

# 超声振动对 TC1 钛合金板材拉伸性能的影响

高铁军<sup>1</sup>, 刘小军<sup>1</sup>, 于 鲲<sup>2</sup>, 齐 林<sup>1</sup>, 王 硕<sup>1</sup>

(1. 沈阳航空航天大学, 辽宁 沈阳 110136)

(2. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 辽宁 沈阳 110043)

**摘 要:** 通过超声振动辅助拉伸试验, 研究了超声振动的频率、振幅及间歇振动方式等参数对 TC1 钛合金板材应力与应变、屈服强度、抗拉强度及延伸率等拉伸性能指标的影响。通过拉伸试件的组织和性能分析, 研究了超声振动参数对 TC1 板材金相组织、断口形貌及维氏硬度的影响。结果表明, TC1 钛合金板材拉伸过程中叠加一定频率、振幅的超声振动可以明显降低材料的屈服强度和抗拉强度, 并且在一定工艺参数条件下还可以较大幅度提高材料的延伸率, 而且对其组织和性能影响较小。

**关键词:** 超声振动; TC1 钛合金; 拉伸性能; 振动方式

中图分类号: TG115

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)01-0286-07

钛合金具有密度低、强度高、耐高温和抗腐蚀等优点, 已成为飞机、导弹、发动机的首选材料。例如钛合金占 F-22 机体结构重量的 39%, 占 F-15 机体结构重量的 25.8%, 在 F100 和 F119 发动机上用量也分别达到了 25% 和 40%<sup>[1-4]</sup>。钣金件作为飞行器典型结构零件, 具有品种多、批量小、结构形状复杂、尺寸互换协调关系强等特点。与传统金属材料相比较, 钛合金板材的强度高、塑性变形能力差, 成形所需压力大, 并且容易出现起皱、破裂等质量缺陷。

为了提高钛合金板材塑性变形能力, 通常采用将成形温度提高到一定范围的热成形方法 (一般要超过 500℃), 不但成形工艺复杂、模具制造成本高, 而且高温环境对板材原始组织、表面质量影响较大。如果在板材塑性成形过程中, 对被加工板材 (或模具) 叠加一定方向、一定频率和振幅的振动 (称为振动辅助成形), 将会得到很多有利于成形的结果。如在板材成形过程中, 振动效应产生的应力和材料内部应力叠加之和超过材料屈服强度, 就可以使板材提前进入塑性变形阶段, 降低成形力<sup>[5-8]</sup>。振动效应还会降低板材和模具之间的摩擦力, 提高材料的均匀变形能力和成形性能<sup>[9-14]</sup>。同时, 在成形后期振动效应产生的应力与材料内部应力叠加后, 可使应力集中部分产生塑性变形, 减小成形试件的回弹, 提高制造准确度。

目前, 振动辅助成形过程根据振动频率的不同, 可

分为低频振动和高频振动, 其中低频振动以机械振动为主, 高频振动以超声振动为主。板材塑性成形过程主要以高频超声振动为主。如 Pasierb<sup>[15]</sup> 的研究结果表明, 在铝、铜板拉伸试验过程叠加超声振动后能够使拉伸载荷明显降低。Jimma<sup>[16]</sup> 将超声振动叠加到 0.5 mm 厚的薄钢板拉伸过程后, 使材料极限拉伸比由 2.68 增长到 3.01, 同时还比较了各种振动方式对提高极限拉伸比的影响, 研究结果表明对压边圈或凹模叠加轴向振动比叠加径向振动来提高极限拉伸比的作用效果更好。Wen<sup>[17]</sup> 研究发现拉伸过程叠加超声振动后对 AZ31 镁合金板料的成形性能、成形载荷、失效方式等有显著影响。Zhuang<sup>[18]</sup> 在 1050 铝合金压缩试验过程叠加振动后, 降低了试件与模具的之间的摩擦力以及试件的变形抗力, 同时还提高了试件表面质量。Ashida<sup>[19]</sup> 在拉伸过程中也发现了超声振动效应降低了板材与模具之间的摩擦系数, 且有效避免了板材成形过程中起皱、开裂现象的产生。Wang<sup>[20]</sup> 针对超声振动引起的应力降低进行了研究, 建立了基于超声软化与应力叠加的分析模型, 开发了与振幅相关计算应力降低的方程。杨枫<sup>[21]</sup> 对 TA1 板材拉伸过程中叠加了超声振动的现象进行了分析, 并对试验过程中出现的软化与硬化现象进行了解释。

