

紧固件用 TB2 钛合金棒材热处理工艺研究

黄帆, 孙虎代, 海敏娜, 张伟, 闫宗义, 李乐鑫

(宝鸡钛业股份有限公司, 陕西 宝鸡 721014)

摘要: 研究了热处理工艺对原始组织为粗大 β 晶粒+少量细小 α 晶粒的紧固件用 TB2 钛合金棒材组织与力学性能的影响。结果表明: 随着固溶温度的升高, 棒材组织中 α 相含量逐渐减少, β 晶粒尺寸明显增大, 经 780 °C 固溶后强度和塑性匹配最好; 固溶+时效处理时, 随着时效温度的升高, 棒材组织中析出的次生 α 相体积分数先增加后减少, 且棒材强度先升高后降低; 经固溶+预拉伸变形+时效处理后, 棒材组织中晶粒有一定细化, 次生片状 α 相含量增多, 抗拉强度较固溶后直接时效提高了近 10%。

关键词: TB2 钛合金; 固溶时效; 低温形变热处理

中图分类号: TG166.5; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2023)01-027-05

Study on Heat Treatment Processes of TB2 Titanium Alloy Bar for Fasteners

Huang Fan, Sun Hudai, Hai Minna, Zhang Wei, Yan Zongyi, Li Lexin

(Baoji Titanium Industry Co., Ltd., Baoji 721014, China)

Abstract: The effect of heat treatment on the microstructure and properties of TB2 titanium alloy bar with coarse β grain and few fine α grain was studied. The results show that with the increase of solution temperature, the content of α phase decreases gradually, and the size of β grain increases obviously. After solution treatment at 780 °C, the strength and plasticity of the bar match best. After solution + aging treatment, with the increase of aging temperature, the volume fraction of α phase increases first and then decreases, and the strength of the bar also increases first and then decreases. After solid solution + pre-stretching deformation + aging treatment, the grain is refined to a certain extent, the content of secondary flaky α phase increases, and the tensile strength of the bar is increased by nearly 10% compared with the direct aging after solid-solution.

Key words: TB2 titanium alloy; solution and aging; low temperature deformation heat treatment

TB2 钛合金是我国研制的一种亚稳定 β 型钛合金^[1-2], 其名义成分为 Ti-5Mo-5V-8Cr-3Al, β 相稳定系数为 1.98, 在固溶状态下具有良好的工艺塑性、冷成形性和焊接性能, 经时效处理后具有高强、高韧性能, 是典型的高强钛合金。因其良好的综合性能, 主要用于制造卫星波纹壳体、火箭连接带及各类铆钉、螺钉、螺栓等^[3]。

TB2 钛合金中不仅加入了大量可与钛形成连续固溶体的 Mo 和 V 元素, 还加入了可与钛形成化合物的 Al 和 Cr 元素, 故其固溶时效强化效果十分显著^[4-5]。不同产品类型及加工工艺对应着不同的最

佳固溶时效制度。紧固件用小规格 TB2 钛合金棒材在固溶状态下具有良好的塑性和冷成形性, 在固溶时效状态下具有超高的强度, 可满足航空航天紧固件对该材料的要求。

固溶+预拉伸变形+时效是把加工硬化和时效强化结合起来的一种低温形变热处理技术, 是金属材料强化的重要手段^[6-7]。对于亚稳定 β 型钛合金, 固溶后的预拉伸变形对其 α 相的析出有促进作用, 与常规固溶+时效相比较效果更佳, 是目前提高钛合金强度最有效和最有前景的方法之一^[8]。因此, 研究了固溶、固溶+时效及固溶+预拉伸变形+时效的热处理制度对紧固件用小规格 TB2 钛合金棒材组织与性能的影响, 从组织形貌等方面分析了其强化

机理, 确定最佳热处理制度, 以期为我国紧固件用超
高强、高韧钛合金棒材的研制与生产提供数据支撑。

1 实验

实验材料为真空自耗电弧炉 (VAR) 2 次熔炼的
 $\phi 500$ mm 的 TB2 钛合金铸锭, 其化学成分满足 GB/T
3620.1—2016《钛及钛合金牌号和化学成分》要求,
采用连续升温金相法测得铸锭相变点为 765 $^{\circ}\text{C}$ 。铸
锭经锻造、轧制、拉伸等工序制备成 $\phi 11.2$ mm 的
棒材, 其组织形貌为粗大的 β 晶粒及弥散分布的细
小 α 晶粒, 如图 1 所示。

