4.3.2	焙烧产物氨浸过程 $\text{Me-NH}_3\text{-CO}_3^{2-}\text{-H}_2\text{O}$ 体系 $\lg c_{\text{Me},T}\text{-pH}$ 图	89
4.4	硫酸熟化焙烧—水浸实验结果与讨论	93
4.4.1	硫酸加入量的影响	93
4.4.2	水加入量的影响	94
4.4.3	焙烧温度的影响	94
4.4.4	焙烧时间的影响	97
4.4.5	原料粒度的影响	98
4.4.6	硫酸钠加入量的影响	99
4.4.7	矿浆浓度的影响	100
4.4.8	综合实验	102
4.5	焙烧产物氨浸实验结果与讨论	103
4.5.1	氨浓度的影响	103
4.5.2	铵盐种类和浓度的影响	104
4.5.3	矿浆浓度的影响	107
4.5.4	氨浸温度的影响	108
4.5.5	氨浸时间的影响	108
4.5.6	综合实验	108
4.6	硫酸化焙烧过程优化实验设计	110
4.6.1	实验设计及数据处理	110
4.6.2	硫酸加入量与焙烧温度的交互影响	113
4.6.3	硫酸加入量与焙烧时间的交互影响	115

4.6.4	焙烧温度与焙烧时间的交互影响	115
4.6.5	优化区域确定	117
4.7	硫酸熟化焙烧过程动力学研究	119
4.7.1	硫酸化动力学曲线	119
4.7.2	表观活化能和控制步骤	121
5	镍红土矿常压盐酸浸出过程理论及工艺研究	124
5.1	引言	124
5.2	常压盐酸浸出过程热力学分析	124
5.2.1	热力学数据及计算	124
5.2.2	常压盐酸浸出过程主要反应 $\Delta_r G^\ominus - T$ 图	125
5.3	实验结果与讨论	126
5.3.1	酸料比的影响	126
5.3.2	浸出温度的影响	127
5.3.3	浸出时间的影响	128
5.3.4	矿浆浓度的影响	129
5.3.5	原料粒度的影响	129
5.3.6	Cl^- 浓度的影响	130
5.3.7	综合实验	131
5.4	常压盐酸浸出过程动力学研究	131
5.4.1	浸出动力学曲线	131
5.4.2	表观活化能和控制步骤	134
6	研究成果与展望	137
6.1	研究成果	137
6.2	展望	139
	参考文献	140

1 概 述

1.1 镍的性质及主要用途

1.1.1 镍的性质

镍是具有银白色金属光泽的铁磁性硬质金属，属元素周期表第Ⅷ族，为面心立方体晶型，原子序数 28，相对原子质量 58.69。镍在自然界存在五种稳定的同位素，包括⁵⁸Ni、⁶⁰Ni、⁶¹Ni、⁶²Ni 和⁶⁴Ni。镍在硬度、抗拉强度、机械加工性能、热力学性质以及电化学行为等方面与铁类似^[1]。镍是许多磁性材料及物件的组成成分，但在超过居里温度 357.6℃时失去磁性。每单位体积镍能吸收 4.15 体积氢气或 1.15 体积 CO。镍具有良好的磨光性能，故纯镍广泛用于电镀行业^[2,3]。表 1-1 列出了镍的一些物理性质^[4,5]。

表 1-1 镍的物理性质

物 理 量	数 值	物 理 量	数 值
相对原子质量	58.6934	价电子结构	[Ar] 3d ⁸ 4s ²
原子半径/pm	124.6	第一电离能/kJ·mol ⁻¹	736
密度/g·cm ⁻³	8.90	比热容/J·(kg·K) ⁻¹	439
电负性	1.8	还原电位/V	-0.250
熔点/℃	1453	沸点/℃	2732
熔化热/J·g ⁻¹	243.09	居里温度/℃	357.6
布氏硬度	80~90	莫氏硬度	4
电阻率/μΩ·m	6.84	极限抗拉强度/MPa	4~5

