

工艺优化设计

超声辅助纯钛拉伸试验研究

胡俊, 路腾腾, 申昱

(上海交通大学 塑性成形技术与装备研究院, 上海 200240)

摘要: **目的** 研究超声振动对材料流动特性的影响。**方法** 采用自制超声振动拉伸试验装置在不同超声频率和功率条件下进行 TA1 薄板超声辅助拉伸试验, 获得了相应条件下的应力-应变曲线, 并进一步比较了不同条件下材料屈服强度及抗拉强度。**结果** 叠加超声振动后, 材料的屈服强度和抗拉强度均降低, 表明材料出现软化效应。在频率为 20 kHz 条件下, 材料屈服强度降低 7%~10%, 抗拉强度降低 11%~14%, 随着功率的增大, 材料屈服强度逐渐下降, 但功率对抗拉强度的影响并不显著。在功率为 200 W 时, 材料屈服强度降低 5%~8%, 抗拉强度降低 11%~14%, 随着频率的增大, 材料抗拉强度显著下降, 但频率对屈服强度的影响并不显著。**结论** 超声振动对材料的屈服应力及抗拉强度等材料流动指标具有显著影响, 研究结果对相关工艺设计提供了依据。

关键词: 超声振动; 拉伸微成形; 屈服强度; 抗拉强度

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.04.011

中图分类号: TG663 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2018)04-0075-04

Ultrasonic Vibration Tensile Test on Pure Titanium

HU Jun, LU Teng-teng, SHEN Yu

(Institute of Plastic Forming Technology and Equipment, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: The paper aims to study effects of supersonic vibration on material flow characteristics. Ultrasonic vibration tensile apparatus was used to carry out ultrasonic vibration tensile tests of TA1 thin sheet at different frequency and power. Stress-strain curves under corresponding conditions were obtained. The yield strength and tensile strength of different conditions were compared. The ultrasonic vibration could decrease the yield strength and tensile strength of material, which showed the softening effect of material. At 20 kHz, the yield strength decreased by 7%~10%, the tensile strength decreased by 11%~14%. With the increase of power, the yield strength decreased, but the tensile strength had no explicit change. At 200 W, the yield strength decreased by 5%~8%, the tensile strength decreased by 11%~14%. With the increase of frequency, the tensile strength decreased, but the yield strength had no explicit change. The supersonic vibration has explicit effects on yield strength and tensile strength of material, which provides relevant references for the process design.

KEY WORDS: supersonic vibration; tensile; microforming; yield strength; tensile strength

随着产品微型化及相关研究的发展, 微制造技术特别是微塑性成形技术日益成为微细加工领域的研

究热点^[1-5], 利用超声振动、激光等辅助微成形的工艺逐渐成为了研究热点^[6-11]。传统超声振动辅助塑性

收稿日期: 2018-03-13

基金项目: 国家自然科学基金 (51635005)

作者简介: 胡俊 (1983—), 男, 助理工程师, 主要研究方向为微成形理论与工艺。

通讯作者: 申昱 (1974—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为微成形理论与工艺。

成形工艺具有成形载荷低、成形件表面质量好等优点，同时考虑到微成形件尺寸小、成形能量低等特点，在微成形工艺中引入超声振动辅助成形相对易于实现，因而超声辅助微成形逐渐成为微成形领域的研究热点。Bai Y. 等开展了超声振动辅助金属薄板压缩试验，研究了超声振动对成形件表面质量的影响，结果表明，成形件表面粗糙度的降低与超声振幅近似呈线性关系^[12]。Yao Z. H. 等研究了高频超声振动下微细观尺度纯铝镦粗，结果表明，超声的软化效应持续时间较短，硬化效应在成形过程中始终存在，且超声振动施加时间越长硬化效果越明显^[13]。Hung J. C. 等研究了微尺度黄铜微圆柱体超声辅助镦粗试验，结果表明，材料流动应力显著降低，且试样尺寸相对于晶粒尺寸对流动应力下降幅度的影响更相关^[14]。Yao Z. 等对铝的微尺度镦粗发现，超声振动可降低表面摩擦力，并提高成形件表面质量^[15]。Bunget C. 等设计了超声振动辅助挤压装置，并通过相关试验表明施加超声振动后成形载荷显著降低，表面质量显著提高^[16]。

