

钛合金 TC-4 在高应变率下的动态本构关系

赵西寰 李庆明
(太原工业大学)

摘要 利用分离式 Hopkinson 扭杆对钛合金 TC-4 进行了高应变率下动态剪切本构关系的实验研究。结果表明 TC-4 对应变率高度敏感, 对应变率的敏感性随应变率的提高而增加。其动态应力应变关系呈线性强化形式。但动态强化模量随应变率的提高而略有减少。采用 Malvern^[5] 给出的过应力模式 $\dot{\gamma}_p = \{ \exp [(1/a) (\tau - f(\gamma))] - 1 \} / b$ 可以较好地描述 TC-4 的动态剪切本构关系。

关键词 钛合金 SHTB 动态本构关系

1. 引言

材料在高应变率下的动态本构关系对于研究爆炸、高速撞击、穿透问题、动态断裂、弹塑性波的传播及绝热剪切等方面有着重要的影响。

钛及其合金具有优良的性能, 目前已在航空、航天、造船、石油化工等部门广泛应用。因此, 对于钛及其合金动态本构关系的研究在工程上有很大意义。

从六十年代以来, 利用 SHPB 技术与 SHTB 技术分别对 α 型(六方晶格)工业纯钛^[2-5], $\alpha + \beta$ 型(体心立方晶格十六方晶格)钛合金^[4,6,7] 及 β 型(体心立方晶格)钛合金^[8] 都进行了实验研究。其中文献 [6,7] 给出了 TC-4 在 SHPB 装置上所作不同应变率范围的试验结果, 但尚未见到国外对 TC-4 在高应变率下的动态剪切本构关系进行研究, 在我国则是新开展这方面的工作。

本文采用自己研究的 SHTB 装置^[9] 对国产 $\alpha + \beta$ 型钛合金 TC-4 的动态剪切本构关系在应变率范围 68 ~ 502 (1/秒) 内进行了实验研究。

2. 实验描述

实验装置在文献 [9] 中作了详细介绍。图 1 为该装置及测试系统示意图。

在应力与应变沿试件均匀分布假设下, 以下各式可作为 SHTB 实验中确定试件动态应力 $\tau_s(t)$ 、应变 $\gamma_s(t)$ 及应变率 $\dot{\gamma}_s(t)$ 的公式^[10]:

$$\dot{\gamma}_s = 2 \frac{R_s c_b}{R_b L} \phi_R \quad (1)$$

$$\gamma_s = 2 \frac{R_s c_b}{R_b L} \int_0^t \phi_R dt \quad (2)$$

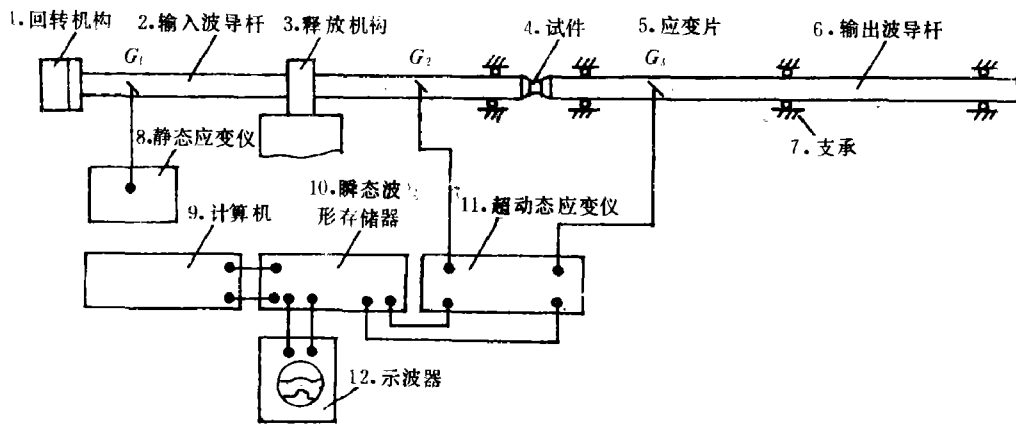


图1 实验装置及测试系统

Fig. 1 Schematic of the experimental arrangement
 1. Rotating mechanism; 2. Input bar; 3. Relaxing mechanism; 4. Specimen; 5. Strain gauge; 6. Output bar; 7. Supporter; 8. Static strain recorder; 9. Computer; 10. Transient strain recorder; 11. Super-dynamic amplifier; 12. Oscillograph

$$\tau_s = G_b \frac{R_s J_b}{R_b J_s} \dot{\phi}_t \quad (3)$$

式中 τ_s 、 ν_s 、 $\dot{\nu}_s$ 分别代表剪应力、剪应变与剪应变率； R 是半径， J 是极惯性矩， c 是扭转波波速， G 是剪切弹性模量， L 是试件长度，反射与透射应变波分别由 ϕ_r 和 ϕ_t 表示，下标 b 和 s 分别代表波导杆与试样， R_s 是薄壁管型试件(见图2)的平均半径。

