

如何用铌改善钢的性能

——含铌钢生产技术

冶金工业出版社

如何用铌改善钢的性能

——含铌钢生产技术

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2007

内 容 简 介

本书是 CBMM 亚洲公司组织日本钢铁研究和生产界一流的技术专家编写的一本铌在钢铁制品中应用的基础性和普及性技术著作。书中全面介绍了含铌钢在整个冶炼生产过程中的技术,包括含铌钢的冶炼与连铸技术,含铌钢连铸坯冶金质量控制方法;中厚板和热轧板含铌钢的物理冶金原理及工艺技术;含铌冷轧汽车板的相关技术问题;含铌棒线材及铁素体不锈钢生产技术等。

本书较全面地论述了各类含铌钢中铌的作用和相关生产工艺,特别适合我国冶金企业的广大技术人员在研发含铌钢时参考,同时也适合研究生在从事相关领域科研时参考。

图书在版编目(CIP)数据

如何用铌改善钢的性能:含铌钢生产技术/CITIC-CBMM 中信微合金化技术中心编. —北京:冶金工业出版社, 2007. 8
ISBN 978-7-5024-4376-4

I. 如… II. C… III. 铌—合金钢—炼钢 IV. TF7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 125187 号

出 版 人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)
责任编辑 李 梅 (电话: 010-64027928) 郭冬艳 美术编辑 李 心
版面设计 张 青 责任校对 王贺兰 李文彦 责任印制 牛晓波
ISBN 978-7-5024-4376-4

北京印刷一厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销
2007 年 8 月第 1 版, 2007 年 8 月第 1 次印刷
787mm × 1092mm 1/16; 10.25 印张; 245 千字; 151 页; 1-4000 册
39.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893
冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711) 电话: (010)65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

编 者

主编：Hiroshi Takechi 博士，教授，福岡初等技術學院前校長

Shunichi Hasimoto 博士，CBMM 亞洲有限公司

Masana Imagumbai 博士，CBMM 亞洲有限公司

译 者

付俊岩（CITIC-CBMM 中信微合金化技術中心）

尚成嘉（北京科技大學）

作 者

1. 炼钢过程中的铌：Hiroyuki Kajioka 博士

新日铁，前研究员

2. 热轧平板：Isao Kozasu 博士

NKK 公司钢铁研究中心，前副主任

NKK 公司，前高级研究员

3. 热轧带钢：Osamu Hashimoto 博士

川崎钢铁公司钢铁研究中心薄板部，前总经理

川崎钢铁技术研究公司，主任研究员

4. 冷轧带钢：Mitsunobu Abe 博士

新日铁，前高级研究员

5. 钢筋、钢棒和特钢：Masaaki Katsumata 博士

神户制钢（股份）有限公司钢铁研究中心铁基材料研究室，
前总经理

Shinko 研究机构，首席研究员

6. 不锈钢：Yoshiatsu Sawaragi 博士

住友金属工业（股份）有限公司，前技术主管

住友金属技术有限公司，技术主管

译者的话

含铌微合金化钢是最典型的高强度低合金钢，铌微合金化技术在国际上已经研究和发展的30多年，取得了较全面、较系统的研究成果。从1989年起，中信微合金化技术中心（CITIC）和巴西矿业公司（CBMM）合作，多年来一直和中国钢铁与材料专家，共同推广铌微合金化技术和含铌钢的开发。在全国同行的共同努力下，含铌钢年产量从1990年的3万t度果到2006年的2700万t，名列世界第一；含铌钢品种从几个发展到130多个，金国铌技消耗强度从1t粗钢不足1g提高到30g。17年果累计生产7700万t含铌钢材，不仅为国防工业和经济建设提供了急需的高性能钢材，也大大缩小了中国钢铁工业与发达国家的差距。

中信微合金化技术中心在国内外跨部门、跨行业、跨学科的领域中，开展了全方位、多元化、多层面的推广铌微合金化技术的工作，包括：先后设立了“铌钢发果奖”、“铌科学技术优秀论文奖”、“铌钢研究生奖学金”、“海外铌钢培训计划”、“铌钢研究与开度项目基金”、组织铌科学技术国际技术研讨会，编译出版了多种文集和著作，以及《神奇的铌——在钢铁中应用》技术丛书和《微合金化技术》刊物，不断地将国内外最新的与铌有关的科学技术介绍给中国钢铁工业及相关产业的工程技术人员。