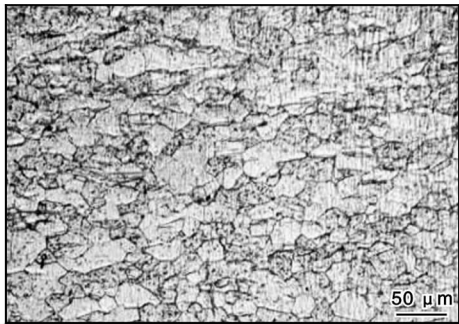


图 1 TB2 钛合金棒材的原始显微组织

Fig. 1 Original microstructure of TB2 titanium alloy bar

按照表 1 方案对 TB2 钛合金棒材进行热处理,
其中, A1 ~ A4 研究固溶温度对棒材组织与性能的影响,
B1 ~ B4 研究时效温度对棒材组织与性能的影响,
C1 ~ C3 研究固溶后不同预变形量对棒材时效态组织
与性能的影响。

表 1 TB2 钛合金棒材的热处理方案

Table 1 Heat treatment schemes of TB2 titanium alloy bar

No.	Heat treatment scheme
A1	760 $^{\circ}\text{C}$ /30 min/AC
A2	780 $^{\circ}\text{C}$ /30 min/AC
A3	800 $^{\circ}\text{C}$ /30 min/AC
A4	820 $^{\circ}\text{C}$ /30 min/AC
B1	780 $^{\circ}\text{C}$ \times 30 min/AC + 450 $^{\circ}\text{C}$ \times 20 h/AC
B2	780 $^{\circ}\text{C}$ \times 30 min/AC + 470 $^{\circ}\text{C}$ \times 20 h/AC
B3	780 $^{\circ}\text{C}$ \times 30 min/AC + 490 $^{\circ}\text{C}$ \times 20 h/AC
B4	780 $^{\circ}\text{C}$ \times 30 min/AC + 510 $^{\circ}\text{C}$ \times 20 h/AC
C1	780 $^{\circ}\text{C}$ \times 30 min/AC + 3.5% Deformation + 470 $^{\circ}\text{C}$ \times 20 h/AC
C2	780 $^{\circ}\text{C}$ \times 30 min/AC + 5.3% Deformation + 470 $^{\circ}\text{C}$ \times 20 h/AC
C3	780 $^{\circ}\text{C}$ \times 30 min/AC + 7.0% Deformation + 470 $^{\circ}\text{C}$ \times 20 h/AC

按照 GB/T 5168—2020《钛及钛合金高低倍组织
检验方法》加工金相试样, 采用 AXIOVERT 200 MAT
光学显微镜观察显微组织。按照 GB/T 228.1—2021
《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》
加工拉伸试样, 采用 INSTRON 5885 电子万能材料拉
伸试验机测试室温拉伸性能。

2 结果与分析

2.1 固溶温度对棒材组织与性能的影响

图 2 为 TB2 钛合金棒材经不同温度固溶处理后的
显微组织。固溶温度为 760 $^{\circ}\text{C}$ 时, 因固溶温度在
相变点以下, 组织中存在少量未完全转变的 α 相, β
相平均晶粒尺寸为 26.7 μm (图 2a)。固溶温度为
780 $^{\circ}\text{C}$ 时, 因固溶温度超过相变点, α 相几乎全部溶
解, 只有 β 相保留下来, 在晶界和晶粒内部开始重
新形核并长大, 平均晶粒尺寸达 31.8 μm (图 2b)。
随着固溶温度的继续升高, 平均晶粒尺寸持续增大,
但增幅变缓 (图 2c、2d)。

