

现代

XIANDAI HANNI BUXIUGANG

含铌不锈钢

孟繁茂 付俊岩 编

Nb

冶金工业出版社



Nb

ISBN 7-5024-3480-1



9 787502 434809 >

ISBN 7-5024-3480-1

TG · 345 定价 45.00 元

现代

XIANDAI HANNI BUXIUGANG

含铌不锈钢

孟繁茂 付俊岩 编

Nb

冶金工业出版社

内 容 简 介

本书是一本全面介绍含铌不锈钢性质、发展前景、新产品开发与应用以及加工成形技术的实用技术图书。

本书详细介绍了铌在不锈钢中的物理冶金性质；阐述了含铌耐蚀耐热不锈钢的现状和最新发展；重点叙述了现代含铌不锈钢的新产品开发与应用，包括汽车排气系统用含铌不锈钢，建筑用含铌不锈钢，造船用含铌不锈钢，家电、家具、厨房用含铌不锈钢，抗菌铁素体不锈钢等；系统探讨了含铌不锈钢的加工成形技术，如铌改善铁素体不锈钢的抗皱性，改善奥氏体不锈钢的抗时效裂纹，降低韧脆转变温度以及加工性能优越的含铌钢种的开发，即高 r 值钢、IF 钢和加工硬化型不锈钢。

本书参考了国内外的先进技术资料，对于不锈钢生产和科研工作有参考和指导作用。本书适用于从事不锈钢生产、研究的技术人员和冶金行业的科研人员阅读，也可作为高校有关专业本科师生的参考资料。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代含铌不锈钢/孟繁茂，付俊岩编. —北京：
冶金工业出版社，2004.3

ISBN 7-5024-3480-1

I. 现… II. ①孟… ②付… III. 铌合金—不锈钢
IV. TG142.71

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 014614 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 王雪涛 美术编辑 李 心

责任校对 刘 倩 李文彦 责任印制 牛晓波

北京兴华印刷厂印刷；冶金工业出版社发行；各地新华书店经销

2004 年 3 月第 1 版，2004 年 3 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32；14.625 印张；392 千字；457 页；1-3000 册

45.00 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)

前

言

书名《现代含铌不锈钢》表明了本书的内容界定范围。现代，即表明关于铌在不锈钢中的应用研究的论文和技术资料方面的撷取力求新颖全面，但由于时间界定范围注重了近十余年的新近研究成果与实用材料的技术资料，因此，对含铌不锈钢的历史发展系统性缺乏顾及，有些遗憾。含铌不锈钢，即指铌在不锈钢的生产、应用中的物理冶金和含铌钢种的开发与应用是本书的主题。

编写本书的宗旨在于把铌在不锈钢中的应用介绍给我国从事不锈钢研究、教学、生产、应用的不锈钢专家与工程师们，以求在发展我国的现代不锈钢技术和在产品结构调整方面尽一点微薄力量，起到抛砖引玉的作用。

在不锈钢产品消费上，我国是世界第一消费大国，消费品种主要是板带材(主要是进口板带材)。从应用范围看，重化工应用很少，主要应用份额在耐久消耗材方面，这种形势并不适应正在高速发展的重工业，如石油、化工、医药、大型建筑、造船、火力发电、汽车等，特别是都市高度功能化和环保事业等方面的需要，因此年消耗 400 万 t 不锈钢对我国来说只是初始阶段。

不锈钢的应用必须有高瞻远瞩的目光和关注全社会效益的胸怀，必须看到不锈钢的生产关键在于设备的长寿命，而不锈钢的环保性会使全人类受益，这是当今世界冶金工业最激进的发展潮流。从这点说我国不锈钢的消费和生产发展与美、日、西欧相比，只是万里长征第一步。展望未来，不锈钢前途无量。