本书原著是由日本著名的冶金与材料科学专家 Dr. Hiroshi Takechi（武志宏）教授作为主编，组织日本钢铁冶金界一流的技术专家编写的一本铌在钢铁制品中应用的基础性和普及性技术著作。该著作介绍了含铌钢的冶炼技术，从如何加入铌获得最高收得率的方法到如何控制含铌钢的连铸坯冶金质量；并针对中厚板材、热轧卷技、冷轧板、棒线材和铁素体不锈钢这五大类钢铁制品，分别从铌

微合金化的物理冶金、TMCP 与 HTP 工艺技术、产品性能等全方位的科技问题进行了较详尽的论述。原著各部分既有综合性论述,也涉及特别实际的工艺技术,可以说是尽量介绍了作者们对所论述领域国际铌科学技术发展所能概括和报道的技术信息。

本书特别适合于我国冶金企业的广大技术人员了解和掌握有关含铌钢的研发动向和应用技术要点,同时也适合研究生们在从事相关领域科研时入门学习,总之是一部相当实用的铌科学技术方面的专著。

本书的出版得到了巴西 CBMM 公司、中信金属公司、北京科技大学的 CITIC-CBMM-USTB 铌钢研究联合实验室的大力支持。其中鞍钢技术中心杨颖参加了第 1 章的翻译,鞍钢李静参加了第 4 章的翻译,北京科技大学的研究生曹建平、陈超、缪成亮、李秀程、由洋等也参加了其他章的翻译工作。在此对他们的辛勤劳动表示感谢!全书由付俊岩和尚成嘉负责翻译及审校。

希望广大读者对本书中的不足之处提出宝贵意见,愿本书能为钢铁界有关科技人员的科研工作以及我国钢铁工业的蓬勃发展奉献微薄之力。

CITIC-CBMM 中信微合金化技术中心 付俊岩

北京科技大学 尚成嘉

2007 年 4 月于北京



随着用户对钢铁产品性能的要求越来越实用化和复杂化，微合金钢的产量在世界范围内大幅增长。以微合金钢为主题的国际会议频繁举行，关于合金钢更深入的研究资料也受到广泛关注。

铌 (Nb)，作为一种重要的合金元素，由于其具有两个非常有价值的特性而被广泛地应用于钢铁生产。一方面，铌可以通过晶粒细化的途径来改善钢铁的强度和韧性的平衡；另一方面，它可以通过提高间隙原子稳定性来改善无间隙原子钢 (IF 钢) 的加工成形性。

对合金元素而言，一个必不可少的要求是价格稳定。钢铁生产者会发觉单独使用一种价格波动很大的合金元素是很不经济的，即使这种合金元素可以很好地改善钢铁的性能。在过去的 30 年中，铌铁合金的价格一直保持在每千克 14 美元左右。这种价格的稳定性是铌铁合金相比于钒铁合金和钛铁合金的一个明显优势。

对一个生产工程师而言，懂得如何能够在钢铁生产的一系列过程中有效地利用铌是十分必要的，这些过程主要包括：钢铁冶炼、热轧、锻造、造火以及各种形式的热处理。关于含铌钢的特性在巴西铌公司 (CBMM) 的主页上有详尽说明，用文来所提供的网址可以自由进入。当然，巴西 CBMM 主页上关于铌在相关钢铁方面的应用有大量先进而全面的被术资料，而本书介绍的内容是为铁少实际经验的工程师提供有关铌在钢中行为原理性、入门性的知识。目前对铌元素在钢中作用的研究还只是停留在单一的冶金学基础上，但是工业生产的钢铁是要经过上述各种加工过程的，其最终性能也会受到这些加工过程的综合影响。本书也将就此对铌的实际应用作相关论述。

本书是由一些日本著名的科研工作者和工程师编写的，实际上是他们发展和生产了含铌板材钢、薄板钢、管线钢、长型材和不锈钢。因此，本书更多内容是实际的应用而非理论的解释。所有编者和作者已在前面列出，希望本书能对所有已在或将要在生产中应用铌元素的工程师们有所帮助。

CBMM 主页上提供了十分详尽的关于铌在钢铁中作用的资料，并建立了一个数据库。由于篇幅有限，本书仅仅解释了有关提在实际应用中的几个基本方面，并列举了几个典型实例，不可能涵盖全部现有资料。如有需要，请读者登录 CBMM 主页进行查询。