镍的化学性质与铂、钯相似，镍具有高度的化学稳定性，在空气中加热到 700~800℃时仍不氧化，空气、河水、海水对镍的作用很小，这主要是在镍的表面形成了一层致密的氧化膜，能阻止本体金属继续氧化^[6]。金属镍在冷硫酸中相当稳定，但能与热硫酸反应，如电解镍片在约 100℃的 3mol/L H₂SO₄ 中溶解速度为 10g/(m²·h)；稀盐酸对镍作用很慢，而稀硝酸能够剧烈腐蚀镍；各种碱和有机酸几乎不和镍发生作用^[7,8]。Ni²⁺ 很难与卤素离子发生配合反应，但却能与 NH₃、乙二胺等形成稳定的配合物^[1]。

1.1.2 镍的主要用途

镍主要用于不锈钢和特种合金制造、电镀和化工等行业，在国民经济发展中具有极其重要的地位。其主要用途概括如下^[7, 9~11]：(1) 制造不锈钢和其他抗腐蚀金属材料；(2) 用于电镀行业；(3) 制作石油化工催化剂；(4) 用作电子及电极材料；(5) 用作储氢材料；(6) 制作陶瓷。

不锈钢与特种合金生产是镍最广泛的应用领域，其中全球约 2/3 的镍用于不锈钢生产。在钢中加入部分镍，可显著提高钢的机械强度，使其具有更小的膨胀系数，可用来制造多种精密机械和精确量规等。镍钢和各种镍基耐热合金可用来制造机器中承受较大压力、承受冲击和往复负荷部分的零件，如涡轮叶片、曲轴、连杆等。

近年来，在动力电池、二次电池等电池材料领域，镍成为继钴之后最具潜力的金属。镍广泛用于可充电的高能电池，如 Ni-Cd、Ni-Zn、Ni-Fe 及 Ni-H 电池等。随着锂离子电池的发展，镍钴二元材料和镍钴锰三元材料已经成为极具发展前景的锂离子电池正极材料。

1.2 镍的生产与消费

1.2.1 全球镍的生产与消费

目前在全球有色金属生产中，镍的产量仅次于铝、铜、铅、锌的产量，排第五位。随着镍在各方面应用的不断扩大，其产量也持续增加。

图 1-1 所示为 1985 ~ 2009 年全球原生镍的供需平衡图^[12, 13]。自 20 世纪 80 年代末到 90 年代初，全球镍产量一直处于徘徊不前，甚至下降的状态，从 1994 年开始，逐渐进入稳步增长时期。1985 年全球镍产量只有 75.4 万吨，镍消费量为 78.3 万吨；2007 年全球镍产量达到 143.2 万吨，镍消费量为 132.7 万吨。近年来，全球镍产量和消费量持续下滑，且出现供过于求的局面。2008 年受金融危机影响，全球镍价暴跌，镍生产企业纷纷减产，镍产量同比下滑 5%，为 136 万吨；同年全球镍消费量在不锈钢需求下滑的影响下，同比下滑 2.6%，为 129.3 万吨，全年镍供应过剩 10 万吨；2009 年全球镍市场依然低迷，镍产量达到 133.5 万吨，同比下滑 2%，镍消费量为 129.8 万吨，与 2008 年基本持平，全年镍供应过剩 3.8 万吨。2010 年全球镍产量约为 142 万吨。

俄罗斯的精镍生产一直居全球之首，2007 年达到 27.2 万吨，占全球总产量的 19.0%。其次是中国、加拿大、日本、澳大利亚和挪威，这 6 个国家的精镍产量占全球的 70.4%。俄罗斯诺里尔斯克镍公司是全球最大的镍生产公司，其 2009 年镍产量达到 34.8 万吨。表 1-2 列出了 2009 年全球十大镍生产商的产量^[14]。

