

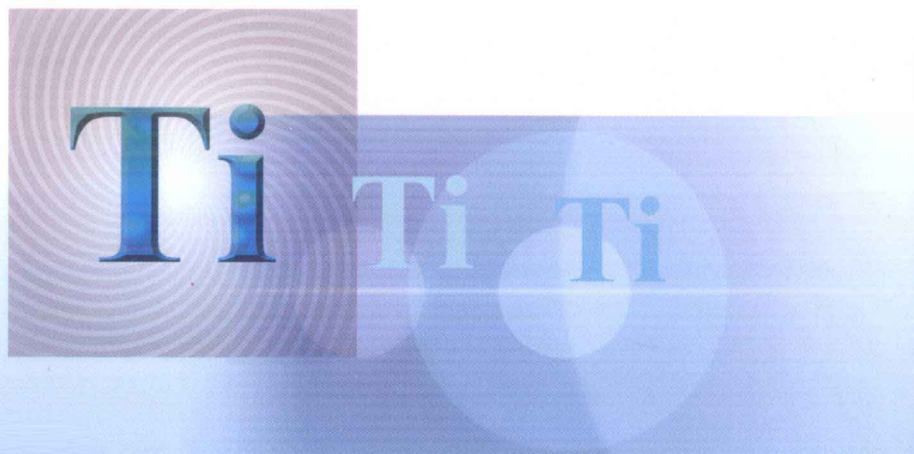
TAI XILIE CONGSHU

• 钛系列丛书 •

主编 莫畏

钛铸锭和锻造

马济民 贺金字 庞克昌 等编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

钛系列丛书

主编 莫 畏

钛铸锭和锻造

马济民 贺金字 庞克昌 等编著

北 京

冶金工业出版社

2012

内 容 简 介

本书是《钛系列丛书》中的一本。本书分上下两篇介绍钛铸锭和锻造。上篇主要包括真空自耗熔炼钛锭和钛合金冷床炉熔炼,下篇包括钛及钛合金锻造、钛及钛合金半成品的组织与性能、锻压设备、钛合金的精密模锻与等温模锻。

本书可作为钛业培训时的教材,也可供钛业科技人员、管理人员和大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

钛铸锭和锻造/马济民等编著. —北京:冶金工业出版社, 2012. 1

(钛系列丛书)

ISBN 978-7-5024-5796-9

I. ①钛… II. ①马… III. ①钛—铸造 ②钛—锻造
IV. ①TG146. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 263031 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 yjcbbs@cnmip.com.cn

责任编辑 尚海霞 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5796-9

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销

2012 年 1 月第 1 版, 2012 年 1 月第 1 次印刷

850mm × 1168mm 1/32; 12.25 印张; 327 千字; 374 页

40.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010) 64027932 投稿信箱: 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)

《钛系列丛书》编委会名单

主 编 莫 畏

编 委 莫 畏 张 翥 谢成木 马济民

谢水生 董天颂 杨绍利 盛继孚

罗远辉 贺金宇 张树立 刘长河

赵云豪 叶镇焜 邓青元 朱祖芳

王群骄 林乐耘 蔡建明 王武育

唐志今 马 兰 姚 超 徐斌海

庞克昌 李四清 敖进清 闫晓东

董鸿超 吴享南

本分册主编 马济民

《钛系列丛书》前言

钛是一种新金属,钛及钛合金也是一种性能优异的新材料,它被誉为现代金属。

钛及钛合金具有密度小、比强度高、耐蚀性能好、耐热性能优良、无磁等一系列特性,获得了广泛的应用。钛的工业化仅有六十余年历史,但已获得了迅速发展。2008年,全世界钛材年产量已达近13万吨。

随着国民经济持续、高速发展,我国对钛的需求量迅速增长。2006年我国海绵钛和钛材的年产量均超过万吨,已进入世界产钛大国的行列,且已形成持续发展的态势。2008年我国海绵钛和钛材年产量分别达到4.96万吨和2.77万吨,名列世界前茅,成为产钛大国。这是件喜忧参半的事,喜的是我国钛工业已经崛起;忧的是钛业的产能已过剩,会影响产品经济效益。它表明钛业市场风险很大,投资应该谨慎。

与美、日、俄等世界产钛强国相比,我国钛业的技术水平仍有差距。我国要成为世界产钛强国还有相当长的路要走。其中,一件重要的基础性的工作是必须提高我国钛业的科研和生产技术水平。

为此,根据钛业技术的发展要求,我们编撰了《钛系列丛书》。这套丛书共9册,是许多专家智慧的结晶,也是为了总结钛业技术发展情况和提高我国钛业国际竞争力,我们做出的力所能及的贡献。

