

中国工程院咨询项目

中国钛合金材料及 应用发展战略研究

● 周 廉 赵永庆 王向东 等编

2



化学工业出版社



郑州大学 *04010779043Z*

中国工程院咨询项目

TG146.2
Z775

中国钛合金材料及 应用发展战略研究

● 周 廉 赵永庆 王向东 等编

TG146.2
Z775



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是中国工程院咨询项目“中国钛及钛合金材料及应用发展战略研究”的研究成果汇编,对近十余年国内外钛及钛合金材料研究进展进行了系统介绍,重点分析了我国钛及钛合金材料及应用的现状和发展趋势,并针对我国钛及钛合金材料及应用研究中存在的问题提出了具体建议。

本书可供钛及钛合金相关政府管理部门、生产企业、高等院校、科研院所等的人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国钛合金材料及应用发展战略研究/周廉,赵永庆,王向东等编. —北京:化学工业出版社,2012.1
(中国工程院咨询项目)
ISBN 978-7-122-13182-9

I. 中… II. ①周… ②赵… ③王… III. 钛合金-金属材料-研究-中国 IV. TG146.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 000789 号

责任编辑:窦臻

文字编辑:杨欣欣

责任校对:陈静

装帧设计:韩飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张10 字数155千字 2012年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:49.00 元

版权所有 违者必究

中国工程院咨询项目
《中国钛合金材料及应用发展战略研究》
项目组人员

周 廉	西北有色金属研究院	中国工程院院士
陈立泉	中国科学院物理研究所	中国工程院院士
赵永庆	西北有色金属研究院	研究员
王向东	中国钛协会	秘书长
毛小南	西北有色金属研究院	研究员
李争显	西北有色金属研究院	研究员
孙洪志	西北有色金属研究院	教授
刘向宏	西部超导科技有限公司	研究员
曲恒磊	西部钛业有限责任公司	研究员
李金山	西北工业大学	教授
薛祥义	西北工业大学	教授
常 辉	西北工业大学	副教授
寇宏超	西北工业大学	副教授
林均品	北京科技大学	教授
张 荻	上海交通大学	教授
左家和	中国工程院化工、冶金与材料工程学部	
贾豫冬	西北有色金属研究院	



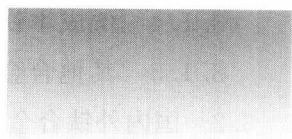
序

钛及钛合金的研究是当代一个重要的金属材料研究分支和热点，除了有重大应用价值外，还有重大的科学意义。从我国的国情及重大工程战略看，在航空、航天、舰船、核工业、兵器、石油、化工、冶金、医疗、体育休闲等领域采用钛及钛合金材料可以提高国防安全及人民的生活质量。

我国的钛合金研究、开发、生产已有 40 多年历史，逐步成长起一支素质较高的钛科技人才队伍。1980 年以来，在钛及钛合金材料及应用的基础研究和应用研究方面又不断取得进展。目前，我国在新型钛合金研究方面处于世界前列。我国的钛产业已经形成，并在不断稳定扩大。加之我国钛的矿产资源丰富，应该说我国在发展钛及钛合金科学技术上是有较好基础的。

结合我国的实际情况及发展战略，如何在钛及钛合金材料及应用的研发和产业化上进一步集中人力物力，如何统筹考虑目标明确的重点项目和有一定探索性及风险较大的项目之间的关系等，成为很重要的课题。我们通过中国工程院咨询项目“中国钛及钛合金材料及应用发展战略研究”，组织了国内钛领域众多的知名专家和学者，通过对国内外钛及钛合金材料及应用发展现状及趋势的系统调研、分析和总结，最终形成了本书。感谢所有参与编写本书的同志，他们的辛勤工作使得本书能够最终完成。希望本书能为我国钛及钛合金材料及应用发展提供一些有益的参考。





