

退火态 ZTi6Al4V 铸造钛合金的断裂韧性研究

党宁¹, 赵嘉琪², 南海², 吴国清¹

(1. 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191; 2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 将尖切口强度理论用于 ZTi6Al4V 铸造钛合金损伤容限性能的评价, 探讨了不同退火温度对其三点弯曲断裂韧性 K_{Q0} 的影响。结果表明: 尖切口试样测定的断裂韧性 K_{Q0} 不等同于标准试验方法测定的 K_Q , 但可用于铸造钛合金不同工艺间断裂韧性的比较。退火温度的改变可微调 ZTi6Al4V 铸造钛合金的强度和断裂韧性, 在 700℃ 或 820℃ 保温 2h 退火处理, 试样的断裂韧性较好, K_{Q0} 值分别达到 78.11 MPa·m^{1/2} 和 79.44 MPa·m^{1/2}, 屈服强度分别为 782.74 MPa 和 771.49 MPa, 抗拉强度分别为 860.18 MPa 和 853.0 MPa, 伸长率达 8.10% 和 7.46%, 获得了较好的强塑性匹配。

关键词: 铸造钛合金; 退火; 断裂韧性

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5053.2012.4.016

中图分类号: TG146.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2012)04-0087-05

铸造 ZTi6Al4V (ZTC4) 钛合金属于 Ti-Al-V 系 $\alpha + \beta$ 型中强钛合金。具有中等强度、塑性好, 可进行热处理强化, 加工性能优异, 并具有较好的焊接性, 而且在中等温度下具有较好的耐热性和保持良好的强度^[1,2]。近年来, 随着断裂力学和损伤容限理论的发展, 飞机零构件的设计准则由传统的静强度设计发展为损伤容限设计, 相应的中强或高强损伤容限型钛合金成为钛合金研究领域的重点之一^[3,4], 研究主要针对变形钛合金的断裂机理和显微组织或工艺对断裂韧性的影响^[5,7]。随着钛合金铸件浇注冶炼技术的提高以及铸件使用环境的拓展, 对钛合金铸件的损伤容限设计也提出了挑战。由于测试的难度, 对于铸件尤其是薄壁铸件断裂韧性的测试尚未见报道。一般情况下, ZTi6Al4V 铸件沿用 Ti-6Al-4V 锻件断裂韧性的评价方法^[8]测试, 试样的最小厚度 B 须达 38mm, 大大超出了一般钛合金铸件尤其是薄壁铸件的厚度(大多数铸件的壁厚为 1~8mm)^[9]。另外, 由于铸件的塑性低于锻件, 在对试样预制疲劳裂纹时可能会出现裂纹直接穿透试样的情况。有研究者^[10-12]提出了尖切口强度理论, 认为当切口件切口根部曲率半径小于某一临界值 ρ_c 时, 在断裂前其切口根部区域的应力应变分布特性与裂纹尖端前沿区域的应力应变分布

特性相近, 此时切口根部材料单元与裂纹前部的材料单元处于近似相同的应力应变状态, 切口问题可反映裂纹问题, 并在此基础上建立了切口强度与断裂韧性的内在联系。王泓等应用上述方法测试并评价了 Al₂O₃ 陶瓷^[13] 和有机玻璃^[14] 的断裂韧性, 然而该理论在铸态金属材料中的应用尚未见报道。

本研究将尖切口强度理论用于 ZTi6Al4V 铸造钛合金损伤容限性能的评价, 通过与疲劳裂纹试样测试结果的对比, 验证了尖切口试样断裂韧性测试结果的有效性, 并以此探讨了不同退火温度对其三点弯曲断裂韧性 K_{Q0} 的影响。

1 试验

采用北京航空材料研究院提供的 ZTi6Al4V 离心铸造板材。原料的化学成分达到了 GB/T 15073—1994《铸造钛及钛合金牌号和化学成分》的要求, 化学成分如表 1 所示。随后经过 920℃/125MPa/2h 的热等静压处理和退火处理, 处理后试样的金相照片如图 1 所示, 可以看出存在着粗大的片层组织和连续晶界 α 相。

采用 SANS CMT5504 试验机进行板状试样室温拉伸试验, 加载速率为 0.5mm/min。试样尺寸如图 2 所示, 厚度 $a = 4$ mm, 宽度 $B = 40$ mm, 长度 $L = 241$ mm, $L_1 = 75$ mm, $h = 60$ mm, $h_1 = 23$ mm, 每组工艺测试 5 根拉伸试样并取平均值。

表1 ZTi6Al4V合金铸板元素含量(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of ZTi6Al4V alloy (mass fraction/%)

Al	V	Fe	Si	C	N	H	O	Ti
6.40	3.98	0.06	0.02	0.014	0.006	0.002	0.17	Bal.

