

文章编号:1003-1545(2020)02-0094-07

经验交流

钛合金应力腐蚀研究现状及展望

孙志杰, 王 洋

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023)

摘要:随着钛合金在舰船和海洋工程中应用范围的扩大,应力腐蚀已经变成了一个必须要面对的问题。从电化学作用、冶金因素、氢作用和晶体取向等方面介绍了钛合金应力腐蚀的研究现状,依据对钛合金应力腐蚀的研究现状提出了相关研究现存的问题,并为钛合金应力腐蚀研究做了相关展望。

关键词:应力腐蚀;电化学;冶金;氢作用;晶体取向

中图分类号: TG172

文献标识码:B

Research Status and Prospect of the Stress-Corrosion of Titanium Alloys

SUN Zhijie, WANG Yang

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

Abstract: With the expansion of titanium alloys in ship and ocean engineering, stress corrosion has become a problem that must be faced. Here is introduced the research situation of stress corrosion in titanium alloys from the aspects of the electrochemistry effect, metallurgy effect, the role of hydrogen and the crystallography effect. Based on the current study on stress corrosion of titanium alloys, the existing problems of the research are put forward and further study prospected.

Keywords: stress-corrosion; electrochemistry; metallurgy; hydrogenation; crystallography

钛在地球上储量丰富,钛及钛合金具有密度低、比强度高、耐腐蚀、耐热、工作温度范围宽、高阻尼、形状记忆和超弹性等优良特性,目前已经成为重要的结构材料。随着人类对海洋的开发、高性能舰船的发展,钛合金在海洋装备及舰船领域的应用将呈现快速上涨的趋势,预计到 2020 年,舰船及海洋工程上的钛合金用量将有 2~5 万吨^[1-3]。

随着钛合金用量的加大且钛合金多用于海工和舰船的主体结构或重要部位,包括载人深潜器、海洋工程中的钻井管线等^[4],以及海洋环境中容易产生点蚀、应力腐蚀等问题,因此,对于海洋用钛合金考察更多的是其腐蚀环境下的应力腐蚀强度因子 K_{ISCC} ^[5]。

应力腐蚀作为一种危害性极大的失效方式,

已经造成了巨大损失,据统计,应力腐蚀广泛发生于船舶、化工、海洋工程,占腐蚀失效的 38%^[6]。且应力腐蚀是没有预兆的破坏方式,能够导致材料脆化,一旦产生,裂纹扩展速率快,造成破坏的应力远小于屈服应力等^[7],因此需要对其从产生、发展到最终的破坏进行详细的研究,从而最大程度减少应力腐蚀造成的破坏。

研究表明,不少钛合金在海水中都存在应力腐蚀现象,见表 1^[7-8],从表中可以看到常见的钛合金均有应力腐蚀敏感性,有些钛合金应力腐蚀敏感性较高, K_{ISCC}/K_{IC} 甚至出现低于 0.3 的情况,合金应用性能严重劣化。

对于海洋用钛合金来讲,通常要求考虑到结构的安全性,所以工程上应防止结构在应力场下

收稿日期:2019-09-12

作者简介:孙志杰,男,1991 年生,助理工程师。

发生断裂传播。根据断裂力学准则, 对于弹塑性材料的结构件, 其相应剩余强度保持在 $0.5 \sigma_{ys}$ 以上, 但是在应力腐蚀的环境中, 材料的性能会发生脆化, 按照传统的选材方法, 可能发生弹塑性断裂向平面应变断裂转变的情况, 出现快速断裂^[9], 从而给设计和选材都带来困难。

本研究将对钛合金的应力腐蚀现状进行综述, 提出相关研究存在的问题, 并对钛合金应力腐蚀研究进行展望。

1 应力腐蚀的机理

目前对于应力腐蚀开裂的机理分别从电化学、氢致开裂、组织结构(包括合金中的组织)、合

金成分影响等几个方面进行研究^[10]。

1.1 电化学作用的影响

电化学方面的研究主要集中于活性通道路理论、快速溶解理论、膜破裂理论和闭塞电池理论等几个方向^[11-12]。研究主要集中在卤离子, pH 值、极化作用等因素对 K_{ISCC} 的影响。