由已有研究可以看出，目前超声辅助微塑性成形研究相关基础试验大部分为镦粗试验。尽管该试验可以在一定程度上反映超声的影响，但由于微小尺寸下摩擦力的显著影响，导致超声对材料流动特性影响的相关研究受到一定制约，因此，本研究采用自制超声振动薄板拉伸试验装置开展超声辅助 TA1 薄板拉伸试验，测量不同条件下的屈服强度和拉伸强度，研究超声振动对材料流动特性的影响。

1 超声辅助薄板拉伸试验

1.1 试验方案

试验材料选用退火 TA1 纯钛板，板厚为 1.1 mm，其化学成分见表 1，试样采用标准拉伸试样。研究选择超声功率和频率作为影响因素，研究超声振动对 TA1 纯钛板材料流动特性的影响，试验条件见表 2，每组条件下重复 3 次以减小试验误差。试验在准静态加载条件下（GB/T 228—2002）进行。

表 1 TA1 化学成分（质量分数）
Tab.1 Chemical composition of TA1 (mass fraction)

							%	
Ti	Fe	C	N	H	O	其他元素		
						单一	总和	
余量	≤0.2	≤0.08	≤0.03	≤0.015	≤0.18	≤0.1	≤0.4	

1.2 试验装置

为了将超声能量施加于试样，本研究设计制造了薄板超声振动拉伸试验装置。装置由 4 个功能模块组

表 2 试验条件
Tab.2 Test condition

序号	厚度/mm	超声振动参数	
		功率/W	频率/kHz
1	1.10	0	0
2	1.10	100	20
3	1.10	200	20
4	1.10	300	20
5	1.10	200	28
6	1.10	200	40

成：超声波发生器、换能器、变幅杆及夹持装置，见图 1。



图 1 超声振动拉伸试验装置
Fig.1 Apparatus of ultrasonic vibration tensile test

2 试验结果与讨论

2.1 试验结果

试验所得不同条件下的应力-应变曲线见图 2。可以看出，在超声振动作用下，材料屈服强度和抗拉强度出现显著下降，即材料在塑性变形过程中出现“软化”。这一现象可以从能量角度解释，随着外界超声能量的输入，滑移系更易于开动，位错更易于运动，即超声能量作用下削弱了材料的各种内应力，使材料更易于塑性变形，即表现为材料屈服强度降低。另外，叠加超声振动后材料伸长率出现一定程度的下降。伸长率的下降是由于超声振动能量的介入导致材料内部缺陷提前萌生并扩展，从而导致伸长率下降。

2.2 超声功率的影响

不同功率条件下屈服强度和抗拉强度见图 3。可以看出，超声频率 20 kHz 条件下，叠加 100~300 W 超声振动，TA1 纯钛板屈服强度下降 7%~10%；且随着超声功率的增大，屈服强度逐渐下降。同时可以发现，叠加 100~300 W 的超声振动使 TA1 纯钛板抗拉强度降低 11%~14%，功率对抗拉强度的影响并不显著。

