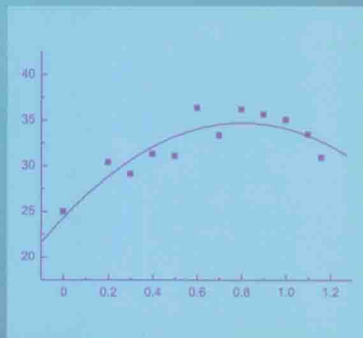
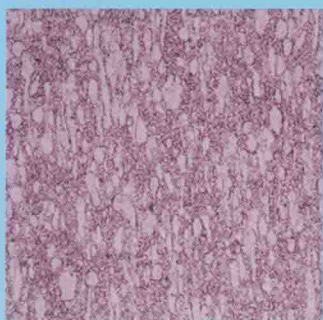


置氢钛合金

组织与性能

Microstructure and Property of Hydrogenated Titanium Alloy

袁宝国 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

置氢钛合金组织与性能

Microstructure and Property of Hydrogenated Titanium Alloy

袁宝国 编著

北 京

冶金工业出版社

2015

内 容 简 介

本书是作者在多年置氢钛合金材料研究的基础上,参考国内外近年来的研究成果编撰而成的,系统介绍了热氢处理技术在钛合金塑性加工领域的应用,突出理论研究及实际应用。

全书共分9章,分别介绍了热氢处理技术、钛合金的置氢工艺、置氢钛合金的微观组织、置氢钛合金的室温拉伸性能、置氢钛合金的室温压缩性能、置氢钛合金的高温力学性能、置氢钛合金的超塑性、置氢钛合金的除氢工艺、置氢及除氢钛合金的使用性能等。

本书可供从事金属材料及塑性加工方面的工程技术人员及研究人员阅读,也可供大专院校有关专业的师生和企业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

置氢钛合金组织与性能/袁宝国编著. —北京:
冶金工业出版社, 2015. 1
ISBN 978-7-5024-6804-0

I. ①置… II. ①袁… III. ①钛合金—研究
IV. ①TG146. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014) 第 276540 号

出 版 人 谭学余
地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926
网 址 www.cnmp. com. cn 电子信箱 yjchs@cnmp. com. cn
责任编辑 张登科 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红
责任校对 禹 蕊 责任印制 李玉山
ISBN 978-7-5024-6804-0
冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京百善印刷厂印刷
2015年1月第1版, 2015年1月第1次印刷
148mm×210mm; 7.75印张; 231千字; 238页
35.00元
冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp. com. cn
冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893
冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)
冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy. tmall. com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

钛及钛合金具有优异的综合力学性能，在航空航天等领域广泛应用，是一种理想的金属结构材料。在 15 年前，国外高度重视新合金的研制，近年来国外更重视合金性能的改善和挖掘。

氢通常被认为是一种“令人生畏”的元素，若进入金属中，很容易与金属发生强烈反应，可以引起材料内部结构的变化。在绝大多数情况下，氢使材料的许多性能（如磁性、耐腐蚀性等）恶化，而且能导致氢脆。因此，自 20 世纪 40 年代钛工业发展以来，钛合金中的氢一直被视为有害的杂质元素，认为氢在钛合金中只会产生不利影响，材料工作者一直致力于氢脆的研究，且氢在钛合金中行为的研究多集中于氢脆，至今仍在继续探索其机制及消除的途径。

然而，在 1959 年，联邦德国学者 Zwiicker 和 Schleicher 发现，在 Ti-8Al、Ti-10Al、Ti-13Al 和 Ti-8Al-3In 钛合金铸锭中加入适量的氢，可以明显改善合金的热加工性能，从而提出了氢可以增加钛合金热塑性的观点，并通过实验验证了这种观点。这在当时仅被作为一种例外而被忽视，但 Zwiicker 和 Schleicher 已揭开了钛合金中氢作用研究的新一页。

随后，关于置氢钛合金的组织与性能的研究陆续展开，并逐渐发展成为一种新的技术——钛合金的热氢处理技术（thermo-hydrogen processing, THP）。该技术是利用氢在钛及钛合金中的强扩散性，把氢作为临时合金化元素，借助氢致塑性、氢致相变以及钛合金中氢的可逆合金化作用以实现钛氢系统最佳组织结构、改善加工性能的一种新体系、新方法和新手段。