水中卤化物离子的存在会加速对应力腐蚀开裂敏感的钛合金断裂过程。在卤化物离子浓度相同情况下, Cl^- 对应力腐蚀开裂影响最大, 溴及碘次之。高浓度溶液中, 应力腐蚀开裂速度随卤离子浓度增大而增大^[13]。T R Beck 等通过对含铝钛合金的一系列研究认为, 水溶液中仅有 Cl^- 、 Br^- 和 I^- , 能够引起钛合金的应力腐蚀, 而且还观测到钛合金应力腐蚀开裂主要发生在 α 相内^[14]。

表 1 一些钛合金的断裂韧性与应力腐蚀断裂韧性

Table 1 The fracture toughness and corrosion stress fracture toughness of some titanium alloys

材料	$R_{p0.2}/MPa$	$K_{IC}/(MPa \cdot m^{1/2})$	$K_{ISCC}/(MPa \cdot m^{1/2})$	K_{ISCC}/K_{IC}
Ti-6Al-2Zr-3Nb-1Mo	740	120	98.4	0.820
Ti-6Al-4V	797	66	39.0	0.591
Ti-5Al-2.5Sn	785	107	33.0	0.308
Ti-6Al-4V-1Sn	902	123	46.2	0.376
Ti-6Al-6V-2Sn	1 080	66	22.0	0.333
Ti-6Al-2Mo	868	128	83.7	0.654
Ti-7Al-2Co-1Ta	721~755	110	38.5	0.350
Ti-8Al-1Mo-1V	742	123	31.0	0.252
Ti-4Al-0.005B	650	114	86.4	0.760
Ti-3.5Al-2Zr-2Mo	678	125	103.0	0.860
Ti-0.8Al-1.2Fe	—	82	60.0	0.730
Ti-3Al-1Zr-0.8Mo-0.6Ni	578	104	83.2	0.800
Ti-13V-11Cr-3Al	960	110	39.0	0.350
Ti-8Mo-8V-3Al-2Fe	1 035	67	42.0	0.630
Ti-3Al-5V-5Mo-4Cr-2Zr	1 307	69	57.7	0.830

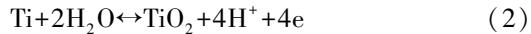
前苏联的相关人员研究也表明, 水溶液所含的无机盐不同, 对应的应力腐蚀机理也有所不同, BT4、BT3-1 在 $NaCl$ 溶液中主要 SCC 机理是裂纹顶端阳极金属溶解, 而 BT4 在 NaF 中 SCC 机理是氢脆^[15]。

在裂纹萌生及扩展时, 极化因素是十分重要的。一般情况下, 在含 Cl^- 、 I^- 及 Br^- 溶液中, 裂纹

扩展速率与电位值近似线性关系。只是根据合金成分、热处理及相对于轧制方向的取样方向不同, 曲线斜率才有变化。阳极极化能够显著提高钛合金腐蚀裂纹扩展速率^[13]。

研究钛合金的应力腐蚀开裂时, pH 值也是一个重要的影响因素。通常钛合金表面钝化膜受到损坏时, 能够立即修复, 防止进一步的腐蚀,

但当 pH 较低时,会阻碍钝化膜的再生^[16]。相关的数据也表明,裂纹尖端 pH 值下限可达 1.0~3.5。此时,裂尖金属相对于其他部位成为阳极,可能发生如式(1)~式(4)反应:



除上述反应外,可能还会有更低价的氧化物如 Ti_2O 、 TiO 等作为中间产物生成^[17]。裂尖发生阳极溶解,同时,裂尖 H^+ 浓度增加,抑制钝化膜再生,促进裂纹扩展。黄显亚等对 $\text{Ti}-5\text{Al}-2.5\text{Sn}$ 和 $\text{Ti}-5\text{Al}-4\text{V}$ 两种钛合金的应力腐蚀进行研究,发现裂纹尖端的 pH 值可低至 1.7~2.1,并认为这两种合金在 NaCl 溶液中经历了选择性阳极形核 \rightarrow pH 值下降 \rightarrow Cl^- 富集 \rightarrow 金属电位下降 \rightarrow 反应放氢 \rightarrow 氢致开裂这一过程^[18]。

除了对钛合金应力腐蚀的宏观过程进行研究外,作为应力腐蚀的稳态扩展阶段的控制因素,电化学反应机制的研究也是引人关注的。尽管无法直接对裂纹尖端进行电化学动力学研究,但文献[19]利用极化曲线研究钛合金腐蚀过程中的动力学机理,表明钛合金阴极析氢的过程是:



文中也指出钛合金阳极氧化的控制步骤是由非整比氧化物 TiO_{1+x} 参与的。

塑性变形对 TC4 合金试电化学性能有显著影响,在高应变条件下,钛合金腐蚀速率会比无应变的 TC4 高 1~2 个量级。这是由于阳极溶解中,裂尖金属表面钝化膜不断开合,这个过程中还会产生一个交流电场,钝化膜修复较快的金属在应力腐蚀裂纹的扩展中伴随着交流信号的产生^[20],在 D Munz 等利用交流电研究腐蚀疲劳的机理,在大的疲劳谱上存在小的交流信号,表明裂纹尖端有钝化膜不断的破裂修复^[21]。

综上可以看出,钛合金的应力腐蚀受到卤离子、pH 值、外界电位、裂尖塑性变形等多方面影响,并且当有裂尖阳极溶解现象发生时,会伴随有微小的交流信号。

1.2 合金元素、杂质元素、热处理的影响

在钛合金主要的合金元素中,铝、锡往往会使

对应力腐蚀造成不利影响,而同晶型 β 稳定元素的影响是有益的。对有应力腐蚀敏感性的钛合金,需要用合理的热处理技术来规避产生增加应力腐蚀敏感性的 Ti_3Al 的出现。

铝含量增加会导致钛合金应力腐蚀敏感性增加。当铝含量超过 4% 时,有析出 α_2 相(Ti_3Al)的情况,导致合金的应力腐蚀强度因子门槛值降低,增加裂纹扩展速率。但合理的热处理可以降低高铝含量钛合金的应力腐蚀敏感性。在二元钛合金中还发现由于 α_2 质点的析出及粗化,其稳定性随着时效时间的加长而降低。时效持续时间增至 500 h 时,由于析出质点与基体金属之间的共格键的损失以及晶格受阻力程度的减少,合金的稳定性反而得到提高^[22],在 $\text{Ti}-7\text{Al}-2\text{Nb}-1\text{Ta}$ (Ti721) 上便出现上述情况。美国海军工程实验室海军用合金研究组对 $\text{Ti}-7\text{Al}-2\text{Nb}-1\text{Ta}$ (Ti721) 合金在海军工程中的应用进行了大量研究,发现该合金在海水中出现应力腐蚀时的剩余强度仅为屈服强度的 45%,当热处理温度在 Ti_3Al 相区以上,随后水淬,即可将应力腐蚀强度提高到 90%,但时效、退火+缓冷的流程均会导致 Ti_3Al 出现,从而出现高的应力腐蚀敏感性^[23]。

Crossley 发现添加同晶形 β 稳定元素,能够影响到 Ti_3Al 形成的动力学过程以及 Ti_3Al 相区的扩展,抑制 Ti_3Al 的析出,从而提高钛合金的抗应力腐蚀性能,这表明同晶形 β 稳定元素都具有使钛合金提高抗应力腐蚀的能力。Sn 元素则会扩大含有 Ti_3Al 的相区,导致容易生成 Ti_3Al ,降低合金的抗应力腐蚀性能^[24]。

