

# 铌·高温应用

**Niobium**

High Temperature Applications

冶金工业出版社

# 铌 · 高温应用

## **Niobium**

---

### High Temperature Applications

Proceedings of the International Symposium on  
Niobium for High Temperature Applications  
held in Araxa, MG, Brazil  
December 1-3, 2003.

金永元 编  
大雕 · 卡内洛

北 京  
冶 金 工 业 出 版 社  
2005

## 内 容 简 介

铌的广泛应用有力推动着材料工业的发展,铌在高温材料中的应用更是备受关注。本书汇集了2003年12月在巴西召开的国际学术研讨会上发表的22篇论文,它们是高温合金领域的著名专家学者的最新研究成果。其中含铌高温合金和金属间化合物各占一半,包括拟在1300℃应用的铌基超高温材料等。内容涉及物理冶金、氧化腐蚀、合金制备、产品制造与应用等一系列材料科学研究和过程应用问题。

随着我国国民经济的快速发展,尤其是航空航天、能源工业、军工的发展,对高温合金在数量和质量上提出了更高的要求。本论文集提供的丰富资料,可供我国高温材料工作者以及企业、科研院所技术人员和大专院校师生学习、参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

铌·高温应用/中信微合金化技术中心编译. 北京:  
冶金工业出版社, 2005. 6

ISBN 7-5024-3749-5

I. 铌… II. 中… III. 铌基合金: 耐热合金  
—国际学术会议—文集 IV. TG146. 4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 043119 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 美术编辑 李 心

责任校对 侯 珏 李文彦 责任印制 牛晓波

北京市铁成印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2005 年 6 月第 1 版, 2005 年 6 月第 1 次印刷

850mm × 1168mm 1/32; 11.25 印张; 299 千字; 343 页; 1-2000 册

49.00 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)