上述研究结果表明, 板材成形过程中叠加超声振动后对其成形性能及成形质量的提高具有明显效果, 并在镁合金、铝合金、铜合金、不锈钢等材料成形方面得到

收稿日期: 2018-01-19

基金项目: 国家自然科学基金 (51575364); 航空科学基金 (2014ZE54024)

作者简介: 高铁军, 男, 1977 年生, 博士, 教授, 沈阳航空航天大学航空航天工程学部, 辽宁 沈阳 110136, 电话: 024-88795292, E-mail: tiejun\_gao@163.com

了较好的应用。本实验基于超声振动辅助成形原理，设计了超声振动辅助拉伸装置，通过超声振动辅助拉伸试验，分析超声振动的频率、振幅、间歇振动方式等参数对钛合金板材拉伸性能的影响；通过对拉伸试件金相组织、断口形貌以及硬度分析，得到超声振动对钛合金板材组织和性能的影响。研究结果可为钛合金板材超声振动辅助成形过程中的工艺参数选择提供参照。

## 1 实验

试验选用钛合金板材的牌号为 TC1，厚度为 1.0 mm，拉伸试件尺寸参照国家标准 GBT 228.1-2010 设计(如图 1)。经过激光切割加工获得标距长度为 30 mm，宽度为 5.0 mm。为了更好的传递振动，将试件一端加工成直径为  $\Phi 8.0$  mm 的孔用于与振动工具头连接，另一端夹持在电子万能试验机上。

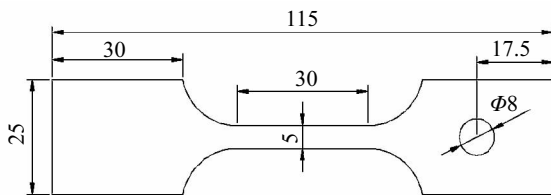


图 1 拉伸试件示意图

Fig.1 Schematic of tensile specimen

超声振动辅助拉伸试验装置是由 WDW-T100 电子万能试验机、换能器、变幅杆、工具头、辅助支架和超声波发生器组成。拉伸过程中，换能器通过辅助支架固定在电子万能试验机上，变幅杆的一端与换能器相连、另一端连接工具头，工具头的另一端通过端面加工出的 1.0 mm 的槽和侧面加工出的  $\Phi 8.0$  mm 的孔与拉伸试件相连接。试验超声波发生器频率分别为 20、25 和 30 kHz。

为了分析超声振动工艺参数对钛合金拉伸性能的影响，分别进行了无超声振动、不同振动频率、不同振幅条件下的超声振动辅助拉伸，拉伸速度为 5 mm/min。试验过程中，通过更换超声波发生器、换能器及变幅杆来获得不同振动频率。通过调节超声波发生器功率输出获得不同的振幅，超声振幅分别为 10、12 和 14  $\mu\text{m}$ 。研究过程考虑到振动作用时间及加载方式，还进行了两种不同间歇超声振动辅助拉伸试验，一种是在振动加载到拉伸应变为 5%或 10%后停止加载振动，之后在无超声振动条件下继续进行拉伸；另一种是无超声振动拉伸应变到 5%或 10%后停止加载，然后施加超声振动，振动时间分别为 30 和 60 s，之后继续进行无超声振动拉伸。具体试验方案见表 1。

