文章编号:1001-4888(2025)05-0599-09

基于单应力小冲杆方法研究轧制 Ti-6Al-4V 钛合金各向异性拉伸性能*

徐鑫龙[1],赖焕生[2],林平[3],何锦坤[3],杨晓翔[1],郭金泉[1]

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院,福建福州 350108;2. 中山大学 中法核工程与技术学院,广东珠海 519082;3. 福建省锅炉压力容器检验研究院,福建福州 350028)

摘要: 钛合金是一种被广泛应用于航空航天、核工程、石化装备等领域的高性能材料。为了克服传统单轴拉伸试验测试钛合金各向异性力学性能需要大尺寸试样的缺点,本文基于微试样的测试方法,提出使用单应力小冲杆测试方法研究轧制 Ti-6Al-4V 钛合金的各向异性拉伸性能。为了验证单应力小冲杆测试方法的精度,还进行了标准单轴拉伸试验及标准小冲杆试验,标准单轴拉伸试验结果表明,试验所用的轧制 Ti-6Al-4V 钛合金具有明显的各向异性。对比拉伸试验与标准小冲杆试验发现,由于双向应力的作用,标准小冲杆试验不能准确测试出钛合金各向异性力学性能,而单应力小冲杆测试方法能够测试试验所用轧制 Ti-6Al-4V 钛合金的各向异性,且具有较高的精度,对屈服强度,Ⅰ方向(垂直轧制方向)2 种试验的平均偏差为2.14%,Ⅱ方向(轧制方向)2 种试验的平均偏差为 3.57%,Ⅲ方向(厚度方向)2 种试验的平均偏差 2.14%;对抗拉强度,Ⅰ方向 2 种试验的平均偏差为 3.60%,Ⅱ方向 2 种试验的平均偏差为 3.53%,Ⅲ方向 2 种试验的平均偏差为 5.34%。2 种试验方法测得的各方向测试结果偏差较小,表明使用单应力小冲杆测试方法测试 Ti-6Al-4V 钛合金不同方向的拉伸性能具有较高的精度。

关键词: Ti-6Al-4V;钛合金;各向异性;拉伸性能;单应力小冲杆

中图分类号: TG113.25 **文献标志码:** A DOI: 10.7520/1001-4888-24-169

0 引言

钛合金具有低密度、高强度、耐高温、耐腐蚀等特点,目前已被广泛用于航空航天、海洋工程、核工程、石化工程等领域[1-4]。在这些应用场景中,存在高温、腐蚀、振动等恶劣环境,钛合金部件在这样的环境下长时间服役,材料的微观结构及性能会发生变化,从而导致相关构件发生破坏[5],因此,力学性能的测试对其结构安全和寿命预测都十分重要[6-7]。根据晶体结构与相的组成差异将钛合金分为 3 类:α 型钛合金、β 型钛合金及 $\alpha+\beta$ 型钛合金[8]。其中,$\alpha+\beta$ 型是最常用的一类钛合金,典型代表为 Ti-6Al-4V(TC4)[9]。钛合金在轧制加工成型后,其微观上表现出明显的织构现象,宏观上表现出各向异性力学性能的特点,因此为了更好地应用钛合金,需要对其各向力学性能进行研究[10-11]。通常情况下,力学性能的测试通过标准单轴拉伸试验(Uniaxial Tensile Test,UTT)完成,但在一些场景中无法按国家标准制样,特别是在役设备无法进行大面积取样,因此只能使用微试样的测试方法。

小冲杆试验(Small Punch Test,SPT)是一种微试样的测试方法,在测试拉伸性能[12-15]、断裂性

* **收稿日期:** 2024-11-11;**修回日期:** 2024-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(11972005)

通信作者: 郭金泉(1979—),男,教授。主要从事结构安全、失效和寿命分析研究。Email: megjq@fzu.edu.cn

能[16-18]等领域的应用已经有了一定的发展。然而，对各向异性材料来说，由于标准的SPT试样受到双向应力作用，使其理论上无法测试材料的各向异性力学性能。为此，有学者研究了使用长条形、狗骨形试样测试材料性能参数，以避免标准小冲杆试验中圆片试样无方向性的缺点[19-20]，但这些试样形式不易装夹，因此也未被用于各向异性力学性能的研究。为实现小试样方法的各向异性性能测试，本研究团队基于薄膜理论，开发了单应力小冲杆测试(Single-stress Small Punch Test，SS-SPT)方法，并成功应用于研究燃料包壳管的周向拉伸和蠕变性能[21-22]。

为研究SS-SPT的可行性，本文采用SS-SPT研究轧制TC4钛合金板材的各向异性力学性能。首先，文中明确了SS-SPT确定拉伸性能的方法，并通过UTT、SS-SPT和SPT测试了钛合金的各向异性拉伸性能；然后，对比了用SS-SPT与UTT测试TC4钛合金各向异性力学性能的精度。