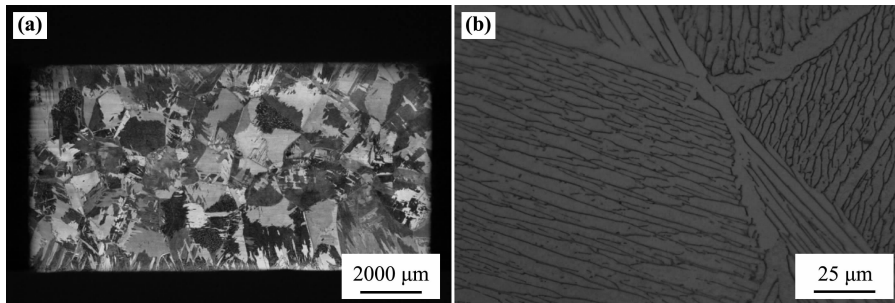


图1 ZTi6Al4V铸造钛合金退火态组织金相照片 (a)退火态的晶粒组织;(b)退火态的片层组织

Fig. 1 Microstructure of as annealed ZTi6Al4V titanium alloy (a) grain structure; (b) lamellar microstructure

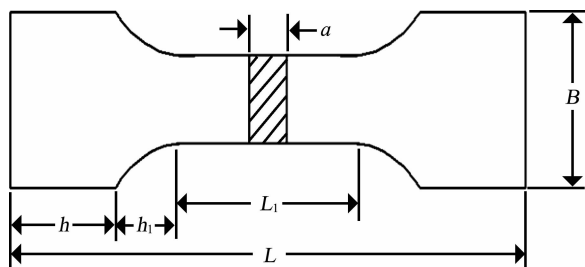


图2 ZTi6Al4V铸造钛合金板状拉伸试样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tensile test specimen

尖切口试样与疲劳裂纹试样示意图均如图3所示,断裂韧性 K_{Q1} 与 K_Q 值计算方法和验证按照GB/T 4161—2007《金属材料平面应变断裂韧性 K_{IC} 试验方法》和GB/T 21143—2007《金属材料准静态断裂韧度的统一试验方法》进行。尖切口试样三点弯曲断裂韧性 K_{Q1} 测试在SANS CMT5504试验机上进行。每组工艺下测试5根尖切口试样,并取平均值。试样厚度 $B = 6\text{mm}$,宽度 $W = 12\text{mm}$,跨距 $S = 48\text{mm}$ 。线切割加工单边切口裂纹长度 $a = 6\text{mm}$,加载速率为 0.5mm/min ;疲劳裂纹试样三点弯曲断裂韧性 K_Q 测试试验,在MTS880 ± 100 kN电液伺服试验机上进行试验,加载速率仍为 0.5mm/min ,试样预制裂纹长度 $a = (6 \pm 0.6)\text{mm}$,试样厚度 $B = 6\text{mm}$,宽度 $W = 12\text{mm}$,跨距 $S = 48\text{mm}$,每组工艺依然测试5根试样,取其均值。

试验结束后得到力-位移曲线,根据该曲线进行 F_Q 的计算。将得出的 F_Q 代入下式进行三点弯曲试样 K_Q 值的计算:

$$K_Q = (F_Q S / BW^{3/2}) \times f(a/W) \quad (1)$$

式中: $f(a/W)$ 函数值可在手册中查表得出。

当满足下列三个条件时 $K_Q = K_{IC}$,如不满足,则 K_Q 只能用于同种材料不同工艺或不同处理的内部评价,不能与其他材料的 K_{IC} 进行直接比较。

$$B \geq 2.5 (K_Q / R_{p0.2})^2 \quad (2)$$

$$F_{\max} / F_Q \leq 1.10 \quad (3)$$

$$a \geq 2.5 (K_Q / R_{p0.2})^2 \quad (4)$$

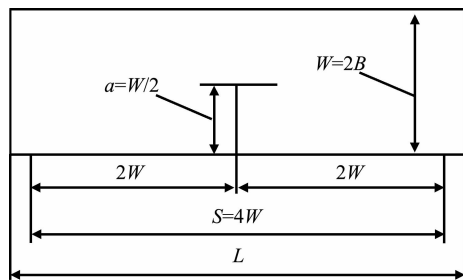
图3 ZTi6Al4V铸造钛合金的断裂韧性 K_Q 试样示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fracture toughness specimen

