

中国工程科技论坛

钛冶金及海绵钛发展

● 中國工程院

高等教育出版社

中国工程科技论坛

钛冶金及海绵钛发展

Taiyejin Ji Haimiantai Fazhan

高等教育出版社·北京

内容简介

本书是中国工程院工程科技论坛系列丛书之一。书中主要介绍钛冶金和钛加工的最新进展、难点和未来发展方向,重点对钛渣冶炼、海绵钛生产技术现状和存在的问题及发展方向、新的钛冶金方法、钛冶金加工技术进行阐述。本次论坛汇集了国内知名专家学者、企业人士,对我国钛产业发展的重点、难点进行了深入探讨,指明了钛产业的未来发展方向,为我国钛产业发展提出了科学而有效的建议。

本书可供从事钛及钛合金生产和研究的科研和工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

钛冶金及海绵钛发展 / 中国工程院编著. — 北京 : 高等教育出版社, 2015.9

(中国工程科技论坛)

ISBN 978-7-04-043785-0

I. ① 钛… II. ① 中… III. ① 钛-轻金属冶金-研究
IV. ① TF823

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 213036 号

总 策 划 樊代明

策划编辑 王国祥 黄慧靖

责任编辑 沈晓晶

封面设计 顾 斌

责任印制 韩 刚

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京汇林印务有限公司
开 本 787 mm × 1092 mm
印 张 11.25
字 数 230 千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
版 次 2015 年 9 月第 1 版
印 次 2015 年 9 月第 1 次印刷
定 价 60.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 43785-00

编辑委员会

主任：周 廉 干 勇 张 懿

副主任：江东亮 何季麟 周克崧 丁文江

委员(按拼音字母排序)：

王向东 常 辉 左家和 程兴德 缪辉俊

张延安 赵永庆 李献民 齐 涛 崔雅秋

陈志强 计 波 张履国 李士凯

材料编撰委员：贾豫冬 朱宏康 谷 宾

目 录

第一部分 综述

综述	3
----------	---

第二部分 主题报告及报告人简介

中国钛工业现状及发展趋势	王向东 等	11
钛合金低成本化技术发展思考	常 辉	21
攀枝花钛渣冶炼技术进展	缪辉俊 等	22
中国钛沸腾氯化炉大型化之路	温旺光	38
铝热还原直接制备钛基合金	张廷安 等	67
Ti14 合金半固态变形行为及可锻性研究	赵永庆 等	80
钛及钛合金材料应用经济性分析	李献民 等	93
钒钛磁铁矿综合利用与钛白清洁生产新技术进展	齐 涛 等	105
钛合金产业链介绍及七二五所钛产业发展	李士凯	130
试谈我国海绵钛生产工艺的优化途径——与业内同行商榷	阎守义	131
浅谈如何保证海绵钛产品质量的稳定	张金宝 等	144
650 ℃ 固溶强化型高温钛合金的探索研究	肖文龙 等	150
国内外钛冶金技术进展	谷宾 等	159
附录 主要参会人员名单		171
后记		173

第一部分

综 述

综 述

一、论坛背景

2014年11月16-17日,由中国工程院主办,中国工程院化工、冶金与材料工程学部和中国钛协会承办的第192场钛冶金工程科技论坛在苏州雅都酒店召开。

中国工程院周廉院士、干勇院士、张懿院士以及中国有色金属工业协会钛锆铪分会王向东秘书长担任论坛主席。

我国钛冶金、钛加工技术近10年来有了长足的进步,在钛的资源综合利用开发中,经过长期不懈的研究和探索,积累了许多经验。本次论坛就我国钛冶金、钛加工等领域的热点、难点、重点问题进行研讨,对促进我国钛工业的发展具有重要意义。

西北有色金属研究院周廉院士、钢铁研究总院干勇院士、中国科学院上海硅酸盐研究所江东亮院士、广州有色金属研究院周克崧院士、上海交通大学丁文江院士、宁夏东方有色金属集团公司何季麟院士以及来自国内的40余家高校、科研单位、企业的近100多名代表出席了论坛。

