文章编号:1004-0609(2010)S1-s0070-05

紧固件用 Ti-45Nb 合金丝材的性能评价

商国强¹,王新南¹,唐 斌²,朱知寿¹,寇宏超²,张丰收³,常 辉²

(1. 北京航空材料研究院,北京 100095;

2. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室,西安 710072;

3. 西部超导材料科技有限公司,西安 710018)

摘 要:研究不同规格的 Ti-45Nb 合金丝材的显微组织和力学性能。结果表明:随着 Ti-45Nb 合金丝材尺寸的增 大,其抗拉强度不断降低,但屈服强度和剪切强度不断增加,而显微组织以及拉伸塑性的变化幅度不是很明显; 经热暴露后的 Ti-45Nb 合金丝材,拉伸强度明显增加,但拉伸塑性的下降也比较明显;不同规格的 Ti-45Nb 合金 丝材经过冷顶锻测试后的样品表面均没有宏观裂纹萌生,表明材料具有良好的冷成形性能。 关键词:Ti-45Nb 合金;紧固件;显微组织;力学性能 中图分类号:TG 146.4 文献标志码:A

Property evaluation of Ti-45Nb alloy wires used in fastener

SHANG Guo-qiang¹, WANG Xin-nan¹, TANG Bin², ZHU Zhi-shou¹, KOU Hong-chao², ZHANG Feng-shou³, CHANG Hui²

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

3. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: The microstructures and mechanical properties of Ti-45Nb alloy wires with different dimensions were investigated. The results show that, with increasing the dimensions of Ti-45Nb alloy wires, the tensile strength of Ti-45Nb alloy decreases gradually, but the yield strength and tear strength increase gradually, the microstructures and tensile plasticity do not change obviously. After thermal exposure, the tensile strength increases obviously, but the tensile plasticity decreases. There is no macroscopic cracking initiation when Ti-45Nb alloy wires with different dimensions are cold upset, which indicates that the Ti-45Nb alloy wires have good properties of cold deformation and forming. Key words: Ti-45Nb alloy; fastener; microstructure; mechanical property

自从 20 世纪 50 年代美国首次将 TC4 螺栓应用于 B-52 型轰炸机上,并且取得了非常好的减重效果后, 国际上纷纷对钛合金紧固件进行了大量研究。国内外 先进飞机选用越来越多的钛合金和复合材料,而作为 复合材料连接件的钛合金紧固件的用量也随之增加。 近年来, 钛合金紧固件已经成功地代替部分比强度较 低的钢制紧固件, 取得非常明显的减重效果, 广泛应 用于近代航空和航天的机械连接结构中,从而进一步 降低飞机的结构质量、提高连接部件的可靠性以及延 长飞机的设计使用寿命^[1-4]。例如,波音747飞机紧固 件以钛代钢后,其结构质量减轻了1814 kg;俄罗斯 的伊尔-96飞机,一架用14.2万件钛合金紧固件,质 量减轻达 600 kg, 对飞机和航天器在提高推力、增加 射程、节省燃料、减少发射费用等方面都产生了巨大 的技术经济效益^[5-8]。

Ti-45Nb 合金作为一种铆钉专用材料,突出优点

通信作者:商国强;电话:010-62496630;E-mail:shanggq1984@126.com

是塑性高(伸长率可达 20%以上,断面收缩率高达 60%~80%),冷加工性能优异,其剪切强度和抗拉强 度均高于纯钛的,并且变形抗力低于纯钛的,非常适 合做复合材料连接用铆钉材料。国外针对 Ti-45Nb 合 金进行了大量的基础研究工作^[9-13],研制技术较为成 熟,并于 1974 年列入 AMS 4982 规范,在航空航天产 品中,已全面取代纯钛铆钉材料。该合金与 Ti-6A1-4V 合金搭配,制成的双金属铆钉,已在空客和波音飞机 上大量应用,因此美国在航空航天产品中全部改用冷 加工性能优异的钛铌铆钉。

本文作者对比研究不同规格的 Ti-45Nb 合金丝材 的组织和性能,为 Ti-45Nb 合金的制造和加工提供理 论和实验依据。

1 实验

实验用原材料来源于西部超导材料科技有限公司 生产的 d 2.5 mm、d 4 mm 和 d 5 mm 退火态丝材,其 名义成分为 Ti-45Nb。通过线切割的方法截取实验所 需的 3 种规格 Ti-45Nb 试样。采用体积比为 1(HNO)₃: 3(HF)的腐蚀液对金相试样进行腐蚀;采用 OLYMPUS GX51 光学显微镜对 3 种规格的 Ti-45Nb 合金丝材进 行显微组织观察;采用 FEI F30 透射电镜对 Ti-45Nb 合金丝材进行透射显微组织观察与分析;采用日本理 学(D/max2400)X 射线衍射仪对 Ti-45Nb 合金丝材进行 相组成分析;利用型号为 WAW-E500C 的微型控制电 液伺服万能实验机测定 Ti-45Nb 合金丝材冷的顶锻性 能、拉伸性能和剪切性能。

