

许国栋 王桂生 莫畏 编著

钛材生产、 加工与应用

500 问

化学工业出版社

Ti



钛材生产、 加工与应用 500 问



化学工业出版社

北京·

Ti

本书以问答的形式解答企业中经常遇到的问题。全书包括三篇共 22 章：第一篇是钛的基础知识，包括概念和术语、金属学特性、性能、资源与历史、钛的标准 5 章；第二篇是钛的生产和加工，包括海绵钛生产、钛的熔炼与铸造、塑性加工、锻造、轧制、挤压、拉拔、焊接、粉末冶金、复合材料、机械加工、表面处理、热处理 13 章；第三篇是钛的应用，包括钛的应用、钛粉的生产应用、钛设备的设计与制造、钛的循环利用与环境保护 4 章。本书还包括 3 个附录，即名词解释、各种钛材质量速查表和各国标准的列表。

本书语言简要、内容易懂、实用性强。可供钛及钛合金研究开发、生产加工和应用的工程技术人员参考，也可作为高等院校材料科学与工程专业的教师和学生的参考资料。

图书在版编目 (CIP) 数据

钛材生产、加工与应用 500 问/许国栋, 王桂生, 莫畏编著.
北京: 化学工业出版社, 2011.8
ISBN 978-7-122-11787-8

I. 钛… II. ①许…②王…③莫… III. 钛-金属材料-金属加工-问题解答 IV. TG146.2-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 133480 号

责任编辑: 丁尚林
责任校对: 陶燕华

文字编辑: 徐雪华
装帧设计: 刘丽华

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: 北京云浩印刷有限责任公司
装 订: 三河市宇新装订厂
850mm×1168mm 1/32 印张 12 $\frac{3}{4}$ 字数 329 千字
2011 年 11 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: 35.00 元

版权所有 违者必究

前言

1791 年英国化学家、牧师格雷戈尔 (W. Gregor) 在黑磁铁矿中发现了一种新的金属元素, 1795 年德国化学家克拉普鲁斯 (M. H. Klaproth) 在研究金红石时也发现了该元素, 并以古希腊的泰坦神 (Titans) 命名之。1910 年美国科学家亨特 (M. A. Hunter) 首次用钠还原 TiCl_4 制取了纯钛, 1940 年卢森堡科学家克劳尔 (W. J. Kroll) 用镁还原 TiCl_4 制得了纯钛。从此, 镁还原法 (又称为克劳尔法) 和钠还原法 (又称为亨特法) 成为生产海绵钛的工业方法。

美国在 1948 年用镁还原法制出 2t 海绵钛, 从此开始了钛的工业化生产, 而实现真正意义上的工业化是在 20 世纪 50 年代。半个多世纪以来, 钛的应用在几十个行业取得了迅速的发展, 收到了显著的经济效益和社会效益, 成为航空航天、海洋、交通、化学和石油化工业不可缺少的工程材料。

我国钛工业大致经历了创业期 (1954~1978 年)、成长期 (1979~2000 年) 和崛起期 (2001 年至今) 三个阶段。进入新世纪后, 我国钛工业取得了突飞猛进的发展。2010 年, 我国海绵钛的产能已突破 10 万吨, 达到 103500t; 钛锭的产能达到 89200t。进口海绵钛 3370t, 出口 3554t; 生产钛加工材 38323t; 进口钛加工材 6134t, 出口 7551t。化工、航空航天、冶金、真空制盐等行业用钛大幅增长, 使中国钛制品的销售量达到创纪录的 35636t。特别是化工用钛量已近 2 万吨, 成为中国用钛的第一大领域。

从事钛加工生产一线的技术人员, 经常会遇到一些熔炼、铸造、塑性加工、热处理、质量检验、故障缺陷、应用和标准等方面

的问题。广大读者也希望有一本能深入浅出地解答钛生产加工中常见问题的技术读物。为此，作者经过详细调研和分析，结合多年的生产经验，精选了钛生产加工过程中容易出现的水百个技术问题，以问答的形式汇编成这本《钛材生产、加工与应用 500 问》。

