

铌微合金化高性能结构钢

Niobium

Bearing
Structural Steels

冶金工业出版社

铌微合金化高性能结构钢

Niobium

Bearing
Structural Steels

北 京
冶金工业出版社
2011

内 容 简 介

本书精选了原定于 2009 年 1 月在巴西举办的“含铌结构钢国际研讨会”上的 31 篇文章。这些高水平的技术论文来自亚洲、北美、欧洲等先进钢铁企业、科研院所以及下游行业的设计和应用单位,精辟论述了结构钢的整体发展及其用于桥梁、建筑、造船、容器和集装箱等诸领域的品种钢研发和应用的最新进展。全书包含桥梁钢、建筑用钢、造船用钢、压力容器和集装箱用钢以及高附加值长材等七部分内容。

本书反映了当今全球范围内结构钢最新成果、发展现状和趋势,可供冶金行业的广大技术人员在研发高性能结构钢时参考,同时也可供高等院校的研究人员在从事相关领域的科研时参考。

图书在版编目(CIP)数据

铌微合金化高性能结构钢/中信微合金化技术中心编译.

—北京:冶金工业出版社,2011.10

ISBN 978-7-5024-5624-5

I. ①铌… II. ①中… III. ①合金钢:结构钢—文集
IV. ①TG142.41-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 144955 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 李 梅 于昕蕾 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-5624-5

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

2011 年 10 月第 1 版,2011 年 10 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;21 印张;541 千字;319 页

88.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

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(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

Editorial Committee

Steven G. Jansto

CBMM-Reference Metals Company Inc. , Pittsburgh (PA) , USA

Jitendra Patel

International Metallurgy Ltd. , England

编译委员会

- 主任委员 侯豁然(中信微合金化技术中心)
- 副主任委员 王伟哲 王厚昕(中信微合金化技术中心)
- 委员 张 伟 张永青 崔天成(中信微合金化技术中心)
- 尚成嘉 郭 晖(北京科技大学材料科学与工程学院)
- 刘清友 刘正东 贾书君(钢铁研究总院结构材料研究所)
- 陆匠心 温东辉(宝钢股份研究院)
- 张万山 王 华(鞍钢股份技术中心)
- 郭爱民 邹德辉(武汉钢铁(集团)公司研究院)
- 韦 明 刘利香(舞阳钢铁有限责任公司)
- 李永东 代云红 季晨曦(首钢技术研究院)
- 陈禄如(中国钢结构协会专家委员会)

译者的话

中信微合金化技术中心在 2006 年和 2007 年分别翻译出版了《汽车用铌微合金化钢板》和《石油天然气管道工程技术及微合金化钢》两本论文集，在传播推广铌微合金化技术和应用中起到很大作用；现在翻译出版的《铌微合金化高性能结构钢》，为全面介绍铌作为重要微合金化元素广泛应用于低合金高强度钢又迈出了重要一步。本书译自原本定于 2009 年 1 月在巴西组织召开的“含铌结构钢国际研讨会”的会议论文集，虽然会议因故取消，但是在本书各作者的大力支持下，论文集有幸继续出版，与世人见面。

本论文集收录了三十多篇高水平的有关结构钢的文章，来自亚洲、北美、欧洲等先进钢铁企业、科研院所以及下游行业的设计和应用单位的知名专家精辟论述了结构钢的整体发展及其用于桥梁、建筑、造船、容器和集装箱等诸领域的品种钢研发和应用的最新进展，显示出现代钢铁材料向更高强度、更高安全性、更优 HAZ 韧性趋势发展。与我们的生活息息相关的结构钢，俨然已成为铌微合金化机理研究和应用的最重要的实践者与受益者。

在巴西 CBMM RMC 公司和 Steven Jansto 先生的支持下，经 TMS 授权，中信微合金化技术中心得以组织编译冶金工业出版社出版的中文版《铌微合金化高性能结构钢》，可供中国的钢铁材料和相关工业领域的技术人员借鉴和参考。