1 采用SS-SPT确定拉伸性能

本研究团队提出的SS-SPT[21-22]是采用弧形试样来测试燃料包壳管的周向拉伸性能的，本文拟对轧制的TC4钛合金板料开展各向力学性能研究，因此需对试样和夹具进行改造，将试样制成平板状，具体如图1(a)所示。在试样上设置了对称的2个孔，孔之间的方形区域为受载区域。试样通过上、下夹具固定，在冲杆受到外加载荷时，半圆柱形的冲头作用到试件上，使试件中部发生拉伸，由薄膜理论可得试样受到的冲头冲力 F 与其对应产生的压力 p 的关系为

$$F = \int_0^{\varphi} 2pbr\cos\gamma \mathrm{d}\gamma = 2pbr\sin\varphi \tag{1}$$

式中：γ 为变形试样表面上任一法线与冲头轴线之间的积分角；φ 为试样与冲头在接触边界线处的接触角；b 为SS-SPT试样有效部分宽度；r 为圆柱形冲头半径。

在压力 p 的作用下，由于试样厚度 h 远小于冲头的半径 r，根据薄膜理论可知，此时试样的弯曲应力很小，可以忽略不计，产生的单个伸张应力 σ 可由式(2)计算。试样受力情况如图1(b)所示，试样加载时只受到单个伸张应力的作用，与标准单轴拉伸试验类似，在理论上可使用SS-SPT对各向异性材料的力学性能进行测试。

$$\frac{2pbr}{2bh} = \frac{pr}{h} = \frac{F}{2hb\sin\varphi} \tag{2}$$

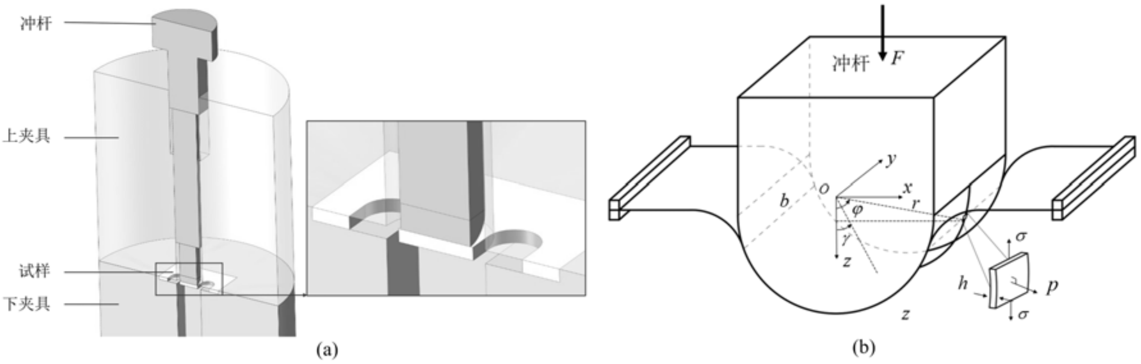

图1 SS-SPT装置与受力示意图：(a)SS-SPT装置；(b)载荷作用下的SS-SPT试样

Fig. 1 Schematic diagram of SS-SPT device and stresses: (a) the SS-SPT setup; (b) the SS-SPT specimen under load

通过SS-SPT能够得到与图2(a)所示标准SPT结果类似的载荷 F-位移 u 曲线(以函数 $F(u)$ 表示)。由于曲线各阶段特征均与标准SPT类似，故标准SPT确定拉伸性能的方法也可用于SS-SPT，即屈服强度(R_e)和抗拉强度(R_m)可根据式(3)、式(4)来确定[23-24]。

$$R_e = \alpha \frac{F_e}{h_0^2} \tag{3}$$

$$R_m = \beta \frac{F_m}{h_0 u_m} \tag{4}$$

式中：α 和 β 为经验因子，取决于试件初始厚度和试验装置的尺寸；F_e 为弹塑性过渡力，可通过图2(b)