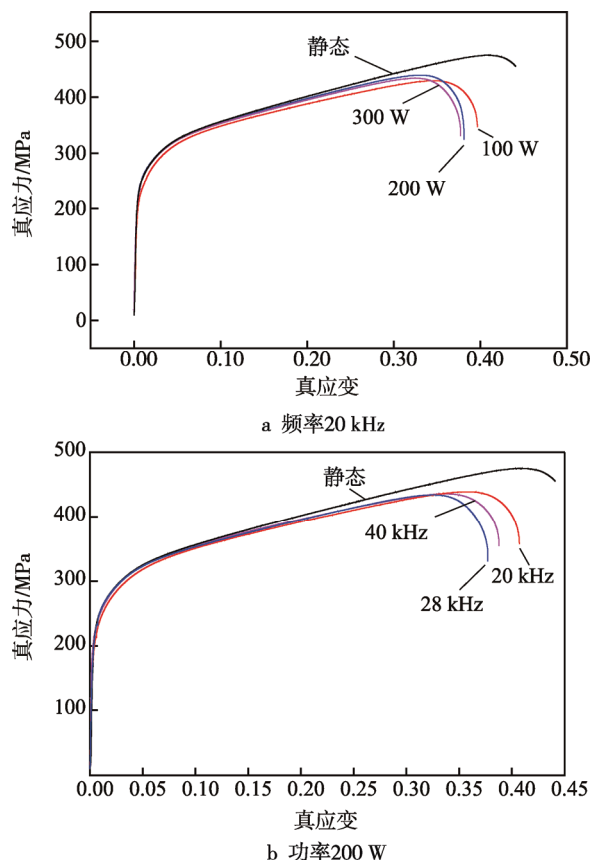


图 2 超声辅助拉伸真实应力-应变曲线

Fig.2 True stress-strain curves in ultrasonic vibration

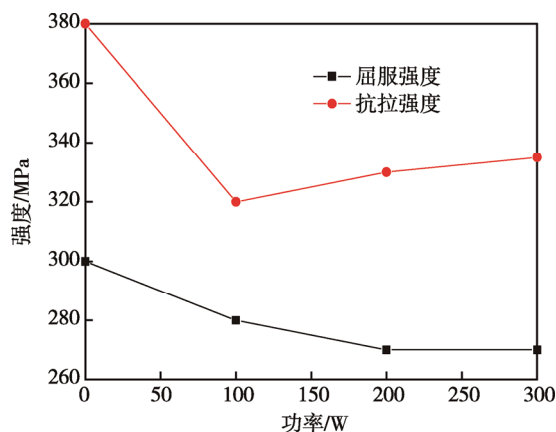


图 3 超声振动功率对屈服强度和抗拉强度的影响(20 kHz)

Fig.3 Influences of supersonic vibration power level on yield strength and tensile strength (20 kHz)

叠加超声振动后,随着功率的增大,输入能量的增大进一步促进了位错运动,从而导致材料屈服强度的降低;功率的增大一方面导致了材料内部缺陷提前萌生并扩展,伸长率下降,抗拉强度下降,另一方面促进了位错运动,导致更多的位错塞积,促进了材料的硬化,在这两种相反机制共同作用下,材料抗拉强度呈现出对功率不敏感的特征。

2.3 超声频率的影响

不同频率条件下屈服强度和抗拉强度见图 4。可

以看出,功率为 200 W 时,屈服强度降低了 5%~8%,抗拉强度降低了 11%~14%,即频率对屈服强度的影响并不显著,对抗拉强度有显著下降作用。

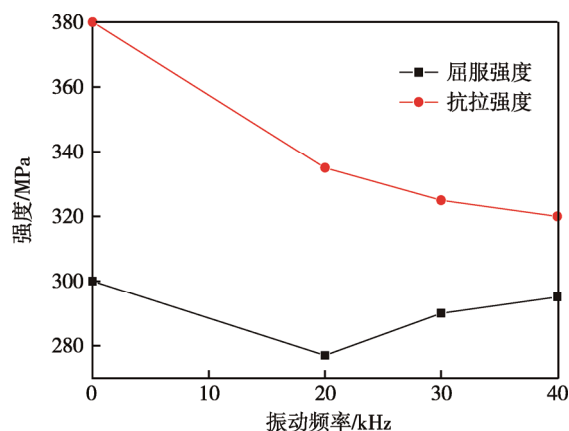


图 4 超声振动频率对屈服强度和抗拉强度的影响(200 W)

Fig.4 Influences of vibration frequency on yield strength and tensile strength (200 W)

在功率一定的条件下,随着频率的增大,材料内部缺陷加速萌生,导致材料抗拉强度显著下降;频率的增大导致试样承受的超声波作用力相对减小,位错运动的驱动力下降,从而导致材料屈服强度增大。同时,试样的几何尺寸及其动力学特性也对超声振动的激励产生影响。在两种机制共同影响下,材料的屈服强度呈现出对频率不敏感的特点。

3 结论

利用自制超声振动拉伸试验装置进行了不同条件下的 TAI 纯钛板材拉伸试验,得出如下结论。

1) 叠加超声振动后,材料的屈服强度和抗拉强度均降低,表明材料出现软化效应。

2) 在频率为 20 kHz 条件下,材料屈服强度降低 7%~10%,抗拉强度降低 11%~14%,随着功率的增大,材料屈服强度逐渐下降,但功率对抗拉强度的影响并不显著。