试件采用国产 $\alpha+\beta$ 型钛合金 TC-4，尺寸如图 2 所示，所含成份见表 1

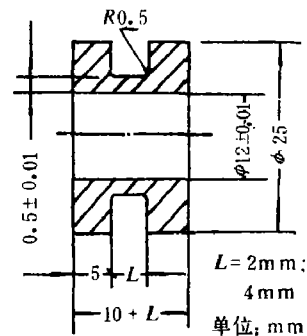


图2 试件形状与尺寸
 Fig. Specimen

表1 钛合金 TC-4 名义成份表

Table 1 Nominal Composition of TC-4 titanium

成份	合金元素含量%		杂质含量%						钛基
	铝	钒	铁	硅	碳	氢	氮	氧	钛
Ti-6Al-4V	5.5~6.8	3.5~4.5	0.3	0.15	0.10	0.015	0.15	0.15	其余

3. 试验结果

根据波导杆上应变片给出的信号可以得到 ϕ_r 与 ϕ_b ，代入公式 (1)~(3) 就可以得到试件中的应力、应变与应变率。典型的应变波形见图 3。

实验所得不同应变率下 TC-4 的动态应力应变曲线见图 4。

图 4 显示出钛合金 TC-4 对应变率十分敏感，当应变率提高时，其动态屈服应力与流动应力都有明显的提高。图 5 给出了应变为 5% 时流动应力随对数应变率 $\lg \dot{\gamma}$ 的变化曲线。显然， τ 随 $\lg \dot{\gamma}$ 的提高而增大，并且呈现线性关系。为了研究材料对应变率的敏感性，通常引入对数应变率敏感系数 $\lambda = \partial \tau / \partial \lg \dot{\gamma}$ 来进行讨论。实验表明， λ 随应变 γ 的增大而下降。图 6 给出了应变率 $\dot{\gamma} = 178$ 时 λ 随 γ 的变化情况。这说明，随着应变率的增加，材料的应变强化性能减小。这是 TC-4 对应变率敏感的特性之一。

