

TNW700 钛合金板材热弯曲性能

Hot Bending Properties of TNW700 Titanium Alloy

张 涛,付明杰,韩秀全,吴 为

北京航空制造工程研究所塑性成形技术

航空科技重点实验室,北京 100024

ZHANG Tao,FU Ming-jie,HAN Xiu-quan,WU Wei

(Aeronautical Key Laboratory of Plastic Forming Technology,Beijing

Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute,Beijing 100024,China)

摘要:采用带有不同弯曲圆角的模具对 TNW700 钛合金薄板进行热弯曲实验,对其在温度为 700~850℃,弯曲圆角为 1/4~6*t*,弯曲角度为 90°时的最小弯曲半径、回弹半径、回弹角度的变化规律进行了研究。结果表明:沿垂直轧制方向变形的热弯曲窗口较沿轧制方向的宽,垂直轧制方向弯曲变形时,700℃和 850℃的最小弯曲半径分别为 1.5*t* 和 1/4*t*,而沿轧制方向弯曲变形时,700℃和 850℃的最小弯曲半径分别为 3*t* 和 1*t*。回弹半径和回弹角度均随温度的升高和弯曲半径的增大而减小,回弹方向主要取决于模具的叠放次序。

关键词: TNW700 钛合金;热弯曲变形;回弹半径;回弹角度

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2015.07.012

中图分类号: TG146 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2015)07-0068-05

Abstract: Dies with different bending fillet were employed to test the bending properties of TNW700 titanium alloy. The hot bending test of TNW700 titanium alloy sheet under conditions of 700-850℃ and 1/4-6*t* were studied. The results show that the hot bending process window of specimen along the transverse direction is wider than along the rolling direction. The minimum bending radius are 1.5*t* and 1/4*t* under deformation temperature of 700℃ and 850℃ respectively along the transverse deformation direction, and the minimum bending radius are 3*t* and 1*t* under deformation temperature of 700℃ and 850℃ respectively along the rolling deformation direction. Springback radius and springback angle decrease with the increase of temperature and bending radius. Springback direction depends on the placement sequence of the male die and female die.

Key words: TNW700 titanium alloy;hot bending deformation;springback radius;springback angle

随着航空航天技术的飞速发展以及材料科学的不断进步,高温钛合金以其高比强、耐腐蚀、高温性能好等优点得到了越来越广泛的关注。近年来,国内外先后研制出了 IMI834(英国)、Ti1100(美国)、BT36(俄罗斯)以及 Ti60(中国)等能够在 600℃长时间使用的高温钛合金。同时,600℃以上使用的钛合金也是国内外学者竞相研究的方向之一。因此,对于此类材料及相应成形、加工工艺的研究具有积极意义。TNW700 是中科院金属研究所与宝鸡钛业有限公司联合研制的一种 Ti-Al-Zr-Sn-Nb-W 系多元强化型钛合金,该合金在 Al-Zr-Sn 的基础上加入了一定的 Nb 及 W,通过这两种同晶型高熔点 β 稳定元素与中性元素 Zr,Sn 的共同作用,提高合金的热稳定性及热强度。尤其是高熔点元素 W 的添加,使其的高温蠕变强度及屈服强度显著提高^[1]。据称,其短时使用温度可

达 700℃。但是,较高的蠕变强度及屈服强度带来了一系列塑性加工方面的问题。常温屈服强度高、成形范围窄、回弹大是此类钛合金的显著特点^[2-4]。目前,国内外对于常规牌号钛合金薄板的塑性加工方法主要基于加热后成形^[5-9]。并且已经开发出了较成熟的成形工艺。但对于一些近年来新研制出的钛合金,其塑性成形工艺的基础研究还有待开展。本工作通过对 TNW700 薄板进行热弯曲实验,研究其不同的成形温度及不同的弯曲半径下的极限弯曲半径及回弹半径、回弹角度的变化规律、回弹角度的方向及板材的各向异性特点。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验用 0.8mm 厚退火态 TNW700 钛合金板材由