CBMM 主页网址：<http://www.cbmm.com.br>

武志宏 博士，教授

2005 年 9 月 1 日

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	定价(元)
汽车用镍微合金化钢板	85.00
石油天然气管道工程技术及微合金化钢	85.00
现代铌钢长条材	45.00
铌·高温应用	49.00
铌·科学与技术	149.00
超细晶钢——钢的组织细化理论与控制技术	188.00
新材料概论	89.00
材料加工新技术与新工艺	26.00
合金相与相变	37.00
2004 年材料科学与工程新进展(上、下)	238.00
电子衍射物理教程	49.80
Ni-Ti 形状记忆合金在生物医学领域的应用	33.00
金属固态相变教程	30.00
金刚石薄膜沉积制备工艺与应用	20.00
金属凝固过程中的晶体生长与控制	25.00
复合材料液态挤压	25.00
陶瓷材料的强韧化	29.50
超磁致伸缩材料制备与器件设计	20.00
Ti/Fe 复合材料的自蔓延高温合成工艺及应用	16.00
有序金属间化合物结构材料物理金属学基础	28.00
超强永磁体——稀土铁系永磁材料(第2版)	56.00
材料的结构	49.00
薄膜材料制备原理技术及应用(第2版)	28.00
陶瓷腐蚀	25.00
金属材料学	32.00
金属学原理(第2版)	53.00
材料评价的分析电子显微方法	38.00
材料评价的高分辨电子显微方法	68.00
X 射线衍射技术及设备	45.00
首届留日中国学者 21 世纪材料科学技术研讨会论文集	79.00
金属塑性加工有限元模拟技术与应用	35.00
金属挤压理论与技术	25.00
材料腐蚀与防护	25.00
金属材料的海洋腐蚀与防护	29.00
模具钢手册	50.00
陶瓷基复合材料导论(第2版)	23.00
超大规模集成电路衬底材料性能及加工测试技术工程	39.50
金属的高温腐蚀	35.00
耐磨高锰钢	45.00
现代材料表面技术科学	99.00



1 炼钢过程中的铌	1
1.1 钢液中 Nb 含量的控制	1
1.1.1 钢液中固态铌铁的行为	2
1.1.2 添加与合金化技术	6
1.2 含 Nb 钢中夹杂和析出相的控制	10
1.2.1 氧化物和硫化物夹杂及 Nb 氧化物析出相的控制	10
1.2.2 含 Nb 钢中 Nb 碳化物和 Nb 氮化物控制	17
1.2.3 Nb 磷化物的控制	23
1.3 无缺陷含 Nb 连铸坯的生产	23
1.3.1 连铸坯表面裂纹	24
1.3.2 夹杂缺陷	29
1.3.3 连铸坯的其他缺陷	32
1.4 加铌铁 (Fe-Nb) 的先进炼钢技术总结	32
参考文献	34
2 热轧平板	36
2.1 结构钢板性能要求	36
2.2 微观组织和工艺因素对钢板性能的常见影响	36
2.2.1 强度和低温韧性	36
2.2.2 焊接性	37
2.2.3 钢板的一般加工工艺	38
2.3 微合金元素 Nb 在钢板中的作用	41
2.3.1 Nb 在奥氏体 (γ) 中的析出和溶解 行为以及对 γ 晶粒尺寸的影响	41
2.3.2 铁素体 (α) 中的析出硬化	42
2.3.3 热轧中 γ 相再结晶的抑制	43
2.3.4 通过添加 Nb 改善淬透性	44
2.3.5 在各种处理工艺中 Nb 作用的归纳	45
2.4 含 Nb 钢的实例 (I): 传统工艺	45
2.4.1 传统热轧	45