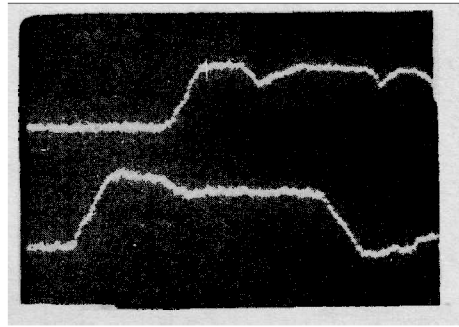


图 3 波导杆上之应变波形

Fig. 3 Strain wave on waveguiding bars

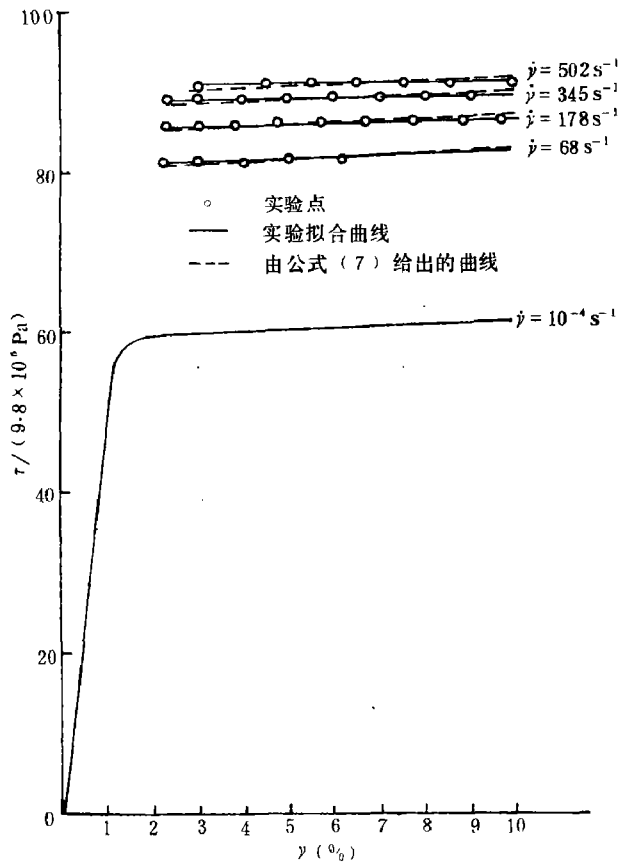


图 4 应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve

○ Experimental data; — Experimental curve; ---- Curve determined by formular (7)

TC-4 不仅对应变率高度敏感，而且对应变率的敏感性随应变率的提高而增加。图 7 给出的曲线说明， λ 随 $\dot{\gamma}$ 单调增加。但是随着 $\dot{\gamma}$ 增大时 λ 增加的幅度减小。当 $\dot{\gamma}$ 较大时， λ 几乎不再增加，这种应变率软化的现象是导致绝热剪切的一个重要因素。对此，文献 [11] 曾提出双变量准则进行研究。

由图 4 还可看出，确定应变率下 TC-4 动态应力应变曲线呈线性强化特性。在强化阶段，一般可表示为

$$\tau = \tilde{\tau} + \tilde{G} \gamma \quad (4)$$

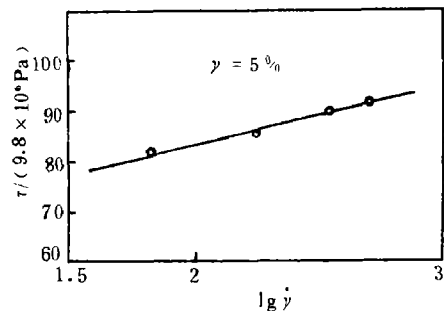


图 5 应力 τ 随 $\lg \dot{\gamma}$ 的变化 ($\gamma = 5\%$)

Fig. 5 Variaton of stress τ with $\lg \dot{\gamma}$ (when $\gamma = 5\%$)

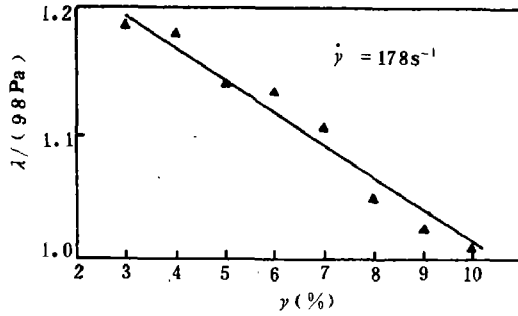


图6 λ随应变γ的变化

Fig.6 Variation of λ with strain γ

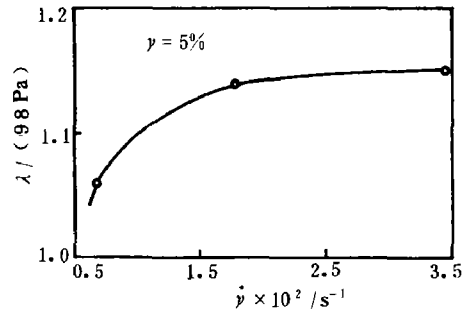


图7 λ~γ̇关系曲线

Fig.7 Variation of λ with γ̇

式中, \tilde{G} 为动态剪切强化模量。 $\tilde{\tau}$ 与 \tilde{G} 均与应变率有关。表 2 给出了不同应变率下相应的 $\tilde{\tau}$ 与 \tilde{G} 值。其中, 动态强化剪切模量大约为静态弹性剪切模量的 1% 左右, 而且随应变率提高呈下降趋势。

表 2 不同应变率下的 $\tilde{\tau}$ 与 \tilde{G} 值
Table 2 Values of $\tilde{\tau}$ and \tilde{G} for various strain rates

$\dot{\gamma}/(s^{-1})$	10^{-4}	68	178	345	502
$\tilde{\tau}/(9.8 \text{ MPa})$	58.58	80.86	85.83	89.26	91.26
\tilde{G}	1.019% G	0.923% G	0.821% G	0.667% G	0.541% G

其中, $G = 42.45 \text{ GPa}$ 为材料静态弹性剪切模量。

采用 Malvern 提出的过应力模型^[1]

$$\dot{\gamma}_p = \frac{1}{b} \left\{ \exp\left[\frac{1}{a} (\tau - f(\gamma))\right] - 1 \right\} \quad (5)$$