宝鸡钛业有限公司生产，采用三次真空自耗电弧炉熔炼。TNW700 钛合金实际化学成分见表 1。三个方向的微观组织(L 为轧制方向,T 为垂直轧制方向,ST 为

轧制面)如图 1 所示。L 向的 α 晶粒沿轧制方向有一定的伸长,而 T 向和 ST 向均由等轴 α 晶组成,其平均晶粒尺寸为 $12\mu\text{m}$ 。

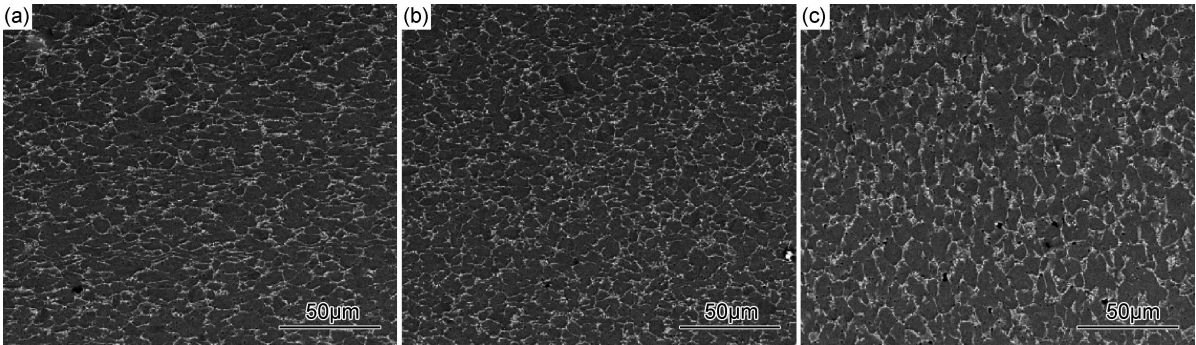


图 1 TNW700 钛合金板材原始显微组织 (a)轧制方向;(b)垂直轧制方向;(c)轧制面
Fig. 1 As-received TNW700 sheet microstructure (a)rolling direction;(b)transverse direction;(c)rolling surface

表 1 TNW700 钛合金的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of TNW700 titanium alloy(mass fraction/%)

Al	Sn	Zr	W	Nb	Si	Fe	C	N	H	O	Ti
5.86	3.40	5.56	1.60	1.15	0.19	0.036	0.10	0.04	0.006	0.091	Bal

1.2 实验方法

TNW700 板材热弯曲实验采用凸凹模热压成形方法完成,模具材料为耐热铸钢 ZG35Cr24Ni7SiN。模具凸模的弯曲半径分别为(t 为板料厚度): $1/4t$, $1/2t$, $1t$, $1.5t$, $2t$, $2.5t$, $3t$, $4t$, $5t$, $6t$, 弯曲角度均为 90° 。采用高压水切割的方法分别沿轧制方向和垂直轧制方向切取加工热弯曲试样,尺寸为 $120\text{mm} \times 25\text{mm}$,热弯曲成形温度分别为 $700, 750, 800, 850^\circ\text{C}$,模具到温后装入试样保温 10min 后开始成形,模具下压速率为 1mm/s ,当凸凹模偶合后加压 $10t$,保压 3min 后取出试件,空冷至室温。实验设备为 FSP150t 超塑成形机,上下平台采用电热棒电阻加热的方式,平台使用 K 型热电偶测温,精度范围: $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 。采用 FPI-XDIII 型荧光渗透检测生产线对弯曲试样表面裂纹进行检测分析。

2 实验结果与分析

2.1 最小弯曲半径及回弹半径

如图 2 所示为不同取样方向热弯曲实验范围内的热加工窗口。可见,沿轧制方向弯曲(图 2(a))的热加工窗口小于垂直于轧制方向的热弯曲(图 2(b))的热加工窗口。在 700°C 变形时,I 类试样(沿轧制方向弯曲的试样,下同)与 II 类试样(沿垂直于轧制方向弯曲的试样,下同)的最小弯曲半径分别为 2.0mm 和