2.4.2 正火	46
2.4.3 调质	47
2.5 含 Nb 钢的实例 (II): TMCP 和 DQ	47
2.5.1 含 Nb 钢的 TMCP	47
2.6 含 Nb 钢的实例 (III): 结构型材	53
2.7 结束语	54
参考文献	54
3 热轧带钢	56
3.1 用途和性能	56
3.1.1 汽车用材料	56
3.1.2 钢管用材料	58
3.1.3 其他用途的材料	60
3.2 加工工艺	62
3.2.1 强化技术	62
3.2.2 成形性改良技术	70
参考文献	75
4 冷轧带钢	76
4.1 引言	76
4.2 IF 钢	76
4.2.1 深冲压性的织构控制	77
4.2.2 C、N、Nb 和 Ti 含量的选择	78
4.2.3 热轧、冷轧工艺	82
4.2.4 Nb-IF 钢产品	86
4.3 含 Nb 高强度钢	87
4.3.1 Nb-IF 钢中的固溶强化	87
4.3.2 改良 IF 钢的烘烤硬化性能	90
4.3.3 析出强化和细晶强化	92
4.3.4 Nb-DP 钢和 Nb-TRIP 钢	94
4.3.5 Nb 系高碳钢	97
4.4 热镀锌	97
4.4.1 连续处理	97
4.4.2 合金层黏着性	99
4.5 点焊性能	100
4.5.1 合金元素的影响	100
4.5.2 镀锌钢板	100
4.6 小结	101
参考文献	102

5 钢筋、钢棒和特钢	104
5.1 Nb 在钢筋、钢棒和特钢中的作用	104
5.1.1 Nb 在中高碳钢热轧过程中的行为	104
5.1.2 控轧工艺中 Nb 对中高碳钢力学性能的影响	105
5.1.3 热处理过程中 Nb 对抑制奥氏体晶粒长大的作用	106
5.1.4 Nb 作为强化元素的作用	107
5.1.5 Nb 对延迟断裂的影响	108
5.2 含 Nb 钢线材、棒材和特种钢的应用	108
5.2.1 机械结构钢	108
5.2.2 高碳线棒钢	116
5.2.3 螺纹钢	119
5.2.4 钢轨	121
5.2.5 工具钢	124
参考文献	126
6 不锈钢	129
6.1 Nb 在铁素体不锈钢中的作用和应用	129
6.1.1 局部耐腐蚀性能	129
6.1.2 室温下的力学性能	130
6.1.3 韧性	130
6.1.4 高温强度	131
6.1.5 高温疲劳和热疲劳性能	133
6.1.6 成形性能	135
6.1.7 焊接性能	135
6.2 奥氏体不锈钢中 Nb 的作用和应用	135
6.2.1 局部抗腐蚀性	135
6.2.2 高温抗腐蚀	138
6.2.3 力学性能	139
6.2.4 高温强度性能	140
6.3 总结	144
附录 含 0.03%C 和 0.10%Nb HSLA 钢的冶金学及其结果	146

1 炼钢过程中的铌

自 20 世纪 20 年代以来, 铌 (Nb) 作为合金元素, 添加到钢液中用来细化晶粒和增加钢材的强度。1958 年, National 钢铁公司利用 Nb 的弱还原性, 在半镇静钢中加入了 Nb, 开发了商品名称为 GLWX^[1] 的高强度含 Nb 钢。

不只在美国, 英国和日本也相继开发了称之为“经济钢”的高强度含 Nb 钢^[2]。由于该钢种具有理想的焊接性能, 含铌钢板材和型材被广泛应用到建筑、桥梁、造船以及市政工程和运输车辆用材料上。可见, Nb 很早就被应用到钢铁产品的大规模生产中。

自 20 世纪 60 年代以来, 热力学数据已表明含 Nb 钢的生产不会引起冶炼 (包括冶炼、精炼和浇注) 过程中某些棘手问题的出现。比如当钢液中加入强氧化合金元素如 Al、Ti 和 Si 时, 由于它们和 [O] 反应, 收得率很低, 也不稳定。与此同时, 生成的脱氧产物常常以夹杂物的形式留在钢中, 导致钢中形成各种缺陷。使用 Nb 时可避免此类几乎不能克服的“夹杂问题”。Nb 是一种成本低, 并可改善强度和延展性的最有效的元素。

20 世纪 80 年代, 钢铁企业引进了连续冶金工艺技术, 如连铸、连续退火及直接轧制工艺 (如连铸连轧和热机械处理控轧工艺), 这些工业技术的利用不但可节省能源, 还能大幅度降低生产成本。其中, 冶金工艺, 如拉速、钢液温度和成分等须严格控制。在上述工艺中, 由于在钢液中添加铌铁工艺的进步, Nb 的含量可控制在精确的范围。目标 Nb 含量命中率接近 100%, 而且 Nb 含量的标准偏差已降低到可忽略不计的水平。如今, Nb 是用于连铸工艺开发新钢种和生产钢铁产品的最合适的元素。此外, 正如前面所提到的, 生产含 Nb 钢产品可以避免产生脱氧产物问题 (夹杂物)。因此, 在各个钢铁企业含 Nb 钢的实际生产比率得到了很大提高。