众所周知，含铌不锈钢并不是不锈钢的全部，它是不锈钢一个方面，却是重要的一个大方面，特别是在当前中国不锈钢工业的背景下，含铌不锈钢具有几乎全新的内涵。本书在编写过程中注重新知识和新技术。书中的图表众多，并处于重要地位，除了必要的分析和解释，书中并没有对图表内容作更多的赘述，相信读者和在不锈钢生产、研究第一线的工程师们会以较少的时间从具有直观性和科学性的图表中获得丰富的信息，并使已掌握的知识得到升华。

本书从收集文献到提笔成文历时近1年。本书在编写过程中参阅了当今世界含铌不锈钢研究生产方面已公开发表的大量论文和技术资料，这里特别向 DeArdo 教授，Oku、Hiraide、Hiramatsu 博士等冶金专家、学者们致以感谢，感谢他们的无私奉献。

本书还必须感谢巴西 CBMM 公司和中信金属公司为本书的出版给予的大力支持。还要感谢冶金工业出版社的帮助，通过他们精心的工作，本书在时间紧迫的条件下及时出版。

孟繁茂 付俊岩

2004 年新春佳节

目

录

1 含铌不锈钢概况	1
1.1 铌在不锈钢中的重要性	2
1.2 现代不锈钢产业特点	6
2 不锈钢品种结构调整势在必行	11
2.1 我国不锈钢企业品种结构和生产的现状	11
2.2 发展现代铁素体（含马氏体）不锈钢应是 不锈钢品种结构调整的重点之一	12
2.3 现代铁素体不锈钢主要应用领域和市场	13
2.4 铌在现代铁素体不锈钢中的作用	16
2.5 结论	22
3 铌在不锈钢中的实用物理冶金	23
3.1 铌的溶度积原理及其应用	23
3.2 铌对不锈钢的固溶强化作用	26
3.3 铌的沉淀强化	30
3.4 铌对铁素体不锈钢的耐蚀性能的影响	32
3.5 相同孔蚀指数的铁素体不锈钢和奥氏体 不锈钢的孔蚀性能的差异	37
3.6 铌、钛对 18Cr 铁素体不锈钢的敏化行为的 影响	39

3.7	合金元素对 18Cr 铁素体不锈钢的抗氧化性能的影响	42
3.8	铌和晶粒度对 Md30 的影响	46
3.9	18Cr 铁素体钢的动态再结晶	48
3.10	热轧板的退火工艺对铁素体不锈钢的冷轧板再结晶温度和 r 值的影响	49
3.11	铌、钛对铁素体不锈钢的再结晶行为的影响	53
3.12	铁素体不锈钢中的铌、钛、碳、氮对再结晶和晶粒长大的影响	55
3.13	铌、钛、硼对高纯 18Cr 铁素体不锈钢结晶粒度的影响	57
3.14	析出物间的反应对细化晶粒的作用	58
3.15	347 型不锈钢降铌含量及其发展	60
3.16	利用加工热处理开发高强度不锈钢的物理冶金要点	62
3.17	奥氏体耐热钢 SUS347 和 SUS321 晶粒细化技术	66
3.18	关于晶粒度对蠕变强度的影响	74
3.19	热轧和常化工艺对 9Cr-1Mo-VNbN 钢的晶粒尺寸的影响	75
3.20	304 型不锈钢中加入少量铌、氮改善耐蚀性能的物理冶金原理及其应用	80
3.21	铌提高加工性能的物理冶金	96
4	含铌不锈钢的研究与发展现状	99
4.1	含铌中、高铬铁素体不锈钢的现状	99
4.2	铌对铁素体不锈钢性能的影响	111
4.3	含 Nb 双相不锈钢	120
4.4	铌对马氏体不锈钢性能的影响	123
4.5	铌在奥氏体不锈钢和双相不锈钢中的应用	125