中国工程院周廉院士致开幕词。他表示钛冶金对航空、陆地、海洋等装备具有重要意义,尤其是钛在海洋中的应用有待提高,特别是在海洋中的耐腐蚀和防污损等方面的问题急需解决;除此之外,在钛质量提高、成本降低、扩大应用等方面还需要进一步研究。本次论坛专家、学者云集,规模宏大,将有助于钛冶金及加工技术的创新和发展。中国工程院干勇院士介绍了钛合金在轻合金中的重要地位。他表示如何根据中国自己的钛矿石特点,进行钛合金冶炼方法的改进很重要;钛合金的市场前景应打开,并扩大其应用量,这将有助于钛合金在航空航天、核电、海洋、石化、生物医药等方面的全面应用;如何寻找一种战略方法来使用好钛资源,将对钛工业的蓬勃发展具有重要意义。

二、论坛成果总结

(一) 为国家制定钛产业政策及发展规划献计献策

在论坛报告中,中国有色金属工业协会钛锆铪分会王向东秘书长作了“中国

钛工业现状及发展趋势”的报告,重点从中国钛工业的现状、存在问题及发展趋势三个方面做了介绍。根据报告内容,参会专家从钛工业现状出发,为钛工业未来发展规划献计献策。周廉院士指出:在目前的情况下,可以建立若干个钛合金研发中心,利用其平台建设评估一些项目,以支持项目的实现投产,且平台可以分为海绵钛的生产、钛合金的加工、钛合金的基础应用等方向;科研院所可以与产业合作成立,人员方面可从国外引进先进人才;另外在像航空航天、海洋、生物等高端应用方面,要提高钛合金的品质,而像化工等行业也可使用中端钛合金。

江东亮院士建议我国应加强科研院所与企业的合作,比如日本在大型项目上,经常企业、大学、研究所三家合作进行攻关,成果出来之后交给企业完成生产化,我国可以效仿这种模式,对当前合作体制改革创新,提高效率;若想达到高端技术的进步,分工更需精细。同时,这样也会避免目前一些研究所开始办企业,而企业开始办研究所,造成的资源浪费。

何季麟院士指出推广钛及钛合金应用首先要降低海绵钛生产成本与后续的加工成本;建议整个钛研究分成冶炼部分、加工部分、改性部分等,搭建起来几个协同平台,切实发挥研究院所的职能。

周克崧院士提议建立相应产-学-研平台。首先要实现各方面的突破,就要建设相应的平台,以此来调动相关领域的专业人员;充分利用人力资源,比如一些老专家,可以通过平台对一些技术进行评估,或者通过平台建立一些课题,让国家给予一定的支持,以此来节省大量的人力、物力。

丁文江院士提出了三点建议:第一,国家在处理这些问题时,资源配置的体系有缺陷,像企业是创新的主体,而企业是在找政府办事,而不是去找科研单位,找政府是为了拿资源,拿到资源以解决自己眼前的问题,所以资源在配置的时候就往企业倾斜;第二,当前的产-学-研机制中,企业、研究院不应各自做事,比如一些科研单位有了成果之后,自己搞产业化,我国大型企业自成体系搞研发,而世界上的其他大型企业一般与一些民营的研发机构或创新型中小企业相结合,院校教师可以给小企业提供技术以获得价值,小企业在为大企业服务中获得利润,而大企业以批量化、产业化来体现价值,而目前我国的大型企业什么都是自己独自完成,所以我国的产-学-研体系的建立还有很长的路要走;第三,针对钛产业而言可以搞一些平台,关键是靠自己的能力创新设计,不能一味模仿,要拥有自主的产权。

干勇院士表示目前国家新材料的重大专项在启动,习近平总书记曾经表示在原有的16个专项的基础上,为气候环境、能源、生命健康、智能制造等四个方面,再选一些重大项目或重大工程,并成立领导小组,把原来的新材料重大专项变成重大工程,钛合金产业若想抓住发展战略机遇,必须解决技术路线如何选

择、要攻破哪些难点、产-学-研机制的重点在哪里等问题。重大专项具有集中各界力量,国家领导牵头,引出地方或社会融资等优势。目前重点支持7类材料,像高温合金、碳素纤维、特种合金等基础前沿材料或大规模工业化应用的材料,钛合金发展战略是目前应注重的,有了战略才能有规划,然后有规划才有计划,有了计划才能去实施,这是一个逐步实现的过程。建议钛产业成立一个联合的平台,包括设计人员、装备人员、材料人员、工艺人员,以促进钛材料的应用,包括舰船、海洋工程、海水淡化等的应用,建立一套标准,建成示范工程产业;最后实现关键技术的突破,形成一个重要的材料支撑体系。