0.8mm ,在 750°C 变形时,I 类试样与 II 类试样的最小弯曲半径分别为 1.2mm 和 0.8mm ,在 800°C 变形时,I 类试样与 II 类试样的最小弯曲半径分别为 1.2mm 和 0.4mm ,在 850°C 变形时,I 类试样的最小弯曲半径为 0.4mm ,而 II 类试样的最小弯曲半径为 0.2mm 时仍未破裂。I 类试样与 II 类试样的弯曲半径变化趋势相同,均随着凸模圆角半径的增加和弯曲温度的升高,其成形范围加宽。图 3 所示为不同取样方向弯曲后试样外圆角回弹半径变化曲线,回弹半径 $\delta = R_a - R_t$;其中 R_a 为实际外圆角半径, R_t 为理论外圆角半径,回弹半径 δ 值越大,表明材料变形后回弹越大,与理论值偏差越大。由图可见,随着弯曲温度的升高及弯曲半径的增大, δ 值和对应的回弹半径逐渐减小。对于 I 类试样, 700°C 时最小 $\delta = 0.11\text{mm}$, 750°C 时最小 $\delta = 0.1\text{mm}$, 800°C 时最小 $\delta = 0.05\text{mm}$, 850°C 时最小 $\delta = 0$,对应的弯曲半径均为 4.8mm 。对于 II 类试样, 700°C 时最小 $\delta = 0.2\text{mm}$, 750°C 时最小 $\delta = 0.13\text{mm}$, 800°C 时最小 $\delta = 0.06\text{mm}$, 850°C 时最小 $\delta = 0.05$,对应的弯曲半径均为 4.8mm 。从图 3(a),(b)上可以看出,随着温度的升高或弯曲半径的增大,I、II 类试样的 δ 均呈下降的趋势。但两者回弹半径的变化规律存在明显不同,对于 I 类试样,当弯曲半径小于 $2.4\text{mm}(3t)$ 时, δ 变化斜率较大,即 δ 随弯曲半径的增加而减小的幅度较大。当弯曲半径大于 $2.4\text{mm}(3t)$ 时, δ 变化斜率较小,即 δ 随弯曲半径的增加而减小的幅度较小。

表明回弹半径在弯曲半径为 $3t$ 处发生转折,弯曲半径小于 $3t$ 时, δ 值较大且随弯曲半径的增大而减小显著。弯曲半径大于 $3t$ 时, δ 值较小且随弯曲半径的增大而减小渐缓。对于 II 类试样,则是在弯曲半径为 2.0mm

($2.5t$)处发生与 I 类试样相似的现象,两者的规律基本相似。由此可见,TNW700 的各向异性较大,垂直轧制方向的弯曲性能明显优于平行轧制方向的弯曲性能。

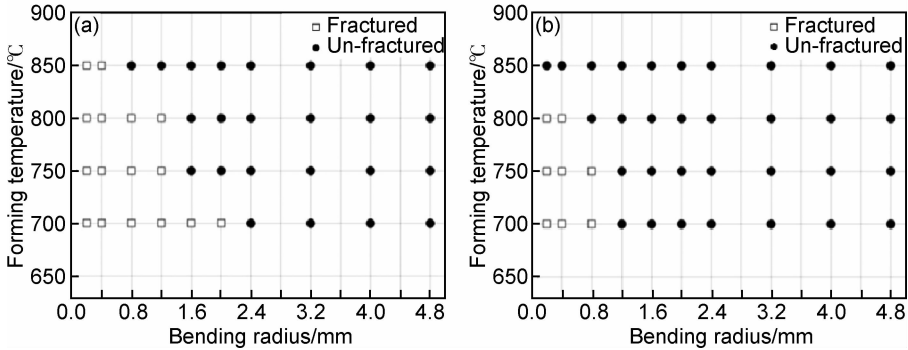


图 2 TNW700 钛合金热弯曲加工窗口 (a)轧制方向;(b)垂直轧制方向
Fig. 2 TNW700 titanium hot bending process window (a)rolling direction;(b)transverse direction