对于能提高抗应力腐蚀的合金元素,目前研究的并不多,更多的是集中在耐蚀钛合金的添加元素上。其中 Ni 元素对钛合金热力学稳定性有积极影响,能够与 Ti 形成可溶于 NaCl 的 Ti_2Ni 金属间化合物,化合物中的 Ni 能够沉积在金属表面,使得金属表面处于钝化范围内。同时 Ti_2Ni 能够降低氢的过电位,加速它的放电过程,降低合金增氢程度,当 Ni 含量在 2%(质量分数)时不存在应力腐蚀敏感性^[25]。除此之外,在酸性溶液中, Ni 会富集在钛合金表面且成 0 价,从 Ti_2Ni 中溶出的 Ni 在金属表面沉积,形成 NiO ,并以 NiO 的形式与周围的 O-Ti 形成络合物,从而使钝化膜稳定^[26]。

Pd 元素在钛合金中也有类似于 Ni 元素的作用, 但也有文献表明 Pd、Pt 等元素在钛合金中属于阴极性合金元素, 作为电正性元素, 它们会以一定的方式在合金表面积聚, 形成很高的还原电流, 促使钛合金钝化^[27]。而加入金属 Ru 来提高耐蚀性则是由于形成了 TiRu 金属化合物, 影响此处的氢过电位, 扩大了保护范围^[28]。

Mo 元素的加入除能够提高钛合金的热力学稳定性, 抑制析出相外, 钛合金中含有 Mo 元素时, α 相和 β 相的原子结合强度均提高, Mo 元素属于 β 稳定元素, 在钛合金 α 相出现裂纹时, 合金中的 β 相可以有效阻止裂纹继续扩展, 起了抗应力腐蚀作用^[29]。除此之外, Mo 元素和 Zr 元素还能够提高钛合金对亚临界裂纹扩展的抗力, 从而提高其止裂能力^[30]。

对于 V 对钛合金抗应力腐蚀性能的影响, 文献[31]研究表明, 加入有利于形成 β 相的元素 V, 在 α/β 合金中, β 相可以阻止敏感 α 相中的裂纹扩展, 提高抗应力腐蚀能力, 但对于 V 来讲, 提高钛合金抗应力腐蚀性能的主要原因是形成了 β 相, 由于 V 与 Ti 的原子半径相差大, 在合金表面的 VO^{2+} 反而会增加表面缺陷浓度, 降低氧化层的稳定性, 导致合金耐蚀性能下降^[32], 这表明 V 对钛合金抗应力腐蚀的能力可能没有 Mo 的效果明显。

对于 Nb 元素来讲, 由于 Nb 元素的化合价为 +5, 而钛合金的氧化膜中存在 O 空位, 由于钛合金的氧化由 O 元素控制, 当氧化膜中存在 Nb^{5+} 时可以有效减少 O 空位, 抑制 O 扩散, 从而降低氧化膜向金属基体扩展, 提高金属耐蚀性^[32]。

尽管添加同晶型 β 稳定元素有利于提高应力腐蚀抗力, 但 β 应力腐蚀性能并不是随 β 相含量的增加单调递增的。一些观点认为, 如果 β 相连续且含量较少的话, 由于氢在 β 相中扩散快, β 相反而会成为氢的扩散通道, 导致 α 相更加容易开裂^[33]。而在更早的文章中也有类似的报道, 在 Ti-6Al-4V 中如果存在连续的 β 相, 在内部氢的质量分数在 47×10^{-6} 时就会出现裂纹亚临界扩展^[34]。

对于杂质元素的影响, O 对钛合金的作用已经有了一定研究, 当 O 含量超过 0.2% 时, 工业纯

钛在水介质中能够产生应力腐蚀。也有相关研究表明, C、N 和 O 均使应力腐蚀敏感性升高^[11], O 在 Ti 中能促进 α_2 相的生成, 从而促进应力腐蚀的发生^[28]。

1.3 应力腐蚀中氢的作用

由于在应力腐蚀现象中氢都起到了重要作用, 出现了较多关于氢在应力腐蚀断裂中作用机理的研究, 主要集中在氢引起钝化膜性能变化、氢对阳极溶解的影响、氢对尖端塑性区的影响、氢造成原子间结合力降低等方面。