5 含铌耐热不锈钢的现状与发展趋势	150
5.1 超超临界压 (USC) 火力发电的发展对 耐热钢开发的挑战	150
5.2 最先进的实用耐热钢	162
5.3 蒸汽涡轮转子和燃气涡轮盘用下一代耐热钢	167
5.4 发电锅炉用钢管 NF616	171
5.5 垃圾发电用奥氏体不锈钢	175
5.6 适于高温蒸汽条件下的 12Cr 转子钢 MTR10A 的设计与生产	179
5.7 5 种新开发的火力发电用高强度传热管材的 现状与发展	186
5.8 西欧电厂用 9~12Cr 抗蠕变铁素体钢的现状 与发展	189
5.9 最新纳标的火 SUS 347J1TB 发电锅炉用钢管	206
5.10 铌在石油化工用离心铸管中的应用	214
5.11 抗辐照用 316 型加 Nb 不锈钢	227
6 汽车用含铌不锈钢	229
6.1 汽车用含铌不锈钢概况	229
6.2 汽车排气系统用含铌不锈钢的新品种开发概况	242
6.3 12CrNb 铁素体不锈钢的晶间腐蚀和应用	247
6.4 Nb-Ti 双稳定化的 409 型 T466 钢的开发	255
6.5 Nb、Ti、Mo 三元优化高性能排气歧管用 铁素体不锈钢 YUS450 和 YUS190	260
6.6 排气歧管用 LC-HNb 型高加工性能 R429EX 和 LC-HNb-Mo 型高耐热性能 R444EX	269
6.7 高耐热性、高加工性钼应用型排气歧管用 铁素体不锈钢 RMH-1	279
6.8 Nb-Mo-Cu 型排气歧管用耐热铁素体不锈钢	

NSSEM-3	284
6.9 汽车用排气歧管(获奖制品)	293
6.10 触媒净化器用 20Cr-5Al-Ln 箔材	298
6.11 摩托车类排气装置用超纯铁素体不锈钢 Mn-Nb-Cu 型 NSSEM1 钢	301
6.12 汽车高温排气系统用奥氏体铸钢	306
6.13 汽车排气系统用铁素体不锈钢焊丝的开发	314
6.14 含铌耐热铸钢在汽车零件中的应用	319
6.15 柔性管用 SUS304、SUSXM15J1	325
7 建筑用含铌不锈钢	327
7.1 沿海建筑用含铌不锈钢的耐候性	327
7.2 超级铁素体不锈钢 NSS447M1	334
7.3 SUS630 的冷加工性能	338
8 造船用含铌不锈钢	348
8.1 船舶用高强度奥氏体不锈钢 YUS304N 和 YUS170	348
8.2 焊接用 0Cr13Ni5MoNb 马氏体不锈钢在 高速飞船上的应用	354
9 家电、家具、厨房用含铌不锈钢	365
9.1 厨房、家电、热水器等应用的含铌铁素体 不锈钢	365
9.2 热水器用铁素体不锈钢 NSS445M2	375
9.3 改善抗腐蚀性铁素体不锈钢 NAR-FC-3 的开发	379
10 含铌抗菌不锈钢	396
10.1 抗菌不锈钢的应用与发展	396
10.2 抗菌机制的发现	397

10.3	含铜抗菌不锈钢的组织与抗菌性能	399
10.4	含银抗菌不锈钢的抗菌能力和力学性能	400
11	车辆用不锈钢 SUS301LNb	
	——铌微合金化改善耐晶间腐蚀	402
11.1	车辆用不锈钢的特性	402
11.2	SUS301LNb 不锈钢的特性	402
11.3	NAR301L 的实用效果	406
11.4	不锈钢车辆总经费	407
12	含铌不锈钢的二次加工应用	408
12.1	含铌不锈钢板的深冲加工性能	408
12.2	IF 型高 r 值铁素体不锈钢薄板的开发	412
12.3	高耐锈性、高冷锻性铁素体不锈钢 LAK51	414
附录 1	关于含铌不锈钢的热处理	418
附录 2	UNS 耐热、耐蚀 (含不锈钢)、阀门钢及铁基 超合金化学成分表 (ASTM DS56E, SAE HS- 1086 FEB93)	423