相信中文译本《铌微合金化高性能结构钢》的出版必将会对我国低合金高强度钢的深化发展产生积极的推动作用，以适应当今社会、环境和资源可持续性发展的需求，在研发和生产大型船舶、海洋平台、大跨钢桥、高层建筑、近海风力发电基座等大型工程结构用钢方面发挥出铌微合金化技术责无旁贷的作用。

本书的翻译出版工作得到了宝钢、鞍钢、武钢、首钢、钢铁研究总院、北京科技大学以及冶金工业出版社的大力支持，在此对他们的辛勤工作表示衷心的感谢！尽管所有译校者认真负责，力求忠实原文准确翻译各篇论文，但由于水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

中信微合金化技术中心
中信金属有限公司
2011年8月

Preface

Structural steels represent well over half of the total global steel production and consumption. Structural steels include beams, plate, rods, bar, shapes and long products for a variety of applications. Niobium continues to provide designers and engineers with opportunities to improve structural steel properties at a value-added cost for wide-ranging properties needed for diverse applications. This publication is a collection of state-of-the-art structural steel papers from around the world that will advance the body of knowledge for niobium use. The niobium bearing structural steel findings presented by leading steel producers and end users/designers integrates the metallurgy, the steelmaking process and the application. With applications in diverse global market segments such as construction, ships, pressure vessels, containers, bridges, wind towers, power transmission components, reinforcing bars and many other uses, niobium continues to gain in popularity because of the properties that can be attained.

The global steel industry has accepted the challenge to cost effectively design and produce value added niobium bearing structural steels with superior toughness, weldability, seismic and fire resistance, corrosion resistance, controlled yield to strength ratios and higher strengths to meet demanding end user requirements. The need for higher quality steels in structures is compelling to help mitigate the effects of catastrophic earthquakes and other manmade and natural disasters. Niobium bearing structural steel development and commercialization also contributes to industry sustainability and a cleaner environment. Many of these high strength niobium bearing steels help designers to build more with less, saving scarce resources and producing less greenhouse gas emissions per structure.

This compilation of important papers by world-renown authors from our CBMM customer family and esteemed colleagues is offered in the spirit of advancing the structural steel sector through technology exchange, knowl-

edge transfer, and high-level metallurgical expertise to share the niobium solution. We at CBMM gratefully acknowledge the authors who contributed to make this book the niobium structural steel technology global reference text for the 21st century. We recognize the importance of the authors' contribution and appreciate the opportunity to publish their work to share this valuable metallurgical expertise with the world during a time of compelling need and rigorous demand.

Marcos Stuart-CBMM Director of Technology

序

结构钢占了全球钢产量和消费量的一半以上。结构钢应用广泛，产品包括型钢、板材、棒材、线材以及长材等多种类别。对于各种应用，铌不断为设计者和工程师们提供性能改善的结构钢，以增值的方式满足广泛的性能要求。本书收集了全球高水平的有关结构钢的论文，将会提升铌应用的知识体系。由领先的钢铁生产企业、用户/设计师所阐述的这些含铌结构钢的研究成果，涉及了物理冶金、炼钢工艺及应用。在全球诸多应用领域中，像建筑、压力容器、集装箱、桥梁、风力发电、输电结构件及钢筋等，铌因其能给钢材带来的优越性能而持续受到广泛欢迎。

全球钢铁工业已经接受了有效成本设计和生产具有附加值的含铌结构钢的挑战，这些钢具有优异的韧性、焊接性能、抗震性能和耐火性能、耐腐蚀性能、合理的屈强比控制和更高的强度，从而满足最终用户的需求。为减轻地震等自然的或人为的各种灾难性的危害，各种结构愈加需求更高质量的钢材。含铌结构钢的发展和商业化也有利于工业的可持续性发展和拥有一个更清洁的环境。众多的这些高强含铌钢帮助设计师实现用更少的材料建造更多的结构，节约了稀缺资源，减少了温室气体排放。