## 2 结果与分析

### 2.1 超声振幅对拉伸试验结果的影响

表 1 超声振动辅助拉伸试验

Table 1 Ultrasonic vibration assisted tension test

Test number	Frequency/kHz	Amplitude/ $\mu\text{m}$	Vibration mode
1	0	0	No vibration
2	20	10	Full vibration
3	20	12	
4	20	14	
5	25	10	
6	30	10	
7	20	12	
8	20	12	Vibration stretching until the engineering strain reached 10%
9	20	12	Stop stretching after the engineering strain reached 5%, and continue to stretch after vibration for 30 s
10	20	12	Stop stretching after the engineering strain reached 5%, and continue to stretch after vibration for 60 s
11	20	12	Stop stretching after the engineering strain reached 10%, and continue to stretch after vibration for 30 s
12	20	12	Stop stretching after the engineering strain reached 10%, and continue to stretch after vibration for 60 s

图 2 为不同超声振幅条件下的 TC1 板材工程应力与应变曲线（超声振动频率为 20 kHz），图 3 为 TC1 板材的屈服强度、抗拉强度及延伸率与超声振幅之间的关系。从图 2 中可以看出，在弹性变形阶段，超声振动对 TC1 板材性能几乎没有影响，应力与应变曲线斜率基本相同。而在屈服和塑性变形阶段，超声振动对 TC1 板材性能影响比较大。无超声振动条件下 TC1 板材的屈服强度、抗拉强度分别为 513.2 MPa、631.1 MPa。拉伸过程中叠加振幅为 10~14  $\mu\text{m}$  的超声振动后，TC1 板材的屈服强度、抗拉强度降低，提前进入了屈服和塑性变形阶段，出现了声波软化效应<sup>[22]</sup>。同时，TC1 板材的屈服强度、抗拉强度降低的幅度随着超声振幅的增大而增大，在振幅为 14  $\mu\text{m}$  时分别降低到了 448.4 MPa 和 591.6 MPa，与无超声振动相比较分别降低了 12.6% 和 6.3%。

从图 2 和图 3 还可以看出，TC1 板材无超声振动拉伸时的延伸率为 16.5%，叠加振幅为 10, 12 和 14  $\mu\text{m}$  超声振动后的延伸率分别为 18.4%，19.7% 和 17.7%。拉伸

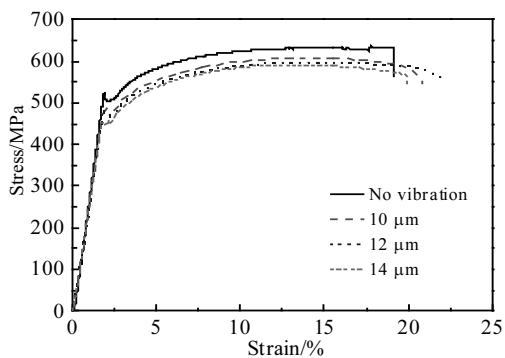


图 2 振动频率 20 kHz 的不同超声振幅条件下 TC1 板材工程应力-应变曲线

Fig.2 Engineering stress-strain curves of TC1 sheet under different ultrasonic amplitude with frequency of 20 kHz

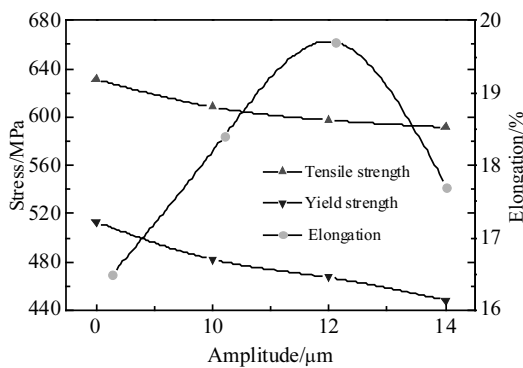


图 3 TC1 板材强度、延伸率与超声振幅关系

Fig.3 Relationship between strength, elongation and ultrasonic amplitude of TC1 sheet

过程中叠加 10~14  $\mu\text{m}$  的振幅超声振动后，TC1 板材的延伸率先增大后减小，在振幅为 12  $\mu\text{m}$  时达到了最大值为 19.7%，与无超声振动相比较提高了 19.4%。如果再增大振幅后，TC1 板材延伸率下降，出现超声硬化现象<sup>[23]</sup>。