本书在出版过程中得到了北京有色金属研究总院张少明院长、熊柏青副院长的大力支持及出版赞助；在编写过程中得到了北京有色金属研究总院邓国珠、朱祖芳、张翥、王希哲、谢水生等教授，中南大学田荣璋教授，北京航空材料研究院谢成木、叶镇焜、马济民、唐龙章等教授，宝山钢铁股份公司庞克昌教授，湖南金天公司唐仁波教授等的指导和帮助，在此一并表示感谢。

由于编者水平所限，遗漏和不当之处在所难免，恳请读者予以赐教和指正。

编著者

2011 年 7 月

目录

第一篇 钛的基础知识

第 1 章 概念和术语	1
1 什么是化学元素周期表?	1
2 金属的概念是什么?	1
3 有色金属的概念是什么?	2
4 合金的概念是什么?	2
5 何谓有色金属合金?	3
6 何谓钛合金?	3
7 何谓海绵钛?	3
8 何谓碘法钛?	3
9 何谓工业纯钛?	4
10 何谓 α 钛合金?	4
11 何谓近 α 钛合金?	4
12 何谓 α - β 钛合金?	4
13 何谓 β 钛合金?	4
14 何谓消除应力?	4
15 何谓退火?	4
16 何谓再结晶退火?	5
17 何谓 β 退火?	5
18 何谓等温退火?	5
19 何谓阶段处理?	5
20 何谓固溶处理?	5

21	何谓淬火？	5
22	何谓时效？	5
第 2 章 钛的金属学		6
23	钛的基本知识是什么？	6
24	钛的十大特性有哪些？	6
25	和常用材料相比，钛的比强度有什么优势？	6
26	钛的耐蚀性能如何？在常用介质中的表现怎样？	7
27	钛的耐热性能如何？	7
28	钛的低温性能如何？	8
29	钛的磁性如何？有什么用途？	8
30	钛的导热性如何？与其他金属相比怎样？	8
31	钛的弹性模量如何？与其他金属相比怎样？	8
32	拉伸强度与屈服强度很接近，对加工性能有何影响？	9
33	钛在高温下容易被氧化吗？	9
34	钛的抗阻尼性能如何？有什么用途？	9
35	钛及钛合金的三种特殊功能指什么？	9
36	何谓钛的形状记忆功能？	10
37	何谓钛的超导功能？	10
38	何谓钛的吸氢功能？	10
39	钛与不同元素相互作用的特点是什么？	10
40	钛的二元状态图有哪几种主要形式？	12
41	合金添加剂对钛合金有什么影响？	13
42	钛铝二元状态图是怎样的？有什么特点？	14
43	钛硼二元状态图是怎样的？有什么特点？	15
44	钛碳二元状态图是怎样的？有什么特点？	16
45	钛钴二元状态图是怎样的？有什么特点？	16
46	钛铬二元状态图是怎样的？有什么特点？	17
47	钛铜二元状态图是怎样的？有什么特点？	18
48	钛铁二元状态图是怎样的？有什么特点？	20