(二) 推进钛冶金和钛加工新理论、新技术的发展

本论坛从经济性角度对钛及钛合金材料的应用提出了肯定。宝鸡钛业股份有限公司李献民副院长以“钛及钛合金材料应用经济性分析”为题,从钛合金材料的优异性能、钛合金与其他材料原料价格变化分析、钛及钛合金材料应用经济性分析、钛及钛合金降低生产成本关键技术分析等6个方面,对钛合金的应用经济性做了全面阐述。报告中指出从全寿命的角度考虑,钛及钛合金投资成本低于不锈钢和其他金属材料;我国钛产业高速发展,具有充裕的产能、产量,而且钛材价格处于历史低位,保证了其经济性;技术的提升、新装备的引进建设,使得产品品质优化、规格大型化,都为钛合金的推广应用提供了充分的条件。因此今后的工作重点为一方面致力于技术进一步提高钛材的品质、降低成本;另一方面和用户一起深化加强钛合金的应用研究工作。

本论坛还对钛合金产业链进行了详细介绍,并介绍了相关院所钛产业的发展。中国船舶重工集团公司第七二五研究所李世凯主任以“钛合金产业链介绍及七二五所钛产业发展”为题,从钛产业链中钛矿产资源、海绵钛生产、铸锭的熔炼,以及七二五所钛产业发展等多个方面作了报告。报告中指出建立钛合金产业链具有的优势,利于上游产业的健康发展;利于钛合金产品质量和技术的提升,根据最终产品质量对上游原材料的特殊要求,在全产业链范围内对相应生产环节的技术或设备进行调整或改进,以满足最终产品质量要求。利于控制钛合金产品成本,缩短供货周期。

除此之外,本次论坛对钛合金相关具体技术进行了介绍。

中国科学院过程工程研究所齐涛所长以“钒钛磁铁矿综合利用与钛白清洁生产新技术进展”为题,从钛资源高效综合利用的背景与技术现状、钒钛磁铁矿利用总体思路、高铬型钒钛磁铁矿选择性还原/磁选-钛渣制备技术、超贫钒钛磁铁矿湿法新流程、熔盐法钛白清洁生产新技术进展等8个方面,对钛资源高效综合利用与清洁生产新技术做了全面的阐述。报告最后指出钒钛磁铁矿的开发利

用需要集成社会优势技术资源,走清洁高效综合利用的新途径,研发针对资源特色的清洁生产新技术,大幅度提高资源利用率,源头减排,走创新驱动之路。这对钒钛磁铁矿未来的发展具有重要指导意义。

鞍钢集团钒钛(钢铁)研究院缪辉俊研究员以“攀枝花钛渣冶炼技术进展”为题,从攀西钛资源的特点、攀西钛渣冶炼技术特点与难点、攀西钛渣冶炼技术的进展以及对未来的展望四个方面,对攀枝花的钛渣冶炼情况做了全面的阐述。报告指出钛渣冶炼是攀西钛资源发展的核心,同时指出了攀枝花钛渣冶炼的困难,为未来钛渣冶炼技术核心指明了方向。

广州有色金属研究院温旺光以“中国钛沸腾氯化炉大型化之路”为题,从国内外钛沸腾氯化技术概述、无筛板沸腾氯化新技术的研究与工程化、中国钛沸腾氯化炉大型化之路等7个方面,对钛沸腾氯化技术进行了讲解。

沈阳铝镁设计研究院阎守义教授以“试谈我国海绵钛生产工艺的优化途径——与业内同行商榷”为题,从钛渣生产、氯化生产、熔盐氯化等方面,对中国海绵钛生产中的问题做了概况性分析。报告指出我国在海绵钛生产各个环节上均落后于国外先进技术,在海绵钛生产大发展时期,大规模地引进了国外技术。因此如何使这些引进技术与国内技术对接、如何使用本土原料与引进装备对接,还需要我们做艰难而细致的工作。

朝阳金达钛业股份有限公司张金宝部长以“浅谈如何保证海绵钛产品质量的稳定”为题,从海绵钛质量对钛合金铸锭质量有遗传性、质量控制的工艺等方面,对海绵钛的质量稳定性进行了分析。报告指出我国对海绵钛中的杂质元素对钛合金性能和质量方面的影响研究不多,特别钛合金中微合金化机制、组织稳定性和力学性能间的关系还不清楚。这需要我们多做这方面的基础研究,积累更多的数据和理论,为未来钛合金的应用提供参考。