在编写过程中力求理论与实践相结合,做到既有理论论述,也有工艺实践;以工艺实践为重点,保持适当的理论深度和广度,同时在论述中力求做到避虚务实。

该丛书在编写过程中得到了许多同行专家的大力支持,特别是北京有色金属研究总院及其领导给予了大力支持和赞助,在此一并表示谢意。

该丛书涉及的技术领域很宽,而我们的写作水平有限,丛书中难免有不足之处,恳请读者批评指正。

编者 莫畏

2009年7月

前 言

1951 年, TIMET(美国)和 IMI(英国)分别成功生产出了海绵钛, 我国于 1955 年研制成功海绵钛, 因此, 从钛开始走上工业化生产算起, 今年恰逢是 60 周年。60 年来, 钛科学与技术取得了长足的发展, 钛在其工艺方法、性能和成本方面具有高性价比的领域得到了广泛应用, 如航空、航天、船舶和化工行业等。钛合金的使用成为高性能装备的重要标志之一, 如第四代战斗机 F22 的用钛量占 41%; F119 航空发动机用钛量达 40%; 波音 777 飞机的钛部件质量占 10%, 并且 β 型钛合金的用量第一次超过了 $(\alpha + \beta)$ 型钛合金 Ti-6Al-4V。钛合金铸锭大型化、高纯化, 钛锻件的大型化、整体化、高可靠性和长寿命成为重要的发展方向。

当前, 第四代机 F22 四个大的整体框(眼镜框)都是 Ti-6Al-4V ELI 锻件, 投影面积为 $4.06 \sim 5.68\text{m}^2$, 锻件质量为 $1895 \sim 2972\text{kg}$; 波音 747 起落架梁采用 Ti-6Al-4V 锻件, 长 6.2m , 投影面积为 4m^2 , 质量达 1293kg ; 波音 777 的主起落架梁采用 Ti-1023 钛合金锻件, 质量为 1440kg , 投影面积为 1.23m^2 , 这些都是正在服役的最大钛合金锻件。同时, 民机用钛量增加, 钛合金锻件的使用寿命要求已不是几千小时, 而是 $6\text{万} \sim 9\text{万小时}$, 所以对材料提出了更高的要求。因此, 在本书中, 对优质钛合金铸锭、钛合金冷炉床熔炼、钛合金精密锻造和等温锻造, 以及半成品的

组织与性能方面做了必要的介绍。

从1968年伦敦第一届国际钛会议起,国际钛会议已经召开过12届,中国的钛会议也已召开了14届,有关钛合金的科学和技术得到了广泛的总结和交流,这些宝贵的创见和经验是本书出版的主要依据,同时也参照了一些国家先进的工艺技术。本着百花齐放的态度,对一些有价值的观点和经验做了归纳和介绍。希望能在钛铸锭质量优质化、锻件显微组织的定量化和性能的可控化方面做一点工作,以期为我国钛同行们提供一点启发和参考,并在此对本书出版作出贡献的单位和同仁表示衷心的感谢。

本书由数位专家、教授编写。全书分为两篇,共9章。参加编写的有:第1章(除第1.5.2节),莫畏^①;第2章、第4章(除第4.7节)及第1.5.2节,马济民^②和蔡建明^②;第3章和第4.7节、第6章、第7章,贺金宇^①;第5章,闫晓东^①;第8章,唐至今^②;第9章,庞克昌^③。其中,作者单位^①为北京有色金属研究总院,^②为北京航空材料研究院,^③为上海宝钢公司特钢中心。

本书在编写过程中参考了一些文献资料,在此对文献的作者及提供参考资料的专家表示衷心的感谢。另外,北京有色金属研究总院的朱露对本书的编写提供了帮助,在此表示感谢。

由于编者水平所限,书中难免有不足之处,敬请广大读者批评指正。

编者 马济民

2011年11月于北京

目 录

上篇 钛 铸 锭

1 真空自耗熔炼钛锭	1
1.1 概述	1
1.1.1 真空熔炼的意义	1
1.1.2 真空熔炼方法比较	2
1.2 真空自耗电弧熔炼原理	9
1.2.1 熔炼电弧特性	9
1.2.2 金属熔滴在弧区的过渡	17
1.2.3 熔炼过程	19
1.2.4 凝固时的偏析和收缩	22
1.2.5 提纯原理	24
1.2.6 熔炼过程中钛的损失	32
1.3 真空自耗电弧炉	33
1.3.1 炉型结构	33
1.3.2 自耗炉基本结构	36
1.3.3 炉体总装	43
1.4 真空自耗电弧熔炼工艺	45
1.4.1 炉料准备	45
1.4.2 原料处理	51
1.4.3 自耗电极制备	51
1.4.4 真空自耗熔炼	60