自从 20 世纪 80 年代以来, 冶金企业 Nb 铁的消耗量就一直持续增长。目前, Nb 已经被添加到各个级别钢种中, 在提高强度和延展性的同时也解决了夹杂物问题。还有一种趋势就是在利用新研发或新改进的工艺开发和生产高强度钢时都偏重于添加 Nb。

可以预期, 随着 Nb 作为合金元素在钢中的作用被进一步揭示, 今后钢铁企业铌铁的消耗量将进一步增加。当然, 为了生产低成本、高质量的含 Nb 钢, 钢铁企业有必要改善钢液中添加铌铁的技术, 以便在更精确的范围内控制 Nb 的含量。此外为了开发高性能的钢种, 研究凝固时 Nb 析出产物数量和尺寸的控制技术也是十分重要的。

1.1 钢液中 Nb 含量的控制

炼钢时, 通过添加铌铁 (Fe-Nb) 来控制钢液中 [Nb] 的含量 ($w[\text{Nb}]$), 这与钢中 [Mn] 和 [Si] 含量的控制方式相同。为了在输送和加入过程中便于操作并将机械损耗降到最小, 炼钢厂应从铌铁制造商订购具有最佳尺寸分布的块状铌铁。

常用铌铁的典型化学成分如表 1-1 所示。典型铌含量为 66.5%[●]的铌铁，相当于金属间化合物 (NbFe) 中 [Nb] 含量的水平，因此，它很脆，易于破碎到所需要的尺寸，便于从铌铁制造商订购。表 1-2 列出了铌铁制造商所提供的铌铁颗粒尺寸分布范围。选择不同的颗粒尺寸的铌铁，通常取决于钢包容积和铌铁添加技术。根据最近 CBMM 的报道，在北美广泛采用粒子尺寸为 3~11mm 铌铁；在日本则多数使用尺寸为 5~30mm 的铌铁，在钢包精炼工艺中，Nb 铁直接添加到钢液表面（参看 1.1.2 节）。为了使生产质量稳定，并得到成本低廉的含 Nb 钢液，最重要的是了解铌铁在钢液中的冶金行为。

表 1-1 CBMM 标准级铌铁化学成分（铝热还原法生产）

元 素	化学成分/%		元 素	化学成分/%	
	规定值	典型值		规定值	典型值
Nb	>63.0	66.5	Pb	<0.12	0.04
P	<0.20	0.08	Si + Al + Ti	<5.5	3.0
S	<0.10	0.06	Fe	余 量	30.0
C	<0.15	0.08			

注：来源于 CBMM。

表 1-2 铌铁颗粒的尺寸分布实例

粒 度	生产率/%	应 用
20~80mm	—	在大钢包中倾倒入（大于 300t）
10~30mm	20	最典型的钢包倾倒入方式
5~50mm	15	最典型的钢包倾倒入方式，但用于较小炉容
5~30mm	15	在 RH 中倾倒入（在日本应用广泛）
5~20mm	15	在 RH 中倾倒入（在日本应用广泛），但用于较小炉容
3~15mm	5	在 RH 或大罐中倾倒入（在美国应用广泛）
2~8mm	—	在简化钢包精炼工艺中应用（CAS）
1~13mm	10	在简化钢包精炼工艺中应用
<2mm	—	喷射，喂线

注：1. 2mm 以下的小于 10%；

2. 来源于 CBMM。

1.1.1 钢液中固态钢铁的行为

铌铁添加到钢液中的行为如图 1-1 所示。在添加的过程中及添加后，铌铁以四种形态存在：粉尘中、钢包渣中、渣壳中及溶解在钢液中的 [Nb]。溶解于钢液中的 [Nb] 根据 [Nb] 含量和 [O] 含量的不同与 [O] 发生反应。在反应中，[Nb] 被消耗形成 Nb 氧化物（氧化损耗或化学损耗）。因此添加 Nb 的物料平衡如下：

$$[\text{添加的总 Nb}] = [\text{Nb 粉尘}] + [\text{渣中的 Nb}] + [\text{渣壳中的 Nb}] + [\text{钢液中溶解的 [Nb]}] + [\text{铌氧化物(渣或浮渣) 中的 Nb}] \quad (1-1)$$