东北大学豆志河教授以“铝热还原直接制备钛基合金”为题,从研究背景、铝热还原制备钛基合金存在的问题、铝热还原制备钛基合金的研究进展三个方面,对钛及钛合金的短流程制备做了深入阐述。报告对铝热法高钛铁合金中氧、夹杂物赋存状态及分布规律, TiO_2 铝热还原的热力学规律及脱氧平衡极限, TiO_2 铝热还原的动力学规律,强化铝热还原直接制备钛基合金(高钛铁、钛铝)的新方法做了重点介绍,这对于开发钛及钛合金短流程清洁制备新理论、新方法具有重要意义。

除此之外,钛合金加工技术作为一个重要方面,也有专家做了介绍。南京工业大学常辉教授以“钛合金低成本化技术发展思考”为题,从钛合金制备技术、钛合金加工技术、钛合金零部件近净成形技术三个方面做了介绍,其中钛合金制备技术重点介绍了 ITP 的 Armstrong 工艺、EMR 工艺,钛合金加工技术介绍

了一次熔炼直接加工技术、Beta 锻造技术、钛合金连铸/连轧技术、钛合金零部件近净成形技术精密铸造技术、粉末冶金及近净成形、增材制造技术-激光铺粉、增材制造技术-电子束送丝、增材制造技术-电子束铺粉等,为钛合金制备和加工成本降低提供了切实可行的思路。

长安大学陈永楠教授以“典型钛合金半固态加工技术”为题,从降低钛合金成本的途径之一——钛合金半固态加工的实验过程、研究成果、分析与结果等方面,对钛合金半固态加工技术做了全面阐述。

(三) 促进钛合金领域学术界与企业界的合作交流

本次论坛的参会人员中有中国工程院院士 6 人,分别为西北有色金属研究院周廉院士、钢铁研究总院干勇院士、中国科学院上海硅酸盐研究所江东亮院士、广州有色金属研究院周克崧院士、上海交通大学丁文江院士、宁夏东方有色金属集团公司何季麟院士,除此之外,还有来自高校(北京航空航天大学、南京工业大学、东北大学)、科研院所(西北有色金属研究院、钢铁研究总院、广州有色金属研究院、中国科学院过程工程研究所、中国船舶重工集团公司第七二五研究所、沈阳铝镁设计研究院、四川省攀枝花市科技发展战略研究所)、企业(鞍钢、宝鸡钛业股份有限公司、朝阳金达钛业股份有限公司、宝钢特钢有限公司、中铝沈阳有色金属加工有限公司、遵义钛业股份有限公司)以及学会的代表,这次会议为从事钛生产和研究的代表提供了交流的平台,给年轻的从业人员提供了很好的学习机会,对钛冶金和钛加工的重点和难点做了重点讨论,为钛产业今后发展指明了方向。

(四) 扩大中国工程科技论坛影响

中国工程科技论坛是我国工程科技交流的重要平台,在中国工程院的支持下,本次论坛顺利召开,并受到行业内众多专家、学者支持,影响面十分广泛。本次论坛就我国钛冶金、钛加工等领域的热点、难点、重点问题进行研讨,从我国钛冶金、钛加工现状出发,从目前存在的问题入手,深入探讨了目前问题的解决方法,明确了未来的发展方向及目标,对中国钛产业的蓬勃发展和战略转型具有重要意义。

第二部分

主题报告及报告人简介

中国钛工业现状及发展趋势

王向东 逯福生 贾 翊 郝 斌

中国有色金属工业协会钛锆铪分会

摘要:本文概述了 21 世纪以来中国钛工业在产能、产量、装备上的发展现状及技术进步。分析了中国钛工业的不足,提出了近期的发展目标。

一、中国钛工业现状

钛及其合金具有比强度高、耐腐蚀、高低温性能好、无磁性等一系列突出优点,而在航空航天、海洋工程、医疗、化工、电力、冶金、体育休闲等行业有广泛的应用。

中国钛工业是在老一辈党和国家领导人的关怀下成长起来的,从 20 世纪 50 年代开始研究起步,经历了创业期(1954—1978 年)、成长期(1979—2000 年)和崛起期(2001 年至今)逐步发展起来,目前我国已是世界产钛用钛的大国。