关于氢的作用, 乔利杰等认为氢在阳极溶解型开裂中起到促进的作用, 同时, 氢对于钝化膜也有一定影响, 并认为氢进入钝化膜后会生成 $M_xH_yO_2$ 类型的化合物, 从而改变表面钝化膜的性质, 使得钝化膜与基体结合强度下降, 降低了对基体的保护能力。同时, 也给出了氢与应力对腐蚀过程的协同影响的计算公式:

$$i = i_0 \exp\left(\alpha \frac{\Delta U - T \Delta S}{RT}\right) \cdot \exp\left[\alpha \frac{A(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2)}{2E\rho RT}\right] \cdot \exp\left(\alpha \frac{\sigma_H \bar{V}_H}{RT}\right) \quad (6)$$

其中 i 和 i_0 为有氢应力和无氢应力时的腐蚀电流。 ΔU 和 ΔS 分别为氢引起的内能和熵变化, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别表示三个主应力, σ_H 表示三向应力, \bar{V}_H 是 H 元素偏摩尔体积^[35]。而钛合金的耐蚀性也是由于表面存在致密的氧化膜, 因此, 氢对金属氧化膜的作用也是值得关注的, 实际上已经有研究报道证实氢能通过降低钝化膜稳定性改变钛合金钝化膜的耐蚀性^[36]。

虞炳西等通过使用 X 射线衍射仪测定出不同氢含量的 Ti-30Mo 合金的 Debye 特征温度及晶格常数变化, 表明随着氢含量增加, Debye 特征温度降低, 晶格常数增加, 证实了氢含量增加会导致金属原子键合力减弱, 造成金属脆化。这为应力腐蚀中氢的作用提供了有力证据^[37]。

除了氢弱化原子键合力之外, 有研究认为氢能够促进局部塑性变形, 并通过位错的滑移形成解理裂纹核, 随之氢会在裂纹内部聚集形成氢气, 产生巨大的氢压, 从而导致内压协助外力, 使得裂纹迅速扩展^[38]。

也有观点认为, 在应力腐蚀中, 氢易被钛吸

收,由于钛合金对氢脆敏感,氢含量较高时,很容易产生不同类型的氢化物,该物质脆性大,且伴有体积膨胀。氢含量较低时,由于氢定向扩散到裂纹尖端,形成具有脆性且体积增大的感生氢化钛片状组织,导致裂纹扩展^[39]。王德明等通过超高压透射电镜原位试验表明,即使在(40~50)×10⁻⁶含氢量的情况下,也有氢致开裂的情况发生^[40]。当氢含量低于15×10⁻⁶时,可以防止发生氢化物型的氢脆,但应力感生氢化物和可逆氢脆仍难以避免^[41]。

近年来,根据试验中观察到由氢的空位浓度增加而发展出新的氢开裂理论。该理论认为,氢和由塑性变形引起的过量空位发生聚集形成微孔洞,导致剪切局部化,增大了局部剪切不稳定性。该理论也提到过量空位能促使位错通过攀移的方式越过障碍,提高局部塑性,可能对氢滞后塑性变形理论有重要作用,但目前的研究仍不完善^[42]。

目前为止,仍未就氢在应力腐蚀中的作用达成一致,也没有一个完善的理论来解释氢在合金中对应力腐蚀作用的机理,但降低氢含量,仍是钛工业的重要话题。

1.4 应力腐蚀中晶体学取向问题

研究者通过X射线和EBSD等技术研究钛合金应力腐蚀断口中的小平面取向(脆性断裂的解理面)。早期通过X射线,M J Blackburn等发现应力腐蚀中的解理面在Ti-6Al-4V和Ti-8Al-1Mo-1V中的取向与(0001)方向的夹角在10°~15°^[43]之间。Williams研究证明,对于试验的近 α 钛合金来讲,解理面取向与(0001)方向夹角在12°~16°之间,Ti-8Al-1Mo-1V解理面取向与(0001)夹角则为6°左右^[44]。