2 结果及讨论

表2给出了ZTi6Al4V铸造钛合金试样力学性能的测试结果。可以看出,退火温度对ZTi6Al4V铸造钛合金的室温拉伸性能有微弱影响,强度变化在3%左右,塑性变化在14%左右。当退火工艺为 $730^\circ\text{C}/2\text{h}$ 或 $850^\circ\text{C}/2\text{h}$ 时,ZTi6Al4V铸造钛合金试样的塑性较低,伸长率分别为7.11%和7.16%;而当退火工艺为 $790^\circ\text{C}/2\text{h}$ 时,试样的强度较低,屈服强度和抗拉强度分别为765.37MPa和841.55MPa;而当退火工艺为 $760^\circ\text{C}/2\text{h}$ 时,试样获得了较好的强

度和塑性匹配,屈服强度、抗拉强度分别为 779.39MPa 和 853.72MPa,伸长率为 7.78%;然而,

此工艺下试样的断裂韧度较差, K_Q 和 K_{Q1} 分别为 $50.45\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $76.87\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

表2 ZTi6Al4V 钛合金的室温力学性能测试结果

Table 2 Testing results of mechanical properties of ZTi6Al4V alloy at room temperature

Annealing parameters	σ_s/MPa	σ_b/MPa	$\delta/\%$	$K_{Q1}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	$K_Q/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$
700°C/2h/FC	782.74	860.18	8.10	78.11	51.65
730°C/2h/FC	780.21	852.76	7.16	78.65	52.25
760°C/2h/FC	779.39	853.72	7.78	76.87	50.45
790°C/2h/FC	765.37	841.55	7.66	78.58	51.57
820°C/2h/FC	771.49	853.00	7.46	79.44	55.26
850°C/2h/FC	769.17	859.17	7.11	76.71	52.08

FC:furnace cooling

图4对比分析了不同退火温度处理后 ZTi6Al4V 铸造钛合金疲劳裂纹试样(K_Q)与尖切口试样(K_{Q1})断裂韧度测试结果,可以看出,通过调整退火温度,可实现对 ZTi6Al4V 铸造钛合金断裂韧度的微调, K_{Q1} 的变化范围在 4% 左右, K_Q 的变化在 10% 左右。在 760°C 退火时, ZTi6Al4V 铸造钛合金试样的 K_Q 与 K_{Q1} 出现最小值,分别为 $76.87\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 和 $50.45\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; 而在 820°C 退火时,试样的 K_Q 与 K_{Q1} 达到最大值,分别为 $79.44\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 和 $55.26\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。预制疲劳裂纹试样的断裂韧度(K_Q)低于不预制疲劳裂纹试样的断裂韧度(K_{Q1}),在数值上 K_Q 值比 K_{Q1} 值平均低 30% 左右,但随着退火温度的增加,均呈现出先降后升、而后趋于平缓的趋势,两者数据的波动呈现出正相关趋势。文献^[10]和文献^[11]的研究者解释了 K_Q 与 K_{Q1} 的数据偏差,并给出了这种正相关趋势的原因。他们认为,裂纹件可以看成是一种当切口半径 $\rho \rightarrow 0$ 时的特殊切口件,光滑构件看成是当切口半径 $\rho \rightarrow \infty$ 时的特殊切口件; ρ 越趋近于 0,切口件尖端应力应变分布特性与裂纹件尖端的应力应变分布特性越趋于一致,由此测量计算出的两者的断裂韧度值正相关性就越好,而常规尖切口件切口半径 ρ 处于 $(0, \infty)$ 之间,这种近似是导致疲劳裂纹试样测得的断裂韧度值(K_Q)低于尖切口试样测得的断裂韧度值(K_{Q1})的原因。所以,尖切口试样只能对材料的断裂韧度进行有条件的定性的比较研究。

运用(2)~(4)式进行验证, K_Q 与 K_{Q1} 的数据结果均不满足 $K_Q = K_{Ic}$ 的条件,因此,本研究中尖切口三点弯曲断裂韧度试样仅适用于相同规格试样在不同工艺间的比较。