### 2.2 超声频率对拉伸试验结果的影响

图 4 为不同超声频率条件下的 TC1 板材的工程应力与应变曲线（超声振幅为 10  $\mu\text{m}$ ），图 5 为 TC1 板材的屈服强度、抗拉强度及延伸率与超声频率之间的关系。从图 4 中可以看出，TC1 板材拉伸过程中叠加频率为 20, 25 和 30 kHz 超声后的材料屈服强度分别为 482.0, 470.2 和 460.3 MPa，抗拉强度分别为 608.4, 581.8 和 571.6 MPa，随着超声振动频率的增大，TC1 板材的屈服强度、抗拉强度不断减小。这是由于应力叠加效应和软化效应与超声振动的能量输入有关<sup>[24]</sup>，在振幅不变的条件下，超声频率越高，能量越大，应力叠加效应和软化效应就越明显。从图 4 和图 5 还可以看出，超声振动频率分别为 20, 25 和 30 kHz 时的 TC1 板材延伸率分别为 18.4%, 16.5% 和 13.4%，也就是说超声振动频率超过 25 kHz 后 TC1 板材的延伸率就会下降，也出现了超声硬化现象。

上述研究结果表明，叠加一定振幅或频率的超声振动后，TC1 板材的屈服强度和抗拉强度明显降低，降低幅度与超声振动的振幅和频率成正比。但超声振动频率和振幅对 TC1 板材延伸率的影响出现了“先增大后减小”现象。因此，在 TC1 板材超声振动辅助成形过程中，需要根据成形力和变形量综合考虑超声振动工艺参数，如果变形过程以降低 TC1 板材成形力为主，那么就可以叠加较高频率及较大振幅的超声振动；如果变形过程以提高 TC1 板材的塑性变形能力为主，可以叠加频率为 20 kHz、振幅为 12  $\mu\text{m}$  的超声振动。

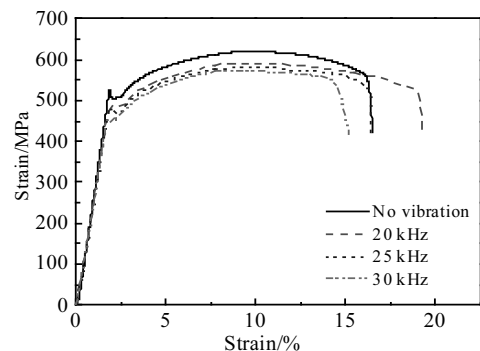


图 4 振幅 10  $\mu\text{m}$  的不同超声频率条件下 TC1 板材工程应力-应变曲线

Fig.4 Engineering stress-strain curves of TC1 sheet under different ultrasonic frequency with amplitude of 10  $\mu\text{m}$

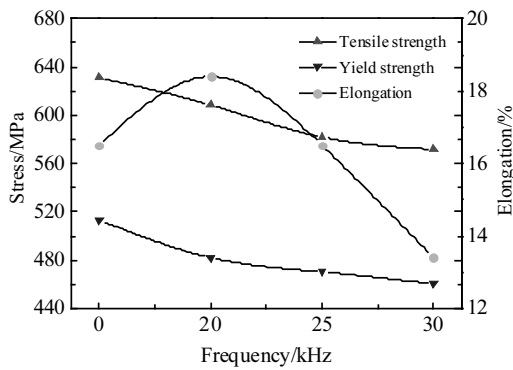


图 5 TC1 板材强度、延伸率与超声频率关系

Fig.5 Relationship between strength, elongation and ultrasonic frequency of TC1 sheet

### 2.3 间歇振动对拉伸试验结果的影响

图 6 为 TC1 板材叠加超声振动拉伸至工程应变的 5% 和 10% 后停止振动，之后在无超声振动条件下继续进行拉伸时的工程应力与应变曲线。从图中可以看出，拉伸过程中振动停止后应力-应变曲线出现一定程度的上升，但低于无超声振动拉伸时应力-应变曲线。超声振动拉伸至应变为 5% 后停止振动时的延伸率为 16.6%，振动拉伸至应变为 10% 后停止振动时的延伸率为 17.8%，超声振动作用阶段越长，对 TC1 板材的延伸率提高幅度越大。