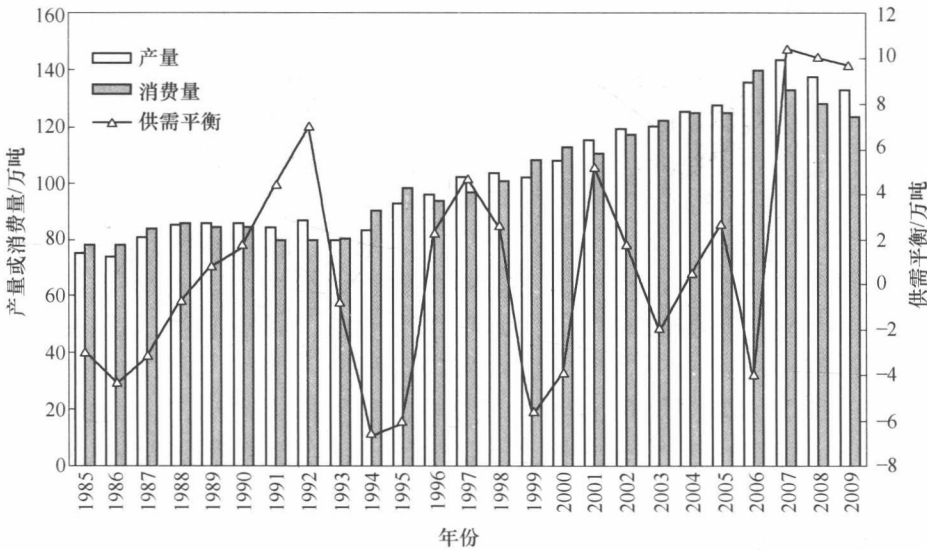


图 1-1 1985 ~ 2009 年全球原生镍供需平衡图

表 1-2 2009 年全球十大镍生产商的产量

排 名	企 业 名 称	国 家	产量/万吨
1	诺里尔斯克镍业	俄罗斯	34.8
2	金川集团	中 国	13.0
3	必和必拓	澳大利亚	11.8
4	巴西淡水河谷	巴 西	9.9
5	斯特拉塔	瑞 士	8.9
6	埃赫曼	法 国	5.2
7	日本住友金属	日 本	4.9
8	英美资源	英 国	3.8
9	谢里特国际公司	加拿大	3.4
10	米纳罗资源	澳大利亚	3.3

全球镍消费按行业用途划分，主要用于不锈钢、合金钢、有色金属、电镀、铸件等行业。图 1-2 所示为 2008 年和 2009 年全球镍消费结构比例变化^[15,16]。镍在不锈钢行业的消费一直占较大比重，但其他领域应用正逐步增长。近年来，镍粉不仅广泛应用于不锈钢和合金钢行业，高级镍粉还被粉末冶金焊条、储氢合金、电池行业所青睐，特别是日本电池行业对镍粉的需求已迅速跃居不锈钢之后，成为日本第二大镍消费领域。随着镍消费结构的变化，随之而来的将是镍产品需求种类的多样化。

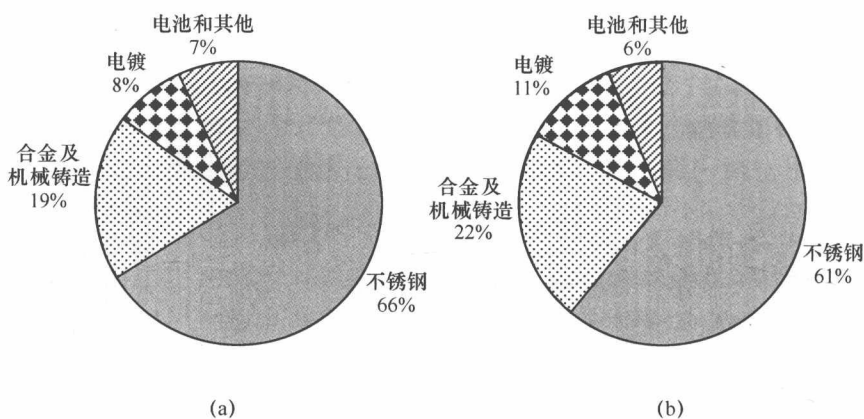


图 1-2 2008 年 (a) 和 2009 年 (b) 全球镍消费结构比例变化

1.2.2 中国镍的生产与消费

21 世纪以来,随着全球制造中心向中国的转移,与之相配套的耗镍生产工序也向中国内陆地区转移,这导致中国的镍生产量和消费量急剧上升^[17]。2004 年,中国超越挪威成为全球第五大镍生产国;2007 年,中国成为仅次于俄罗斯的全球第二大镍生产国。