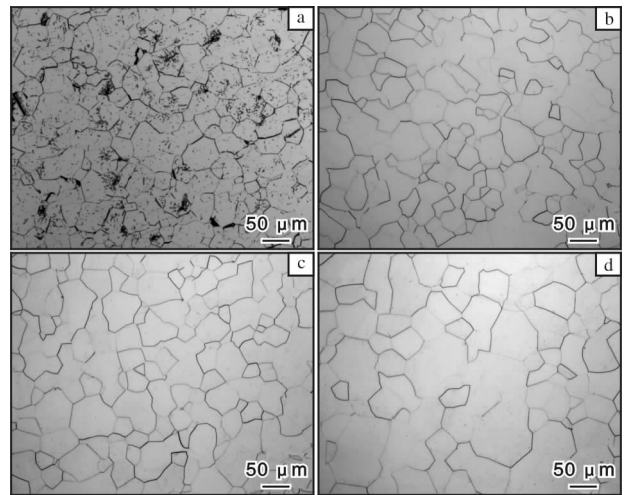


图 2 TB2 钛合金棒材经不同温度固溶处理后的显微组织

Fig. 2 Microstructures of TB2 titanium alloy bar solution
treated at different temperatures: (a) 760 $^{\circ}\text{C}$;
(b) 780 $^{\circ}\text{C}$; (c) 800 $^{\circ}\text{C}$; (d) 820 $^{\circ}\text{C}$

图 3 为 TB2 钛合金棒材经不同温度固溶后的室温
拉伸性能。从图 3 可以看出, 固溶温度低于 800 $^{\circ}\text{C}$
时, 随着固溶温度的升高, 棒材的抗拉强度逐渐升
高。780 $^{\circ}\text{C}$ 固溶时棒材抗拉强度为 886 MPa, 伸长率
达到最高值 23.3%。800 $^{\circ}\text{C}$ 固溶时抗拉强度达到了
最大值 923 MPa, 但此时对应的伸长率最低, 仅为
16%。这是因为该温度下 α 相几乎全部溶解, 固溶
强化效应达到最大。随着固溶温度的进一步升高, β

晶粒粗化, 棒材强度降低。经 780 °C 固溶后, TB2 钛合金棒材强度和塑性达到最佳匹配, 故选择 780 °C 为最佳固溶温度。

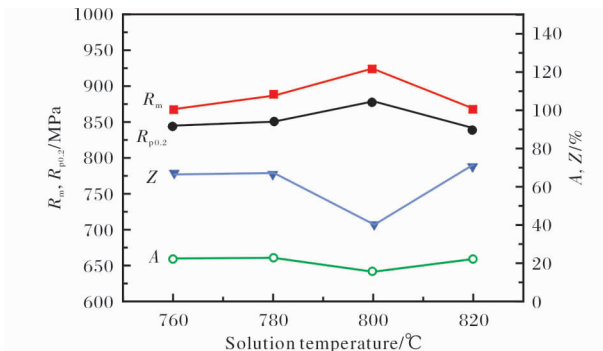


图3 TB2钛合金棒材经不同温度固溶后的室温拉伸性能
Fig.3 Room temperature tensile properties of TB2 titanium alloy bar solution treated at different temperatures

2.2 时效温度对棒材组织与性能的影响

图4为TB2钛合金棒材经780 °C固溶+不同温度时效后的显微组织。从图4可以看出, 不同温度

时效处理后的TB2钛合金棒材中 β 晶粒内分布着含量不同的 α 相晶粒, 晶粒度等级为7级。随着TB2钛合金棒材时效温度的升高, 析出的 α 相体积分数先增加后减少。这是由于 β 稳定元素含量较高的亚稳定 β 钛合金在固溶过程中有大量不稳定的残余 β 相保留, 这些残余 β 相在时效过程中会发生分解^[9]。450 °C时效时, 由于时效温度低, 形核驱动力大, α 相容易形核, 但扩散困难, 弥散析出的 α 相相对较少(图4a)。470 °C时效时, α 相形核驱动力大, 扩散也较容易, β 晶粒内析出大量弥散分布的 α 相(图4b)。490 °C时效时, 在等轴 β 晶界附近析出的 α 相比较粗大, β 晶粒内部出现 α 相亮斑, 但晶内析出 α 相的体积分数有一定下降(图4c)。510 °C时效时, α 相的长大速率非常快, 在 β 晶界和晶粒内均析出片层状 α 相(图4d)。这是由于时效温度过高, 导致亚稳定 β 相分解生成群集的片状 α 相^[9]。