(一) 产能

截至 2013 年,中国海绵钛产能达 15 万 t/a,其中遵义钛厂产能达到 3.4 万 t/a,为世界级的海绵钛大厂。

与此同时,美国 Timet 公司具有 1 万 t/a 的产能,乌克兰具有 1 万 t/a 的产能,哈萨克斯坦有 4 万 t/a 的产能,俄罗斯具有 4 万 t/a 的产能,日本东邦公司具有 2.8 万 t/a 的产能,日本大阪钛公司具有 3.8 万 t/a 的产能。全世界合计共有 31.6 万 t/a 的海绵钛产能,中国产能占世界总产能的 47.5%。

(二) 产量

根据中国有色金属工业协会钛锆铪分会的统计,2000 年中国海绵钛的产量仅 1905 t,钛加工材的产量仅 2233 t。2013 年,中国海绵钛的产量已达 81 171 t,钛加工材的产量已达 44 453 t,分别增长了 41.6 倍和 18.9 倍(表 1 和表 2)。

表 1 21 世纪以来中国海绵钛产量

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
	年	年	年	年	年	年	年	年	年	年	年	年	年	年
产量/t	1905	2468	33 28	4113	4809	9511	18 037	45 200	49 632	40 785	57 770	64 952	81 451	81 171
增率/%		29.6	34.8	23.6	16.9	97.8	89.6	150.6	9.8	-17.8	41.6	12.4	25.4	-0.34

表 2 21 世纪以来中国钛加工材产量

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
	年	年	年	年	年	年	年	年	年	年	年	年	年	年
产量/t	2233	4720	5482	7080	9292	10 135	13 879	23 640	27 737	24 965	38 323	50 962	51 557	44 453
增率/%		111.4	16.1	29.1	31.2	9.1	36.9	70.3	17.3	-10.0	53.5	33.0	1.2	-13.8

(三) 中国钛制品产量在世界总产量中的占比

2013 年,中国共生产海绵钛 81 171 t,占世界总产量 191 671 t 的 42.3%,中国共生产钛加工材 44 453 t,占世界总产量 125 453 t 的 35.4%。2007 年,中国海绵钛产量达 45 200 t,已居世界第一位。2010 年,中国钛加工材产量达 38 323 t,已居世界第一位(表 3、表 4)。

表 3 全球海绵钛历年的产量和占比

年份	美国		日本		哈萨克斯坦		俄罗斯		乌克兰		中国		总和/t
	产量/t	占比/%	产量/t	占比/%	产量/t	占比/%	产量/t	占比/%	产量/t	占比/%	产量/t	占比/%	
2001	7500	11.1	25 107	37.1	12 000	17.7	21 000	31.1	-	-	2000	3.0	67 607
2002	5600	7.9	22 652	31.9	11 000	15.5	22 000	31.0	6000	8.4	3800	5.3	71 052
2003	5600	7.6	18 617	25.4	12 000	16.4	26 000	35.5	7000	9.6	4000	5.5	73 217
2004	8500	9.4	26 233	29.1	16 500	18.3	27 000	30.0	7000	7.8	4809	5.3	90 042
2005	8000	7.9	30 549	30.2	17 000	16.8	28 000	27.7	8000	7.9	9511	9.4	101 060
2006	12 300	9.9	36 995	29.9	18 000	14.5	29 500	23.8	9000	7.3	18 037	14.6	123 832
2007	17 100	10.4	38 533	23.4	21 000	12.7	32 000	19.4	11 000	6.7	45 200	27.4	164 833
2008	18 800	10.9	40 000	23.1	23 000	13.3	32 000	18.5	9500	5.5	49 600	28.7	172 900
2009	16 000	12.0	25 000	18.7	20 000	14.9	26 000	19.4	6000	4.5	40 785	30.5	133 785
2010	18 000	11.3	32 000	20.1	14 700	9.2	29 000	18.3	7634	4.8	57 770	36.3	159 104
2011	24 000	11.7	52 600	25.6	20 000	9.7	35 000	17.0	9000	4.4	64 952	31.6	205 552
2012	12 600	5.7	57 000	25.6	20 000	9.0	42 600	19.1	9000	4.0	81 451	36.6	222 651
2013	12 000	6.3	25 500	13.3	20 000	10.4	44 000	23.0	9000	4.7	81 171	42.3	191 671