等式右边的前三项表示在运送和添加过程中的机械或物理损耗，最后一项是 Nb 在钢液中的氧化损耗或化学损耗。

钢液中 Nb 的收得率 = $100 \times [\text{钢液中 [Nb] 的质量}] / [\text{加入铌铁中铌的质量}]$

为了提高钢液中 Nb 的收得率，必须改变添加条件或运用改进的添加技术使各种损耗

● 本书中凡未经注明的物质百分含量均为质量分数。

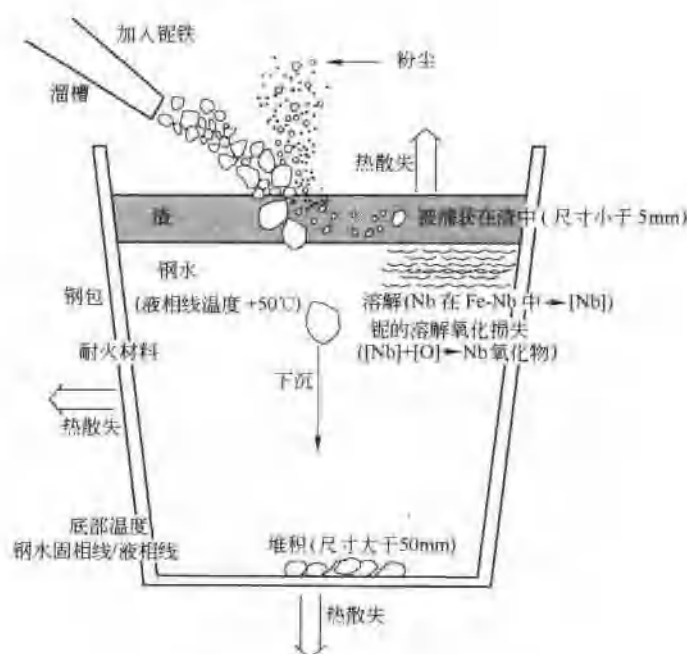


图 1-1 加入到钢液中铌铁的行为

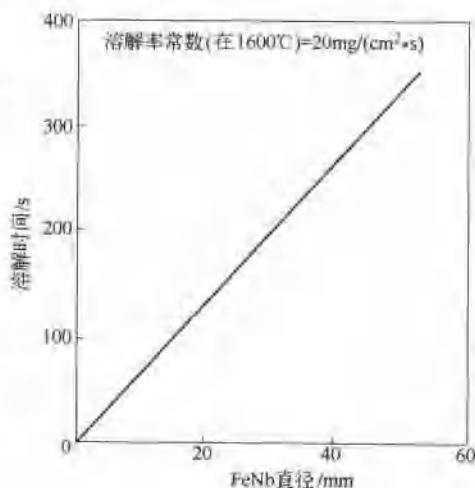
因素减至最小（参看 1.1.2 节）。换言之，将 Nb 含量控制在窄的范围内并得到很高的收得率，从而降低含 Nb 钢的生产成本的关键是使这些损耗因素最小化。

1.1.1.1 钢液中添加的固态铌铁的物理行为

在输送和往钢液中加入铌铁的过程中，铌铁的细小颗粒（直径小于几微米）可能会像粉尘一样损失掉。在加入过程中，一些小块铌铁（小于 10mm）可能会被包渣截留隔离而不能和钢液接触，其结果就是它们不溶于钢液，减少了钢液中的收得率。铌铁的密度 (8.1g/cm^3) 大于钢液的密度 (6.8g/cm^3)。因此当一块固态铌铁进入钢液后，它在溶解于溶液的同时会一直沉到容器（钢包）底部。因为铌铁的熔化温度范围（固相线温度～液相线温度： $1580 \sim 1600^\circ\text{C}$ ）大于钢包中钢液的温度（钢的液相线温度 + 50°C ：小于 1600°C ），所以铌铁在钢液中并不熔化，而是通过 $[\text{Nb}]$ 的扩散，溶解到钢液中。