3) 在功率为 200 W 时,材料屈服强度降低 5%~8%,抗拉强度降低 11%~14%,随着频率的增大,材料抗拉强度显著下降,但频率对屈服强度的影响并不显著。

参考文献:

- [1] 孟庆当, 李河宗, 董湘怀, 等. 304 不锈钢薄板微塑性成形尺寸效应的研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(2): 280—283.
MENG Qing-dang, LI He-zong, DONG Xiang-huai, et al. Investigation of Size Effects of 304 Stainless Steel Foils in Microforming Processes[J]. Chinese Journal of Me-

- chanical Engineering, 2013, 24(2): 280—283.
- [2] 王广春, 郑伟, 姜华, 等. 纯铜微锻粗过程尺寸效应的试验研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(14): 32—37.
WANG Guang-chun, ZHENG Wei, JIANG Hua, et al. Experimental Research on Size Effect of Micro Upsetting of Pure Copper[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(14): 32—37.
- [3] XU Jie, ZHU Xiao-cheng, SHAN De-bin, et al. Effect of Grain Size and Specimen Dimensions on Micro-Forming of High Purity Aluminum[J]. Materials Science and Engineering, 2015, 646: 207—217.
- [4] 单德彬, 徐杰, 王春举, 等. 塑性微成形技术研究进展[J]. 中国材料进展, 2016(4): 251—261.
SHAN De-bin, XU Jie, WANG Chun-ju, et al. The State of the Art in Plastic Micro-forming[J]. Materials China, 2016(4): 207—217.
- [5] GEIGER M, KLEINER M, ECKSTEIN R, et al. Microforming[J]. Cirp Annals-Manufacturing Technology, 2001, 50(2): 445—462.
- [6] 王春举, 郭斌, 单德彬, 等. 高频/超声振动辅助微成形技术研究进展与展望[J]. 精密成形工程, 2015, 7(3): 7—16.
WANG Chun-ju, GUO Bin, SHAN De-bin, et al. High-frequency/Ultrasonic Vibration Assisted Microforming[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(3): 7—16.
- [7] BUNGET Cristina, NGAILE Gracious. Influence of Ultrasonic Vibration on Micro-Extrusion[J]. Ultrasonics, 2011, 51(5): 606—616.
- [8] DUTTA R K, PETROV R H, DELHEZ R, et al. The Effect of Tensile Deformation by in Situ Ultrasonic Treatment on the Microstructure of Low-Carbon Steel[J]. Acta Materialia, 2013, 61(5): 1592—1602.
- [9] WANG C J, LIU Y, GUO B, et al. Acoustic Softening and Stress Superposition in Ultrasonic Vibration Assisted Uniaxial Tension of Copper Foil: Experiments and Modeling[J]. Materials & Design, 2016, 112: 246—253.
- [10] BUNGET Cristina, NGAILE Gracious. Influence of Ultrasonic Vibration on Micro-extrusion[J]. Ultrasonic, 2011, 51: 606—616.
- [11] HUANG Y M, WU Y S, HUANG J Y. The Influence of Ultrasonic Vibration-Assisted Micro-Deep Drawing Process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71: 1455—1461.
- [12] BAI Y, YANG M. Influence of Ultrasonic Vibration Metal Foils Surface Finishing with Micro-Forging[C]. 11th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP-11), Nagoya, Japan, 2014, 1475—1480.
- [13] YAO Z H, KIM G Y, FAIDLEY L, et al. Acoustic Softening and Hardening of Aluminum in High-Frequency Vibration Assisted Micro/Meso Forming[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2013, 28(5): 584—588.
- [14] HUNG J C, TSAI Y C. Investigation of the Effects of Ultrasonic Vibration-assisted Micro-upsetting on Brass[J]. Materials Sciences and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2013, 580: 125—132.
- [15] YAO Z, KIM G Y, FAILDLEY L, et al. Effects of Super Imposed High-frequency Vibration on Deformation of Aluminum in Micro/Meso-scale Upsetting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(3): 640—646.
- [16] BUNGET C, NGAILE G. Influence of Ultrasonic Vibration on Micro-extrusion[J]. Ultrasonics, 2011, 51(5): 606—616.