所示 $F(u)$ 曲线的双线性函数拟合法来确定；h_0 为试件的初始厚度；F_m 为试验过程中的最大载荷值；u_m 为最大载荷对应位移值。

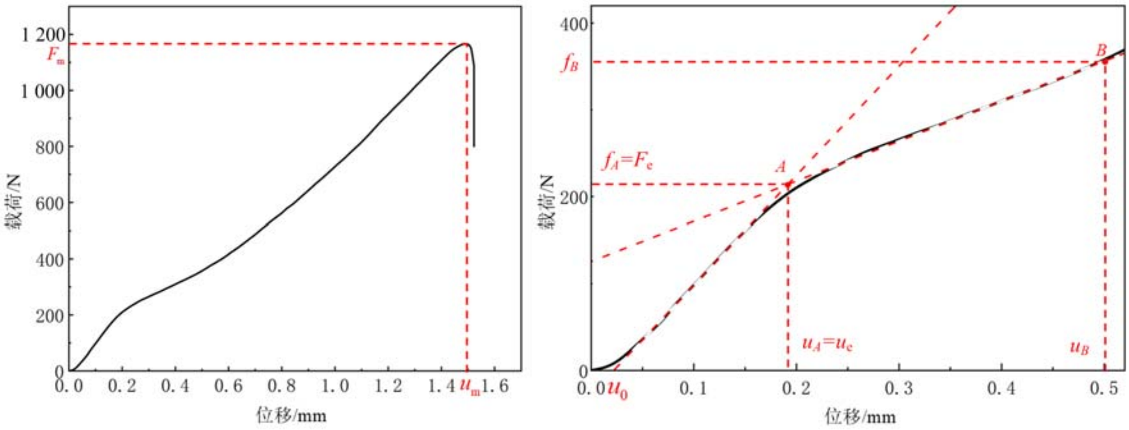

图 2　SPT 载荷-位移曲线及 F_e 的确定：(a)SPT 曲线；(b)确定 F_e 的双线性函数[25]

Fig. 2　Load-displacement curves of SPT and determination of F_e:

(a)SPT curve; (b)determine the bilinear function of F_e[25]

参考 GB/T 29459.2－2012《在役承压设备金属材料小冲杆试验方法 第 2 部分：室温下拉伸性能的试验方法》进行双线性拟合，拟合方程 $f(u)$ 如式(5)所示。通过图 2(b)中拟合方程 $f(u)$ 的自变量与函数值 u_0、u_A、f_A、f_B 来确定双线性函数，以便使误差计算公式(6)所计算的误差 e_{rr} 最小。

$$f(u)=\begin{cases}0,\ 0\leqslant u<u_0\\ \dfrac{f_A}{u_A}u,\ u_0\leqslant u<u_A\\ \dfrac{f_B-f_A}{u_B-u_A}(u-u_A)+f_A,\ u_A\leqslant u\leqslant u_B\end{cases}\tag{5}$$

$$e_{rr}=\int_0^{u_B}[F(u)-f(u)]^2\mathrm{d}u\tag{6}$$

式中：u 为位移值；u_0 为拟合函数最低点位移；u_A 为拟合点 A 的位移；u_B 为拟合点 B 的位移，$u_B=h_0$；f_A 为 A 点拟合函数值；f_B 为 B 点拟合函数值。

2　试验

试样原料为热轧加工的 TC4 板材，尺寸为 80 mm×60 mm×60 mm，化学成分见表 1。分别对材料在其垂直轧制方向(Ⅰ方向)、轧制方向(Ⅱ方向)、厚度方向(Ⅲ方向)取样，进行标准单轴拉伸试验及 SS-SPT。为更好地对比 UTT 试样与 SS-SPT 试样的结果，在原材料与Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ方向所对应的 A、B、C 面上取样，具体取样方式如图 3 所示。利用线切割及电火花加工的方式加工 UTT 试样、SPT 试样及 SS-SPT 试样，试样加工后需使用砂纸将表面进行研磨至光滑，且保证一定的厚度精度。

表 1　TC4 合金微量元素含量

Tab. 1　Chemical composition of TC4 alloy

元素	Al	V	Fe	O	C	N	H	Ti
含量/%	6.000	3.500	0.300	0.200	0.200	0.050	0.015	余量

2.1　UTT 试验

根据 GB/T 228.1－2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法》，考虑实际试样加工条件及试验机夹持要求，设计了如图 4 所示的标准拉伸试样。试样总长度为 60 mm，标距长度为 23 mm，宽度为 10 mm。由于原始材料的尺寸有所限制，以及试验机夹持设备影响，故参考标准中的薄板试样类型，综合考虑后试样截面厚度取 1 mm。使用电子万能试验机及非接触式引伸计进行试验，在室温下对