49	钛氢二元状态图是怎样的？有什么特点？	20
50	钛锰二元状态图是怎样的？有什么特点？	21
51	钛铝二元状态图是怎样的？有什么特点？	22
52	钛铌二元状态图是怎样的？有什么特点？	22
53	钛镍二元状态图是怎样的？有什么特点？	24
54	钛氧二元状态图是怎样的？有什么特点？	24
55	钛钡二元状态图是怎样的？有什么特点？	25
56	钛硅二元状态图是怎样的？有什么特点？	25
57	钛锡二元状态图是怎样的？有什么特点？	27
58	钛矾二元状态图是怎样的？有什么特点？	27
59	钛钨二元状态图是怎样的？有什么特点？	28
60	什么是 α 稳定元素？对钛合金有什么影响？	28
61	什么是 β 稳定元素？对钛合金有什么影响？	29
62	什么是中性元素？对钛合金有什么影响？	29
63	什么是铝当量和钼当量？	29
64	钛合金按照组织结构是如何分类的？	30
65	什么是 α 钛合金？有什么特点？	30
66	什么是 β 钛合金？有什么特点？	30
67	什么是 $\alpha+\beta$ 钛合金？有什么特点？	30
68	试比较钛合金的组织分类、成分、显微组织、性能等特点。	31
69	钛合金按照用途有哪些分类？	32
70	钛合金按照强度有哪几类？有什么特点和应用？	32
71	什么是工业纯钛？有什么特点？	33
72	什么是耐热钛合金？有什么特点和应用？	33
73	什么是耐腐蚀钛合金？有哪些特点和应用？	34
74	什么是低温钛合金？有哪些特点和应用？	35
75	列表说明典型的耐热钛合金的使用温度和化学成分。	35
76	世界各国常用钛合金有哪些？其成分和钼当量、铝当量如何？	36

第 3 章 钛的性能	43
77 钛的物理性质如何?	43
78 钛的主要物理参数有哪些? 同其他金属相比如何?	43
79 钛的强度性能如何?	44
80 钛的持久性能如何?	45
81 钛的硬度如何?	45
82 钛的弹性模量如何?	45
83 钛的断裂韧性和冲击韧性如何?	46
84 钛的高温力学性能如何?	46
85 钛的低温力学性能如何?	47
86 钛的化学性质如何?	47
87 钛的耐腐蚀性能原理是什么?	48
88 纯钛在不同介质中的腐蚀性能如何?	49
89 钛在无机酸中的耐腐蚀性能如何?	51
90 钛在有机酸及有机化合物中的耐腐蚀性能如何?	52
91 钛在碱中的耐腐蚀性能如何?	53
92 钛在氯气、氯化物和含氯化物中的耐腐蚀性能如何?	53
93 钛在溴、碘和氟及其化合物中的耐腐蚀性能如何?	54
94 钛在河水、海水中的耐腐蚀性能如何?	54
95 Ti-Pd 和 Ti-Ni-Mo 钛合金的耐腐蚀性能如何?	55
96 钛的腐蚀形态有哪些?	59
97 什么是缝隙腐蚀? 有哪些特征和规律?	59
98 什么是点腐蚀? 有哪些特征和规律?	61
99 什么是吸氢与氢脆? 有哪些特点和规律?	62
100 什么是应力腐蚀开裂? 有哪些特征和规律?	64
101 什么是电偶腐蚀? 有哪些特征和规律?	64
第 4 章 钛的资源和历史	66
102 钛是如何被发现的?	66
103 世界钛的资源如何?	66

104	我国钛的资源如何？	67
105	世界主要的海绵钛和钛加工生产厂家有哪些？其主要产品有 哪些？	68
106	我国钛的发展历史是怎样的？	69
107	美国钛的发展历史是怎样的？	70
108	俄罗斯钛的发展历史是怎样的？	71
109	日本钛的发展历史是怎样的？	72
110	欧洲钛的发展历史是怎样的？	72
111	中国和国际钛的学术交流会主要有哪些？举办情况如何？ ...	73

第 5 章 钛的标准 74

112	世界主要标准有哪些？其简称和制定部门分别是什么？	74
113	中国国家标准中常用的钛标准有哪些？	75
114	中国国家军用标准中常用的钛标准有哪些？	76
115	美国试验与材料协会标准中常用的钛标准有哪些？	77
116	美国宇航材料技术标准（机动车工程师协会标准）中常用的 钛标准有哪些？	78
117	美国军用标准中常用的钛标准有哪些？	82
118	英国标准中常用的钛标准有哪些？	83
119	俄罗斯标准中常用的钛标准有哪些？	85
120	日本标准中常用的钛标准有哪些？	86
121	德国标准中常用的钛标准有哪些？	86
122	法国标准中常用的钛标准有哪些？	87
123	ISO 国际标准中，外科植入物用钛有哪些标准？	87
124	各国标准对照表。	87
125	各国加工钛及钛合金牌号是如何对应的？	87
126	中国、俄罗斯、美国的铸造钛及钛合金牌号和标准是如何对 应的？	91
127	各国的海绵钛的牌号是如何对应的？	91
128	各国纯钛和 Ti-6Al-4V 合金的标准是如何对应的？	92