近几年,中国镍行业的发展与全球镍行业形成了鲜明的对照——镍产量只在 2008 年稍有下降,而消费量持续增加,且长期呈现供不应求的局面。图 1-3 所示为 2001~2009 年中国原生镍供需平衡图^[12,13]。2008 年,中国镍产量为 13.3 万

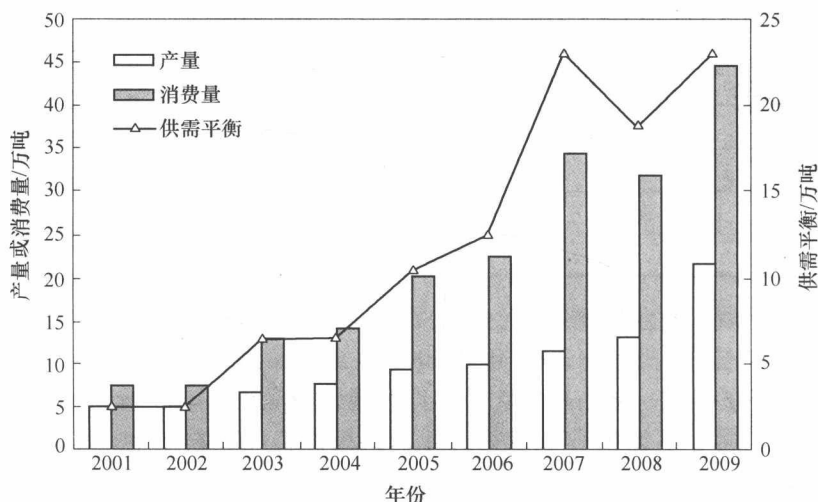


图 1-3 2001~2009 年中国原生镍供需平衡图

吨, 消费量为 32.0 万吨, 供需缺口达 18.7 万吨; 2009 年中国镍产量和消费量分别为 21.6 万吨和 44.7 万吨, 供需缺口继续扩大, 达 23.1 万吨。

中国精镍及其产品的生产相对来说比较集中, 以甘肃、吉林、四川、新疆、云南等地区为主, 主要生产厂家有金川集团有限公司、吉林吉恩镍业股份有限公司、新疆有色金属集团阜康冶炼厂、云南锡业元江镍业有限公司^[18]。其中金川集团有限公司是中国最大的镍生产商, 其 2009 年镍产量达到 13.0 万吨, 占中国镍总产量的 60.2%, 位居全球第二。

目前, 中国是全球最大的不锈钢消费国、最大的电池生产和消费国, 还是全球最大的硬质合金生产和人造金刚石生产国, 因此应用于这些领域的原材料也出现了旺盛的需求^[19]。图 1-4 所示为 2008 年和 2009 年中国镍消费结构比例变化^[15]。可以看出, 与全球镍消费结构相比, 中国在不锈钢和电镀行业内的镍消费比例相对较高, 其他行业消费比例较低。预计未来 20 年, 随着中国经济发展高峰期的到来, 中国对镍的累积需求量将达到 2000 万吨^[20]。