1 含铌不锈钢概况

第一个把铌 (Nb) 引进不锈钢世界的是德国克虏伯公司 Schafmeister, 他们于 1930 年在 V2A 钢中, 加入 (Nb + Ta), 改善了抗晶间腐蚀, 并取得专利权 (Ger643444 钢)。当时德国生产炸药采用 V2A 钢制化学装置, 产生了严重“晶间溃蚀”。V2A 的化学成分 0.2C-20Cr-7Ni 是典型的奥氏体不锈钢; 加 (Nb+Ta) 1% ~ 1.5%^①, 并加 Nb 稳定化的 V2A Nb, 是现代的 347 型钢的原型。

但是此后的 20 多年中, 由于 Nb 尚属稀缺的贵金属, 因此在我国一直是国库中的战略物质, 国际上也是如此。1960 年以前美国的第一个 Nb 在微合金化钢中的应用专利, 尚为奇特的新闻而无人问津。到 1965 年巴西的阿拉夏 CBMM 矿开始进行 Nb 的商业化生产, 才把 Nb 的“稀有”变成富有和易得的奇特金属炉料铌铁。

Nb 的早期应用受到脱 C 技术尚不成熟的阻碍。按 Nb/C 质量比不小于 7.7 计, 钢水中的 Nb (C, N) 的溶度积太低, 致使大量的 NbC (N) 液析或焊缝液析, 并由此产生其他种种缺陷, 使含 Nb 不锈钢的推广应用受阻。不锈钢实现工业大生产是从 20 世纪 50 年代开始, 先是美国、英国、德国, 后起之秀是日本。

中国开始研究 Nb 在钢中的应用是 20 世纪 70 年代, 本文作者及其同事, 从事国防军工课题, 研制高深冲加工用耐蚀 (主要是大气腐蚀)、耐疲劳、抗应变时效不锈钢, 研制成功的 00Cr15Ni6Nb (纳标牌号 F112) 获发明奖, 在航天工业中广泛

① 本书凡未经说明的百分含量均为质量分数。

应用。至今该钢在国际上仍属领先地位。

20 世纪 80 年代在航空工业，如直升机、斯贝发动机等，本文作者及其同事先后研制多个含 Nb 马氏体耐热不锈钢，均纳标实机应用。

因此，我国的 Nb 在不锈钢中的应用研究，起步较早，且卓有实效，但终因我国 Nb 资源开发难以商业化，而导致 Nb 的应用进展缓慢。

1.1 铌在不锈钢中的重要性

Nb 在不锈钢中的重要性表现在物理冶金多样性。Nb 在不锈钢中的任何存在形式都是可资利用的，并且表现出比任何别的元素都优异的性能。它贯穿于从冶炼到产品最终应用的全部历程中的各个环节。

1.1.1 铌在制钢工艺中的物理冶金

Nb 在制钢工艺中的物理冶金性能如下：

(1) 炼超低碳不锈钢加入少量 Nb 或 Nb + Ti 复合应用把钢中残 C 固定，比加深度脱 C，如延长 AOD 或 VOD 所需的时间要经济得多。加 Nb 或 Nb + Ti 复合的连铸坯，可减少坯料修磨费用，可获得比增加 Nb 合金化成本多得多的收益。

(2) 在热加工时 Nb 的沉淀物或固溶 Nb 都可用于热机械处理 (TMCP) 得到热加工态的优良的细化 (包括位错胞状组织、变形奥氏体、马氏体、亚结构等精细结构) 组织，这对各种不锈钢的生产有重要意义。

冷加工前的退火温度和冷加工后的固溶温度的调配应用表现出的 Nb 稳定化钢具有比 Ti 稳定化优越得多的晶粒细化组织。

(3) 在冷轧板带的调质轧制中，含 Nb 不锈钢的抗时效裂纹 (奥氏体不锈钢) 和抗皱性 (铁素体不锈钢) 都得到改善。

(4) 连续退火和连续酸洗或无氧化退火后的 Nb 不锈钢的表面质量和织构组织发展都比含 Ti 钢好。

(5) 在冷轧板的二次加工使用中, 含 Nb 奥氏体不锈钢中 Nb 的 Md30 系数为 68。含微量固溶 Nb 改变 Md30 都具有实际作用。

经过国际上半个多世纪的研究, Nb 在不锈钢中应用课题从深度和广度方面不断发展, 以适应商业用不锈钢各种各样的特性要求。在诸多常用元素 (Mo、Ti、Nb、V、Zr、Si、Mn、Al、Cu、B) 中, Nb 是物理冶金内容丰富的多功能元素, 是现代不锈钢的支柱元素之一, 也是任何现代不锈钢厂炉料处理不可缺少的元素。