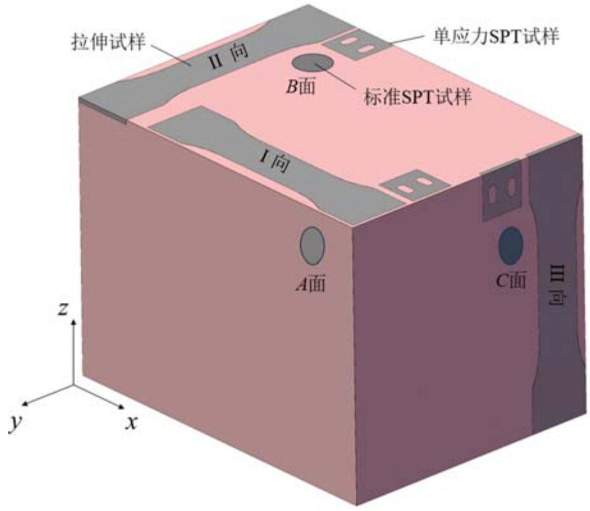

图 3 试样取样方向与位置

Fig. 3 Sampling directions and locations of specimen

每个方向进行 3 次拉伸试验,加载速率设置为 0.2 mm/min。

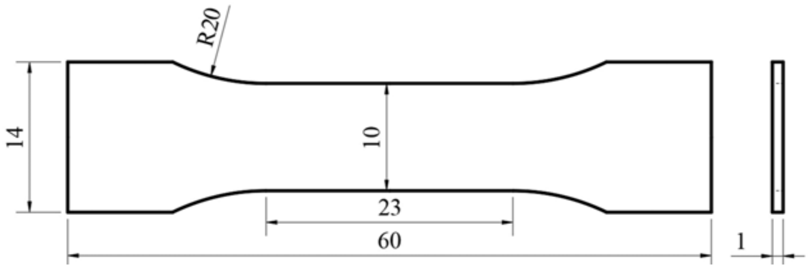

图 4 拉伸试样尺寸(单位:mm)

Fig. 4 Dimension of the tensile specimen (unit: mm)

2.2 SS-SPT 试验

SS-SPT 试样形状尺寸如图 5(a)所示,试样设有 2 个对称的方槽,方槽之间为冲击区域。试样采用电火花加工,初始厚度为 0.7 mm,使用砂纸对其研磨至(0.5±0.005)mm,得到试验试样如图 5(b)所示。利用图 1(a)所示的试验装置,在室温下进行试验,每个方向重复 3 次试验得到 $F(u)$曲线。

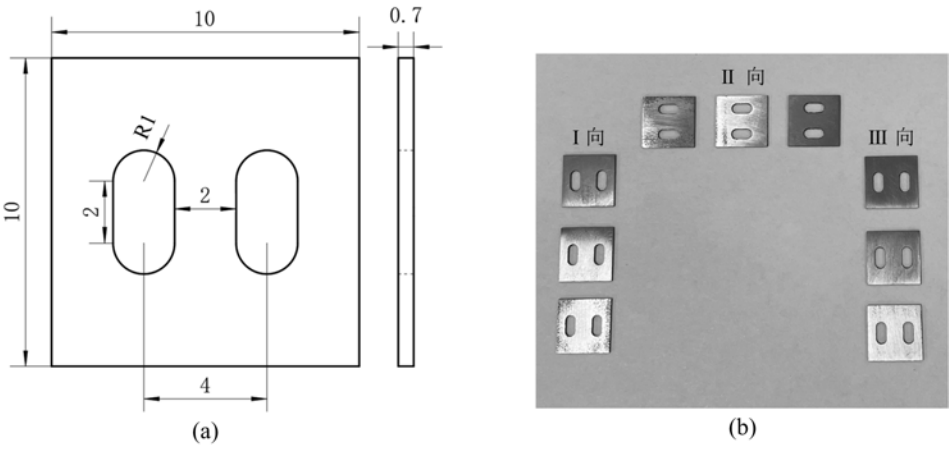

图 5 SS-SPT 试样:(a)试样尺寸(单位: mm);(b)试验试样

Fig. 5 SS-SPT specimen:(a)dimension of specimen(unit: mm);(b)test specimen

2.3 SPT 试验

参考 GB/T 29459.2—2012《在役承压设备金属材料小冲杆试验方法 第 2 部分:室温下拉伸性能的

试验方法》，设计标准小冲杆试样如图 6(a)所示。试样直径为 10 mm，加工厚度 0.7 mm，使用砂纸对其研磨至(0.5±0.005)mm。在室温下使用图 6(b)所示装置进行标准 SPT 试验，每个方向重复 3 次，加载速率设置为 0.2 mm/min。

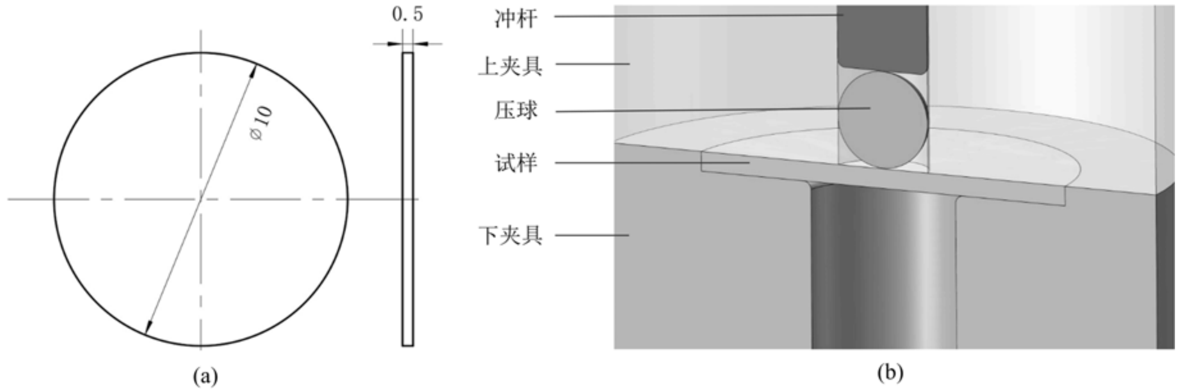

图 6　标准 SPT 试样及装置：(a)试样尺寸(单位：mm)；(b)试验装置

Fig. 6　The specimen and schematic of the standard SPT：(a) dimension of specimen(unit：mm)；(b) test setup