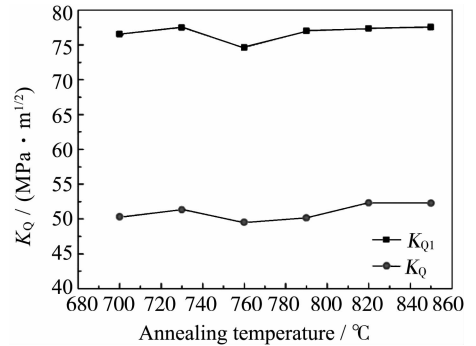


图4 ZTi6Al4V 合金的 K_Q 与 K_{Q1} 测试结果对比

Fig. 4 Testing results comparison between K_Q and K_{Q1} of ZTi6Al4V alloy

将退火温度对 ZTi6Al4V 铸造钛合金拉伸性能与断裂韧度 K_{Q1} 的影响对比分析(图5),可以看出,随着退火温度的升高, ZTi6Al4V 铸造钛合金试样的抗拉强度表现出先降低,后略有升高的趋势。在 790°C 退火时达到最低值(841.55MPa)。对比两条曲线的变化趋势来看,除在 790~820°C 温度区间抗拉强度与断裂韧度 K_{Q1} 出现同步增长以外,在其余温度范围,两者均呈现出一定程度的反相关趋势。当退火温度在 700~790°C 范围内变化时,760°C 退火处理后的 ZTi6Al4V 铸造钛合金试样,断裂韧度 K_{Q1} 出现极小值,为 $76.87\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,而此时抗拉强度却呈现出极大值,为 853.72MPa;退火温度为 790°C 时,断裂韧度 K_{Q1} 出现极大值,为 $78.58\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,然而此时,抗拉强度却出现极小值, $\sigma_b = 841.55\text{MPa}$ 。而当退火温度在 790~850°C 变化时, ZTi6Al4V 铸造钛合金试样抗拉强度随退火温度升高而上升,而断裂韧度 K_{Q1} 变化趋势为

先升高再降低,820℃退火处理时,断裂韧度 K_{Q1} 呈现出极大值,此时 $K_{Q1} = 79.44 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。文献^[15]的研究者指出,出现这种负相关的原因可能与片层组织的片层厚度等微观组织参数有关。

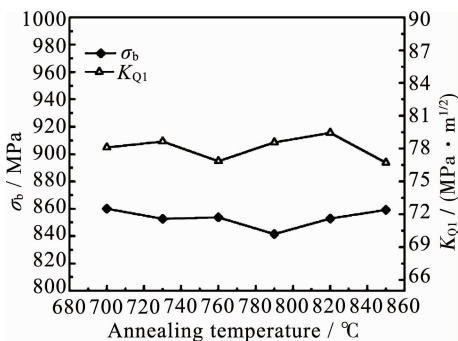


图5 退火温度对 ZTi6Al4V 铸造钛合金拉伸性能与断裂韧度 K_{Q1} 的影响

Fig. 5 Effect of annealing temperature on tensile properties and fracture toughness of ZTi6Al4V alloy

由于断裂韧度反映了各种材料对尖锐缺口(裂纹或类裂纹缺陷)的敏感程度^[3],故评价材料的损伤容限静态性能通常以断裂韧度为判据。因此,在损伤容限的设计理念指导下进行工艺选择时,应首先满足较高的断裂韧度,其次再满足强度和塑性的使用要求,使处理后的合金具有比较良好的损伤容限性能和强塑性的匹配。对于 ZTi6Al4V 铸造钛合金板材,当选择 700℃ 或 820℃ 的退火时,获得了较好的断裂韧度, K_{Q1} 值分别可达 $78.11 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 和 $79.44 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, K_Q 值可达 $51.25 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 和 $55.26 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。同时,在这两个温度下退火后的铸造板材也具有比较良好的强塑性匹配,屈服强度分别为 782.74MPa 和 771.49MPa,抗拉强度分别可达 860.18MPa 和 853.0MPa,而伸长率也达 8.10% 和 7.46%。因此对于 ZTi6Al4V 钛合金铸造板材,退火选择 700℃ 或 820℃,保温 2h 后可以获得最佳强度、塑性和韧性的匹配。

3 结论

(1) ZTi6Al4V 铸造钛合金断裂韧度的测试结果表明,尖切口试样的断裂韧度 K_{Q1} 测试方法得到的 K_{Q1} 值与标准断裂韧度方法得到的 K_Q 值呈正相关关系,但是比之高 30%。

(2) 退火对 ZTi6Al4V 铸造钛合金的断裂韧度和室温拉伸性能均有一定的微调作用,随着退火温

度的变化,合金的断裂韧度值与强度值呈现一定程度的负相关。

(3) 对于 ZTi6Al4V 钛合金铸造板材,在 700℃ 或 820℃ 退火,保温 2h 后可获得较良好的损伤容限性能和强塑性的匹配,屈服强度分别为 782.74MPa 和 771.49MPa,抗拉强度可达 860.18MPa 和 853.0MPa,伸长率达 8.10% 和 7.46%,断裂韧度 K_{Q1} 值可达 $78.11 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 和 $79.44 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

参考文献:

- [1] OHKUBO C, FORD J P, OKABE T, *et al.* The machinability of cast titanium and Ti - 6Al - 4V[J]. *Biomaterials*, 2000,21(4):421 - 428.
- [2] CUI C X, HU B X, ZHAO L X, *et al.* Titanium alloy production technology, market prospects and industry development[J]. *Materials and Design*, 2011, 32(3): 1684 - 1691.
- [3] OBERWINKLER B, RIEDLER M, EICHLSEDER W. Importance of local microstructure for damage tolerant light weight design of Ti - 6Al - 4V forgings[J]. *International Journal of Fatigue*, 2010,32(5):808 - 814.
- [4] 曹春晓. 选材判据的变化与损伤容限钛合金的发展[J]. *金属学报*, 2002, 38, (增1): 125 - 128. (CAO C X. Change of material selection criterion and development of high damage-tolerant titanium alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2002,38(Suppl 1):125 - 128.)
- [5] CHANDRARAO B S, SRINIVAS M, KAMAT S V. Effect of temperature on fracture toughness of timetal 834 titanium alloy under mode I and mixed I/III loading[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2008,39:1340 - 1349.
- [6] CHEN Y Y, NIU H Z, KONG F T. *et al.* Microstructure and fracture toughness of α β phase contain TiAl alloy[J]. *Intermetallics*. 2011,19:1405 - 1410.
- [7] ZHANG J K, CHENG X Q, LI Z N. Total fatigue life prediction for Ti-alloys airframe structure based on durability and damage-tolerant design concept[J]. *Materials and Design*, 2010,31(9):4239 - 4335.
- [8] 束德林. 工程材料的力学行为[M]. 北京:机械工业出版社. 2006:91 - 93.
- [9] WILLIAMS J C, STARKE E A. Progress in structural materials for aerospace systems[J]. *Acta Materialia*, 2003,51(19):5775.
- [10] ZHENG X L. On an unified model for predicting notch strength and fracture toughness[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1989,33(5):685 - 695.
- [11] NODA N A, SERA M, TAKASE Y. Stress concentration factors for round and flat test specimens sith notches[J].

International Journal of Fatigue, 1995, 17(3): 163 - 178.

[12] SHABARA M A, DOMINATY A A, ANSARY M D. Estimation of plane strain fracture toughness from circumferentially bluntly notched round-bar specimens[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1996, 54(4): 533 - 541.

[13] 王峰会, 王泓, 鄢君辉. 两种 Al_2O_3 结构陶瓷断裂强度的统计分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2000, 29(5): 311 - 314.

(WANG F H, WANG H, YAN J H. Statistical analysis of fracture strength for two kinds of Al_2O_3 structural ceramics [J]. Rare Metal Materials and Engineering. 2000, 10(5): 311 - 314.)

[14] 王泓, 鄢君辉, 郑修麟. 航空有机玻璃切口强度及切口

敏感性[J]. 机械强度, 2001, 23(2): 131 - 133.

(WANG H, YAN J H, ZHENG X L. Predicting of notch strength and notch sensitivity in aviation polymethyl methacrylate [J]. Journal of Mechanical Strength, 2001, 23(2): 131 - 133.)

[15] 张旺锋, 李兴无, 马济民, 等. 组织类型对钛合金损伤容限性能的影响及电镜原位观察[J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 313 - 314.

(ZHANG W F, LI X W, MA J M, *et al.* Effect of microstructure on damage tolerance properties and SEM *in-situ* observation for titanium alloy [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(3): 313 - 314.)

Fracture Toughness of ZTi6Al4V Casting Titanium Alloy under Different Annealed Conditions

DANG Ning¹, ZHAO Jia-qi², NAN Hai², WU Guo-qing¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The theory of notch strength was used to judge the damage tolerance capability of ZTi6Al4V casting titanium alloy, for example, the effect of annealing temperature on three-point bending fracture toughness. The results show that fracture toughness K_{Q1} , which was tested by notched specimens, is not equal to the K_Q tested by the standard testing method. But it was used to compare qualitatively fracture toughness of casting titanium alloy with different annealing processes. The changing of annealing temperature can adjust strength and fracture toughness of ZTi6Al4V casting titanium alloy. Samples annealed at 700°C and 800°C for 2h have better toughness, the K_Q values are 78.11 MPa · m^{1/2} and 79.44 MPa · m^{1/2}. They also have a relatively better match of strength and plasticity, that is the yield strength is up to 782.74 MPa and 771.49 MPa, tensile strength reaches 860.18 MPa and 853.0 MPa, and the elongation reaches 8.10% and 7.46% respectively.

Key words: casting titanium alloy; annealing; fracture toughness