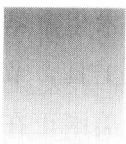
目录

1 导论	1
2 钛工业现状及发展趋势	4
2.1 美国钛工业现状	4
2.1.1 美国钛工业的基本情况	4
2.1.2 美国主要钛企业	6
2.2 日本钛工业现状	11
2.3 独联体钛工业现状	12
2.3.1 俄罗斯钛工业	13
2.3.2 乌克兰的钛工业	14
2.3.3 哈萨克斯坦的钛工业	15
2.4 欧洲钛工业现状	15
2.5 中国钛工业现状	15
2.5.1 产能	16
2.5.2 产量	16
2.5.3 进出口量	17
2.5.4 需求及需求分配	18
2.5.5 中国海绵钛和钛加工材产量占世界总产量的比例	18
2.5.6 中国的主要钛企业	19
2.6 钛工业的发展趋势	25
3 钛合金研究发展现状及发展趋势	26
3.1 新型钛合金的研究进展	26
3.1.1 航天用钛合金	26
3.1.2 船用钛合金	30
3.1.3 生物医用钛合金	33

3.1.4	低成本钛合金	34
3.1.5	其他合金	35
3.2	国内外钛合金的加工技术/成形技术/应用技术进展	37
3.2.1	国外情况	37
3.2.2	国内情况	41
3.3	国内外钛合金研制的差距	43
3.4	对钛合金研究发展的建议及发展趋势	44
4	TiAl 金属间化合物研发现状及发展趋势	45
4.1	国外本领域基础研究现状及发展趋势	46
4.1.1	TiAl 合金的成分—组织—性能关系	46
4.1.2	工程 TiAl 合金发展	46
4.1.3	TiAl 合金的制备和加工技术	49
4.2	国内本领域基础研究现状	58
4.2.1	高温 TiAl 合金 (高 Nb-TiAl 合金)	58
4.2.2	精密铸造和定向凝固	60
4.2.3	变形 TiAl 合金	62
4.2.4	TiAl 合金多孔材料	64
4.3	发展前景	64
5	钛表面处理技术现状及发展趋势	66
5.1	钛表面处理技术的现状	66
5.1.1	传统的表面处理技术在钛材表面的应用	67
5.1.2	钛表面新型处理技术	78
5.2	钛表面处理技术的发展趋势	85
6	外科植入物用钛合金材料设计、开发与应用	86
6.1	应用背景及重点研究领域	86
6.1.1	生物医用钛合金的科学内涵、分类与基本特性	86
6.1.2	生物医用钛合金的发展概况	87
6.1.3	生物医用钛合金的应用领域	88
6.2	生物医用钛合金的重大需求	89
6.2.1	国民经济发展	90
6.2.2	人民生活质量提高	91

6.2.3	高新技术产业提升	92
6.3	生物医用钛合金国内外发展现状分析与评价	94
6.3.1	国内外发展现状	94
6.3.2	综合分析与评价	96
6.4	生物医用钛合金研究、开发、生产和应用中的关键科学问题和 主要技术瓶颈	97
6.4.1	科学研究中关键科学问题分析	97
6.4.2	工程化和应用的主要技术瓶颈	98
6.4.3	产业化前景及市场分析	101
6.5	生物医用钛合金研究、生产和应用中产学研发 展的政策性问题	102
6.6	生物医用钛合金发展战略及对策	104
6.6.1	发展战略	104
6.6.2	建议和对策	105
7	大飞机研制对钛合金材料技术发展的需求	106
7.1	国外大飞机用钛部位及特点	107
7.1.1	波音飞机用钛部位及特点	107
7.1.2	空客飞机用钛部位及特点	109
7.2	大型运输机用钛部位	112
7.3	发动机用钛合金材料需求及发展	113
7.4	大飞机对钛材加工技术的需求及发展	114
7.4.1	大规格铸锭的熔炼技术	114
7.4.2	钛合金精密铸造技术	115
7.4.3	大型钛合金整体结构件的锻造技术	116
7.4.4	超塑成形/扩散连接技术	116
7.5	我国大飞机用钛合金材料的研究基础	117
7.6	大飞机用钛材的差距与对策	121
7.6.1	我国大飞机用钛合金材料技术的差距	121
7.6.2	我国大飞机用钛合金发展的对策	122
8	钛及钛合金的应用	124
8.1	钛及钛合金的基本性质	124