这些重要文章的知名作者来自我们 CBMM 客户大家庭和受人尊重的同事们。这些文章旨在通过技术交流、知识转化和高水平冶金专业知识分享铌应用方案。在这里，CBMM 由衷地感谢各位作者，正是由于这些作者才使本书成为 21 世纪含铌结构钢技术的全球典范。我们不得不承认各位作者所做出贡献的重要性，非常感谢各位作者同意发表他们的成果，在这迫切需要和严格要求的时代与全球分享这些宝贵的冶金专门知识。



含铌结构钢

21 世纪含铌结构钢	Steven G. Jansto	3
结构钢铌微合金化的历史展望	W. B. Morrison	19

桥 梁 钢

桥梁及建筑结构用钢的发展及应用	郭爱民 邹德辉	29
屈强比在钢结构设计中的作用	K. S. Sivakumaran	38
高强度 Nb 微合金化热轧结构钢卷（定尺板）	Nitin Amte, Gadadhar Ghosh, S. K. Tiwary	49
Nb 在 120mm 厚 TMCP 结构钢中的应用	P. Fluess, R. Valentin, V. Schwinn, F. Hanus	56

建筑用钢

控制在线热处理工艺中的组织开发建筑用含 Nb 结构钢	Shinichi Suzuki, Keiji Ueda, Shinji Mitao, Nobuo Shikanai, Takayuki Ito	67
大型结构梁用含铌微合金钢的物理冶金问题	R. D. K. Misra, T. Mannering, D. Panda, S. G. Jansto	77
含铌微合金耐火结构钢	John G. Speer, Ryan W. Regier, David K. Matlock, S. G. Jansto	88
宝钢建筑用耐火耐候钢研发进展	温东辉 屈朝霞 胡晓萍 宋凤明 李自刚	99
重大建筑钢结构工程用钢概况	陈禄如 刘志军	104
高性能低碳贝氏体钢的发展	尚成嘉 贺信莱 侯华兴	114
欧盟 HIPERC 计划：高性能经济型钢的概念在管线钢和 一般结构钢中的应用	Stephen Webster, Lyn Drewett	128
JSPL 公司含铌微合金钢的开发	AA Shaik, B Bhattacharya, S Ghosh, AK Mukherjee	140
高强度和超高强度钢的低合金设计	Rainer Grill 博士	151

造 船 板

结构钢中的铌	Shuichi Suzuki	169
--------------	----------------	-----

新日铁造船和基础设施用含 Nb 结构钢的新进展	Atsuhiko Yoshie, Jun Sasaki	191
康力斯 (Corus) 公司制板厂轧制高 Nb 钢的性能和经验	Bill Timms	202
近年一些英国造船合同中关于含铌结构钢的应用及其焊接研究	Norman A. McPherson	208
大型集装箱船用高强度钢板	Chang-Sun Lee, Sangho Kim, In-Shik Suh, Kyung-Keun Um, Ohjoon Kwon	216
采用 TMCP 工艺生产的 Nb 微合金钢在商业用船和 海洋平台上的研究与应用	Man-joo Huh, Jong-min Park, Jung-hyun Kim, Han-jin Cho, Ki-hyoung Han	224
420 ~ 550MPa 级大厚度海洋平台用钢的组织 and 力学性能	Hua Wang, Wanshan Zhang	228
一种大线能量焊接用高强度含铌船板钢的研制	Ching-Yuan Huang, Fon-Jen Chiu, Yeong-Tsuen Pan	238

压力容器和集装箱用钢

超超临界火电机组用铁素体锅炉钢的研究与应用	刘正东 程世长 杨 钢 千 勇	249
欧洲标准 EN13445 中对非燃式压力容器抵抗脆性断裂的设计	Peter Langenberg, Rolf Sandström	259
高性能压力容器用钢	J. Gottlieb, A. Kern, U. Schriever, G. Steinbeck	267

高附加值长材

生产微合金化钢的几点考虑	Bernhard Hoh	277
Nb 对不锈钢长型材研究开发的影响	Marc Mantel, Nicolas Renaudot, Nicolas Meyer, Muriel Veron, Olivier Geoffroy	286
Nb, V, Ti 对中碳钢锻造过程中微观结构变化的作用	Nina Fonstein	296