钛合金氢合金化降低金属流变应力及提高极限变形率的效应,叫做“氢增塑”。氢对钛合金热塑性、室温塑性和超塑性等都存在有益的影响,氢致室温增塑、氢致高温增塑和氢致超塑性是氢增塑技术中既有联系、又有区别的三种现象。每种现象都有各自的、不同于其他两种现象的属性。

本书是作者在参考了国内外有关资料和自己多年从事金属塑性加工、钛合金热氢处理技术理论及应用研究成果的基础上编撰的,目的是全面反映热氢处理技术在钛合金塑性加工方面的研究理论及其应用,以利于钛合金的塑性加工,适应“轻量化”的发展趋势。

本书共分9章,第1章为绪论;第2章为钛合金的置氢工艺;第3章为置氢钛合金的微观组织;第4章为置氢钛合金的室温拉伸性能;第5章为置氢钛合金的室温压缩性能;第6章为置氢钛合金的高温力学性能;第7章为置氢钛合金的超塑性;第8章为置氢钛合金的除氢工艺;第9章为置氢及除氢钛合金的使用性能。

本书在编写过程中,得到了哈尔滨工业大学李春峰教授的鼎力支持和帮助;编写中还参考或引用了国内外有关专家、学者的著作文献资料和研究成果。另外,与本书内容有关的项目研究得到了国家自然科学基金青年科学基金项目(51205102)、中国博士后科学基金项目(2012M511401)的资助,在此一并表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中不妥之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2014年8月

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 钛及钛合金	2
1.3 氢在钛中的存在状态及其行为研究	5
1.3.1 氢在钛中的存在形式	5
1.3.2 氢在钛中的溶解	6
1.3.3 氢在钛中的扩散	7
1.3.4 氢在钛中的特性	8
1.3.5 钛氢微观作用机理	8
1.4 钛合金热氢处理技术	9
1.4.1 热氢处理技术的概况	10
1.4.2 热氢处理技术的国内外研究现状	11
1.4.3 热氢处理技术的应用及前景	13
2 钛合金的置氢工艺	26
2.1 引言	26
2.2 氢处理方法	26
2.2.1 固态置氢法	26
2.2.2 液态置氢法	29
2.3 影响氢处理效果的因素	29
2.4 钛合金的吸氢过程	32
2.5 钛合金高温气相充氢研究	33
2.5.1 置氢温度对 Ti-6Al-4V 钛合金氢含量的影响	33

2.5.2	保温时间对 Ti-6Al-4V 钛合金氢含量的影响	34
2.5.3	氢压对 Ti-6Al-4V 钛合金氢含量的影响	34
2.5.4	氢气流速对 TB8 钛合金氢含量的影响	38
2.5.5	置氢温度对 TB8 钛合金氢含量的影响	39
2.5.6	置氢时间对 TB8 钛合金氢含量的影响	40
2.5.7	TB8 钛合金置氢时氢的扩散路径	42
2.6	置氢动力学与氢分布规律研究	43
2.6.1	动力学方程	44
2.6.2	动力学机制	44
2.6.3	氢分布规律研究	45
2.7	热氢处理的基本工艺	49
3	置氢钛合金的微观组织	51
3.1	引言	51
3.2	试验材料	51
3.3	组织分析方法	54
3.3.1	组织观察	54
3.3.2	X 射线衍射仪	54
3.3.3	扫描电子显微镜	54
3.3.4	电子背散射衍射	55
3.3.5	透射电子显微镜	55
3.4	氢含量对 Ti-6Al-4V 合金微观组织结构的影响	55
3.4.1	微观组织分析	55
3.4.2	X 射线衍射结果分析	58
3.4.3	透射电镜结果分析	63
3.5	塑性变形过程中置氢 Ti-6Al-4V 合金的微观 组织演变	66

3.6 氢含量对 TB8 合金微观组织结构的影响	69
3.6.1 渗氢后的显微组织演变	69
3.6.2 渗氢后的相成分分析	73
3.6.3 置氢钛合金固态相变	80
3.6.4 渗氢后的相变点及元素分布状况	82
4 置氢钛合金的室温拉伸性能	87
4.1 引言	87
4.2 性能测试方法	87
4.2.1 室温拉伸试验	87
4.2.2 原位拉伸试验	88
4.2.3 维氏硬度试验	90
4.3 氢含量对 Ti-6Al-4V 合金室温拉伸性能的影响	90
4.3.1 伸长率	92
4.3.2 抗拉强度	93
4.3.3 屈服强度	94
4.3.4 弹性模量	95
4.3.5 维氏硬度	96
4.4 Ti-6Al-4V-xH 合金室温拉伸变形应力应变 曲线数学模型	97
4.5 拉伸变形后合金的断口形貌及组织分析	104
4.6 氢对 Ti-6Al-4V 合金拉伸断裂行为的原位观察	107
4.6.1 原位拉伸试验力学性能	108
4.6.2 未置氢 Ti-6Al-4V 合金的断裂过程	109
4.6.3 置氢 Ti-6Al-4V 合金的断裂过程	110
4.6.4 除氢 Ti-6Al-4V 合金的断裂过程	112
4.6.5 原位拉伸试样的断口形貌	112