# 编译委员会

名誉主任：陈国良（北京科技大学）

主任：付俊岩（中信微合金化技术中心）

副主任：谢锡善（北京科技大学）

王伟哲（中信微合金化技术中心）

委员：

侯豁然 杨雄飞 （中信微合金化技术中心）

胡尧和 董建新 林均品 （北京科技大学）

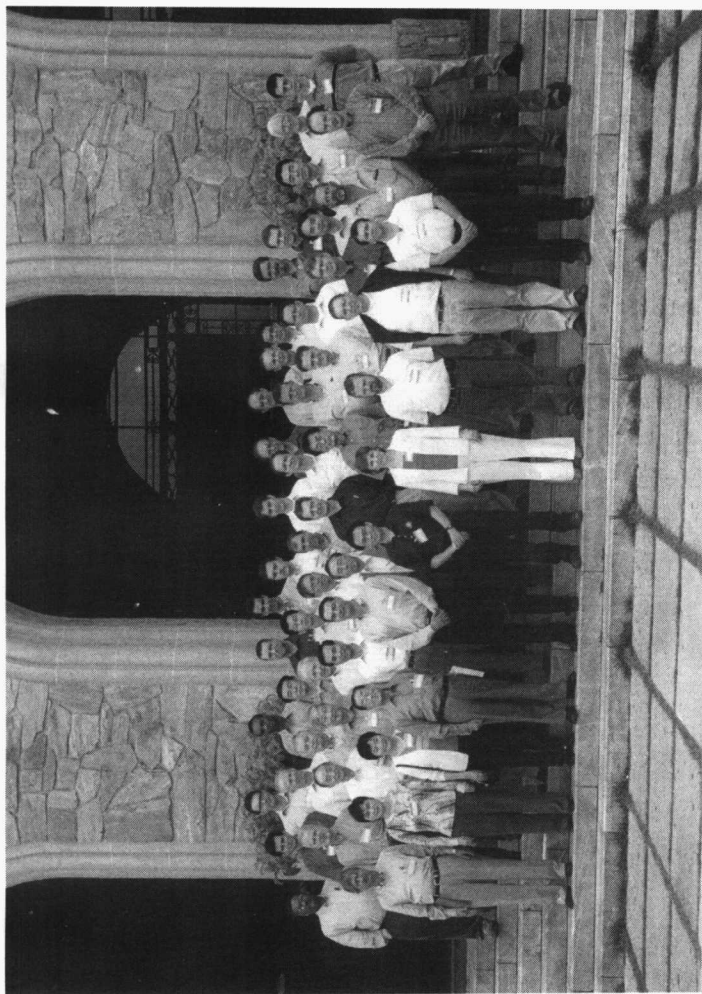
张继 李世琼 杜金辉 （北京钢铁研究总院）

韩雅芳 宋尽霞 曲士昱 （北京航空材料研究院）

刘宇 张玉春 （东北特殊钢集团公司）

谢蔚 王致政 （宝钢集团上海五钢公司）

王剑志 （长城特殊钢集团公司）



参加会议人员

## 译者的话

金属铌是在所有重要的高温材料中不可缺少的合金添加剂。20 世纪 40 年代, 铌首次被用于高温合金生产气轮机部件, 五六十年代美苏在空间的竞赛进一步推动了铌在高温材料的研究工作, 1959 年美国国际镍公司合金部冶金材料专家 H. L. Eiselsyein 发明的用于航空航天喷气发动机涡轮盘和叶片材料 718 合金, 成为航天航空工业不同型号火箭推进器的重要高温合金材料。当前, 全世界在高温材料生产中, 2004 年消耗真空级 Nb-Ni 合金和真空级 Nb-Fe 合金用量为 2100t, 其中真空级 Nb-Ni 合金为 1200t, 真空级 Nb-Fe 合金为 870t, 美国用量占 80%。

铌是高科技领域中重要的金属材料。铌的发现虽然已经有 200 年的历史, 但是作为工业材料使用只是最近 50 年的事情。这段时间里, 铌因为其本身特有的技术性能, 帮助人类解决了很多工程技术难题。这包括: 油气输送管线、汽车工业、高层建筑、航天飞机发动机、化工、电子通讯和核磁医疗设备等。随着铌的金属特性被进一步发掘, 未来铌作为重要的工程材料, 它的应用领域将更加广泛。铌是以希腊神话中旦塔勒斯神的女儿——眼泪女神尼俄伯名字命名的。今天, 经过全世界铌大家庭中广大冶金工作者的努力, 眼泪女神尼俄伯的眼泪已变成世人的喜悦之泪, 铌作为合金化元素, 已成为当代冶金和材料科学技术进步和成就的象征之一。

中信金属公司作为巴西 CBMM 公司铌产品在中国地区的独家代理公司, 从 1989 年起, 一直和 CBMM 公司合作,

共同致力于普及和推广铌科学技术的工作：1994 年设立中信“铌钢发展奖励基金”，2000 年成立 CITIC-CBMM 中信微合金化技术中心，设立“铌钢发展奖”、“研究生奖学金”、“优秀论文奖”，建立“铌微合金化技术网站”（[www.citicmetal.com.cn](http://www.citicmetal.com.cn)），出版《神奇的铌在钢中应用》技术系列丛书和《微合金化技术》杂志，2002 年又设立了“铌钢研究开发（R & D）基金”，2004 年在北京科技大学设立“铌钢联合实验室”，资助和指导国内含铌钢的研究开发工作。

在巴西 CBMM 公司 Tadeu Carneiro 博士和 Pascoal Bordignon 先生的支持下，中信微合金化技术中心继在冶金工业出版社出版 2001 年铌国际学术会议文集中译本《铌·科学与技术》之后，今又出版了 2003 年国际学术会议论文集中译本《铌·高温应用》，供从事高温材料的同志们在科研和生产工作中参考。我相信该论文集中译本的出版必将对我国高温材料领域的研究开发工作有一定的推动作用。

本译文集的翻译工作还得到了北京科技大学陈国良院士和谢锡善教授、钢铁研究总院高温合金所、北京航空材料研究院和上钢五厂的领导和朋友们的大力支持，在此表示衷心的感谢。

中信微合金化技术中心 付俊岩  
2005 年 5 月

## 译 序

周期表中有一类熔点很高的金属元素，称为难熔金属元素，其中在地球上储量较大的难熔金属有 Mo、W、Nb、Ta 等元素。金属铌（Nb）是 1801 年由英国化学家 Chatchett 发现的。世界上许多国家中，以巴西拥有最丰富的铌矿，巴西的铌产量约占世界的 84.5%，而巴西矿冶公司（CBMM）的铌产量为世界总产量的 73%，是主要的铌公司。