工程机械用钢

Nb 微合金化技术在预硬化工具钢厚板中的应用	Per Hansson	307
铌在舞钢建筑结构用宽厚钢板中的应用	常跃峰 韦 明 刘利香	314

含铌结构钢

21 世纪含铌结构钢	3
结构钢铌微合金化的历史展望	19

21 世纪含铌结构钢

Steven G. Jansto

CBMM-Reference Metals Company

1000 Old Pond Road, Bridgeville, PA 15017, USA

摘 要: 为提高 21 世纪建筑结构性能, 满足对材料性能日益增长的需求, 高附加值铌微合金钢被不断开发, 并得到广泛应用。含铌钢具有良好的韧性、抗断裂、耐火性和可焊性, 主要用于大中型型钢、锅炉、桥梁、集装箱、重型设备、长材、压力容器、造船、储油罐和风塔等。目前, 钢厂面临着开发低成本微合金钢的挑战, 满足用户对减薄、高强度、好的低温韧性的需求, 以抵抗建筑、压力容器、船舶领域中抗脆性破坏性能, 并提高抗震强度, 抗飓风强度, 建筑、桥梁和隧道防火性, 提高可焊性。铌往往是获得这些成果的关键元素。本文将对铌的市场机遇和成熟的冶炼、铸造、轧制高强钢的关键操作实践进行讨论。铌冶金过程主要是利用铌获得超细晶粒、均匀的显微组织与结构钢优越的力学性能。此外, 由于环境和资源可持续性日益受到关注, 采用先进的高强度含铌建筑结构用钢已经证明可以减少资源的浪费和降低碳排放。最近, 铌微合金化钢应用使产品设计更加高效, 减少了炼钢碳排放和能源消耗。

关键词: 大梁, 桥, 耐火, 高强钢, 铌, 压力容器, 抗震钢筋, 韧性

1 引言

铌赋予了结构钢独特的冶金属性, 使得含铌结构钢能很好地满足机械、腐蚀和高温等方面的严格要求。

含铌结构钢独特的冶金性能能够很好地满足机械、腐蚀和高温的严格要求。19 世纪 80 年代, 含铌结构钢生产受到限制应用。在过去的 20 年中, 钢厂、大学、研究机构以及 CBMM (巴西矿冶公司) 进行了大量的全球范围含铌结构钢研发活动, 取得了重大进展。含铌结构钢得到了广泛的应用。本文将重点讨论含铌结构钢市场的多样化和未来的潜力, 并对铌在冶炼、浇铸和轧制中的冶金工艺一贯制要求和成本效益最大化进行概述。

2 背景

对于许多先进的高强结构和土木工程应用来说, 含铌钢的应用可以减少整体材料的使用

并降低工程费用。尽管有不同的土木工程设计和多元化的产品应用于建筑市场, 但含铌钢也可以达到同样的效果。铌微合金钢钢种体系的广泛应用满足了不同最终用户的要求。目前, 结构钢需求特性有: (1) 改善低温韧性; (2) 更高屈服强度的小截面结构; (3) 高伸长率; (4) 改善可焊性, 减少施工时间; (5) 改善高温性能; (6) 提高断裂韧性; (7) 抗震性; (8) 提高抗疲劳性。含铌钢的大量应用带动了大型结构设计的多样化, 以及从梁到储油罐各种产品性能的提高。最近, 含铌钢在更高力学性能且要求严格的长材产品领域中, 获得较快应用, 如汽车悬挂部件、电力传输用微合金非调质钢部件、高碳钢钢轨、风塔支撑结构和抗震钢筋。

建筑用碳钢占世界粗钢总产量比例最高, 超过 60%。2009 年, 在 6.699 亿吨建筑钢板和长材中 10% 以上是含铌钢。2009 年主要建筑用钢比例如图 1 所示。