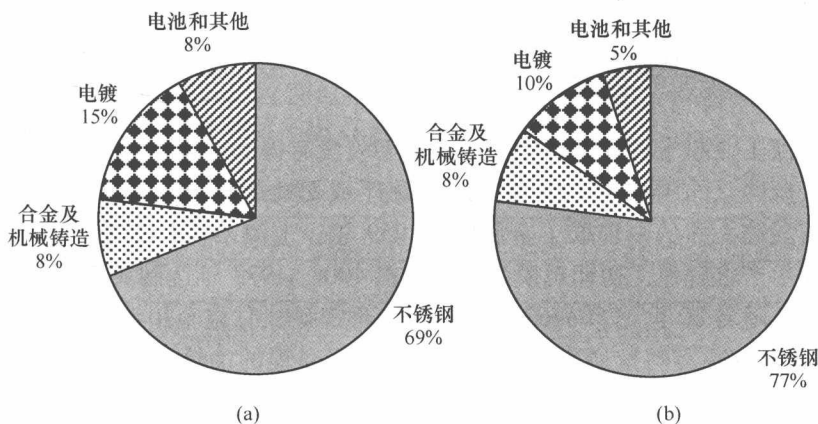


图 1-4 2008 年 (a) 和 2009 年 (b) 中国镍消费结构比例变化

2009 年中国在不锈钢行业的镍消费量为 34 万吨, 约占总消费量的 77%, 远高于 2009 年国际市场 61% 和 2008 年国内市场 69% 的水平。中国镍消费爆发性的增长, 一是与中国不锈钢产量大幅增加有关; 二是和不锈钢产品结构升级有关; 三是含镍生铁替代了部分废不锈钢, 扩大了不锈钢行业原生镍的消费基数。镍的电池和电镀消费领域由于基数较小, 加上镍系电池的市场份额不断受到锂离子电池的侵蚀, 因此 2009 年电池行业用镍至少下降 11%, 至 1.65 万吨。受汽车零部件出口下降影响, 2009 年中国电镀行业镍用量下降 5%, 至 4.5 万吨。高级合金领域, 虽然国家投资建设了大批核电站项目, 但是由于建设周期较长, 因此相对于不锈钢而言, 该领域镍消费量相对比较稳定^[21]。

1.3 镍的资源状况

1.3.1 镍的发现及开发历史

人类发现镍的时间不长,但使用镍的时间可追溯到公元前 300 年左右^[22]。中国古代已大量生产并使用铜镍合金(白铜)和锌镍合金(锌白铜),春秋战国时期就已经出现了含有镍成分的兵器及合金器皿^[23]。1751 年,瑞典的克郎斯塔特用红砷镍矿表面风化后的晶粒与木炭共热制得镍^[2]。人类广泛开采利用镍矿的历史基本上是在工业革命之后。18 世纪时开采的镍矿主要是镍硫化矿,基本集中在挪威及波罗的海地区。1864 年,法国在新喀里多尼亚发现了大量的镍红土矿,从此揭开了人类大规模开发镍矿的历史^[24,25]。随着经济的全球化发展,相继在一些南北回归线以内的国家和地区,如古巴、巴西、印度尼西亚、菲律宾、希腊、澳大利亚等国发现了储量可观的镍红土矿^[22]。加拿大萨德伯里在 1883 年发现的大型镍硫化矿床对全球镍资源的开发利用起到了极大的推动作用,到目前为止它一直是全球最大的镍矿床^[26]。20 世纪上半叶,苏联相继在科拉半岛及西伯利亚诺里尔斯克地区发现了大型铜镍硫化矿床,使苏联成为镍资源大国和最大的镍生产国。

中国镍工业起步较晚,新中国成立前不仅没有镍的冶炼工业,而且被认为是一个镍资源匮乏的国家。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硫酸镍,并从中提取了金属镍。1959 年,上海冶炼厂开始用从古巴进口的氧化镍生产电解镍,初期规模为年产电镍 400t,1973 年达到年产电镍 2500t 的生产能力。随着 20 世纪 50~60 年代四川会理镍矿、甘肃金川镍矿、吉林磐石镍矿以及 80 年代新疆喀拉通克镍铜矿的相继开采,镍的冶炼得到了蓬勃发展。特别是金川镍矿的发现和建成投产,不但使中国的镍资源储量跃居全球前列,而且大幅度提高了中国镍的产量,为中国现代工业的发展奠定了基础^[27]。