2 结果与分析

2.1 不同规格的 Ti-45Nb 合金丝材的显微组织特征

图 1 所示为 Ti-45Nb 合金 d2.5 mm、d4.0 mm 以 及 d5.0 mm 3 种规格丝材的显微组织。其最终热处理 状态为冷变形后进行(810 ,1 h)真空退火,随后充氩 气冷却。由图 1 可以看出,Ti-45Nb 合金丝材冷拉后 的显微组织在退火后已经获得回复并发生再结晶,晶 粒呈等轴状。其中 d2.5 mm 与 d4.0 mm 丝材试样因冷 轧加工变形量过大存在晶粒尺寸不均匀现象,而 d 5.0 mm 丝材试样的晶粒大小则较为均匀。根据 GB/T 6394—2002 的测试标准,3 种 Ti-45Nb 合金丝材 试样的晶粒尺寸均为 37.8 µm,晶粒度均处于 6.5 的级 别范围。



图 1 不同规格 Ti-45Nb 合金丝材的显微组织 **Fig.1** Microstructures of Ti-45Nb alloy wires with different dimensions: (a) *d* 2.5 mm; (b) *d* 4.0 mm; (c) *d* 5.0 mm

2.2 不同规格的 Ti-45Nb 合金丝材的 X 射线分析

试验采用日本理学(D/max2400)X 射线衍射仪对 3 种规格的 Ti-45Nb 合金丝材进行相组成分析,其中 X 射线扫描时间为 20 min,实验结果如图 2 所示。由图 2 可以看出 3 种规格的 Ti-45Nb 晶粒均有明显的取向性, 为(110)取向,其主相为 bcc 结构。由于单质 Nb 和室温 状态下的 Ti 的晶体结构均为体心立方结构,且 Ti 和 Nb 的原子半径很接近,分别为 1.47 Å 和 1.46 Å^[14], 二者互溶形成体心立方的 TiNb 固溶体,因此,合金 的晶格参数与纯金属相比变化不大,未发现其他析出 相。

2.3 不同规格 Ti-45Nb 合金丝材的拉伸与剪切性能

图 3 所示为不同规格的 Ti-45Nb 合金丝材的力学性能和剪切性能。由图 3 可以看出,随着合金丝材直





Fig.2 XRD patterns of Ti-45Nb alloy wires with different dimensions



图 3 不同规格 Ti-45Nb 合金丝材的力学性能

Fig.3 Mechanical properties of Ti-45Nb alloy wires with different dimensions

径的增大,其抗拉强度不断降低,但屈服强度和剪切 强度却不断增加,拉伸塑性的变化不是很明显。直径 为 2.5 mm 的合金丝材的抗拉强度和屈服强度分别达 到 570 MPa 和 425 MPa,保持着获得 22%的伸长率和 71%的断面收缩率。虽然随着丝材直径的增大,其抗 拉强度有所降低,但均满足作为制造复合材料的铆钉 连接件所要求的拉伸性能(441~490 MPa)、剪切强度 (365 MPa)以及拉伸塑性(伸长率不小于 10%,断面收 缩率不小于 50%)的技术指标,具有优异的力学性能。

2.4 不同规格 Ti-45Nb 合金丝材热暴露后的力学 性能

Ti-45Nb 合金丝材经 400 热暴露 100 h 后的力学 性能如图 4 所示。由图 4 可以看出,随着合金丝材直 径的增大,其抗拉强度逐渐下降,而屈服强度、伸长 率和断面收缩率的变化不是很明显。相对于未经热暴 露的合金丝材(见图 3),热暴露后的 Ti-45Nb 合金丝材 的抗拉强度和屈服强度均明显提高,但伸长率尤其是 断面收缩率下降比较明显。

图 5 所示为尺寸规格为 d4.0 mm 的 Ti-45Nb 合金 丝材经 400 热暴露 100 h 后的显微组织及衍射花样。 由图 5 可以看出,经热暴露后,在 Ti-45Nb 合金的亚



图 4 不同规格的 Ti-45Nb 合金丝材经热暴露后的力学性能 Fig.4 Mechanical properties of Ti-45Nb alloy wires with different dimensions after thermal exposure



图 5 Ti-45Nb 丝材经 400 热暴露 100 h 后的显微组织及 衍射花样

Fig.5 Microstructure(a) and diffraction pattern(b) of Ti-45Nb alloy wires after thermal exposure for 100 h

稳 β 基体内部析出细小针状的次生 α 相,且 α 相在晶 粒内部分布均匀,尺寸为 300 nm 左右。由于数量及尺 寸限制,选区电子衍射(SAD)中 α 相斑点较弱。正是 由于在热暴露过程中析出的细小针状次生 α 相,使得 Ti-45Nb 合金得到明显的强化。