铌的广泛应用有力推动着材料工业的发展。除了铌基合金、钛铌低温超导合金等重要合金的发展和应用以外，铌作为合金元素，在合金钢、高温合金、金属间化合物合金中都得到广泛的应用。近年来，含较高铌量的高温合金和高温金属间化合物合金得到了广泛的研究和应用，镍基高温合金的铌合金化得到了  $\gamma'$  强化的高强度 Inconel 718 合金，高铌合金化明显提高了 TiAl 金属间化合物的高温强度和使用温度，还有正在发展使用温度更高的 Ni-Si 基金属间化合物合金和铌基超高温材料等。铌在高温材料中的应用得到了加倍重视。

巴西矿冶公司为总结和推动铌在高温材料工业中的应用，于 2003 年 12 月 1 ~ 3 日由现任 CBMM 公司技术部部长 Tadeu Carneiro 博士和美国金属间化合物著名专家 Yong-Won Kim 博士共同组织于巴西矿冶公司所在地 Arexa 召开了“铌·高温应用”的国际研讨会。会议请美、英、中、德、日、奥等 6 个国家 20 多位专家做了特邀报告。世界三大航空公司 GE、PWA 和 Rolls-Royce 都分别有专家参加会议。我国专家亦应邀在会上做了“高铌含量的高温钛铝合金的进展”和“中国含铌高

温合金的研究和发展”两个报告。

会议论文由美国矿物·金属·材料学会 (TMS) 出版了论文集, 收集了 22 篇论文, 其中高温合金和金属间化合物约各占一半, 包括拟在 1300℃ 应用的铌基超高温材料等。文集内容涉及物理冶金、氧化腐蚀、合金制备, 甚至产品制造和应用等一系列材料科学研究和工程应用问题。

本文集由中信金属公司组织翻译, 提供的资料可供我国高温材料工作者和工厂、研究院所的技术人员以及大专院校师生学习参考。

陈国良 谢锡善

2005 年 4 月

## 序

在高温材料的演变过程中，铌一直是一个极为重要的因素。铌基合金在 20 世纪五六十年代的这一顶峰时期被详尽地研究过。而且 Nb-1% Zr 和 C-103 (Nb - 10% Hf-1% Ti) 这两种合金的使用是这项研究的重要成果。之后，随着重要的镍基高温合金 Inconel 718 在 1959 年的发展，铌在高温合金工业又有了其他重要的作用。Inconel 718 这种合金最终成为航空燃气轮机发动机制造的关键。

在开发高温条件下使用的新材料时，尤其是那些与航天技术相关材料的开发，在工业上必须进行性能的优化，例如高温强度、蠕变强度、环境稳定性以及室温韧性。此外，在开发新型合金以便应用时，材料的可加工性能、密度、成本及材料的可利用性这些性质也是至关重要的。

多年以来，受高温应用的推动，出现了亟待解决的总体目标，在实现这些目标时，铌被认为是对其有贡献的一种元素。无论是作为一种合金元素被用于改善某种特殊性能，还是作为一种在高温下使用的金属，铌总被当作重要的选择。这不仅是由它的总体性能，而且是因为铌是密度最低的难熔金属。

2003 年 12 月，在巴西 MGaraxá 举办的“铌·高温应用”国际学术会议上发表了关于三个主要合金族：铌镍基高温合金、铌基合金及含铌  $\gamma$ -TiAl 合金的 22 篇演讲。代表汽车及飞机发动机工业整个供应链的研究者和专家聚集一堂，就每一个合金族的最新研究结果和发展计划进行了介绍与讨论，而且在此期间他们都作了报告。