129	列表说明美国加工钛及钛合金的牌号和化学成分。·····	103
130	列表说明美国钛及钛合金棒材和锻坯的牌号和化学成分。·····	103
131	列表说明美国铸造钛及钛合金牌号和化学成分。·····	103
132	列表说明俄罗斯加工钛及钛合金牌号和化学成分。·····	103

第二篇 钛的生产和加工

第 6 章 海绵钛的生产 ·····	105
133 什么是钛矿物? ·····	105
134 什么是金红石? ·····	107
135 什么是钛铁矿? ·····	107
136 什么是海绵钛? 它的主要用途是什么? ·····	108
137 海绵钛是用什么方法生产的? 为什么呈海绵状? ·····	108
138 海绵钛的生产包括哪些步骤? ·····	109
139 什么是钛渣? ·····	109
140 为什么要用氯化冶金方法生产海绵钛? ·····	110
141 哪些钛矿物可用于氯化生产四氯化钛? ·····	110
142 氯化生产四氯化钛有哪些工艺方法? 根据什么来选择氯化工艺方法? ·····	110
143 氯化制取的四氯化钛含有哪些杂质? 如何将它们去除? ·····	110
144 镁还原法生产海绵钛的工艺过程是怎样的? ·····	111
145 镁还原法生产海绵钛过程中如何实现氯镁循环利用? ·····	112
146 镁还原法生产海绵钛有哪些工艺方法? ·····	112
147 镁还原 TiCl_4 生产海绵钛对原料有什么要求? ·····	113
148 电解法制取金属镁和氯有哪些工艺方法? ·····	113
149 镁还原法生产的海绵钛要经过哪些后处理才能变成商品海绵钛? ·····	114
150 影响海绵钛质量的主要杂质是什么? ·····	114
151 世界海绵钛生产厂家有哪些? 各采用何种生产方法? ·····	114
152 我国的海绵钛生产情况怎样? ·····	115

153	海绵钛的质量标准如何?	116
154	美国海绵钛标准中对化学成分和硬度是怎样规定的?	117
155	俄罗斯海绵钛标准中对化学成分和硬度是怎样规定的?	117
156	日本海绵钛标准中对化学成分和硬度是怎样规定的?	118
157	镁还原法生产海绵钛过程产生哪些废料? 如何治理这些 废料?	118
第 7 章 钛的熔炼和铸造		120
158	钛及钛合金一般如何进行熔炼?	120
159	简述真空自耗电弧炉的熔炼工艺过程。	120
160	什么是冷床炉熔炼技术?	120
161	合金元素有哪些加入形式? 常用中间合金的化学成分和性质 如何?	124
162	对自耗电弧炉电极有哪些要求? 自耗电弧炉电极压制方法有 哪些?	125
163	真空自耗电弧炉熔炼有哪些操作程序?	126
164	钛合金的感应熔炼技术有什么优势?	127
165	凝壳炉有哪些类型? 主要特点是什么?	127
166	简述钛铸件的熔炼和铸造工艺。	129
167	简述钛及钛合金铸造的造型工艺。	129
168	铸造有什么优点和缺点?	129
169	什么是石墨捣实型铸造? 有什么特点?	130
170	什么是熔模铸造? 有什么特点?	131
171	熔模铸造的主要应用领域有哪些?	131
172	如何对残钛料进行净化处理?	132
173	什么是铸造钛合金? 常用的铸造钛合金主要有哪些?	133
174	铸件的后处理有哪些?	134
第 8 章 钛的热加工		136
175	钛合金的加工包括哪些工艺和方法?	136
176	什么是塑性加工?	137