8.2 钛及钛合金的应用	125
8.2.1 航空航天应用	125
8.2.2 化工用钛	126
8.2.3 电力用钛	127
8.2.4 海水淡化用钛	128
8.2.5 船舶用钛	128
8.2.6 建筑用钛	129
8.2.7 汽车、摩托车用钛	131
8.2.8 体育休闲用钛	131
8.2.9 医疗用钛	132
8.2.10 钢铁及冶金用钛	132
8.2.11 高技术领域用钛	132
9 我国钛及钛合金材料及应用发展战略及对策分析	133
9.1 我国钛及钛合金材料及应用发展需要解决的问题	133
9.2 钛及钛合金材料及应用产业发展的战略目标	134
9.3 钛及钛合金材料及应用产业化发展重点	134
9.4 钛及钛合金材料及应用产业化发展对策建议	135
10 2010 年中国钛工业发展报告	137
10.1 2010 年中国钛工业运行情况	137
10.1.1 产能和产量	137
10.1.2 对外贸易情况	141
10.1.3 市场及价格	142
10.2 2010 年钛工业运行状况分析	145
10.2.1 2010 年中国钛工业运行状况的总评价	145
10.2.2 市场分析	146
10.2.3 政策分析	146
10.2.4 机遇分析	146
10.3 技术进步	147
10.4 中国钛工业存在的问题	147
参考文献	149



1 导论

钛及钛合金由于具有熔点高、无磁性、热膨胀系数低、比强度和比刚度高以及耐腐蚀性能好、耐生物侵蚀等许多优异特性，成为航空、航天飞行器等高技术领域不可或缺的关键结构材料，并在化工、能源、舰船、石油、生物医学等国民经济领域获得了越来越多的应用。钛工程技术研究往往分为航空与非航空或军用与民用两大领域，它们的发展趋势各有不同。在航空领域主要以比强度、比刚度和耐热性、韧性、疲劳寿命等作为主要技术目标，尽量选择综合力学性能最优的钛合金；非航空领域则主要以腐蚀性、加工性和成本作为主要技术目标，它主要选择工业纯钛、成分较简单或低合金化的通用钛合金。

世界上钛的工业生产始于 1948 年，目前世界年产钛材约 6 万吨。钛的应用始于 20 世纪 50 年代，是从航空航天开始的，首先用于航空发动机，然后用于机身、导弹、卫星等，然后逐渐用于化工、能源、冶金等行业。20 世纪 90 年代以来，钛进入日常生活、体育休闲、建筑、汽车等行业。世界各国由于军事、经济及工业水平的不同，其钛应用状况有较大的差异。在消费结构方面，美国、俄罗斯以军用为主，航空航天分别占 70% 和 60%，民用工业占 30% 和 40%；中国和日本以民用为主，航空及军工占 10%~20%，民用占 80%~90%；许多发展中国家还没有建立自己的钛工业，中东等地区的一些国家，也使用大量钛制海水淡化设备和化工装置，全部靠成套进口钛设备。

钛及钛合金材料的研发及应用水平，已经成为一个国家新材料研究开发应用水平和综合国力的重要体现。近年来，各国正在开发低成本和高性能的新型钛合金，努力使钛合金进入具有巨大市场潜力的民用工业领域。

美国在钛的研究及应用方面一直处于世界领先地位。尤其在航空工业中，不管是四代战斗机的代表 F-22 还是波音公司的 B-777 都大量地采用了钛合金。近 20 年来，美国一方面大力开发先进航空钛应用技术，例如用等

温锻造技术、精铸技术生产大型的航空锻件、铸件，用超塑成形技术生产结构复杂的航空构件，不仅大大简化构件，使之减重，而且减少装配工具，节约装配时间；另一方面，美国也在大力开发高附加值的钛民用品。美国正在实行的 PNGV 十年计划（家用汽车减重 40%），投资 1 亿美元，将 Ti 与 Al、Mg 一起推广到汽车。该计划不仅将钛用于汽车的连杆、气门弹簧、消音器、排气管等小部件，而且要用于汽车底盘等负重部件。美国的医用钛制品也是非常先进的，钛心脏起搏器和钛血管支架等产品早已进入我国，一直是医院的畅销产品。

俄罗斯的钛应用技术也非常先进，在海洋工程如海上油气田开采、核能应用等某些方面甚至领先于美国，如钛在“一体化压水堆”上的应用技术就是俄罗斯的独创。20 世纪 60~80 年代，前苏联生产了全部采用钛合金制作壳体的“阿尔法”级潜艇和用钛量达 9000t 的“台风”级潜艇，表现出极其优异的性能。另外，俄罗斯还将钛合金广泛应用于船舶动力装置中的热交换器、海水淡化器、冷却器、冷凝器等，相比于不锈钢和铜合金，其服役寿命及服役可靠性大幅度提高。近年来，俄罗斯也在大力发展钛的民用技术，特别是低成本的钛应用技术，采用的技术主要包括大量回收残钛熔炼技术、大变形量加工技术、近净成形加工技术等。