4.6.6 有限元模拟结果分析	115
5 置氢钛合金的室温压缩性能	118
5.1 引言	118
5.2 性能测试方法	119
5.2.1 室温压缩试验	119
5.2.2 磁脉冲压缩试验	120
5.3 氢含量对 Ti-6Al-4V 合金室温压缩性能的影响	121
5.3.1 极限变形率	123
5.3.2 抗压强度	123
5.3.3 屈服强度	124
5.3.4 弹性模量	125
5.4 Ti-6Al-4V-xH 合金室温压缩变形应力应变 曲线数学模型	126
5.5 压缩变形后合金的断口形貌及组织分析	128
5.6 氢对 Ti-6Al-4V 合金高速压缩性能的影响	129
5.6.1 磁脉冲压缩性能分析	130
5.6.2 磁脉冲压缩断口观察	133
5.6.3 磁脉冲压缩变形后合金的组织分析	135
5.7 置氢 Ti-6Al-4V 室温拉伸与压缩性能改性机理	141
5.8 置氢 Ti-6Al-4V 合金最佳室温塑性成型条件	144
5.9 置氢 TB8 钛合金的室温压缩性能研究	145
5.9.1 氢对 TB8 钛合金室温压缩性能的影响	145
5.9.2 渗氢后 TB8 钛合金室温压缩变形应力 应变数学模型	149
5.9.3 氢对钛合金硬度的影响	152
5.10 钛合金室温氢增塑的应用	153

5.11 钛合金室温氢增塑国内外研究现状	154
6 置氢钛合金的高温力学性能	157
6.1 引言	157
6.2 钛合金高温成型	157
6.3 钛合金氢致高温增塑	161
6.3.1 氢对 α 钛合金高温塑性的影响	162
6.3.2 氢对 $\alpha + \beta$ 合金高温塑性的影响	168
6.3.3 氢对 TiAl 基合金高温塑性的影响	176
6.3.4 氢对 Ti 基复合材料高温塑性的影响	179
6.4 钛合金氢致高温增塑机理	180
6.5 钛合金氢致高温增塑应用	180
7 置氢钛合金的超塑性	183
7.1 引言	183
7.2 超塑性	183
7.3 钛合金超塑性	184
7.4 钛合金氢致超塑性	191
7.5 钛合金氢致超塑性机理	197
8 置氢钛合金的除氢工艺	198
8.1 引言	198
8.2 差热及热重分析实验方法	198
8.3 除氢规范的制定	198
8.4 除氢 Ti-6Al-4V 合金的微观组织	202
8.5 差热分析	204
8.6 除氢 Ti-6Al-4V 合金的室温拉伸性能研究	205

8.7 除氢 Ti-6Al-4V 合金的室温压缩性能研究	209
9 置氢及除氢钛合金的使用性能	214
9.1 引言	214
9.2 摩擦磨损试验方法	215
9.3 氢对 Ti-6Al-4V 合金摩擦性能的影响	216
9.4 氢对 Ti-6Al-4V 合金磨损性能的影响	219
9.5 磨损机制	219
参考文献	228