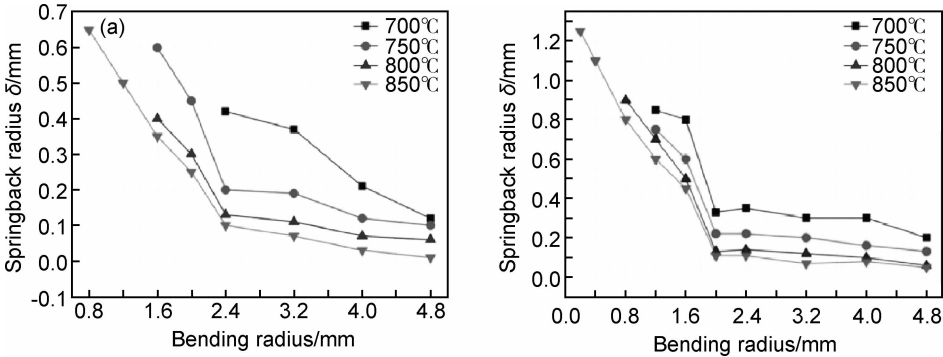


图 3 不同变形方向的试样回弹半径的变化曲线 (a)轧制方向;(b)垂直轧制方向
Fig. 3 Springback diameter of specimen with different deformation directions (a)rolling direction;(b)transverse direction

2.2 回弹方向及回弹角度

图 4 为 I 类试样及 II 类试样的角度变化曲线。可见,随着温度的升高或弯曲半径的增大,I 类试样及 II 类试样的弯曲角度均增大,I 类试样在大弯曲半径时的弯曲角度增幅大于 II 类试样的,但是两者的弯曲角度均小于或接近 90° ,这与常温弯曲时的变化规律相

反^[10-12]。图 5 为常温、高温状态下加载及卸载时圆角应力状态示意图。常温弯曲时,在单位载荷 P 的作用下板料发生弯曲,其材料截面应力状态见图 5(a)所示,中性层内侧材料应力指向压力中心线,外侧材料应力背离压力中心线,此时材料发生弹塑性变形。卸载后,弹性变形的驱动力的方向与加载前相反,见图 5(b)。

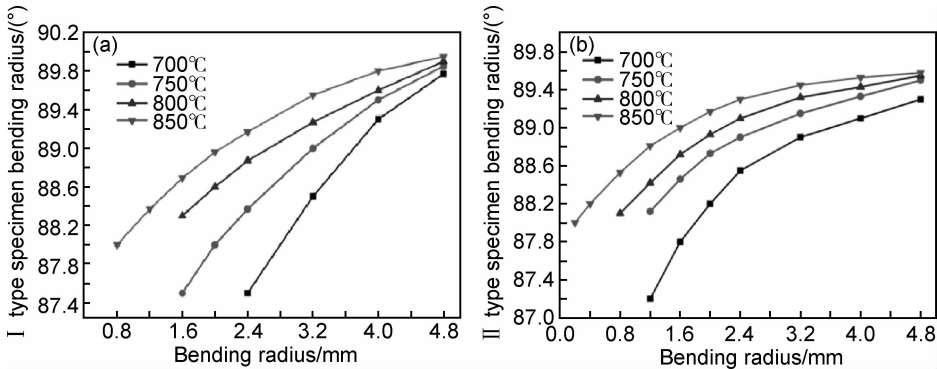


图 4 不同方向弯曲后的试样角度变化曲线 (a)轧制方向;(b)垂直轧制方向
Fig. 4 Corner of specimen with different deformation directions (a)rolling direction;(b)transverse direction