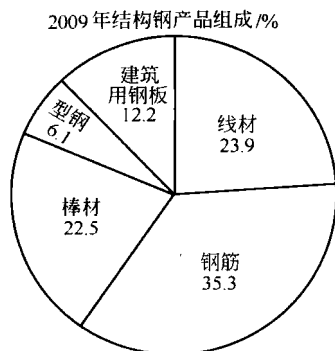


图1 全球长材和板材占总建筑用钢比例

目前铌在建筑用钢中主要用于建筑钢板和型钢,超过在线材、钢筋和商品条钢等长材中应用。然而,当前和未来的产品开发活动将致力于含铌高碳合金长材领域技术进步。例如,随着对建筑材料耐火性和抗震性要求的提高,开发了 S500 和 S600 Nb-Mo 钢筋并进行了工业化试验,并在预应力混凝土桥、楼房和隧道建筑上得到应用。含铌建筑用钢板、梁杆和棒材根据各自的定位,广泛应用于终端用户,并且进入到一些新的产品开发领域,如表 1 所示。

表 1 建筑领域最终用户含铌钢的应用和开发

建筑钢板	建筑型钢	棒 材	线 材	建筑钢管	钢 筋
风塔支撑件	轻型到巨型梁	弹簧钢	预应力高碳钢	脚手架结构	抗 震
桥	桥	锻造件	工 程	建筑物	耐 火
压力容器和集装箱	建筑物(自由塔)	汽车悬挂系统	冷锻钢	灌溉和公用事业	桥
铁路罐车和火车车厢	发电厂	渗碳齿轮和轴	高强螺栓	锅炉管	建筑物
船板/海洋平台	拖车导轨支架	淬火和回火	钢绞线	发电厂	隧 道
重型机械	轨 道				

全球结构钢的开发、研制、工业生产需要改变传统的冶金方法,目前结构钢和长材产品制造所面临的挑战与过去 10 年汽车钢生产者开发先进高强钢面临的挑战是相同的。同样,管线钢从 X-52 到 X-100 的发展演变,存在着类似的挑战:炼钢和加工工艺发展为高温轧制工艺(HTP),以满足对这些产品及产品质量的要求。很多这类技术可以转移到含铌结构钢的生产上。

在很多情况下,与高附加值汽车、管线和建筑钢类似,高附加值结构钢的成功生产需要炼钢厂和轧钢厂的不断实践。在冶炼、浇铸、板坯/矩形坯/方坯加热和轧制采取严格的过程控制可以提高产品性能。对高品质结构钢的生产需要采取不同的控制策略,这些策略包括:在转炉(BOF)或电炉(EAF)以及方坯/矩形坯/板坯铸机中降低残余元素、废钢分类和采用低硫、低磷、低碳方法,以及控制氮含量。这样的操作和冶金实践曾在长材结构用钢生产中被认为是不必要的。然而,与中厚板发展进程类似,新一代高附加值长材产品要求在操作实践中进行改进。

本着传播和分享铌技术持续创新的精神,CBMM(巴西矿冶公司)于 2005 年 12 月在 Araxa 举办汽车用钢研讨会和 2006 年 1 月管线用钢研讨会,在会议上,用户、研究机构和大学发表了许多含铌钢论文^[1,2]。本论文集收录含铌结构钢相关的内容,目的是:(1)汇编铌结构钢先进技术论文;(2)确定铌在高附加值结构钢中未来的发展;(3)提供全面的铌结构钢参考书。本书中呈现了大量的实践案例,这些案例突出显示了从工艺冶炼到物理冶炼中成功生产满足最终用户期望的结构钢产品。

3 21 世纪含铌结构钢的技术、挑战、变化和机遇

不同于汽车或者管线钢中碳的含量通常都低于 0.10%,很多结构钢板中碳含量都超过了 0.15%并接近上限 0.22%。全球仍有大量结构钢板和型钢生产中碳含量控制优势。其中原因很多,包括冶金工艺、轧机配置过程和加热炉效率和生产性能。有些工厂选择利用高碳含量提高强度,但牺牲了韧性、焊接性和其他产品