J K Gregory等对TC4板材应力腐蚀的研究显示,应力腐蚀敏感性与板材组织有关,即c轴平行于应力方向的晶粒密度,c轴平行于应力方向的晶粒越多, K_{ISCC} 越低,而且没有观察到在基面上的滑移,并据此推论认为Ti-6Al-4V的应力腐蚀开裂是氢脆引起的,并建立了取向-弹性模量-应力腐蚀性能之间的关系,认为成分和相组成相同的合金,弹性模量高的方向应力腐蚀敏感性强^[45]。

对于晶体取向与应力腐蚀之间的关系还有

待于进一步的研究,但可以看出应力腐蚀与合金中晶体的取向确有关联,而且也与合金的成分有关,但具体的关系尚不明确。

2 钛合金应力腐蚀研究发展方向

2.1 对海洋工程用钛开展研究

海洋是一个容易引起腐蚀的环境, K_{ISCC} 比 K_{IC} 更加能够反映真实工况下的断裂韧性,因此研究相关合金的应力腐蚀性能特别是机理方面,对于拓展钛合金在海洋工程中的应用范围、挖掘合金潜力、开发新型合金都有着重要意义。

2.2 SCC中电化学作用综合性研究

对于钛合金的应力腐蚀研究,总体上仍缺乏系统性。例如,对于钛合金应力腐蚀中的电化学作用机理研究,更多的是从单一变量进行研究,实际上,电化学作用过程是极其复杂的,卤离子、pH、是否外加应力等都会对其电化学性能造成影响。而且这些因素相互之间均存在相互作用,因此有必要进行试验来解释各因素之间的相互关系,同时可以利用电化学方法来制造与应力腐蚀裂纹尖端近乎相同的环境,从而建立这些变量与 K_{ISCC} 和应力腐蚀性能的关系。

2.3 合金成分对 K_{ISCC} 影响的研究

对于同种组织不同合金,合金成分对 K_{ISCC} 的影响是巨大的,在 α 稳定元素中,除Zr元素外,其余所有的 α 稳定元素都具有降低 K_{ISCC} 的效果。但对于保证一定Al当量的合金来讲,Zr是有益元素,尽管如此,Zr有益的机理未见到相关报道。对于 β 稳定元素,其作用较为复杂。已知的文献^[46]表明,含有Mo、Pd、Ni元素的钛合金均具有较好抗应力腐蚀开裂的能力。但目前为止研究的合金元素不多,合金元素之间的相互作用并不清楚,需要进一步对多种合金元素的影响以及影响机理进行深入研究。

对于杂质元素,如O元素,是典型的 α 强化元素,对于合金强度提高也有重要的作用,但是O含量的升高,会带来应力腐蚀性能的下降,同时也有报道称在钛合金的应力腐蚀中,Al元素和O元素对于应力腐蚀的影响存在协同作用,同时这也表明元素的影响并不是线性的。因此O和

Al元素含量影响的非线性是值得关注的问题。

2.4 焊接结构应力腐蚀的研究

在舰船及海洋工程领域,焊接结构是及其重要的,在船舶与海洋工程中焊接占了工时相当大的比例,可以说是船舶、海工最重要的材料加工工艺。但目前为止,关于钛合金焊接结构的应力腐蚀研究方向的文献、报告极为稀少,而焊接接头往往存在残余应力,成为应力腐蚀的薄弱区域,这种情况对于舰船及海洋工程的发展极为不利。

3 结语

随着国家对海洋开发的重视程度不断提升,海洋用钛合金的用量将不断增加,对海洋用钛合金应力腐蚀开裂问题的研究也会变得愈加急迫。因此,需要加大对钛合金抗应力腐蚀性能的研究,重点应该在以下几个方面:

(1)钛合金应力腐蚀机理较为复杂,极有可能是阳极溶剂和氢致开裂的交互作用,事实上也有研究表明,氢能够促进阳极溶解,不能将二者分割开来,需要将阳极溶解与氢致开裂综合起来研究。