177	钛材料塑性加工有什么特点?	138
178	基本塑性变形方式有哪些?	138
179	什么是锻造?	138
180	什么是轧制?	138
181	什么是挤压?	140
182	什么是拉拔?	140
183	什么是焊接?	140
184	什么是粉末冶金?	140
185	什么是复合材料?	140
186	钛因为吸收氧、氮和氢导致塑性降低, 如何克服?	141
187	在加热过程中, 如何控制钛合金的升温速度?	141
188	在电炉或火焰炉中加热钛时, 如何计算加热时间?	141
第 9 章 钛的锻造		142
189	钛合金的锻造方法有哪些? 各有什么特点?	142
190	常用的锻压设备有哪些?	143
191	常用的锻造辅助设备有哪些?	145
192	锻造的变形抗力与哪些因素有关?	145
193	什么是开坯锻造? 开坯锻造中应注意哪些问题?	145
194	什么是自由锻?	146
195	制订钛合金自由锻工艺包括哪些步骤?	146
196	钛及钛合金锻造的工艺流程是怎样的?	146
197	锻造工艺中影响锻件组织和性能的因素有哪些?	146
198	锻造变形温度对锻件的组织和力学性能有哪些影响?	148
199	锻造变形程度对锻件的组织和力学性能有哪些影响?	149
200	锻造过程中的热效应对锻件的组织和力学性能有哪些 影响?	150
201	锻造后的冷却速度对锻件的组织和力学性能有哪些 影响?	151
202	两相钛合金如何选择锻造温度能获得良好的综合性能?	151

203	我国常用钛合金的锻造加热温度如何选定？	153
204	锻造过程中如何选择和控制变形量？	153
205	简述 TC4 合金饼材和环材的锻造过程。	154
206	模锻工艺有哪些分类？	155
207	开式模锻有哪些成形特点？	156
208	闭式模锻有哪些成形特点？	156
209	什么是等温模锻？	156
210	等温锻造有哪些工艺特点？	157
211	锻造过程中对润滑剂有什么要求？	157
212	钛合金模锻时采用玻璃润滑剂有哪些优势？	158
213	什么是旋转锻造？有什么工艺特点？	158
214	什么是精锻？有什么工艺特点？	159
215	什么是快锻？快锻液压机有什么特点？	160
216	什么是辊锻？有什么优点？	160
217	什么是摆锻？有什么优点？	161
218	钛锻件检验的内容和方法有哪些？	161
219	锻件的主要缺陷有哪些？其形成原因和消除方法是 什么？	162

第 10 章 钛的轧制 166

220	什么是轧制？轧制原理是什么？	166
221	热轧的特点有哪些？	166
222	热轧的优点有哪些？	167
223	热轧的缺点有哪些？	167
224	热轧工艺制度包括哪些内容？	167
225	钛及钛合金轧制温度如何选择？	168
226	确定钛的轧制工艺时应考虑哪些因素？	168
227	试述钛及钛合金板带材热轧、温轧和冷轧的简明工序。	169
228	纯钛板材的轧制工序是怎样的？	169
229	3.2mm TC4 合金板材热轧道次如何分配？	170

230	钛板材、带材的加工率与性能有什么关系？	170
231	钛在冷轧时，如何避免热黏现象？	170
232	如何处理因冷轧引起的加工硬化现象？	171
233	如何对冷轧后的钛合金材料进行退火处理？	171
234	如何对冷轧轧板进行矫形？	172
235	大型带材卷如何轧制？	172
236	钛及钛合金的带材、箔材如何进行表面处理？	172
237	简述斜轧穿孔热轧法轧制管坯的工作原理和特点。	173
238	钛管材有哪几类加工方法？	174
239	轧制生产无缝管的基本工序包括哪些？	174
240	常用的轧机有哪些分类？	175
241	板材轧机的常用技术指标有哪些？	175
242	什么是森吉米尔冷轧机？有哪些优点？	177
243	森吉米尔冷轧机是怎样命名的？	178
244	目前森吉米尔轧机的发展水平如何？	179
245	日本常用冷轧机的性能参数有哪些？	179
246	棒材轧制的设备有哪些？主要技术特性如何？	179