1.4.5 安全操作	72
1.5 产品质量和管理	72
1.5.1 钛锭质量的评价条件	73
1.5.2 优质钛合金(航空级)铸锭	74
1.5.3 熔炼钛锭时常见的缺陷	76
2 冷炉床熔炼钛合金锭	82
2.1 钛合金中的主要冶金缺陷及其对使用性能的影响	82
2.1.1 钛合金的冶金缺陷与飞行安全	82
2.1.2 真空自耗熔炼锭的冶金缺陷	84
2.1.3 真空自耗熔炼消除夹杂的局限性	88
2.2 冷炉床熔炼技术	89
2.2.1 冷炉床工作原理	90
2.2.2 电子枪和电子束冷炉床	92
2.2.3 等离子枪和等离子体冷炉床	95
2.3 冷炉床熔炼技术的应用	100
2.4 冷炉床熔炼技术的发展	102

下篇 钛 锻 造

3 锻造原理	105
3.1 钛及钛合金的塑性	105
3.1.1 钛的晶体结构	106
3.1.2 β/α 相转变	108
3.1.3 扩散	109
3.2 钛及钛合金的可锻性和工艺塑性	109
4 钛及钛合金半成品的组织与性能	118
4.1 概述	118

4.2 变形钛合金的低倍组织及其评定方法	119
4.2.1 晶粒大小 D_M	120
4.2.2 晶粒的不等轴程度 K_D	121
4.2.3 基色 T	122
4.3 钛合金半成品显微组织的多样性与分类	126
4.4 半成品显微组织评定	132
4.5 ($\alpha + \beta$) 钛合金的热机械加工工艺	133
4.5.1 全片状组织	134
4.5.2 双态组织	138
4.5.3 全等轴组织	142
4.5.4 工厂退火组织	145
4.6 锻造半成品的组织特征和不均匀性	146
4.6.1 区域不均匀性	147
4.6.2 带状组织	149
4.6.3 岛屿状晶粒	149
4.6.4 云纹状组织	150
4.6.5 年轮状组织	151
4.6.6 粗大的 α 相析出	153
4.7 锻造工艺对半成品组织和力学性能的影响	155
4.7.1 变形温度的影响	155
4.7.2 变形程度的影响	165
4.7.3 变形速度的影响	169
4.7.4 锻后冷却的影响	171
4.8 显微组织对半成品力学性能影响的讨论	172
4.8.1 显微组织类型对半成品性能的影响	172
4.8.2 显微组织参数对力学性能影响的规律性	178
4.8.3 合金相成分对力学性能的影响及其与 组织的关系	180
4.8.4 化学成分对性能的影响及其与组织的关系	183
4.9 半成品最佳组织的选择原则	185

5 锻压设备	188
5.1 主要锻压设备	188
5.1.1 锻锤	188
5.1.2 液压机	191
5.1.3 螺旋压力机	197
5.1.4 特种锻压机	197
5.2 锻造工具	201
5.2.1 锻造操作机	201
5.2.2 加热设备	202
5.3 锻压设备发展趋势	203
6 自由锻和胎模锻	204
6.1 自由锻造工序	204
6.1.1 镦粗	204
6.1.2 拔长	208
6.1.3 冲孔	214
6.1.4 扩孔	215
6.1.5 切断	216
6.1.6 弯曲	217
6.1.7 锻比的计算	218
6.2 自由锻造工艺	220
6.2.1 坯锭准备	221
6.2.2 加热制度	222
6.2.3 锻造	229
6.2.4 钛的典型锻造工艺举例	235
6.2.5 锻件的精整	245
6.3 胎模锻	245
6.3.1 胎模锻的种类	245
6.3.2 胎模锻工艺	245

6.3.3 胎模锻设备吨位的确定	249
6.4 特种锻造	250
6.4.1 旋转锻造	250
6.4.2 棒材精锻	252
6.4.3 棒材快锻	255
6.4.4 辊锻	256
6.4.5 摆锻	258
6.5 产品质量及控制	260
6.5.1 锻件的质量检验	260
6.5.2 锻件的主要缺陷	260
6.5.3 锻件的质量控制	264
7 模锻	268
7.1 模锻概述	268
7.2 模锻工艺分类和成形特点	271
7.2.1 开式模锻的成形特点	271
7.2.2 闭式模锻的成形特点	273
7.3 模锻件锻件图的设计	274
7.3.1 分模面的选择	274
7.3.2 模锻件的余量和公差	275
7.3.3 模锻斜度	275
7.3.4 圆角半径	275
7.3.5 模膛设计	276
7.3.6 热模锻图的制定	276
7.4 锻压力的计算	277
7.5 钛及钛合金的润滑	278
7.6 钛合金锻件的精整	281
7.6.1 切边	281
7.6.2 校正	282
7.6.3 表面净化处理	282