3　结果与讨论

图 7(a)为不同方向轧制 TC4 钛合金的 UTT 工程应力-应变曲线，从图中可以看出，该轧制 TC4 钛合金各个方向的 3 组曲线不同，表明在 3 个不同取样方向上的力学性能有所差异。其中，Ⅱ方向的强度最高，其次是Ⅰ方向，Ⅲ方向的强度比其他 2 个方向低。对比 3 个方向屈服强度也有所差异，Ⅱ方向屈服强度最大，Ⅰ方向与Ⅲ方向接近。此外，从弹性变形阶段斜率来看，Ⅰ方向的斜率最大，Ⅲ方向最小。表 2 为不同方向多个试样的室温力学性能，从表中数据可以看出，3 个方向屈服强度和抗拉强度明显不同。对 3 组试验结果取平均，得到Ⅰ方向屈服强度为 736 MPa，抗拉强度为 830 MPa；Ⅱ方向屈服强度为 809 MPa，抗拉强度为 853 MPa；Ⅲ方向屈服强度为 744 MPa，抗拉强度为 806 MPa。从以上不同方向的差异性结果可见，该轧制 TC4 钛合金具有各向异性特征。

表 2　TC4 合金试样室温拉伸性能

Tab. 2　The tensile properties of TC4 alloy specimenat room temperature

方向	编号	R_e/MPa	R_m/MPa
Ⅰ	1	732	822
	2	751	836
	3	725	832
	平均值	736	830
Ⅱ	1	816	861
	2	795	842
	3	815	855
	平均值	809	853
Ⅲ	1	740	807
	2	744	806
	3	747	804
	平均值	744	806

图 7(b)为不同方向轧制 TC4 钛合金的 SS-SPT 测试结果 $F(u)$曲线，从图中可以看出，3 个方向的试样所得到的载荷-位移关系有一定的差异。当 $u<0.25$ mm 时，Ⅲ方向的载荷大于其他 2 个方向；当 u

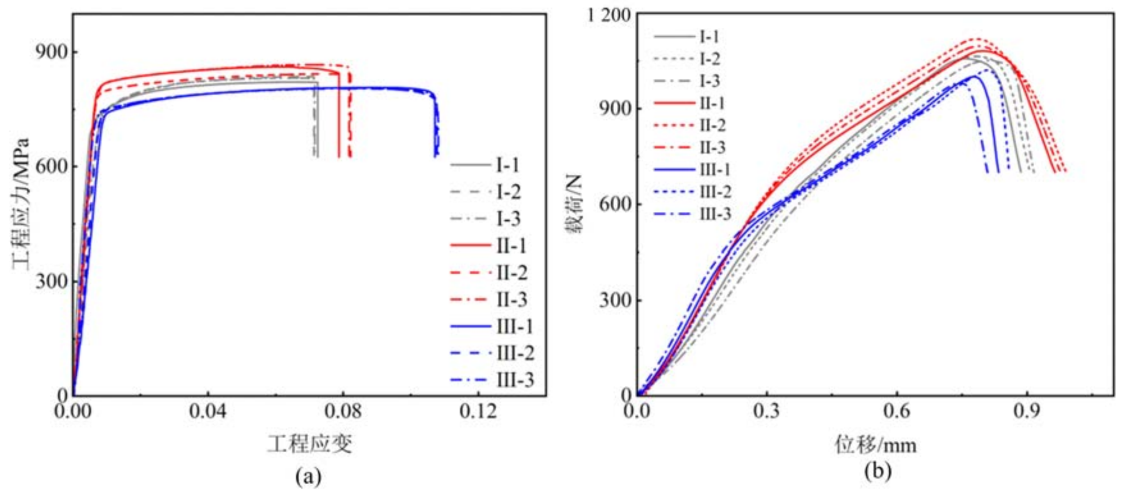

图7　TC4合金室温试验曲线:(a)UTT工程应力-应变曲线;(b)SS-SPT载荷-位移曲线

Fig.7　The experimental curves of TC4 alloy at room temperature:(a)engineering stress-strain curve of UTT;(b)load-displacement curve of SS-SPT