日本钛的民用技术走在世界的前列。在日本，钛产品已遍及化工、石化、建筑、医疗（人体植入件、轮椅）、交通（汽车、摩托车）、体育（高尔夫球杆、网球、渔具、钓鱼船等）、日用电子产品（照相机、手表、复印机、打字机、手机）、炊具（刀、叉、锅、铲）等各个部门。在民用品开发中，形成了许多专利技术。日本以钛产品新、技术精而赢得了良好的声誉和很强的国际竞争力。已建设成的北京中国国家大剧院，其屋顶与幕墙大量采用钛材。在该项建筑钛材的国际招标中，日本新日铁公司以应用技术成熟、产品质量高而击败众多对手一举夺标。日本的成功经验表明，企业竞争力来自长期深入的应用开发。

近年来，受社会与经济发达的拉动，我国钛的研究与产业化水平不断提高。尤其是国内航空、能源、化工、体育休闲、航天、冶金等领域对钛应用的需求刺激了钛工业的飞速发展，钛加工材及其他钛产品已经连续 5 年以 30% 左右的速度增长，产量由原来占世界的 2%~3% 发展到已超过 20%，钛工业已经位居世界第 3 位。

《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006～2020 年）》提出的三个重点领域（制造业、能源、水和矿产资源）中的五个优先主题（第 31 主题——基础材料：轻质高强金属结构材料；第 33 主题——军工配套关键材料及工程化；第 2 主题——煤的清洁高效开发利用；第 7 主题——综合节水；第 8 主题——海水淡化）和两个重大专项（大型飞机、载人航天与探月工程）等任务以及西部大开发等战略，为钛的发展提供了历史机遇。钛及钛合金的发展进入了关键时期。

2 钛工业现状及发展趋势

王向东

2.1 美国钛工业现状

2.1.1 美国钛工业的基本情况

美国是世界上第一个工业化生产海绵钛和钛加工材的国家，具有完善的钛冶金—加工—应用和研究体系，也是目前钛加工材生产量最大、用钛量最大的国家。2007年、2008年美国海绵钛、钛锭和钛加工材产量见表2-1。

表 2-1 2007年、2008年美国海绵钛、钛锭和钛加工材产量

品种	2007年产量/t	2008年产量/t	增长/%
海绵钛	17100	18800	10
钛锭	59200	58600	-1
钛加工材	38200	39700	4

“9.11”事件过后，2004~2008年，随着世界航空业的快速复苏，美国钛加工材生产量连年增长，从2004年的约27000t增长到近40000t（见图2-1）。

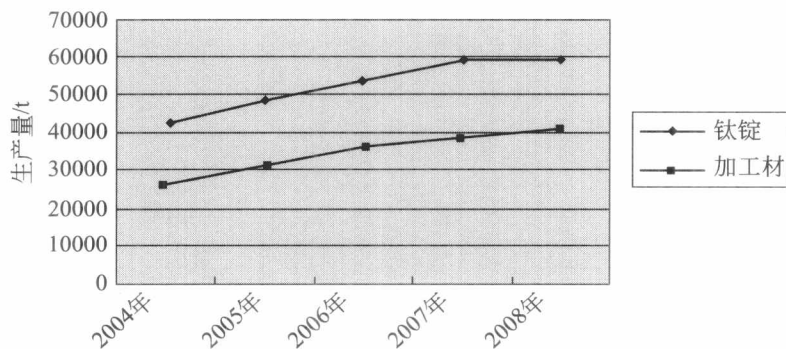


图 2-1 美国 2004~2008 年钛加工材生产量

2008 年，美国钛产品的进出口量见表 2-2。美国是一个以海绵钛为主的钛原料进口大国，2008 年其海绵钛的净进口量为 21530t；同时；美国也是一个钛加工材的出口大国，2008 年美国净出口钛加工材 10970t；美国也是全世界用钛量最大的国家，2008 年其消费钛加工材 28730t（以其生产量减去净出口量）。

表 2-2 2008 年美国钛产品的进出口量 t

项目	废钛	海绵钛	钛锭	其他原材料	钛加工材
进口量	10400	23900	1340	59	8010
出口量	8180	2370	725	2710	18980
净进口量	2220	21530	615	-2651	-10970