2.5 不同规格 Ti-45Nb 合金丝材的冷顶锻性能

图 6 所示为不同规格的 Ti-45Nb 合金丝材进行冷顶锻性能测试后的照片,每个规格的丝材分别顶锻至 原有高度的 1/4。由图 6 可以看出,d 2.5 mm、d 4 mm 和 d 5 mm 3 种规格的 Ti-45Nb 合金丝材在冷冲击载荷 下均产生了较大的塑性变形,经过冷顶锻测试后的试 样表面均没有产生宏观裂纹,表明材料具有良好的冷 加工性能,冷成形性能优异。





3 结论

 1) 随着 Ti-45Nb 合金丝材尺寸的增大,其显微组 织变化不是很明显,均呈等轴状,晶粒尺寸为 37.8 μm, 晶粒度均处于 6.5 的级别范围。

2) Ti-45Nb 合金丝材的抗拉强度随尺寸的增加而 降低,但屈服强度和剪切强度却不断增大,拉伸塑性 的变化不是很明显。

3) 经热暴露后的 Ti-45Nb 合金丝材,其拉伸强度 明显增加,而拉伸塑性的下降比较明显。

4) Ti-45Nb 合金丝材在冷冲击载荷下均产生较大的塑性变形,试样表面均没有产生宏观裂纹,表明材料具有良好的冷成形性能。

REFERENCES

 张树启. 紧固件用高强钛合金的进展[J]. 钛工业进展, 1998, 15(5): 1-3.
 ZHANG Shu-qi. Development of high strength titanium used in

fastener[J]. Titanium industry process, 1998, 15(5): 1–3.

[2] 顾中灼. 钛 β 合金紧固件研究[J]. 航空标准化与质量, 1999(2):
 17-20.

GU Zhong-zhuo. A research on fasteners made of β -titanium alloy[J]. Aeronautic Standardization and Quality, 1999(2): 17–20.

[3] 张喜燕,赵永庆,白晨光. 钛合金及应用[M]. 北京: 化学工 业出版社, 2005.

ZHANG Xi-yan, ZHAO Yong-qing, BAI Chen-guang. Titanium alloy and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.

[4] 张庆玲, 王庆如, 李兴无. 航空用钛合金紧固件选材分析[J].材料工程, 2007(1): 11-14.

ZHANG Qing-ling, WANG Qing-ru, LI Xing-wu. Material selection analysis for titanium alloy fasteners in aviation industry[J]. Journal of Materials Engineering, 2007(1): 11–14.

- [5] 杨专钊. 钛合金紧固件连接结构接触腐蚀行为及其控制技术 研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004. YANG Zhuan-zhao. Galvanic corrosion behavior and control technology study of titanium alloy used in fastener connecting structure[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004.
- [6] 赵庆云,刘风雷,刘华东.世界先进航空紧固件进展[J].航空 制造技术,2009(3):54-56.

ZHAO Qing-yun, LIU Feng-lei, LIU Hua-dong. Development of advanced aerospace fastener[J]. Aeronautic Manufacturing Technology, 2009(3): 54–56.

[7] 刘风雷. 我国航空钛合金紧固件的发展[J]. 航空制造技术, 2000(6): 39-40.

LIU Feng-lei. Development of aeronautic Ti alloy fastener in China[J]. Aeronautic Manufacturing Technology, 2000(6): 39–40.

[8] 金属钛及其应用[M]. 程敏,赵克德,译.北京:冶金工业出版社,1989.

Metallic titanium and its application[M]. CHENG Min, ZHAO Ke-de, transl. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998.

- [9] ZORN G, LESMAN A, GOTMAN I. Oxide formation on low modulus Ti45Nb alloy by anodic versus thermal oxidation[J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 201: 612–618.
- [10] GODLEY R, STAROSVETSKY D, GOTMAN I. Corrosion behavior of a low modulus β -Ti-45%Nb alloy for use in medical implants[J]. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2006, 17: 63–67.
- [11] DUTTA B, KELLER T, RETTENMAYR M, JANTSCH U,

LUPTON D F. Effect of ternary Al, Ni additions on hydrogen absorption behaviour of Ti-45Nb alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 382: 57–63.

- [12] FENG Xin-jian, MACAK J M, SCHMUKI P. Flexible self-organization of two size-scales oxide nanotubes on Ti45Nb alloy[J]. Electrochemistry Communications, 2007, 9: 2403–2407.
- [13] ZORN G, GOTMAN I, GUTMANAS E Y, ADADI R, SALITRA G, SUKENIK C N. Surface modification of Ti45Nb alloy with an alkylphosphonic acid self-assembled monolayer[J]. Chem Mater, 2005, 17: 4218–4226.
- [14] 虞觉奇,易文质,陈邦迪,陈宏鉴.二元合金状态图集[M]. 上海:上海科学技术出版社,1987.
 YU Jue-qi, YI Wen-zhi, CHEN Bang-di, CHEN Hong-jian. Atlas of binary alloys state[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1987.

(编辑 杨 华)