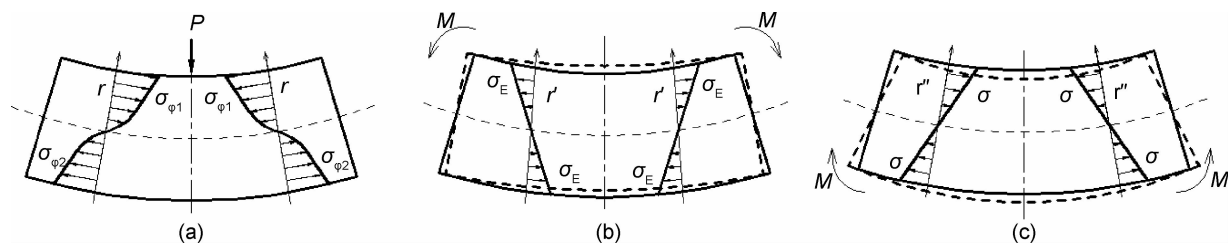


图 5 常温、高温板材弯曲加载及卸载时圆角应力状态示意图 (a)常温加载;(b)常温卸载;(c)高温卸载

Fig. 5 Illustrated diagram of stress condition on fillet when loading on and off at room temperature and elevated temperature sheet bending (a)load-on at RT;(b)load-off at RT;(c)load-off at elevated temperature

这是常温弯曲后试件的实际角度大于理论角度的原因。高温成形时板料受力与常温相同,不同的是在高温作用下,与逐渐被消除,即所谓的应力松弛^[13,14]。理论上热弯曲后的试件角度应该趋近 90° ,但本实验取件时,凸模先抬起,试件弯曲的内表面与空气接触迅速冷却,而外表面继续在凹模上加热,因此,试件的内外表面形成较大的温度梯度,材料截面受力见图 5(c),与加载时相似,在力矩 M 的作用下板材向内弯曲,因此最终角度小于 90° 。这主要由于实验过程中模具叠放次序引起的,如果是凹模先抬起,试件弯曲的外侧先与空气接触,那么将和本实验得到的结果相反,原因同上。但无论试件弯曲角度的回弹方向如何,其回弹的规律都一致,即弯曲半径越小,卸载时由于温度梯度形成的反向力矩 M 越大。成形后试件角度较理论值偏差越大。弯曲半径越大,成形后试件的角度较理论偏差越小。

3 结论

(1)建立了 TNW700 钛合金板材的热弯曲加工窗口,沿垂直轧制方向的变形窗口大于沿轧制方向的变形窗口。垂直轧制方向弯曲时,700,750℃的最小弯曲半径为 $1.5t$,800℃,850℃的最小弯曲半径分别为 $1t$, $1/4t$ 以下。沿轧制方向弯曲时,700℃的最小弯曲半径为 $3t$,750,800℃的最小弯曲半径为 $2t$,850℃的最小弯曲半径为 $1t$ 。

(2)回弹半径以及回弹角度的变化趋势与弯曲方向无关,与弯曲半径(凸模圆角)相关,回弹半径、回弹角度均随弯曲半径的增大而减小。弯曲角度的回弹方向与模具的叠放方式有关。

(3)沿垂直轧制方向和平行轧制方向弯曲变形,弯曲半径分别小于 $2.5t$ 和 $3t$ 时,回弹半径较大;弯曲半径分别大于 $2.5t$ 和 $3t$ 时,回弹半径随着弯曲半径的增大逐渐减小到趋近理论值。

参考文献

[1] 蔡建明,郝孟一,李学明,等. BT36 高温钛合金的成分特点及组

织研究[J]. 材料工程,2000,(2):10-12.

CAI Jian-ming,HAO Meng-yi,LI Xue-ming,et al. Study on composition character and microstructure of BT36 high temperature Ti alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2000,(2):10-12.

[2] 陈伟,陈明和,王辉. BTi62421S 高温钛合金盒形件超塑性成型工艺[J]. 机械工程材料,2008,32(6):40-43.

CHEN Wei,CHEN Ming-he,WANG Hui. Superplastic forming technology of box-shaped piece of high-temperature titanium alloy BTi6431S[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2008,32(6):40-43.