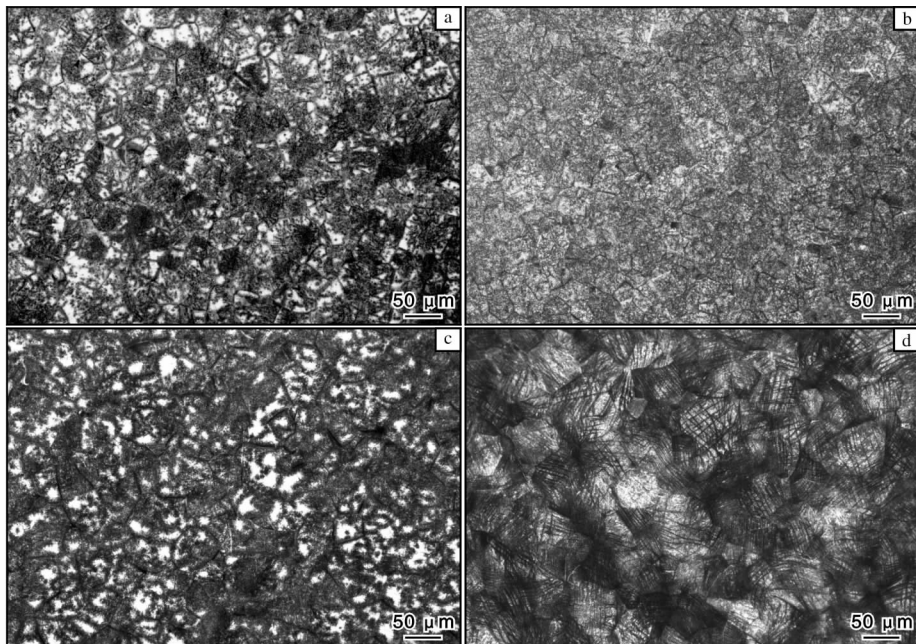


图4 TB2钛合金棒材经780 °C固溶+不同温度时效后的显微组织

Fig.4 Microstructures of TB2 titanium alloy bar solution treated at 780 °C and aging treated at different temperatures: (a) 450 °C; (b) 470 °C; (c) 490 °C; (d) 510 °C

图5为TB2钛合金棒材经780 °C固溶+不同温度时效后的室温拉伸性能。从图5可以看出, 随着时效温度的升高, 棒材强度呈先升高后下降的趋势, 延伸率和断面收缩率则相反。这与时效过程中析出 α 相的体积分数有密切关系^[10]。

450 °C时效时, TB2钛合金抗拉强度较低, 仅为1234 MPa。这是由于时效温度较低, β 晶粒虽易形核 α 相, 但扩散困难, 弥散析出的 α 相较少。470 °C时效时, 棒材抗拉强度达到了最高值1392 MPa, 伸长率最低, 此时强度和塑性均满足紧固件对TB2钛合

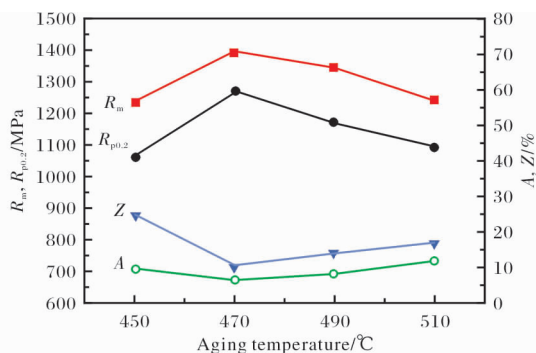


图5 TB2钛合金棒材经780 °C固溶+不同温度时效后的室温拉伸性能

Fig. 5 Room temperature tensile properties of TB2 titanium alloy bar solution treated at 780 °C and aging treated at different temperatures