图 7 为 TC1 板材在无超声振动条件下拉伸工程应变 5% 和 10% 后，在拉伸载荷不变的情况下叠加 30 和 60 s 超声振动，之后继续进行无超声振动拉伸时的工程应力与应变曲线。从图中可以看出，不同应变处叠加不同时间的振动后，试件的应力与应变曲线迅速下降，降低程度与振动时间成正比。这是由于这种状态下，拉伸试件

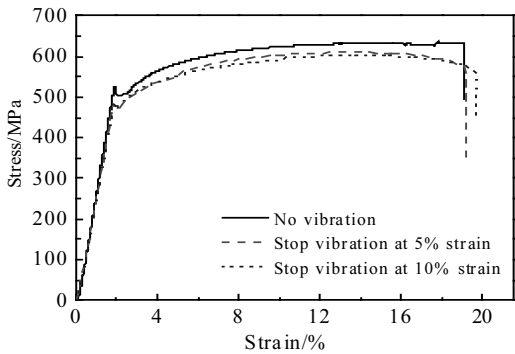


图 6 不同应变处取消超声振动后的 TC1 板材工程应力应变曲线  
Fig.6 Engineering stress-strain curves of TC1 sheet after ultrasonic vibration cancellation at different strains

叠加超声振动对 TC1 板材起到了“应力时效”的作用，时效效果与超声振动叠加时间和拉伸变形阶段有关。图 8 为不同应变处超声振动时间与 TC1 板材延伸率关系。在工程应变为 5% 处，超声振动时间为 30 s 时的 TC1 板材延伸率为 16.8%，超声振动时间为 60 s 时的 TC1 延伸率为 17.6%。在工程应变为 10% 处，超声振动时间为 30 s 时的 TC1 板材延伸率为 17.1%，超声振动时间为 60 s 时的 TC1 板材延伸率为 18.4%。也就是说，在 TC1 板材拉伸后期叠加超声振动所取得的时效效果优于成形前期，同时超声振动时间越长对其塑性变形能力的提高幅度越大。

### 2.4 超声振动对拉伸试件组织和硬度的影响

在上述研究基础上，又对超声振动辅助拉伸试件的金相组织、断口形貌以及硬度进行了分析。图 9 为不同超声振动条件下的 TC1 板材拉伸试件的金相组织，无超声振动以及超声振动拉伸试件的金相组织主要是由  $\alpha$  相

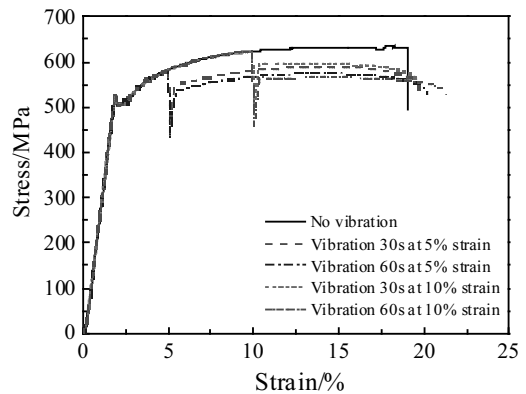


图 7 不同应变处叠加不同超声振动时间的 TC1 板材工程应力应变曲线

Fig.7 Engineering stress-strain curves of TC1 sheet with different ultrasonic vibration time at different strains

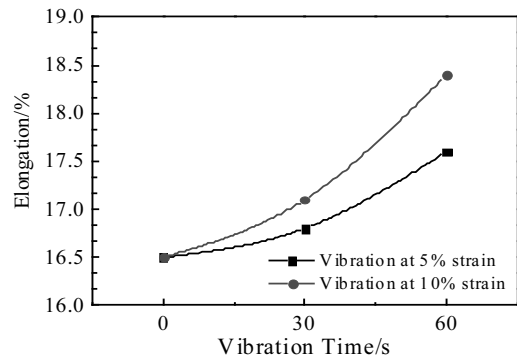


图 8 不同应变处叠加的超声振动时间与 TC1 板材延伸率关系  
Fig.8 Relationship between ultrasonic vibration time and the elongation of TC1 sheet at different strains