在一定程度上可以较好地描述 TC-4 的本构关系。其中, a 、 b 为材料常数, $f(\gamma)$ 为静态应力应变关系。根据静态实验结果

$$f(\gamma) = \begin{cases} 4332 \gamma, & f(\gamma) \leq 59.18 \\ 58.58 + 44.14 \gamma, & f(\gamma) > 59.18 \end{cases} \quad (6)$$

$f(\gamma)$ 的单位为 9.8 MPa。

将 (6) 式代入 (5) 式并按照最小二乘法对所有实验点进行拟合可确定

$$a = 4.65 (9.8 \text{ MPa}), \quad b = 2.0 (s)$$

故 (5) 式可写为

$$\tau = 58.58 + 4.65 \ln(1 + 2\dot{\gamma}) + 44.14 \gamma \quad (7)$$

采用 Malvern 模型得到的结果与实验值的比较可见图 4, 两者吻合较好。

将 (7) 式与 (4) 式比较可知

$$\tilde{\tau} = 58.58 + 4.65 \ln(1 + 2\dot{\gamma}), \quad \tilde{G} = 44.14 (9.8 \text{ MPa})$$

显然, Malvern 模型只能反映动态屈服应力随应变率的变化, 不能反映动态强化模量随应

变率提高而减小这一实验事实。对于这种现象, 文献 [8] 曾用热-力学耦合观点作了定性解释。在他们进一步的工作中^[11,12], 成功地用基于双曲型势垒热激活机制的热-粘塑性本构方程描述了 TC-4 的动态力学性能, 并建立了宏观本构关系与微观机制间的联系。本文采用 Malvern 本构模型得到的应力应变关系, 在应变率变化范围不大时, 可以忽略动态剪切强化模量的减小。从这一意义上讲, 这个本构关系还是适用的

参 考 文 献

- [1] Malvern, L. E., *J. Appl. Mech.*, **18** (1951), 203.
- [2] Nicholas, T., *Exp. Mech.*, **11** (1971), 370.
- [3] Lawson, J. E and Nicholas, T., *J. Mech. Phys. Solids*, **20** (1972), 65.
- [4] Tanaka, K. and Ogawa, K., Proc. 2nd Inter. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, Boston (1976), 1598.
- [5] Kawata, K., Ogawa, K., eds., *High Velocity Deformation of Solids*, Springer-Verlag, Berlin (1978), 98.
- [6] Maiden, C. J. and Green, S. J., *J. Appl. Mech.*, **33** (1966), 496.
- [7] Lindholm, U. S., Bessey, R. L., Tech Rep. AFML-TR-69-119, Air Force Materials Lab. (1969).
- [8] 王礼立, 胡时胜, 爆炸与冲击, **5** (1) (1985), 9.
- [9] 赵西寰, 力学学报, **18** (3) (1986), 323.
- [10] Nicholas, T., Lawson, J. E. et al, Tech. Rep. AFML-TR-71-145.
- [11] 徐天平, 王礼立, 卢维纲, 爆炸与冲击, **7** (1) (1987), 1.
- [12] Wang Lili et al., IUTAM Int. Symp. on Macro-and Micro-Mechanics of High-Velocity Deformation and Fracture, Tokyo (1985), Springer-Verlag, Berlin (1987), 356.

DYNAMIC PROPERTIES OF TC-4 TITANIUM UNDER HIGH STRAIN-RATE

Zhao Xihuan Li Qingming

(Taiyuan University of Technology)

ABSTRACT The dynamic stress-strain relation of TC-4 titanium has been investigated experimentally under high strain-rate by SHTB. It is showed that TC-4 is very sensitive to the strain-rate, and the sensitivity to the strain-rate increases with the rise of strain-rate. Although the dynamic hardening module decreases with the increase of strain-rate, the dynamic constitutive relation of TC-4 for a definite value of strain-rate can be illustrated in the linear hardening form. The experimental results are in good agreement with the Malvern's over stress model $\dot{\gamma} = \{ \exp[(1/a)(\tau - f(\gamma))] - 1 \} / b$. But this model can not be used to present the phenomenon which the dynamic hardening module decreases with the increase of strain-rate. This character is one of the important factors for the formation of adiabatic shear band.

KEY WORDS Ti-alloy, SHTB, dynamic constitutive relation.