从全世界 Nb 在钢铁工业中的应用情况看, 1980 年共用 Nb 14000t, 而不锈钢用 Nb 占 11%, 到 2000 年共用 Nb 23000t, 不锈钢用 Nb 仍占 11%, 绝对增加量近一倍, 见表 1.1.1。

表 1.1.1 从 1980~2000 年 Nb 在不同领域中的应用变化 (百分比, %)

年 份	Nb 总量 /kt	不锈钢	金属和 特殊合金	铁、钢 (不 锈钢除外)	管	结构	汽车
1980~	14000	11	5	6	58	10	10
2000	23000	11	10	8	25	17	29

日本是消耗铌铁最多的国家之一。不锈钢中用 Nb 的比率逐年增加 (见表 1.1.2), 1980 年为 5%, 1990 年为 25%, 1993 年为 30%。

表 1.1.2 日本铌铁消耗领域构成比

铌铁总消费量/t	2280	4126	4574	5051
钢管	56%	35%	27%	
中厚板	25%	35%	40%	
不锈钢	5%	25%	30%	
其他	5%	5%	3%	
年份	1980	1990	1993	1995

1.1.2 铌在不锈钢中的实用物理学

Nb 的一切物理冶金现象产生于 Nb 元素的基本特性。在元

素周期表上，Nb 是远离 Fe 位的过渡族元素，它与 Fe、Cr、Mn 有着差异悬殊的电子结构，在较深的 4d 电子层仍有缺位，属于强碳化物形成元素。其相对原子质量为 92.91，原子半径为 0.147nm，比 Fe 的大 15%。Nb 在不锈钢中的存在形式已发现的有固溶状态、碳氮化物、金属间化合物以及含氮化合物。研究人员根据它们各自不同的物理机制，扬长避短，充分发挥其优势，开发了性能各异的实用不锈钢。

A 固溶 Nb

Nb 对铁基合金而言，不论是室温还是高温下都有强烈的固溶强化作用。Nb 是铁素体不锈钢耐热钢最有效的提高高温屈服强度的元素，居 Mo、W、Hf、Ti、P、Si、Ta 之首。在铁素体不锈钢中应用 Nb 的钢种最多，在生产实际中用 Nb 量也最多，主要用于汽车排气系统、石油、发电以及家电、建筑等等。

Nb 在超纯铁素体不锈钢中提高抗点蚀电位，17Cr-0.4Nb 的电点蚀位与 17Cr-1Mo 相当，0.4Nb 相当于 3 个 Cr 当量。

Nb 在亚稳定奥氏体不锈钢中有强烈抑制形变马氏体转变的作用。

含 Nb 316 钢的固溶态 Nb 对辐照条件下产生的晶界偏析导致 Ni 和 Cr 在晶界上偏析，从而使斯皮诺塔分解；并产生氦气泡等现象。钢中 Nb 原子有抑制作用，能捕捉气泡，减少缺陷，抑制迁移，这些都源于 Nb 是大原子半径元素。因此 316 Nb 是核反应堆用抗肿胀的特殊性能钢。

B Nb 稳定化技术的发展

按照溶度积原理，Nb 在不锈钢中的溶解度决定于钢中的 C、N 含量和温度，其间的关系服从溶度积公式，并且与钢的基本成分 Cr、Ni、Mn、Mo 等有关。

(1) Nb 可稳定 C、N，提高不锈钢的各种形式的耐蚀性。Nb 稳定化技术随脱 C 技术的发展以及 N 在不锈钢的应用，不锈钢的稳定化技术也在发展。

众所周知，Ti 稳定化的 SUS321 钢，由于 TiN 的大块夹杂

物污染钢水，而影响板面质量，它的实用性已低于 Nb 稳定化钢。

(2) Nb 稳定化技术的发展。由于 NbC 的稳定性高于 TiC，所以 Nb 稳定化温度区间比 Ti 要宽得多，如 409Ti 在马弗炉的应用温度 300~550℃ 在长期使用时效后产生严重晶间腐蚀；而 Nb 或 Nb + Ti 双稳定化改善了这种腐蚀。