1.3.2 镍的资源特点

镍在地壳中的丰度为 0.008%,居已知元素第 24 位,主要存在于基性或超基性岩中。全球镍资源按照地质成因主要划分为三类:岩浆型镍硫化矿、风化型镍红土矿和海底锰结核镍矿。海底锰结核中的镍约占全球总镍的 17%,但由于开采技术和海洋环境影响等因素,目前尚未实际开发。陆基镍矿床主要是镍硫化矿床和镍红土矿床^[28]。镍具有亲硫性,因此在含硫丰富的环境中,镍优先与硫结合,与部分铁、铜、钴等亲硫元素一起形成硫化物熔浆,并从硅酸盐岩浆中分离出来,在一定条件下形成镍硫化矿床。当岩浆含硫不足时,镍则作为镁的类质同相矿物进入富镁的硅酸盐矿物中,并在后期较酸性矿浆中,与钴、硫一起进入热熔浆,形成镍和钴的硫化物脉状矿物。在表生条件作用下,镍不易氧化,但活动

性强，当镍硫化矿岩体受风化和淋滤时，镍可以从中析出，并在一定层位沉积形成地表风化壳性镍红土矿床。目前，全球已知的镍矿物有 50 余种，常见的具有工业价值含镍矿物见表 1-3^[29~31]。

表 1-3 常见的具有工业价值镍矿物

矿物名称	化学式	矿物名称	化学式	矿物名称	化 学 式
镍黄铁矿	(Fe, Ni) ₉ S ₈	硫镍矿	NiS ₂	镍蛇纹石	4(Ni, Mg) ₄ · 3SiO ₂ · 6H ₂ O
镍磁黄铁矿	(Fe, Ni) ₇ S ₈	红砷镍矿	NiAs	硫镍铁矿	(Fe, Ni) ₂ S ₄
砷镍矿	Ni ₃ As ₂	针镍矿	NiS	硅镁镍矿	H ₂ (Ni, Mg)SiO ₄ · nH ₂ O
辉砷镍矿	NiAsS	辉镍矿	3NiS · FeS ₂	镍褐铁矿	(Fe, Ni)OOH · nH ₂ O

2007 ~ 2009 年全球主要产镍国的镍储量和储量基础见表 1-4^[32~37]。全球已探明陆地镍矿总储量约 230 亿吨，平均含镍量为 0.97%，镍总量约为 2.2 亿吨，其中镍硫化矿储量约为 105 亿吨，平均品位为 0.58%，镍含量约为 6200 万吨，约占陆地镍矿总资源量的 28%；镍红土矿约为 126 亿吨，平均品位为 1.28%，镍含量约为 1.6 亿吨，约占陆地镍矿总资源的 72%。中国周边国家有镍矿储量 1125 万吨，只分布在少数国家，包括俄罗斯、印度尼西亚、菲律宾、缅甸和越南，但占全球总储量比较大，约占 23%。

表 1-4 全球主要产镍国的镍储量和储量基础

国 家	储量/万吨			储量基础/万吨		
	2007 年	2008 年	2009 年	2007 年	2008 年	2009 年
澳大利亚	2400	2600	2600	2700	2900	2900
新喀里多尼亚	710	710	710	1500	1500	1500
古 巴	560	560	550	2300	2300	2300
俄罗斯	660	660	660	920	920	920
加拿大	490	490	410	1500	1500	1500
巴 西	450	450	450	830	830	830
南 非	370	370	370	1200	1200	1200
印度尼西亚	320	320	320	1300	1300	1300
中 国	110	110	110	760	760	760
菲律宾	94	94	94	520	520	520
哥伦比亚	83	140	170	11	270	270
多米尼加	72	72	84	100	100	100
委内瑞拉	56	56	49	63	63	63
博茨瓦纳	49	49	49	92	92	92
希 腊	49	49	49	90	90	90
津巴布韦	1.5	1.5	1.5	26	26	26
其 他	210	220	390	590	610	610
合 计	6684.5	6951.5	7066.5	14502	14981	14981