>0.25 mm时,Ⅲ方向的载荷增大速率开始变缓,曲线载荷值开始逐渐低于其他2个方向。当曲线到达最高点时,载荷最大值 F_m 从大到小依次是Ⅱ方向、Ⅰ方向、Ⅲ方向,这与常规单轴拉伸试验结果一致。当曲线达到最高点后,试样开始破坏,此时曲线逐渐下降。图8给出了SS-SPT试样测试后的典型破坏形式,由图可以看出,试样的颈缩与破坏均发生在试样的中心。对3组试验的最大载荷及最大载荷对应位移取平均,得到Ⅰ方向最大载荷为1 058 N,对应位移为0.78 mm;Ⅱ方向最大载荷为1 099 N,对应位移为0.79 mm;Ⅲ方向最大载荷为1 001 N,对应位移为0.78 mm。试验得到的各方向最大载荷有所差异,可见SS-SPT能测出该材料的各向力学性能。根据试验结果提取对应参数,由式(3)和式(4)计算SS-SPT的屈服强度和抗拉强度,式中的试样初始厚度 h_0 为0.5 mm,经验因子 α 和 β 根据文献[21]取0.297与0.384,计算结果见表3。

图9为不同取样面轧制TC4钛合金的SS-SPT测试结果 $F(u)$ 曲线,从图中可以看出,利用标准SPT测出的该轧制TC4钛合金A、B、C面的载荷-位移曲线未能明显地区别出不同方向的力学性能,且测试结果的分散性较大,这是由于标准SPT试样加载时处于双应力状态造成的。因此,标准SPT不适用于测试轧制的TC4钛合金的各向异性力学性能。由于TC4钛合金在试样失效前会出现复杂的局部紧缩及断裂扩展并产生延迟断裂的现象,因此其SPT曲线形貌与常规金属SPT曲线有所不同[26-27]。

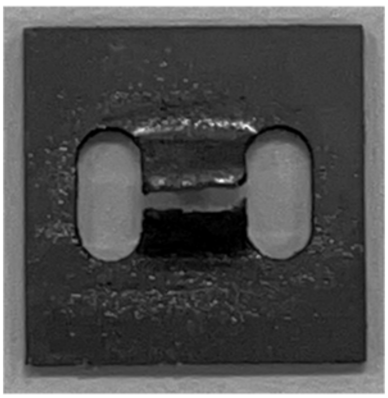

图8　SS-SPT试样的典型破坏形式

Fig.8　The typical failure modes of SS-SPT

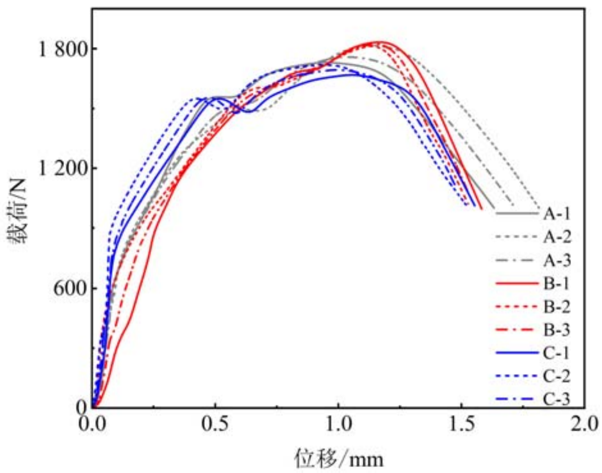

图9　SPT载荷-位移曲线

Fig.9　Load-displacement curves of SPT

对比 SS-SPT 测试结果(表 3)与 UTT 测试结果(表 2)可以发现：就屈服强度而言，I 方向两者的平均偏差为 2.14%，Ⅱ方向两者的平均偏差为 3.57%，Ⅲ方向两者的平均偏差为 2.14%；就抗拉强度而言，I 方向两者的平均偏差为 3.60%，Ⅱ方向两者的平均偏差为 3.53%，Ⅲ方向两者的平均偏差为 5.34%。该结果说明，SS-SPT 所得结果与 UTT 结果较为一致，因此，使用 SS-SPT 方法能够准确地测试出轧制 TC4 钛合金材料不同方向的力学性能。

表 3　SS-SPT 室温试验结果

Tab. 3　SS-SPT result at room temperature

方向	编号	F_m/N	u_m/mm	F_e/N	R_e/MPa	e_{R_e}/%	R_m/MPa	e_{R_m}/%
I	1	1 057	0.76	482	740	1.09	826	0.49
	2	1 065	0.78	495	760	1.20	811	2.99
	3	1 051	0.81	492	755	4.14	771	7.33
	平均值	1 058	0.78	490	752	2.14	803	3.60
Ⅱ	1	1 081	0.80	509	782	4.17	803	6.74
	2	1 119	0.78	551	846	6.42	852	0.35
	3	1 097	0.79	561	816	0.12	825	3.51
	平均值	1 099	0.79	557	815	3.57	827	3.53
Ⅲ	1	1 001	0.78	492	756	2.16	762	5.58
	2	1 022	0.81	472	725	2.53	749	7.07
	3	981	0.75	495	760	1.74	777	3.36
	平均值	1 001	0.78	486	747	2.14	763	5.34