性能。工厂的加热和轧制工艺还不能适应低碳微合金的冶金操作要求,在这种情况下,板材产品没有充分发挥铌在降低碳含量同时又提高屈服强度、塑性、韧性和可焊性的优点。长材产品生产中,Nb 在高碳合金长材的加入量曾受到限制,但现在处于 Nb 含量和应用都在不断增加的过程,详见表 1。

3.1 结构钢板和型钢

50% 以上的结构钢板、型钢是碳含量在 0.15% ~ 0.22% 的中碳钢。不过现在一些工厂正在转变思路。在一些寻求生产高附加值结构钢板、梁部件的工厂,正在生产碳含量小于 0.10% 的低碳含铌微合金板材和长材。其优势不仅在于提高力学性能和应用性能,而且通过提高产能、减少不合格率以及提高产品质量减少了总体吨钢成本。

由于低碳铌微合金化良好的研究成果和开发进展,该技术在全世界范围内钢板、型钢以及轧制钢梁的商业化应用方面获得了巨大的成功,本文将介绍这方面取得的冶金成果。随着原料和能源消耗的不断增加,用以提高冶金性能的工艺参数,如加热温度、热轧后的冷却速度等在显著降低消耗方面也有很大作用。采用低碳低合金方法 (LCLA ©),即采用选定的快冷方法和更合适的加热温度控制可以进一步降低生产成本。

3.2 成本效益

成本效益分析系统可以协助钢材生产商采用最低的总成本实现 LCLA 钢材的商业化生产。系统中从原料到最终产品形成一个完整的供应链,诸如精确的原材料、替代原料的实际增量成本、产品结构变化、产能/质量指标、经营和间接成本等都是该系统的关键组成部分。具体用于某个生产厂时,该系统将依据其经营、生产和客户的要求做出经济解释。

图 2 是采用传统冷却工艺生产的高碳高合金 500MPa 钢板的成本效益分析结果。图 3 是成本效益分析系统显示的采用 LCLA 方法生产的含铌钢板的分析结果。

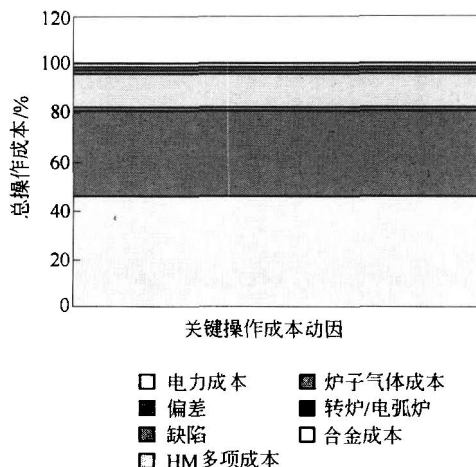


图2 采用传统冷却工艺生产高合金成分的 500MPa 含铌钢板
高合金组成:0.092% C, 0.048% Nb, 0.011% Ti, 1.80% Mn, 0.30% Cu, 0.24% Ni, 0.25% Cr, 0.16% Mo

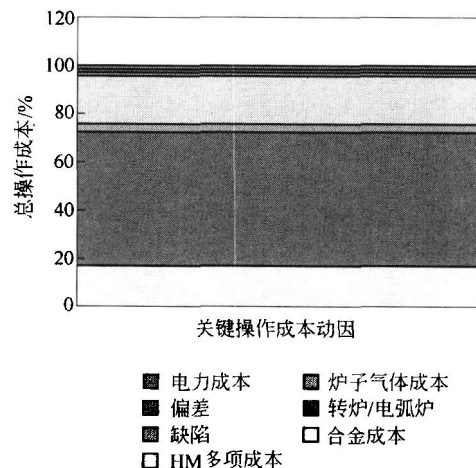


图3 采用快冷、低碳低合金成分的 500MPa 含铌钢板

LCLA 组成: 0.04% C, 0.10% Nb, 0.015% Ti, 1.50% Mn (加速冷却)

图2 中合金的成本占到总运营成本的 46%, 而图3 中采用 LCLA 方法生产时合金原料成本仅占 18%。

3.3 其他考虑

生产高强度和高韧性结构钢板以及部分长材时需要洁净的钢质,如硫含量不超过