美国 1997~2008 年海绵钛的进口量变化见图 2-2，主要来源国见表 2-3。美国海绵钛的进口量于 2007 年达到峰值，约 26000t；并于 2004~2007 年连年增长，正好对应了世界钛工业快速发展的几年；2008 年的金融危机使其进口量略有下降。哈萨克斯坦、日本和中国是美国海绵钛的主要供应国。

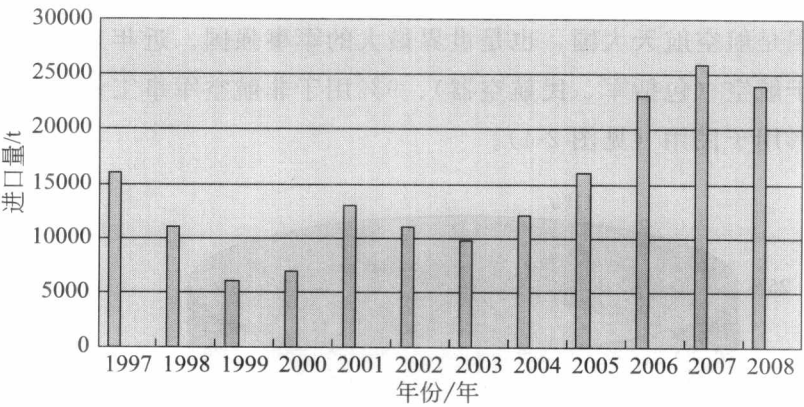


图 2-2 1997~2008 年美国海绵钛的进口量

表 2-3 2007 年、2008 年美国海绵钛的主要来源国

项目	中国	日本	哈萨克斯坦	其他	合计
2007 年/t	2220	8250	13800	1676	25900
2008 年/t	1510	7860	12000	2510	23900
增长率/%	-32	-5	-13	50	-8

美国 2004~2008 年钛加工材的出口量变化见图 2-3，2007 年和 2008 年主要的出口品种见表 2-4。

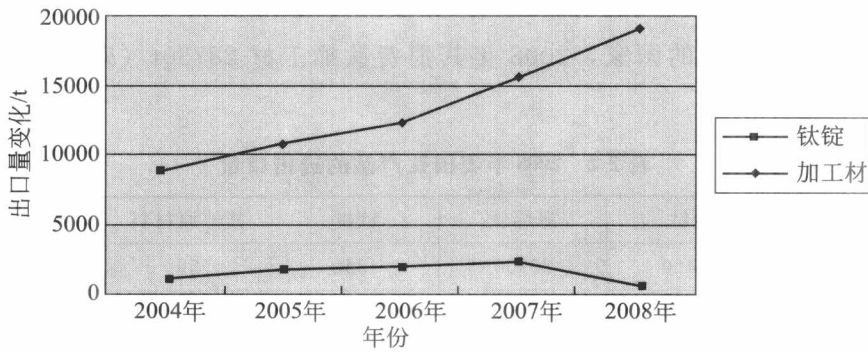


图 2-3 美国 2004~2008 年钛锭和钛加工材的出口量变化

表 2-4 2007 年和 2008 年美国钛加工材分品种出口量

项目	棒、线、型材	大棒	毛坯	板及其他成品
2007 年出口量/t	2840	2730	1280	8670
2008 年出口量/t	3300	3200	1980	10500
增长率/%	16	17	55	21

美国是航空航天大国，也是世界最大的军事强国。近年来其钛加工材的 55% 用于航空（包括军、民航空器）、9% 用于非航空军事工业，25% 用于工业，11% 用于民用（见图 2-4）。

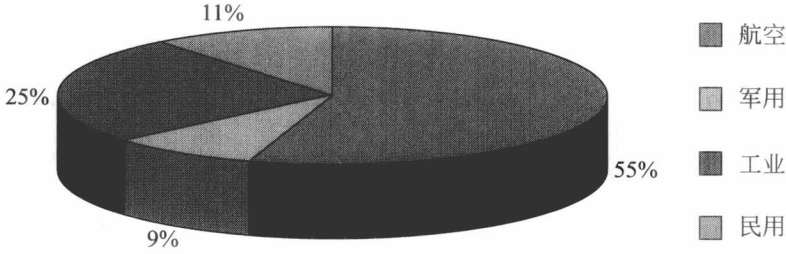


图 2-4 近年来美国钛市场需求分布

2.1.2 美国主要钛企业

美国主要有两大海绵钛厂，即美国钛金属公司（Timet）和美国冶联科技国际公司（Allegheny Tekedyne Inc. 即 ATI）；三大钛加工厂，即 Ti-