注："e"为 SS-SPT 与标准单轴拉伸试验结果偏差值。

4　结论

本文采用 SS-SPT 方法对轧制 TC4 钛合金在室温条件下进行测试，获得 3 个方向的拉伸性能，并将 SS-SPT 试验与标准 SPT 试验和 UTT 试验进行对比，结果如下：

1)轧制 TC4 钛合金的 UTT 测试表明，3 个方向的拉伸性能有所差异，呈现出各向异性的力学特征。

2)标准 SPT 测试表明，对各向异性材料来说，标准的 SPT 试样由于受到双应力的作用，其载荷-位移曲线未能反映 TC4 钛合金的各向异性力学性能。

3)使用 SS-SPT 能够准确测出 TC4 钛合金的各向异性拉伸性能，在 SS-SPT 与 UTT 结果对比中，对屈服强度，I 方向 2 种试验的平均偏差为 2.14%，Ⅱ方向 2 种试验的平均偏差为 3.57%，Ⅲ方向 2 种试验的平均偏差为 2.14%；对抗拉强度，I 方向 2 种试验的平均偏差为 3.60%，Ⅱ方向 2 种试验的平均偏差为 3.53%，Ⅲ方向 2 种试验的平均偏差为 5.34%。

参考文献：

[1] JIA N N, LI Y K, LIU X, et al. Thermal stability and mechanical properties of low-activation single-phase Ti-V-Ta medium entropy alloys[J]. JOM, 2019, 71(10):3490-3498.

[2] 陈皎，程礼，焦胜博，等. TC4 钛合金超高周疲劳性能研究[J]. 实验力学，2018，33(2):272-280 (CHEN Jiao, CHENG Li, JIAO Shengbo, et al. On the ultra-high cycle fatigue behavior of titanium alloy TC4[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(2):272-280 (in Chinese))

[3] WILLIAMS J C, BOYER R R. Opportunities and issues in the application of titanium alloys for aerospace components[J]. Metals, 2020, 10(6):705.

[4] WU H L, GONG P, HU S Y, et al. Hot corrosion damage mechanism of Ti_6Al_4V alloy in marine environment

[J]. Vacuum, 2021, 191:110350.

[5] LI S, DENG T S, ZHANG Y H, et al. Review on the creep resistance of high-temperature titanium alloy[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2021, 74(2):215-222.

[6] LI W Y, CHEN Z Y, LIU J R, et al. Rolling texture and its effect on tensile property of a near-α titanium alloy Ti60 plate[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(5):790-798.

[7] LIU F L, CHEN Y, HE C, et al. Tensile and very high cycle fatigue behaviors of a compressor blade titanium alloy at room and high temperatures[J]. Materials Science and Engineering:A, 2021, 811:141049.

[8] ZHANG L C, CHEN L Y, WANG L Q. Surface modification of titanium and titanium alloys: Technologies, developments, and future interests[J]. Advanced Engineering Materials, 2020, 22(5):1901258.

[9] ZHAO Z L, JI H C, ZHONG Y Z, et al. Mechanical properties and fracture behavior of a TC4 titanium alloy sheet[J]. Materials, 2022, 15(23):8589.

[10] TANG B T, WANG Q F, GUO N, et al. Modeling anisotropic ductile fracture behavior of Ti-6Al-4V titanium alloy for sheet forming applications at room temperature[J]. International Journal of Solids and Structures, 2020, 207:178-195.

[11] MORENO-VALLE E C, PACHLA W, KULCZYK M, et al. Anisotropy of tensile and fracture behavior of pure titanium after hydrostatic extrusion[J]. Materials Transactions, 2019, 60(10):2160-2167.

[12] VIJAYANAND V D, MOKHTARISHIRAZABAD M, PENG J, et al. A novel methodology for estimating tensile properties in a small punch test employing in situ DIC based deflection mapping[J]. Journal of Nuclear Materials, 2020, 538:152260.

[13] CALAF-CHICA J, SÁNCHEZ PALOMAR M, BRAVO DÍEZ P M, et al. Deviations in yield and ultimate tensile strength estimation with the small punch test: Numerical analysis of pre-straining and Bauschinger effect influence [J]. Mechanics of Materials, 2021, 153:103696.

[14] PENG J, ZHANG H, WANG Y Q, et al. Correlation study on tensile properties of Cu, CuCrZr and W by small punch test and uniaxial tensile test[J]. Fusion Engineering and Design, 2022, 177:113061.

[15] KUMAR K, POOLEERY A, MADHUSOODANAN K, et al. Evaluation of ultimate tensile strength using miniature disk bend test[J]. Journal of Nuclear Materials, 2015, 461:100-111.