# 目 录

## □ 镍基高温合金和铌基合金

|                                                |       |
|------------------------------------------------|-------|
| 用于先进工业燃气轮机 (IGT) 的镍基高温合金                       |       |
| 材料技术 .....                                     | (3)   |
| S. J. Balsone                                  |       |
| 含 Nb 变形高温合金 (718 + 100°F) 的进展 .....            | (15)  |
| R. L. Kennedy, W. -D. Cao, T. D. Bayha         |       |
| and R. Jeniski                                 |       |
| 铌对镍基合金耐腐蚀性能的影响 .....                           | (30)  |
| G. D. Smith and N. C. Eisinger                 |       |
| 中国含铌高温合金的研究和发展 .....                           | (45)  |
| X. Xie                                         |       |
| 超高温铌-硅化物基复合材料 .....                            | (70)  |
| B. P. Bewlay, M. R. Jackson, P. R. Subramanian |       |
| and J. J. Lewandowski                          |       |
| Nb-Ti-Si 基合金的相变和抗氧化 .....                      | (84)  |
| E. S. K. Menon                                 |       |
| Nb 合金和复合材料的断裂与疲劳 .....                         | (100) |
| J. J. Lewandowski                              |       |
| 高温用新型铌基合金 .....                                | (120) |
| R. Tanaka, A. Kasama, M. Fujikura, I. Iwanaga, |       |
| H. Tanaka and Y. Matsumura                     |       |

|                                                                                                       |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 高温铌合金的 Re 基扩散障涂层 .....                                                                                | (134) |
| T. Narita, M. Fukumoto, Y. Matsumura, S. Hayashi,<br>A. Kasama, I. Iwanaga and R. Tanaka              |       |
| 计算机模拟设计的用于 1300℃ 的铌合金研究 .....                                                                         | (152) |
| G. B. Olson, A. J. Freeman, P. W. Voorhees,<br>G. Ghosh, J. Perepezko, M. Eberhart and<br>C. Woodward |       |

## □ $\gamma$ -TiAl 合金

|                                                                                   |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 铌在 $\gamma$ -TiAl 合金发展进程中的作用 .....                                                | (167) |
| Y. -W. Kim                                                                        |       |
| 提高 TiAl 合金高温性能的进展 .....                                                           | (186) |
| F. Appel, J. D. H. Paul, M. Oehring,<br>C. Buque, Ch. Klinkenberg and T. Carneiro |       |
| 高铌含量的高温钛铝合金的进展 .....                                                              | (203) |
| G. Chen, J. Lin, X. Song, Y. Wang<br>and Y. Ren                                   |       |
| 运输用变形 $\gamma$ -TiAl 基合金部件生产的几个问题 .....                                           | (219) |
| H. Kestler, N. Eberhardt and S. Knippscheer                                       |       |
| 低 Nb 和高 Nb 铸造 TiAl 基合金晶粒细化 and 性能<br>评估 .....                                     | (238) |
| X. Wu, D. Hu and M. H. Loretto                                                    |       |
| 航空发动机用高铌 TiAl 合金的潜力 .....                                                         | (250) |
| D. Roth-Fagaraseanu                                                               |       |
| 载人汽车增压器用热强高铌铸造 $\gamma$ -TiAl 合金 .....                                            | (262) |
| T. Tetsui                                                                         |       |
| 粉末冶金 $\gamma$ -TiAl 化合物合金的加工工艺、微观<br>组织和力学性能 .....                                | (273) |
| C. F. Yolton, U. Habel and Y. -W. Kim                                             |       |

|                                                                    |       |
|--------------------------------------------------------------------|-------|
| 载入汽车用铸造 TiAl 排气阀的生产 .....                                          | (289) |
| M. Blum, H. Franz                                                  |       |
| 高 Nb 含量的 $\gamma$ -TiAl 合金的环境与热防护 .....                            | (300) |
| C. Leyens and R. Braun                                             |       |
| Nb 对全片层结构 $\gamma$ -TiAl 单晶合金片层位向控制<br>的影响 .....                   | (316) |
| M. Takeyama, Y. Yamamoto, M. Nagaki,<br>K. Hashimoto and T. Matsuo |       |
| 定向凝固高 Nb 含量 TiAl 合金片层组织位向调整 .....                                  | (332) |
| H. Inui, Y. Omiya and D. R. Johnson                                |       |