met、RTI 国际金属公司和 ATI。

(1) Timet

Timet 是世界上最著名的钛冶炼、加工专业企业，成立于 1950 年，产品有四大系列，即海绵钛、熔铸制品、轧制品和制成品（卷筒、管接头、导管、容器等）。

Timet 的生产企业主要分布在美国和欧洲（见表 2-5），具有 44650t 的熔铸能力，约占世界总量的 20%，其中 35% 是冷床炉产品，63% 是真空自耗电弧炉（VAR）产品，2% 是真空感应熔炼炉（VIM）产品。实际轧制品产量约为 20000t/a。

表 2-5 Timet 美国钛金属公司的生产分布状况

生产位置	产品	年产能/t	
		熔制品	轧制品
Henderson 亨德森(内华达州)	海绵钛、铸锭	12250	—
Morgantown 摩根镇(宾夕法尼亚州)	扁锭、铸锭、原材料加工	20000	—
Toronto 多伦多(俄亥俄州)	坯、棒、厚板、薄板、带	—	11000
Vallejo 瓦列霍(加州)	铸锭(包括非钛超合金)	1600	—
Ugine 于日讷(法国)	铸锭、坯	2100	1500
Wanarlwydd 沃纳德(斯旺西, 威尔士)	棒、厚板、薄板	—	3100
Witton 威顿(英格兰)	铸锭、坯、棒	8700	7000

Timet 的客户主要是一些国际大公司，并与这些公司签有长期的供货协议（到 2017 年）。这些公司主要是：波音公司、生产航空发动机的罗-罗公司及其在德国和美国的分公司、联合技术公司（UTC，普惠及相关公司）、Snecma 公司、Wyman-Gordon 公司和 VALTIEET SAS 公司等。

(2) RTI

RTI 公司是美国航空钛材及高端钛加工材的专业生产厂家，旗下设有钛集团和制造销售集团，19 个制造和销售中心分布在美国、加拿大、欧洲和亚洲。年产钛加工材 7000t 左右。

RTI 公司的客户也主要是波音、空中客车、罗-罗公司等国际航空界大公司，在钛及其合金的熔铸、轧制、挤压、超塑变形、焊接等领域有很高的水平，其主要设备和产品见图 2-5～图 2-12。



图 2-5 10t 真空自耗炉 8 台/等离子炉 2 台

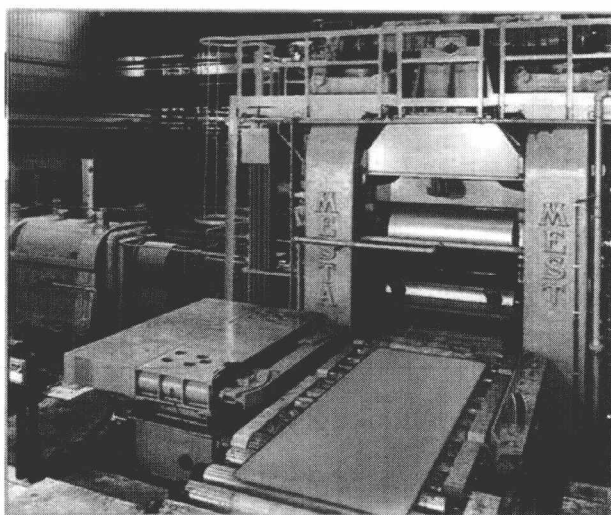


图 2-6 1.6m4 辊钛合金轧板机

(3) ATI

ATI 公司是美国著名的不锈钢及特种金属生产厂，主要从事不锈钢及特种金属的生产。ATI 公司位于美国宾夕法尼亚州匹兹堡市，其子公司有华昌公司（Wah Chang，世界著名的活性金属和难熔金属生产商）；俄勒冈冶金公司（Oremet，曾是美国第三大钛生产商）；Ludlum 公司和 Allvac 公司。

ATI 公司的产品有扁平轧制品、高性能金属、工程用产品、腐蚀液及石油天然气工业用的耐蚀材料四大系列。钛制品主要包含在前两类产品中。