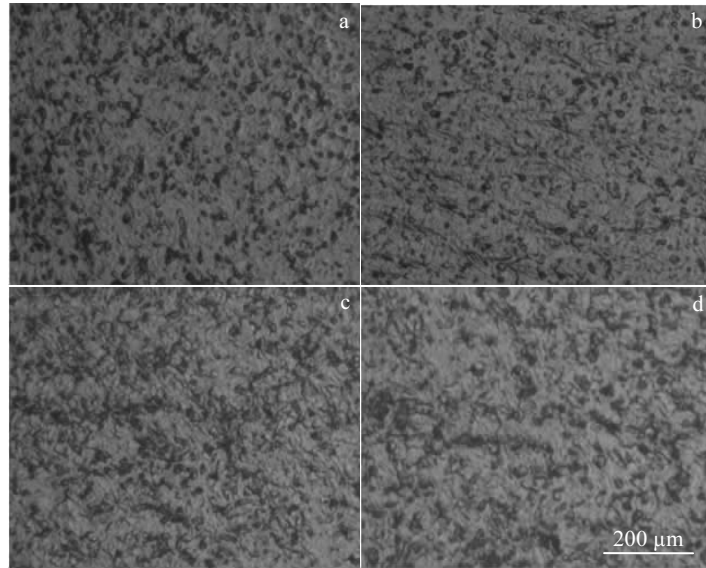


图 9 超声振动对拉伸试件金相组织的影响

Fig.9 Influence of ultrasonic vibration on metallographic microstructures of tensile specimens: (a) no vibration; (b) 20 kHz, 10 μm; (c) 20 kHz, 14 μm; (d) 25 kHz, 10 μm

和少量  $\beta$  相组成，并且与无超声振动拉伸相比较，叠加超声振动后的组织形貌并没有发生明显的变化。图 10 为不同超声振动条件下的 TC1 板材拉伸试件的断口形貌，无超声振动 TC1 板材拉伸试件断口由许多等轴韧窝组成，叠加超声振动后，韧窝有尺寸变大、深度增加的趋势，并且这种趋势随着超声振动对 TC1 板材延伸率提高效果越好而越加明显。

图 11 为不同超声振动条件下的 TC1 板材拉伸试件的维氏硬度测量结果，在超声振动频率为 20 kHz 条件下，随着超声振幅的增加，拉伸试件的硬度出现了先增大后减小的趋势，在超声振幅为 12 μm 达到最大为 3300 MPa，这与超声振幅对 TC1 板材延伸率的影响规律相似；而在超声振幅为 10 μm 时，随着超声频率的增加，拉伸试件硬度逐渐增大，在超声振动频率为 30 kHz 的最大为