(3) 近年来，N 在奥氏体不锈钢中的应用得到推广，Nb、N 复合应用既提高了强度又改善了抗晶间腐蚀性能，可谓一举两得，因此开发了最优秀的、最受用户欢迎的 304NNb 钢和 301Nb 钢。

Nb、N 复合应用机制是在高温退火状态下形成 CrNbN (Z 相)，Z 相在晶内析出，而后在较低但高于敏化温度下形成的 Cr_{23}C_6 就在 Z 相上附生，改善了晶界耐蚀性。

(4) Nb (C, N) 沉淀在耐热不锈钢中的应用技术和耐蚀不锈钢不同，最主要差别在于耐热钢中应有足够的 C、N 含量，C、N 是沉淀强化资源。

无论是马氏体耐热不锈钢，还是奥氏体耐热不锈钢，Nb (C, N)、 Cr_{23}C_6 、VC 等的碳化物沉淀强化是必需的。随着在工作温度下的时效中析出的沉淀相，在蠕变过程中起钉扎位错阻止滑移的作用。细化的晶粒对蠕变行为有复杂的作用。最新研究指出，在 700℃ 以上，细晶粒的蠕变破断寿命低于粗晶的寿命，这一点已经定论；而 650℃ 以下没有确定的影响，蠕变强度只与固溶温度有关，与晶粒度无关。只就沉淀相对蠕变强度的影响而言，沉淀相的尺寸稳定性是重要的。最新研究指出 VC 在超过万小时以上，在高温下 VC 有沿晶界聚集长大现象，从而留下一个贫析出物的弱化带。蠕变强度迅速下降而破断，这个破断强度远低于按传统理论预测值。这一现象的出现，把抗蠕变强度研究推向新的台阶。现在研究内容为利用 W、N、B 固溶强化弱化带，Nb 的沉淀强化仍不失去作用，从而开发改性的新钢种。

(5) 利用 Nb (C, N) 的溶度积与 TMCP 相结合是生产细晶、防止粗晶和混晶的高强度高韧性钢铁材料的重要技术之一,也是生产高强度不锈钢、细晶粒耐高温水腐蚀的耐热不锈钢的主要技术。此技术还包括冷加工材退火后的晶粒控制。

这一技术的主要内容为再结晶控轧、非再结晶控轧,以及热加工后的冷却速度的控制。温度控制与 Nb (C, N) 溶度积必须相匹配,在加工温度下必须有足够数量的细小的析出物为形变热处理提供“钉扎物”,抑制再结晶后的晶粒长大。而溶质 Nb 对晶格重组、位错迁移有拖曳作用,对细化组织有利。这方面的研究工作很多,经验丰富,可资利用。

1.2 现代不锈钢产业特点

1.2.1 应用范围广

现代不锈钢的特点是在人民生活中的应用远重于产业应用。它是最“善解人意”、“与人为善”的材料,作为商业用不锈钢应用领域扩展到人们日常生活的各个方面,表 1.2.1 中所列内容是日本 1985 年的资料。

表 1.2.1 不锈钢应用领域

应用领域	建 筑	产业机械	电气, 机器	厨 房	煤气灶台	家用器具, 装修	
构成比	13.7	18.5	6.8	16.2	5.9	3.0	
铁素体 不锈钢 占比	15.8	6.8	38	52.4	66.1	45.3	
应用领域	浴 槽	汽 车	铁路车辆	自行 车	容 器	钢 管	全 部
构成比	1.5	11.2	1.1	1.4	2.0	5.0	100
铁素体 不锈钢 占比	5.6	60.4	2	79.2	57.4	20.4	34.2