(2)目前针对合金元素对钛合金抗应力腐蚀性能的影响研究尚不完善,需要开展研究元素与 K_{ISCC} 关系的系列试验。通过这些试验探明合金元素的作用及其作用机理,以及多种合金元素对钛合金抗应力腐蚀综合影响。

(3)通过不同的热处理,探究热处理与抗应力腐蚀性能的关系、组织与应力腐蚀开裂的关系、合金中能够导致抗应力腐蚀性能劣化的相,从而能够通过合理热处理工艺制度提高现有钛合金抗应力腐蚀能力。

参考文献:

- [1] 莫畏. 钛[M]. 北京:冶金工业出版社, 2011:1.
- [2] 林翠,杜楠. 钛合金选用与设计[M].北京:化学工业出版社, 2014: 25.
- [3] 高敬. 国内外钛合金研究发展动态[J]. 世界有色金属, 2001(2): 4.
- [4] 孟祥军,陈春和,余巍,等.几种海洋工程用钛合金及其应用[J]. 中国造船, 2004, 45(增刊): 38.
- [5] 程德彬. 船用钛合金与航空钛合金的使用性能差 异[J]. 材料开发与应用, 2012, 27(3): 60.
- [6] 娜玲. 环境腐蚀及其应力耦合的损伤力学方法与结构性能预测研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [7] 许立坤. 海洋工程的材料失效与防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014: 277.
- [8] 褚武杨,乔利杰,李金许,等. 氢脆和应力腐蚀-典型体系[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 795.
- [9] 威廉 S 佩利尼著. 结构完整性原理[M], 周黻秋, 王克仁,译. 北京: 国防工业出版社, 1983: 38.
- [10] 褚洪. 钛合金的应力腐蚀[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(1): 47.
- [11] 黄克智,肖纪美. 材料的损伤断裂机理和宏微观力学理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 227.
- [12] 褚武扬. 阳极溶解型应力腐蚀[J]. 科学通报, 2000, 45(24): 2581.
- [13] 麦烈霍夫 K P 著.钛合金及铝合金的应力腐蚀开裂 [M].陈石卿,译.北京:国防工业出版社, 1982: 18.
- [14] BECK T R, BLACKBURN M J. Stress corrosion cracking of titanium alloys[J]. AIAA Journal, 1973, 6(2): 326.
- [15] 玛丽切夫 A V. 根据在腐蚀介质内外钛合金延迟开裂研究亚临界裂纹增长的动力学和机理[J]. 段淑娥译. 材料开发与应用, 1981, 36(7): 373.
- [16] 沈保罗. 钛合金的应用和应力腐蚀[J]. 四川化工与腐蚀控制, 2000, 3(2): 43.
- [17] 严铿. T225NG 钛合金在高温高压水介质中应力腐蚀行为的研究[J]. 稀有金属, 2004, 28(2): 425.
- [18] 黄显亚,朱祖芳,王德明,等. 钛合金应力腐蚀开裂机理的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1982, 2(4): 37.
- [19] 姜应律,吴荫顺. 利用极化曲线推测中性水溶液中钛合金表面的氧化还原反应机理[J]. 北京科技大学学报, 2004, 26(4): 395.
- [20] 姜应律,吴荫顺. 钛合金 TC4 塑性变形后在 3_NaCl 溶液中的交流阻抗谱[J]. 北京科技大学学报, 2004, 26(6): 616.
- [21] MUNZ D, BACHMANN V. The relationship between crystallographic texture and salt water[J]. Material-Wissenschaft und Werkstofftechnik, 1980, 11(5): 168.
- [22] CAVALLARO J I, WLLCOX R C. Embrittlement of Ti-7Al binary alloy in sea water [J]. Corrosion, 1971, 27(4): 157.
- [23] CROSSLEY F A. Kinetics of Ti3Al grain boundary precipitation in Ti-Al binary and Ti-Al-x ternary alloys and correlation with mechanical properties [J]. Metallurgical Transactions, 1969, 1(7): 1921.
- [24] LEE W W. Development of structural titanium alloys for marine applications [J]. Ocean Eng, 1969, 1