1 绪 论

1.1 引言

钛及其合金具有比强度高、高温性能好、防腐蚀能力强、无磁性、无毒以及良好的生物相容性等一系列优异特性，在航空、航天、船舶、车辆工程、生物医学、化工、能源、海洋等领域得到了广泛的应用，被誉为现代金属，是一种理想的金属结构材料。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指标，尽量选择综合力学性能最优的钛合金。在非航空领域则主要以腐蚀性、加工性和成本为主要技术指标，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^[1]。航空工业是应用钛及其合金最早的领域，由于航空工业对高强度低密度材料的需求日益迫切，大大促进了航空钛工业的迅速发展，从机身骨架到发动机，乃至螺钉、螺母等连接件，钛合金制件在航空中的应用越来越广泛。钛及其合金的强度高（接近中强钢），密度小，用其代替结构钢和高温合金，能大幅度减轻结构的重量，这在航空部门中尤为重要。钛合金耐高温性能好，如常用的 Ti-6Al-4V 合金能在 350℃ 的温度下长期工作，因此在飞机的高温部位（如后机身等）可取代不能满足高温使用性能要求的铝合金。而且钛合金与飞机上大量使用的复合材料的强度、刚度匹配较好，能获得很好的减重效果。同时，由于两者电位比较接近，不易产生电偶腐蚀，因此相应部位的结构件和紧固件宜采用钛合金。另外，钛合金具有较高的疲劳寿命和优良的耐腐蚀性能，可以提高结构的抗腐蚀能力和寿命，满足先进飞机、发动机可靠性高和寿命长的要求。钛没有磁性，用钛建造的潜艇不必担心磁性水雷的攻击，具有很好的反监护作用，并且由于钛既能抗海水腐蚀，又能抗深层压力，其下潜深度比不锈钢潜艇增加了 80%，钛潜艇可以

在深达 4500m 的深海中航行。为此,发达国家投入了大量的资金和技术力量进行钛合金的应用研究,钛合金在飞机上的用量不断增加,甚至达到 41%^[2]。近年来,我国对钛合金的研究也十分活跃,我国钛科学技术的发展不断取得新的进展,目前钛合金已成为我国航空航天工业中不可缺少的结构材料^[3,4]。

然而,钛合金的室温塑性低、变形极限低、变形抗力大、室温成型容易开裂,限制了钛合金的室温塑性成型。所以,目前大部分钛合金仍需要在高温下进行塑性成型^[5,6]。虽然钛合金在高温下塑性变形性能较好,但是热变形温度高、流动应力大、应变速率低,特别是对于那些高强、高韧、高模量、耐高温的难变形钛合金,这种现象尤为严重,限制了钛合金的应用。此外,钛合金的热加工还会导致一些问题,比如系统或工艺的高温保护困难;对模具材料要求高,要求模具能够在 900℃ 以上的高温下仍需具有足够的强度;并且对成型设备的要求较高,使得现有设备加工钛合金结构件的能力大大降低,对研制新成型设备提出了更高的要求,增加了设备研制的费用和难度。为了解决钛合金塑性加工过程中所面临的问题,其途径有二:一是增加现有设备的能力,研制更大吨位的成型设备;二是降低钛合金的变形抗力和成型温度^[7]。

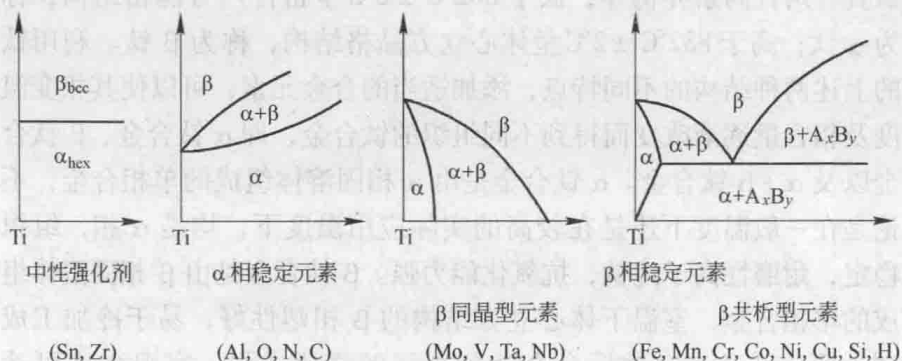
1959 年,联邦德国学者发现适量的氢可以显著改善钛合金的热加工性能,从而提出氢可以改善钛合金热塑性的观点。随后,关于置氢钛合金的组织与性能的研究陆续展开,并逐渐发展成为一种新的技术——钛合金的热氢处理技术^[8]。热氢处理技术可以从材料内部本质角度出发,通过获得一种具有高剩余塑性的热稳定性高的双峰组织结构,达到降低变形抗力和成型温度的目的。研究表明,热氢处理技术不仅可以提高钛合金的高温塑性,还可以提高钛合金的室温塑性和超塑性等,不仅有利于改善合金的冷轧、冷镦等工艺性能,而且可以改善板材的冷冲压性能^[7]。热氢处理技术拓展了钛合金的应用范围,为改善钛合金的塑性成型性能提供了一种新的途径。