## 镍基高温合金和铌基合金

*NIEJI GAOWEN HEJIN HE NIJI HEJIN*

用于先进工业燃气轮机 (IGT) 的镍基高温

合金材料技术

含 Nb 变形高温合金 ( $718 + 100^{\circ}\text{F}$ ) 的进展

铌对镍基合金耐腐蚀性能的影响

中国含铌高温合金的研究和发展

超高温铌-硅化物基复合材料

Nb-Ti-Si 基合金的相变和抗氧化

Nb 合金和复合材料的断裂与疲劳

高温用新型铌基合金

高温铌合金的 Re 基扩散障涂层

计算机模拟设计的用于  $1300^{\circ}\text{C}$  的铌合金研究



# 用于先进工业燃气轮机(IGT) 的镍基高温合金材料技术

Stephen J. Balsone

GE Gas Turbines, LLC

P. O. Box 648; Greenville, SC 29602-0648, USA

**关键词:** 镍基, 高温合金, 燃气轮机, 熔模铸造, 钢锭熔炼, 锻造

**摘 要:** 工业发电和航空发动机的所有燃气轮机的燃烧温度在过去的 30 年里有所提高。最近, 航空发动机的温度提高速率已经变慢, 但工业燃气轮机 (IGT) 的温度提高速率并未变慢。因此这两类燃气轮机的材料温度性能要求有所重合。多年来, 军用和商用航空发动机的高性能要求推动了先进材料和工艺的发展。由于功率、效率和可靠性的要求持续提高, 目前许多这一类的高温材料正用于 IGT。已经开发成功定向凝固和单晶镍基高温合金用于熔模铸造的高温燃气通道部件, 并将尺寸增大到 IGT 部件所需的零件尺寸, 但是在可生产性、缺陷公差和维修等方面仍然存在重大挑战。在钢锭熔炼、浇铸、锻造和检验方面取得重大进展后, 变形镍基高温合金, 例如 706 合金和 718 合金, 正用于 IGT 转子结构中。本文将讨论镍基高温合金在 IGT 中的应用, 特别强调生产大型 IGT 高温燃气通道及转子部件所需的技术发展。从航空发动机大小的零部件扩大到大型 IGT 尺寸的零部件的过程, 引起了独特的材料发展和工艺挑战。

## 1 引言

自从 20 世纪 70 年代初以来, 为电站生产的大型、陆地的

IGT 的功率和效率都持续提高。这种提高很大部分归功于高温结构材料的引入。在过去的 30 年里，这类先进材料的使用导致燃气轮机的燃烧温度从 982℃ (1800 ℉) 提高到 1427℃ (2600 ℉) 以上。燃烧温度每增加 10℃ (50 ℉)，燃气轮机联合循环的效率提高大约 1%。效率提高 1%，对一个打算以最低成本给用户输送电力的电站生产商而言，意味着节约了数百万美元。

镍基高温合金是为高温、高强度结构应用而选择的合金，已经形成供 IGT 高温燃气通道部件，如涡轮叶片、喷嘴和壳体的标准。许多这一类熔模铸造镍基高温合金来自于为商用和军用航空燃气轮机而开发的航空发动机合金。此外，高强度变形镍基高温合金，例如 706 合金和 718 合金，已经取代 GE IGT 转子中应用的合金钢。20 世纪 80 年代后期，706 合金作为 IGT 镍基高温合金锻件首先得到生产应用。1995 年引入第一个 718 合金的 IGT 锻件。

除了熔模铸造和变形高温合金之外，为 IGT 应用的其他高温材料也处于生产或正在开发的阶段。高温涂层，例如抗氧化和抗腐蚀的金属涂层，以及热防护的陶瓷涂层，正在形成用于高温燃气通道和燃烧室金属构件的标准。陶瓷基体复合材料正在开发应用于一些高温部件，例如涡轮壳体、燃烧室衬里和涡轮喷嘴。本文将集中介绍为先进的 IGT 应用而开发和引入的镍基高温合金技术。

## 2 镍基高温合金材料及工艺的最新进展

### 2.1 叶翼应用

过去几十年里，GE 公司先进的叶翼合金的开发是从多晶的镍基高温合金，如 U500、U700 和 738 合金发展，然后再是定向凝固的 (DS) GTD-111™。GE 公司正在生产使用的最先进的 DS 镍基高温合金是 GTD-444™，它是用于航空发动机的单晶 (SX)