[16] 张恩勇,徐彤,喻灿,等. 基于 ASME 应变限制准则的小冲杆试验等效断裂应变[J]. 实验力学,2014,29(5):647-654 (ZHANG Enyong, XU Tong, YU Can, et al. On the equivalent fracture strain in small punch test based on ASME strain limit criterion[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(5):647-654 (in Chinese))

[17] ÁLVAREZ G, RODRÍGUEZ C, BELZUNCE F J, et al. Use of notched small punch test specimens for the determination of fracture properties in structural steels[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, 106:102442.

[18] LAI H S, JIANG X W. Determination of fracture toughness through small punch test of notched-tube specimen [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 279:109059.

[19] 刘刚,关凯书,钟继如,等. 用于金属材料单轴本构关系估算的长条形试样小冲杆试验方法研究[J]. 机械强度,2021,43(4):808-813 (LIU Gang, GUAN Kaishu, ZHONG Jiru, et al. Research on estimation of uniaxial constitutive relationship of metal material by small punch test of strip-type specimen[J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(4):808-813 (in Chinese))

[20] CUESTA I I, RODRÍGUEZ C, GARCÍA T E, et al. Effect of confinement level on mechanical behaviour using the small punch test[J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 58:206-211.

[21] LAI H S, WANG R C, ZHONG Y T, et al. A modified small punch testing scheme to investigate the circumferential mechanical behavior of nuclear fuel cladding tubes[J]. Journal of Nuclear Materials, 2023, 583:154517.

[22] ZHONG Y T, LAI H S, GUO J Q, et al. Small punch test for investigating circumferential creep in cladding tubes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 267:109001.

[23] JIANG X W, DU P N, LI M S, et al. Investigating effects of element composition on the microstructure and mechanical properties of three types FeCrAl alloys through small punch test[J]. Materials & Design, 2024, 238:112712.

[24] TORRES J, GORDON A P. Mechanics of the small punch test: A review and qualification of additive manufacturing materials[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(18):10707-10744.

[25] British Standards Institution. Metallic materials-small punch test method:BS EN 10371:2021[S]. London: BSI, 2021.

[26] ILLSLEY H, LANCASTER R, HURST R, et al. Mechanical property characterisation of electron beam melted (EBM) Ti-6Al-4V *via* small punch tensile testing[J]. Key Engineering Materials, 2017, 734:51-60.

[27] LUCON E, BENZING J T, DERIMOW N, et al. Small punch testing to estimate the tensile and fracture properties of additively manufactured Ti-6Al-4V[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30(7):5039-5049.

Research on anisotropic tensile properties of rolled Ti-6Al-4V titanium alloy using the single-stress small punch test

XU Xinlong[1], LAI Huansheng[2], LIN Ping[3], HE Jinkun[3], YANG Xiaoxiang[1], GUO Jinquan[1]

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China; 2. Sino-French Institute of Nuclear Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, Guangdong, China; 3. Fujian Inspection and Research Institute of Boiler and Pressure Vessel, Fuzhou 350028, Fujian, China)

Abstract: Titanium alloy is a high-performance material widely used in aerospace, nuclear engineering, petrochemical equipment, and other fields. In order to overcome the shortcomings of the traditional uniaxial tensile test to test the anisotropic mechanical properties of titanium alloys that require large-size specimens, this paper proposes to use the single-stress small punch bar test method to study the anisotropic tensile properties of rolled Ti-6Al-4V titanium alloys based on the test method of micro-specimens. In order to verify the accuracy of the single-stress small punch bar test method, standard uniaxial tensile tests as well as standard small punch bar tests were also carried out, and the results of the standard uniaxial tensile tests showed that the rolled Ti-6Al-4V titanium alloys tested in the experiments had significant anisotropy. Comparison of the tensile test with the standard small punch bar test reveals that the standard small punch bar test cannot accurately test the anisotropic mechanical properties of titanium alloys due to the effect of bi-directional stresses. In addition, the single-stress small punch bar test method can test the anisotropy of the rolled Ti-6Al-4V titanium alloy used in the test with high accuracy. The average deviation of the two tests for the yield strength in direction Ⅰ (perpendicular rolling direction) is 2.14%, that of the two tests for the direction Ⅱ (rolling direction) is 3.57%, and that of the two tests for the direction Ⅲ (thickness direction) is 2.14%; the average deviation of the two tests of tensile strength in direction Ⅰ is 3.60%, the average deviation of the two tests in direction Ⅱ is 3.53%, and the average deviation of the two tests in direction Ⅲ is 5.34%. The small deviations of the test results in each direction measured by the two test methods indicate that the use of the single-stress small punch bar test method to test the tensile properties of Ti-6Al-4V titanium alloy in different directions has high accuracy.

Keywords: Ti-6Al-4V; titanium alloy; anisotropic; tensile properties; single-stress small punch test