全球镍资源主要分布情况如图 1-5 所示^[38~41]。镍硫化矿资源主要分布在加拿大、俄罗斯、澳大利亚、中国、南非、博茨瓦纳、芬兰、巴西等国家，一般位于北半球较高纬度和南半球非洲、大洋洲以及南美洲沿海区域；镍红土矿资源主要分布在南北纬 30° 以内的热带地区，集中分布在环太平洋的热带和亚热带地区，储量丰富的国家包括新喀里多尼亚、印度尼西亚、菲律宾、澳大利亚、巴布亚新几内亚、古巴、巴西、希腊、俄罗斯以及阿尔巴尼亚等国家。

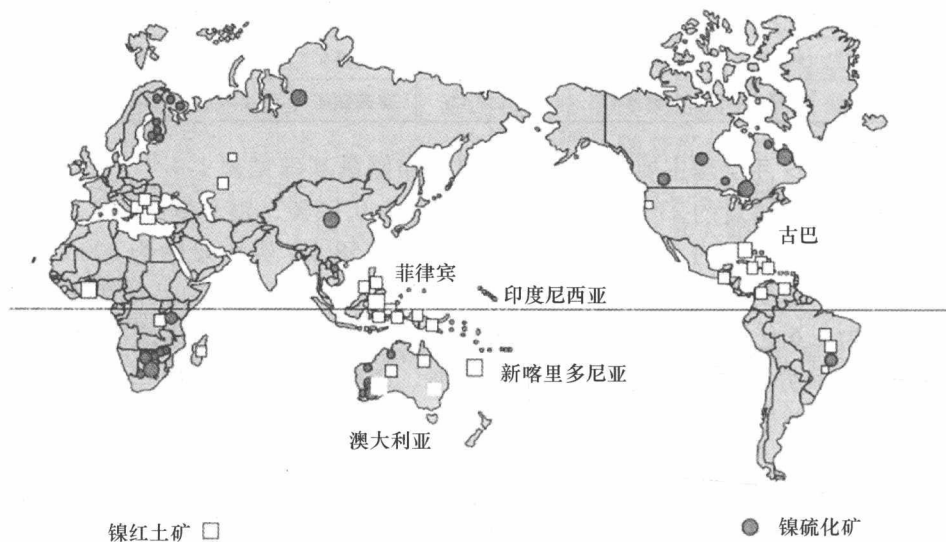


图 1-5 全球镍资源分布图

随着镍硫化矿的长期开采，且近 20 年来在镍硫化矿的新资源勘探上无重大突破，其保有储量急剧下降。如以年产镍量 120 万吨计算，则相当于 2 年采完加拿大伏伊希湾镍矿床（近 20 年发现的唯一大型矿床）、5 年采完我国金川镍矿（全球第三大硫化镍矿）。因此，全球镍硫化矿资源已出现资源危机，且传统的几个硫化镍矿矿山（加拿大的萨德伯里、俄罗斯的诺里尔斯克、中国的金川、澳大利亚的坎博尔达、南非的里滕斯堡等）的开采深度不断加深，矿山开采难度日益加大。为此，全球镍行业将资源开发的重点瞄准储量丰富的镍红土矿资源。

中国镍资源储量居全球前列，但不属于镍资源丰富的国家，已探明的镍矿点有 70 多处，储量为 800 万吨，储量基础为 1000 万吨，其中镍硫化矿占总储量的 87%，镍红土矿占 13%。中国镍资源主要分布在 19 个省（区），70% 的镍资源集中在甘肃金川镍矿，其次分布在新疆（喀拉通克镍矿、哈密镍矿）、云南（金平镍矿、元江墨江硅酸镍矿）、吉林（红旗岭镍矿、赤柏松镍矿）、湖北、四川（会理镍矿、冷水菁镍矿、丹巴镍矿）、陕西（煎茶岭镍矿）和青海（拉水峡镍