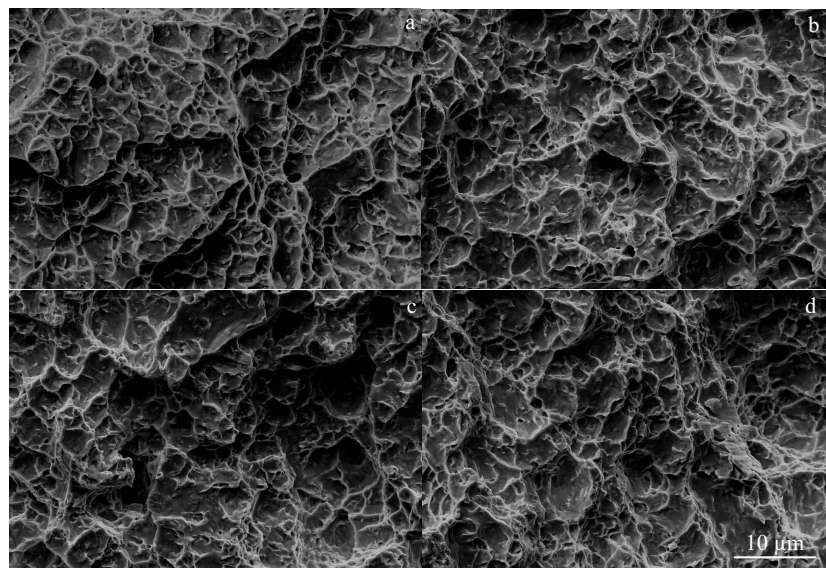


图 10 超声振动对拉伸试件断口形貌的影响

Fig.10 Influence of ultrasonic vibration on fracture morphologies of tensile specimens: (a) no vibration; (b) 20 kHz, 10 μm; (c) 20 kHz 14 μm; (d) 25 kHz, 10 μm

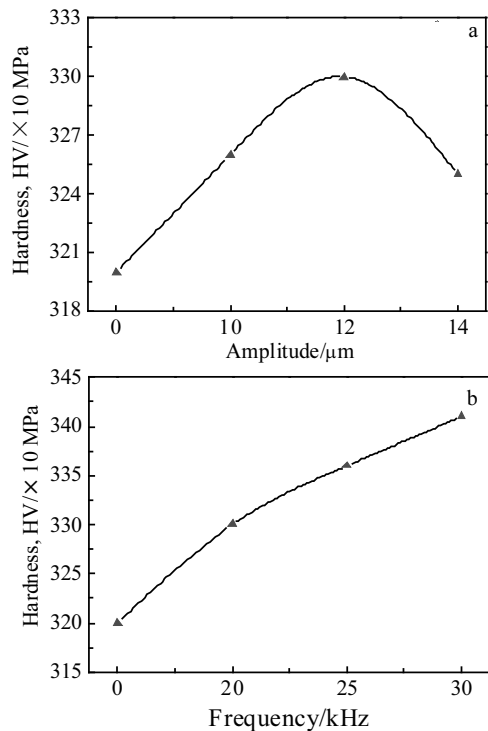


图 11 超声振动对拉伸试件硬度影响

Fig.11 Influence of ultrasonic amplitude on hardness of tensile specimens: (a) and ultrasonic frequency (b)

3410 MPa。但与无超声振动拉伸试件硬度 (3200 MPa) 相比较, 超声振动条件下的拉伸试件硬度增大幅度并不明显。

### 3 结 论

1) TC1 板材在频率 20 kHz 条件下叠加 10~14  $\mu\text{m}$  振幅的超声振动拉伸试验结果表明, 随着振幅的增加, TC1 板材的屈服强度和抗拉强度不断降低, 超声的应力叠加效应和声波软化效应明显增强。而延伸率先增大后降低, 在振幅为 12  $\mu\text{m}$  时的延伸率达到最大。

2) TC1 板材在幅度为 10  $\mu\text{m}$  条件下叠加 20~30 kHz 频率的超声振动拉伸试验结果表明, 随着振动频率的增加, TC1 板材的屈服强度和抗拉强度不断降低, 应力叠加效应和声波软化效应对材料的作用效果越明显。而延伸率随着振动频率的增加而减小, 在振动频率为 20 kHz 时的延伸率达到最大。

3) TC1 板材所进行的超声间歇振动拉伸结果表明, 在超声振动频率 20 kHz、振幅 12  $\mu\text{m}$  条件下, 超声振动持续变形阶段和振动作用时间影响 TC1 板材的拉伸性能, 振动持续变形阶段越大或振动作用时间越长, 对钛合金拉伸性能的改变越明显。