大块铌铁（大于 50mm）容易下沉并聚集在钢包的底部，由于不适合的钢液温度（钢的液相线温度小于 1520°C ）及铌铁附近局部区域的温度较低，大块铌铁不易溶解在钢液中而仍旧以渣子的形态存在。

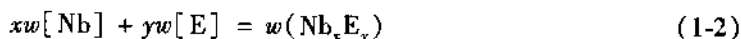
铌铁在钢液中的溶解时间如图 1-2 所示^[3]。

图 1-2 铌铁（标准级）溶解时间^[3]

溶解时间与铌铁的颗粒直径成正比关系。小尺寸的铌铁颗粒加速溶解,但是,它的机械损耗也较大,因为细小的铌铁粉末(小于1mm)加入时扬尘损耗较大,小颗粒铌铁(小于10mm)被包渣捕获的几率也增加。考虑到溶解时间、添加方式以及炉子大小(或钢包容积),以工艺理论参数及实际生产经验为依据,确定加入铌铁的尺寸,可使机械(物理)损耗最小化,见表1-2。按照表1-2添加铌铁时,Nb的收得率达到80%,在镇静钢中可能更高。根据报道,在RH或吹氩精炼工艺中,当较小尺寸的铌铁被添加到钢液的表面时(参看1.1.2节),机械损耗可少于1%,面铌的收得率达到95%以上。

1.1.1.2 在钢液中溶解Nb的化学行为

溶解的Nb($[Nb]$)与钢液中非金属元素如 $[O]$ 、 $[C]$ 、 $[S]$ 、 $[N]$ 和 $[P]$ 的反应如式1-2所示。以 $w[Nb] \cdot w[E]$ 形式出现的铌的碳化物、氮化物、硫化物、磷化物在钢液中的溶解极限是很高的。Nb碳化物、Nb氮化物的溶解度作为典型例子在表1-3中列出一些实例。Nb硫化物和Nb磷化物在钢液中的溶解度要比碳化物高得多。因此,含铌钢中,除了铌的氧化物以外,Nb碳化物、Nb氮化物、Nb硫化物、Nb磷化物均不在钢液中形成或析出。



式中 $w[Nb]$ ——钢液中溶解 $[Nb]$ 的含量,%;

$w[E]$ ——钢液中非金属元素的含量,%;

$w(Nb_xE_y)$ ——Nb的化合物如氧化物、碳化物、氮化物、硫化物、磷化物的含量,%。

表1-3 $M+N=MN$ 和 $M+C=MC$ 反应的平衡常数^[4]

温度/℃	$M+N=MN$			$M+C=MC$		
	$w[V] \times w[N]$	$w[Nb] \times w[N]$	$w[Ta] \times w[N]$	$w[V] \times w[C]$	$w[Nb] \times w[C]$	$w[Ta] \times w[C]$
1500	10.2	0.140	0.313		14.3	5.12
1600	12.9	0.193	0.456	很大	18.3	6.83
1650	16.3	0.262	0.646		23.0	8.51
1600	$w[Ti] \times w[N] \approx 10^{-3}, w[Al] \times w[N] = 1$			$w[Ti] \times w[N] = 1$		

A 镇静钢($w[O] < 0.005\%$)中的氧化损耗

自从连铸工艺作为铸造凝固工艺被引入以来,现代炼钢厂主要生产镇静钢。在生产过程中,首先考虑铌的氧化损耗。图1-3表明了 $[Nb]$ 与 $[O]$ 的亲合力远低于一些典型的脱氧元素如Al、Si和其他合金元素如Ti、Cr。此外,若考虑到商用含Nb钢的 $w[Mn]/w[Nb]$ 比,Mn与 $[O]$ 的亲合力会更低。

图1-4^[4]表明了 $[O]$ 和 $[Nb]$ 的表观平衡常数,0.015% $[O]$ 和1% $[Nb]$ 达到平衡,0.02% $[O]$ 和0.5% $[Nb]$ 达到平衡,因此, $[O]$ 的表观平衡常数比镇静钢($w[O] < 0.005\%$)高一个数量级。这意味着在常规 $[Nb]$ 含量水平的镇静钢中溶解的 $[Nb]$ 不与钢中的 $[O]$ 反应,因而在含Nb的镇静钢生产中, $[Nb]$ 没有化学损耗。

为了降低机械损耗,小心仔细地将铌铁加入到镇静钢液时,Nb的收得率可望达到95%或更高,其标准偏差小于0.0015%。