7.7 钛合金锻造新工艺	283
7.7.1 热模锻造	283
7.7.2 β 锻造	284
8 精密锻造	287
8.1 变形钛合金精密模锻件的工艺	287
8.1.1 变形钛合金的精密锻造	287
8.1.2 航空发动机压气机转子叶片精密锻造	289
8.1.3 叶片精密锻件工艺设计方案和技术途径	289
8.2 精密模锻设备的选择及模具设计	291
8.2.1 设备选择的原则	291
8.2.2 热模锻机械压力机	292
8.3 精密锻造钛合金叶片的热处理和性能	300
8.3.1 精密锻造钛合金叶片的热处理	300
8.3.2 精密锻造钛合金叶片的力学性能	302
8.4 钛合金精密锻件防护用玻璃润滑剂	303
8.5 钛合金精密锻造的质量控制要求	305
8.6 典型金属间化合物钛铝合金的包套挤压精密锻造 ...	306
8.6.1 包套挤压制坯	308
8.6.2 钛铝合金大直径铸锭包套复合挤压工艺试制 ...	310
8.6.3 钛铝合金的等温精密锻造成形技术	313
9 等温锻造	315
9.1 概述	315
9.1.1 钛合金等温锻造的发展背景	315
9.1.2 钛合金等温锻造在我国的发展	321
9.1.3 钛合金等温锻造特性	323
9.1.4 普通锻造、热模/等温锻造和超塑性锻造	328
9.1.5 钛合金等温锻造的经济性	329
9.1.6 热模/等温锻造的优点	329

9.2 等温锻造模具材料和工艺	330
9.2.1 模具材料	330
9.2.2 模具的工艺性设计	336
9.3 钛合金等温锻造工艺的设计思想	342
9.4 成形工艺设计	343
9.4.1 等温锻造的锻造温度	343
9.4.2 等温锻造压力设计	344
9.4.3 等温锻造速度设计	344
9.4.4 锻件设计	345
9.4.5 等温自由锻造制坯	345
9.4.6 等温锻件工序设计	346
9.5 计算机数值模拟	346
9.6 模具设计	347
9.6.1 模具设计最小化原则	347
9.6.2 模架(座)、模具加热炉通用	348
9.6.3 模具强度设计	349
9.6.4 模腔设计	349
9.6.5 模具定位设计	352
9.6.6 顶出结构	353
9.6.7 模具连接	354
9.6.8 模具加热	355
9.6.9 润滑	355
9.7 组织性能工艺设计	355
9.7.1 原材料的组织性能要求	356
9.7.2 预锻和终锻件质量控制的锻压工艺参数设计	356
9.7.3 锻件热处理	357
9.7.4 热处理加矫形	358
9.7.5 锻件后处理	358
9.8 等温锻造设备	358
9.8.1 等温锻造专用压机	358

9.8.2	模架	366
9.8.3	模具加热炉	366
9.8.4	坯料加热炉	367
9.8.5	操作机	367
9.8.6	热处理炉	367
9.8.7	坯料下料设备	367
9.8.8	高温合金模具铸造设备	368
9.8.9	高温合金模具机加工设备	368
9.9	等温锻造实例	368
9.9.1	压气机盘	368
9.9.2	轴颈、大型管	368
9.9.3	机匣、叶片	369
9.9.4	隔框	370
参考文献		371

上篇 钛 铸 锭

1 真空自耗熔炼钛锭

1.1 概述

1.1.1 真空熔炼的意义

从钛化合物制取金属钛的过程都在低于钛熔点(1668℃)的温度下进行,只能得到多孔的金属——海绵钛。海绵钛除了少量直接应用外,大多数都必须首先熔炼成致密钛锭,方可进一步加工成钛材。此外,为了制取钛合金材料,在钛的熔铸时要添加合金组元,调整成分,制取含有一定成分范围的钛合金锭,然后再加工成材。

对作为加工钛材的锭坯有以下要求:

- (1)化学成分和杂质含量在规定的范围内,且均匀分布;
- (2)无夹杂、裂纹和缩孔疏松等冶金缺陷;
- (3)无折皱和大凹凸等表面缺陷;
- (4)合理的形状。

钛是一种高活性金属,在熔炼温度下能和许多元素,包括耐火材料(各种氧化物)起化学反应。因此,钛熔炼必须在真空中或惰性气氛保护下进行。在低于常压下进行的此种特殊冶金工艺称为真空熔炼。在真空熔炼的过程中,可同时除去一些杂质,提高钛的纯度。

在真空熔炼时,还需要解决的另一个难题是需寻找一种合适