金棒材性能的要求($R_m \geq 1370$ MPa, $A \geq 7\%$)。490 °C时效时,棒材抗拉强度相比470 °C时下降了3.7%。

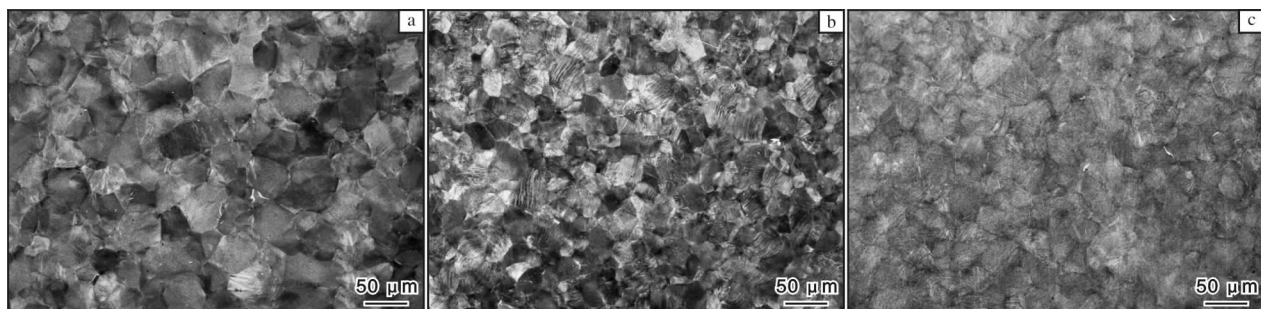


图6 TB2钛合金棒材经780 °C固溶+不同预拉伸变形+470 °C时效后的显微组织

Fig. 6 Microstructures of TB2 titanium alloy bar solution treated at 780 °C + pre-stretching with different deformation + aging treated at 470 °C: (a) 3.5%; (b) 5.3%; (c) 7.0%

图7为TB2钛合金棒材经780 °C固溶+不同预拉伸变形+470 °C时效后的室温拉伸性能。从图7可

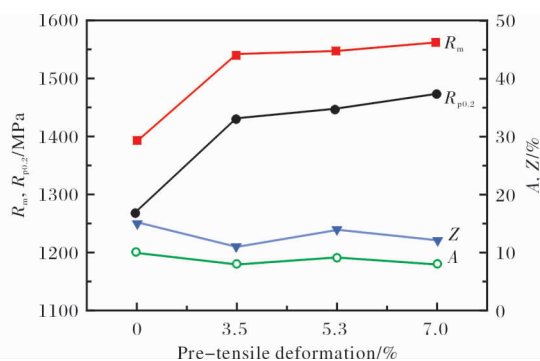


图7 TB2钛合金棒材经780 °C固溶+不同预拉伸变形+470 °C时效后的室温拉伸性能

Fig. 7 Room temperature tensile properties of TB2 titanium alloy bar solution treated at 780 °C + pre-stretching with different deformation + aging treated at 470 °C

510 °C时效时,棒材抗拉强度较470 °C时效下降了11%,而此时延伸率达到最高。

2.3 固溶后预拉伸变形对棒材组织与性能的影响

图6为TB2钛合金棒材经780 °C固溶+不同预拉伸变形+470 °C时效后的显微组织。与固溶后直接时效相比较,固溶+预拉伸变形+时效后的显微组织中晶粒有一定细化,沿晶界析出了少量弥散分布的片状 α 相,再结晶现象有增强趋势,并且随着预拉伸变形量的增加,这种特征更为明显。这是因为预拉伸变形过程中引入了大量的位错、层错等缺陷,这些晶格缺陷在后续时效过程中为次生 α 相形核提供位点,诱导次生片层 α 相快速形核并在晶粒内部和晶界析出^[11]。随着预拉伸变形量的增大,位错缠结加剧,基体内位错密度提高,析出的次生 α 相尺寸增大,数量增多。

以看出,增加预拉伸变形工序后,棒材的室温抗拉强度较固溶后直接时效提高了近10%,达到1500 MPa以上。这是由于固溶后的预拉伸变形会产生大量的位错及高的晶格畸变,为时效时析出相的形成提供了有效的核心^[12],因而棒材强度大幅升高。随着预拉伸变形量从3.5%提升至7.0%,棒材的室温抗拉强度虽逐渐升高,但增幅较小,伸长率、断面收缩率呈先升高后降低趋势。经780 °C固溶+5.3%预拉伸变形+470 °C时效处理后,TB2钛合金棒材的抗拉强度为1544 MPa,延伸率为9%,强度和塑性达到最佳匹配。

3 结论

(1) TB2钛合金棒材经固溶处理后,随着固溶温度的升高,组织中 α 相逐渐消失, β 晶粒尺寸逐渐增大;随着固溶温度的升高,棒材强度先升高后

降低, 780 °C 固溶时强度和塑性达到最佳匹配。

(2) TB2 钛合金棒材经固溶 + 时效处理时, 随着时效温度的升高, β 晶粒内部和晶界析出的次生 α 相体积分数先增加后减少, 晶粒尺寸也由细小变为粗大, 并在 510 °C 时出现了片状形貌; 随着时效温度的升高, 棒材强度先升高后降低, 在 470 °C 时达到最高值, 为 1392 MPa。