第 11 章 钛的挤压 187

247	什么是挤压？挤压时应注意什么问题？	187
248	挤压方法主要有哪些分类？	187
249	挤压加工有什么优点？	188
250	挤压加工有什么缺点？	188
251	挤压机有哪些分类？	189
252	对挤压机有哪些要求？目的是什么？	190
253	挤压工具有哪些？各有什么作用？	191
254	什么是挤压杆？挤压杆外径是如何确定的？	191
255	用图表说明 600t 立式挤压机的工具装配及其尺寸情况。	192
256	用图表说明 3150t 卧式挤压机的工具装配及其尺寸情况。 ...	194
257	我国和俄罗斯应用的挤压机的主要技术特性如何？	195

258	钛及钛合金的热挤压过程有什么特点？	197
259	钛合金挤压过程中为什么必须使用润滑剂？	198
260	挤压用润滑剂有几类？其特点分别是什么？	198
261	什么是旋压？有哪些分类？	199
262	什么是普通旋压？其变形特征如何？	199
263	什么是强力旋压？有哪些特点？	200
264	旋压设备的结构由哪几部分组成？	201
265	旋压设备有什么特点？	201
266	旋压机有哪些分类？	201
267	钛及钛合金挤压制品常见缺陷有哪些？其产生原因和消除 方法如何？	202

第 12 章 钛的拉拔

268	什么是拉拔？	204
269	拉拔有什么工艺特点？	204
270	拉拔的优点有哪些？	204
271	实现拉拔的条件是什么？	205
272	拉拔的分类有哪些？	205
273	实心材拉拔的分类有哪些？	206
274	空心材拉拔的分类有哪些？	206
275	影响线材拉伸力的主要因素有哪些？	206
276	丝材拉拔工艺流程是怎样的？	207
277	拉拔是如何进行配模的？	209
278	拉拔时配模的要求有哪些？	209
279	拉拔配模的步骤主要包括哪些？	209
280	管材拉拔中，无芯头拉拔的分类有哪些？	209
281	空拉时的应力分布和变形特点是什么？	210
282	影响空拉时壁厚变化的因素有哪些？	210
283	空拉对纠正管材偏心有什么作用？	210
284	什么是短芯头拉拔？有什么特点？	211

285	什么是长芯杆拉拔？有什么特点？	211
286	什么是扩径拉拔？有什么特点？	212
287	金属拉拔后的组织有什么变化？	212
288	金属拉拔后的性能有什么变化？	213
289	常用的拉拔设备有哪些？	213
290	拉拔工具主要包括什么？	216
291	拉拔过程中，如何防止粘模？	216
292	金属拉拔时的润滑目的是什么？	217
293	对润滑剂有哪些要求？	217
294	钛及钛合金拉拔时，常用的润滑剂有哪些？	217
295	钛线材的拉拔制品中，常见的缺陷有哪些？其产生原因和 防止措施是什么？	218
296	钛管、钛棒的拉拔制品中，常见的缺陷有哪些？其产生原因和 消除办法是什么？	219

第 13 章 钛的焊接 221

297	什么是钛材料焊接？常用的焊接方法有哪些？	221
298	钛合金焊接前如何对工件进行清理？	221
299	什么是固相接合？	222
300	钛与异材接合时应注意哪些事项？	222
301	什么是 TIG 焊？	223
302	什么是 MIG 焊？	223
303	什么是 B-TIG 焊？	224
304	钨极氩弧焊有哪些种类？	225
305	钨极氩弧焊有哪些优点和缺点？	225
306	什么是焊枪（焊炬）？	226
307	什么是焊炬后部保护罩？	226
308	为什么焊接后表面会变色？	227
309	什么是真空电子束焊（EB 焊）？	227
310	真空电子束焊有什么特点？	228