- (4): 375.
- [25] SEDRIKS A J, ROWEL D T. Electrochemical behavior of Ti-Ni alloys in acidic chloride solution [J]. *Corrosion*, 1972, 28(4): 137.
- [26] 余存烨. Ti-0.8Ni-0.3Mo 合金氢化腐蚀探析 [J]. 稀有金属材料与工程, 1991(3): 73.
- [27] COTTON J B. The role of palladium in enhancing corrosion resistance of titanium [J]. *Platinum Metals Review*, 1967, 11(2): 50.
- [28] UTJERING L, Williams J C. Titanium 2nd [M]. Berlin: Springer, 2007: 168.
- [29] 杨东. 钛合金的腐蚀机理及耐蚀钛合金的发展现状 [J]. 钛工业进展, 2011, 28(2): 4.
- [30] 吴以琴. 用 $J-R$ 阻力曲线研究几种钛合金的断裂韧性 [J]. 稀有金属材料与工程, 1988 (6): 6.
- [31] 高娃, 侯振声. 钛合金的应力腐蚀开裂分析 [J]. 钛工业进展, 1997 (5): 38.
- [32] METIKOS-HUKOVIC M, KWOKAL A, PILJAC J. The influence of niobium and vanadium on passivity of titanium-based implants in physiological solution [J]. *Biomaterials*, 2003(24): 3765.
- [33] MADINA V, AZKARATE I. Compatibility of materials with hydrogen particular case: hydrogen embrittlement of titanium alloys [J]. *Hydrogen Energy*, 2009, 34(2): 5976-5980.
- [34] YEH M S, HUANG J H. Hydrogen-induced subcritical crack growth in Ti-6Al-4V [J]. *Acta Metallurgica*, 1997, 36(12): 1415-1421.
- [35] 乔利杰, 高克玮. 氢对阳极溶解型应力腐蚀的影响 [C]. 第十届全国疲劳与断裂学术会议, 广州: 中国金属学会, 2000.
- [36] 张睿. 钛及钛合金在海水中的应力腐蚀及氢脆敏感性研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2014.
- [37] 虞炳西, 高树凌. 氢对 Ti 合金的 Debye 温度和晶格常数的影响 [J]. *金属学报*, 1990, 26(6): 415.
- [38] 张俊善. 材料强度学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2014: 322.
- [39] 张廷杰. 钛合金相变的电子显微镜研究(IV)-钛合金中的氢化物 [J]. 稀有金属材料与工程, 1990 (1): 75.
- [40] 王德明, 黄显亚, 朱祖芳. 用超高压电镜研究钛中氢致破坏机理 [J]. 稀有金属, 1983(5): 21.
- [41] 辛社伟, 赵永庆, 曾卫东. 钛合金固态相变的归纳与讨论 (II)-共析和有序化转变 [J]. 钛工业进展, 2008, 25(1): 40.
- [42] 钟群鹏, 周煜, 张峰. 裂纹学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2014: 136.
- [43] BLACKBURN M J, SMYRL W H, FEENEY J A. Titanium alloys, in: B.F Brown (Ed), stress corrosion cracking in high strength steels and in titanium and aluminum alloys [R]. Washington DC: Naval Research Lab, 1972.
- [44] LPILCHAK A, YOUNG A H, WWLLIAMS J C. Stress corrosion cracking facet crystallography of Ti-8Al-1Mo-4V [J]. *Corrosion Science*, 2010, 52(10): 3287.
- [45] KGREGORY J, BROKMEIER H G. The relationship between crystallographic texture and salt water cracking susceptibility in Ti-6Al-4V [J]. *Mater Science and Engineer A*, 1995, 203(1): 365.
- [46] CHU H P. Fracture characteristics of titanium alloys in air and seawater environment [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1972, 4(10): 107-117.