(3) TB2 钛合金棒材经固溶 + 预拉伸变形 + 时效热处理后, 晶粒细化, 次生片状 α 相含量增多, 强度较固溶后直接时效提高了近 10%。经 780 °C 固溶 + 5.3% 预拉伸变形 + 470 °C 时效处理后, 棒材抗拉强度达到 1544 MPa, 延伸率达到 9%, 此时强度和塑性达到最佳匹配。

参考文献 References

- [1] 张翥, 王群骄, 莫畏. 钛的金属学和热处理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [2] 樊梦婷, 杨华斌, 曹继敏. TB2 钛合金直丝加工工艺改进及优化[J]. 钛工业进展, 2013, 30(3): 28 - 31.
- [3] 李蒙, 凤伟中, 关蕾, 等. 航空航天紧固件用钛合金材料综述[J]. 有色金属材料与工程, 2018, 39(4): 49 - 53.
- [4] 于顺兵, 李德富, 陈海珊, 等. 钛合金 TB2 热轧棒材组

- 织与性能的试验研究[J]. 稀有金属, 2005, 29(3): 275 - 278.
- [5] 倪沛彤, 韩明臣, 张英明, 等. 热处理制度对 TB2 钛合金带材力学性能及显微组织的影响[J]. 钛工业进展, 2012, 29(6): 19 - 21.
- [6] 尹志民, 蒋蓉蓉, 李建湘, 等. 固溶后预冷拉伸变形对时效态 HS755 合金组织和性能的影响[J]. 铝加工, 2009(6): 8 - 11.
- [7] 宋振亚, 张临财, 任衍彪, 等. 预应变时效对 Ti-2.5Cu 合金力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2019, 36(6): 24 - 30.
- [8] 付朝政. 低温形变热处理对 TC4 钛合金组织及力学性能的影响研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- [9] 赵永庆, 陈永楠, 张学敏, 等. 钛合金相变及热处理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2012.
- [10] 李思兰, 侯智敏, 尹雁飞, 等. 热处理对热加工态 TB2 钛合金显微组织及力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2015, 32(6): 31 - 35.
- [11] 伍贵成, 刘会群, 冯春, 等. 固溶时效及预拉伸变形对 Ti-5.5Al-2Zr-1Mo-2.5V 合金管材组织演化及强韧性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(3): 741 - 751.
- [12] 葛鹏, 赵永庆, 周廉. β 钛合金的强化机理[J]. 材料导报, 2005, 19(12): 52 - 55.

行业动态

医用钛合金表面防护技术研究取得新成果

2023 年 1 月, 安徽工业大学先进金属材料绿色制备与表面技术教育部重点实验室张世宏教授团队在《Corrosion Science》上发表了医用钛合金表面防护的最新研究成果。

医用钛合金具有密度小、比强度高、生物相容性好和耐腐蚀性优良等特点, 是人体植入体的首选材料, 但其长期服役于人体环境中易产生腐蚀磨损, 进而影响钛合金植入体的功能。物理气相沉积(简称 PVD)技术所制备的氮化锆(ZrN)涂层具有优异的抗磨性能和生物相容性, 使其成为骨植入体的重要防护涂层。但 ZrN 涂层中存在的柱状晶界和生长缺陷, 易为腐蚀介质的渗透提供“通道”, 降低其耐腐蚀和抗腐蚀磨损性能, 限制了其在骨植入体上的进一步应用。

张世宏教授研究团队通过在 ZrN 涂层中引入金属 Zr 层, 形成 Zr/ZrN 多层涂层, 降低了涂层柱状晶界和生长缺陷, 进而提高了涂层在模拟人体溶液中的耐蚀和抗腐蚀磨损性能。研究表明, 多层涂层中的 Zr 层可优先形成 ZrO₂ 钝化膜, 且多层结构能够有效抑制腐蚀介质的渗透, 使其具有良好的耐蚀性能。同时, Zr 金属层的引入抑制了磨损过程中的裂纹扩展, 进一步提升了 Zr/ZrN 多层涂层的抗腐蚀磨损性能。

该研究工作揭示了腐蚀介质在多层涂层中的渗透规律以及钛合金表面钝化膜的形成机理, 阐明了腐蚀磨损过程中腐蚀介质与裂纹的交互作用机制, 可为 Zr/ZrN 多层涂层在医用钛合金表面防护的进一步应用提供理论依据。

来源: 安徽工业大学官网