[3] 史科,郭晓琳,王猛团. BTi62421S 高温钛合金的热成形及超塑成形性能[J]. 中国有色金属学报,2010,20(增刊1):770-774.

SHI Ke,GUO Xiao-lin,WANG Meng-tuan. Hot forming and superplastic forming performance of high-temperature BTi-62421S titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010,20(Suppl1):770-774.

[4] 孙二举,边丽虹,刘东,等. 热加工条件下 Ti60 高温钛合金的本构关系[J]. 航空材料学报,2012,32(2):40-45.

SUN Er-ju, BIAN Li-hong, LIU Dong, et al. Constitutive equations for hot deformation of Ti60 high temperature titanium alloy [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012,32(2):40-45.

[5] PRASAD Y V R K,SESHACHARYULU T. Titanium alloy processing[J]. Advanced Materials & Processes, 2000,(6):85-89.

[6] SEMIATIN S L, DELO D P. Equal channel angular extrusion of difficult-to-work alloys[J]. Materials & Design, 2000,21(4):311-322.

[7] 尚建勤. 钛合金 TC1 整流内罩热成形工艺研究[J]. 锻压技术, 2000,(2):17-18.

SHANG Jian-qin. Research on hot forming of the dome part of TC1 titanium alloy[J]. Forging & Stamping Technology, 2000,(2):17-18.

[8] 杨伟俊,李东生,李小强,等. 复杂形状钛合金热成形零件工艺仿真及参数优化研究[J]. 塑性工程学报,2009,16(1):42-46.

YANG Wei-jun,LI Dong-sheng,LI Xiao-qiang, et al. Hot forming process optimization of a complex titanium alloy part with numerical simulation method[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009,16(1):42-46.

[9] 冯岩,孟祥军,李其明. Ti75 合金的热成形工艺研究[J]. 稀有金属,2004,28(1):70-74.

FENG Yan ,MENG Xiang-jun,LI Qi-ming. Research on hot deformation technology of Ti75 alloy[J]. Chinese Journal of Rare

- Metals, 2004, 28(1):70—74.
- [10] 张冬娟,催振山,李玉强,等. 宽板大曲率半径纯弯曲回弹量理论分析[J]. 工程力学, 2006, 23(10): 77—81.
ZHANG Dong-juan, CUI Zhen-shan, LI Yu-qiang, et al. The springback of wide metal sheet after large radius pure bending [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(10): 77—81.
- [11] 刁法玺,张凯峰. 板料 V 形弯曲回弹的动力显示有限元分析[J]. 材料科学与工艺, 2002, 10(2):170—174.
DIAO Fa-xi, ZHANG Kai-feng. Dynamic explicit finite element analysis of springback of sheet V-bending[J]. Material Science and Technology, 2002, 10(2):170—174.
- [12] 秦治国,江乐新,韩鹏彪. 塑性弯曲回弹理论的探讨[J]. 锻压技术, 1995, (1): 28—32.
QIN Zhi-guo, JIANG Le-qun, HAN Peng-biao. A study on the spring back theory of plastic bending[J]. Forging & Stamping Technology, 1995, (1): 28—32.
- [13] 金尧,魏楠. 金属高温应力松弛行为研究[J]. 机械强度, 1997, 19(3): 57—60.
- JIN Yao, WEI Nan. Research on stress relaxation of metals at elevated temperature[J]. Journal of Mechanical Strength, 1997, 19(3): 57—60.
- [14] 刘勇,尹钟大,朱景川. 温度、应力及晶粒度对 TC4 合金应力松弛性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(8): 643—645.
LIU Yong, YIN Zhong-da, ZHU Jing-chuan. Effects of temperature, stress and grain size on stress relaxation in the alloy TC4 [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32(8): 643—645.

收稿日期:2014-08-12;修订日期:2015-05-29

通讯作者:张涛(1979—),男,工程师,研究方向为金属成形技术,联系地址:北京市 340 信箱 106 研究室, E-mail:zt0202@163.com