1.2 钛及钛合金

钛位于元素周期表中 IVB 族,密度为 4.51g/cm³,属于轻金属。

钛具有两种同素异构体，低于 $882^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 呈密排六方晶格结构，称为 α 钛；高于 $882^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 呈体心立方晶格结构，称为 β 钛。利用钛的上述两种结构的不同特点，添加适当的合金元素，可以使其相变温度及相含量逐渐改变而得到不同组织的钛合金，即 α 钛合金、 β 钛合金以及 $\alpha + \beta$ 钛合金。 α 钛合金是由 α 相固溶体组成的单相合金，不论是在一般温度下还是在较高的实际应用温度下，均是 α 相，组织稳定，耐磨性高于纯钛，抗氧化能力强。 β 钛合金是由 β 相固溶体组成的单相合金，室温下体心立方结构的 β 相塑性好，易于冷加工成型，然后可通过时效后合金达到很强的强化效果，室温强度可达 $1372 \sim 1666\text{MPa}$ ，但热稳定性较差，不宜在高温下使用。 $\alpha + \beta$ 钛合金是双相合金，具有良好的综合性能，组织稳定性好，具有良好的韧性、塑性和高温变形性能，能较好地进行热压力加工，能进行淬火、时效使合金强化。热处理后的强度比退火状态提高 $50\% \sim 100\%$ 。高温强度高，可在 $400 \sim 500^{\circ}\text{C}$ 的温度下长期工作，其热稳定性次于 α 钛合金。目前使用最广泛的 $\alpha + \beta$ 钛合金是 Ti-6Al-4V 合金，它是在 20 世纪 40 年代晚期由美国 Hansen 开发出来的。由于其具有良好的综合性能，其使用量占全部钛合金之首，几乎达到钛合金用量的 $75\% \sim 80\%$ 。目前，Ti-6Al-4V 合金已经发展成为一种国际性的钛合金，在我国钛合金的生产和应用中也占有主要地位。

在钛中加入合金元素，随着元素种类和数量的不同， β 相变点将发生变化。合金元素与钛相互作用的性质是合金元素分类的基础，合金元素按其对于钛的同素异构转变温度的影响可分为三类^[9,10]：第一类属于 α 相稳定元素，可以提高钛的同素异构转变温度，如 Al、O、N、C、In 和 Ga 等， α 相稳定元素除了可以将 α 相区扩展到更高温度以外，还形成了 $\alpha + \beta$ 两相区；第二类属于 β 相稳定元素，可以降低钛的同素异构转变温度，该类元素可以细分为 β 同晶型元素和 β 共析型元素， β 同晶型元素（如 Mo、V 和 Ta）在钛中的溶解度很高，而即使存在非常少量的 β 共析型元素也可以形成金属间化合物，如 Fe、Mn、Co、Cr、Cu、Ni、Si 和 H 等；第三类元素属于中性强化剂，对钛的同素异构转变温度影响小，如 Sn、Zr、Ge、Hf 和 Th，如图 1-1 所示。

图 1-1 合金化元素对钛合金相图的影响^[9]

钛合金的两种不同晶体结构以及相应的同素异构转变温度是其获得各种不同性能的基础，因此非常重要。金属塑性变形的容易程度按密排六方（HCP）、体心立方（BCC）再到面心立方（FCC）的顺序逐渐增大。晶体发生塑性变形时滑移系越多，金属发生滑移的可能性越大，塑性就越好。密排六方结构的 α 钛具有 3 个滑移系，而体心立方结构的 β 钛有 12 个滑移系。因此 β 钛的塑性变形能力高于 α 钛。

商业化纯钛、低合金化的钛合金（如 Ti-3Al-2.5V 合金）以及 β 钛合金（如 Ti-22V-4Al、Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al、Ti-20V-4Al-1Sn、Ti-16V-4Sn-3Al-3Nb 以及 Ti-35Nb-2Ta-3Zr 合金）等室温塑性高，具有优良的室温成型工艺性能，可以比较容易地进行室温塑性成型，是适合冷加工的合金^[11~13]。但是，大部分 $\alpha + \beta$ 合金的室温成型性能较差，导致其加工成本较高。