4) TC1 板材拉伸试件组织和性能的分析结果表明,

超声振动对钛合金板材的组织影响较小, 硬度略有增大, 但增大幅度并不明显。

### 参考文献 References

- [1] Zhu Kangping(朱康平), Zhu Jianwen(祝建雯), Qu Henglei(曲恒磊). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(11): 2060
- [2] Jin Hexi(金和喜), Wei Kexiang(魏克湘), Li Jianming(李健明). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2015, 25(2): 280
- [3] Fu Yanyan(付艳艳), Song Yueqing(宋月清), Hui Songxiao(惠松骁) et al. *China Journal of Rare Metal*(稀有金属)[J], 2006, 30(6): 850
- [4] Gao Tiejun(高铁军), Liu Qing(刘青), Cai Jin(蔡晋) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2016, 26(4): 790
- [5] Bai Y, Yang M. *Procedia Engineering*[J], 2014, 81: 1475
- [6] Liu Y X, Sergey S, Han Q Y et al. *Materials Letters*[J], 2012, 67(1): 52
- [7] Hung J C, Lin C C. *Materials and Design*[J], 2013, 45: 412
- [8] Shalvandi M, Hojjat Y, Abdullah A et al. *Materials and Design*[J], 2013, 46: 713
- [9] Nath C, Rahman M, Andrew S S K. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2007, 192-193: 159
- [10] Schwaller P, Gröning P, Schneuwly A et al. *Ultrasonics*[J], 2000, 38(1-8): 212
- [11] Yao Z H, Kim G Y, Faidley L A et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2012, 212: 640
- [12] Bai Y, Yang M. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2013, 213: 330
- [13] Bai Y, Yang M. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2016, 229: 367
- [14] Cao M Y, Li J C, Yuan Y N et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2017, 27(1): 163
- [15] Pasierb A, Wojnar A. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 1992, 34(1-4): 489
- [16] Jimma T, Kasuga Y, Iwaki N et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 1998, 80-81: 406
- [17] Wen T, Gao R, Chen X. *Journal of Shanghai Jiaotong University*[J], 2012, 17(4): 456
- [18] Zhuang X C, Wang J P, Zheng H et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2015, 25(7): 2352
- [19] Ashida. Y, Aoyama. H. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2007, 187: 118

- [20] Wang C J, Liu Y, Guo B *et al.* *Materials and Design*[J], 2016, 112: 246
- [21] Yang Feng(杨 枫), Shen Yu(申 昱), Cao Changyin(曹常印) *et al.* *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2014, 21(4): 42
- [22] Siddiq A, Sayed T E. *Materials Letters*[J], 2011, 65(2): 356
- [23] Lu Teng(路腾腾), Shen Yu(申 昱), Yu Huping(于沪平) *et al.* *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2016, 23(6): 14
- [24] Yao Z H, Kim G Y, Wang Z H *et al.* *International Journal of Plasticity*[J], 2012, 39: 75

## Effects of Ultrasonic Vibration on Tensile Properties of TC1 Titanium Alloy Sheet

Gao Tiejun<sup>1</sup>, Liu Xiaojun<sup>1</sup>, Yu Kun<sup>2</sup>, Qi Lin<sup>1</sup>, Wang Shuo<sup>1</sup>

(1. Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

(2. AECC Shenyang Liming Aero Engine Co., LTD, Shenyang 110043, China)

**Abstract:** The influences of frequency, amplitude and intermittent vibration modes of ultrasonic vibration on the stress and strain, yield strength, tensile strength and elongation of TC1 titanium alloy sheet were investigated by ultrasonic vibration assisted tensile test. The influence of ultrasonic vibration parameters on the microstructure, fracture morphology and Vickers hardness of TC1 sheet were studied by analyzing the microstructure and properties of tensile specimens. The results show that superimposing a certain frequency and amplitude of the ultrasonic vibration in the tensile process can significantly reduce the yield strength and tensile strength of the TC1 titanium alloy sheet. The elongation of the alloy can be greatly improved under certain technological parameters, and the effect on the microstructure and properties of TC1 sheet is less.

**Key words:** ultrasonic vibration; TC1 titanium alloy; tensile properties; vibration mode

---

Corresponding author: Gao Tiejun, Ph. D., Professor, Faculty of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, P. R. China, Tel: 0086-24-88795292, E-mail: tiejun\_gao@163.com