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。世界上钛的工业生产始于 1948 年，目前世界年产钛材约 6 万 t。钛的应用始于 20 世纪 50 年代，是从航空航天开始的，先用于航空发动机，后用于车身、导弹、卫星等，并逐渐用于化工、能源、冶金等行业。20 世纪 90 年代，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。美国、俄罗斯以军

用为主, 航空航天分别占 70% 和 60%, 民用工业分别占 30% 和 40%。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, 如第四代战斗机 F-22 和波音公司的 B-777 都大量采用了钛合金。近 20 年来, 美国在大力开发先进航空钛应用技术, 如用等温锻造技术生产大型的航空锻件, 用超塑性成型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。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。中国和日本以民用为主, 航空及军工占 10% ~ 20%, 民用占 80% ~ 90%。日本钛的民用技术位于世界的前列。在日本, 钛产品已经遍及化工、石化、建筑、医疗、交通、体育、日用电子产品、炊具等各个部门。近年来, 受社会与经济发展的拉动, 我国钛的研究与产业化水平不断提高, 尤其在航空、航天、能源、化工、体育休闲、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%, 钛工业规模已经居世界第 3 位^[1]。

1.3 氢在钛中的存在状态及其行为研究

1.3.1 氢在钛中的存在形式

氢的原子半径仅为 0.046nm, 是最易扩散进入金属的元素, 在各种金属中都处于间隙位置。氢作为间隙原子处在晶格最大间隙位置时畸变能最小, 最有利。因此, 在体心立方金属中, 氢应当在四面体间隙位置, 在面心立方和密排六方金属中则处在八面体间隙位置。这个结论对于纯金属在氢浓度较低时是正确的。但除了畸变能以外, 氢还能与许多金属原子形成一定的化学键, 而这些化学键的形成将会使体系的能量降低。所以, 氢原子在金属中占据哪种位置是两种能量竞争的结果^[14]。不管氢处在钛的何种间隙位置, 都会使点阵发生畸变, 引起点阵常数增大, 从而引起体胀效应。

当钛氢系统中的氢含量超过合金的固溶度时, 可以形成氢化物,

主要有面心立方结构的 δ 氢化物、面心四方结构的 ε 氢化物和 γ 氢化物^[15~17]。TiH₂ 的点阵常数 $a = 0.44\text{nm}$ ，具有面心立方 CaF₂ 型的晶体结构^[18,19]，Ti 处在结点位置，每个单胞有 4 个 Ti 原子，H 原子在面心立方的四面体间隙位置，每个单胞有 8 个 H。

1.3.2 氢在钛中的溶解

氢溶解在 Fe、Ni、Mo 等金属中是吸热反应，因此溶解度极低。但氢溶解在 Ti、Zr、Hf 等金属中却是放热反应，因此氢在钛中的溶解度极大，且钛的吸氢是一种自发进行的过程。氢在 α 钛中的固溶度为 $20 \sim 100\mu\text{g/g}$ ，在室温时仅为 $20\mu\text{g/g}$ ，但氢在 β 钛中的固溶度可高达 $9000\mu\text{g/g}$ ，在 $\alpha + \beta$ 钛合金中的固溶度则介于二者之间。氢在 α 钛和 β 钛中有不同的溶解度，主要是因为氢在钛中间隙固溶，在 α 相和 β 相中随机占据四面体或八面体间隙位置。在 α 相结构中，每一个晶胞有四个四面体间隙位置和两个八面体间隙位置；而在 β 相结构中，每个晶格则含有 12 个四面体间隙位置加一个置换位置和 6 个八面体间隙位置加一个置换位置。因此，氢在 β 钛中的溶解度大大高于在 α 钛中的溶解度^[20~22]。

氢在金属中的固溶度 C_H 与环境中的压力有关系，由热力学方程可以推导出^[14]：

$$C_H = A \times P^{1/2} \exp[-\Delta E/(RT)] \quad (1-1)$$

式中 A ——常数；

P ——氢压；

ΔE ——氢由气态到固溶态的能量变化，kJ/mol；

T ——置氢温度，K；

R ——气体常数，J/(mol · K)。

由式 (1-1) 可以看出，氢压越大，固溶的氢含量越多。由于氢与钛能生成钛氢化物，氢渗透进钛中的过程是放热反应过程 ($\Delta E < 0$)，在真空和高温的条件下，钛氢化物就会分解出氢离子，进而形成氢分子，并从合金中逸出。于是在达到平衡时，钛中的氢含量下降。所以，氢在钛中的溶解及其反应具有可逆性。通过真空退火的方法