

文章编号: 1001-1455(2000)01-0074-05

温度和剪应变率历史对扭转载荷作用下 铁基合金本构关系影响的研究^①

佟景伟, 高丛峰, 李林安, 徐步青

(天津大学力学系, 天津 300072)

摘要: 用间歇式加载的方法, 研究了温度和剪应变率历史在 $20 \sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.00167 \sim 800\text{s}^{-1}$ 的范围内对扭转载荷作用下铁基合金本构关系的影响。试验结果表明: 应变率历史对该材料具有强化作用, 而且其强度随剪预应变率的升高而提高; 其对剪应变率历史的敏感性则随着温度的升高而降低。

关键词: 剪应变率历史; 铁基合金; 温度; 本构关系

中图分类号: O344.3 文献标识码: A

1 引 言

应变率历史对扭转载荷作用下材料本构关系的影响是当代力学的一个重要研究课题。人们通过常温下剪应变率发生突然跳跃的扭转试验研究了剪应变率历史对铝等材料的剪应力-剪应变关系的影响^[1~2]。在实际加工和使用过程中经常会遇到间歇式扭转加载的情况。而且在不同温度下, 剪应变率历史对扭转载荷作用下材料本构关系的影响是有差别的。用间歇式加载的方法研究不同温度下剪应变率历史对扭转载荷作用下材料本构关系影响不仅具有理论意义, 而且还有重要的实用价值。

我们用间歇式加载的方法研究了温度和剪应变率历史(在 $20 \sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.00167 \sim 800\text{s}^{-1}$ 的范围内)对扭转载荷作用下铁基合金的剪应变率和准静态本构关系的影响。

2 试验装置及原理

高温高应变率扭转试验采用了自行研制的用于高温 SHB 试验的新型快速加热装置和应变储能加载的分离式 Hopkinson 扭转系统(简称 SHTB)^[3], SHTB 试验装置如图 1 所示。加载杆与输入杆做成一体, 直径为 10mm, 输出杆为一空心圆杆, 其外径为 13mm, 内径为 8.3mm。加载杆的夹钳机构(见图 1 所示)带有半圆切槽的压块通过压杆和切口脆断试件把油缸活塞的压力传递给加载杆, 使加载杆被牢固地夹住。预加扭矩由加载杆头的棘轮装置施加。所加的扭矩以变形能的形式存储在加载杆中, 而输入杆并不受扭。当夹钳处的压力油缸的压力加大到使切口脆断试件发生突然断裂时, 夹钳松开, 储存在加载杆中的扭矩迅速释放, 向试件施加扭转

① 收稿日期: 1999-03-24; 修订日期: 1999-06-03
基金项目: 国家自然科学基金项目(19372011)。
作者简介: 佟景伟(1933—), 男, 教授, 博士生导师。

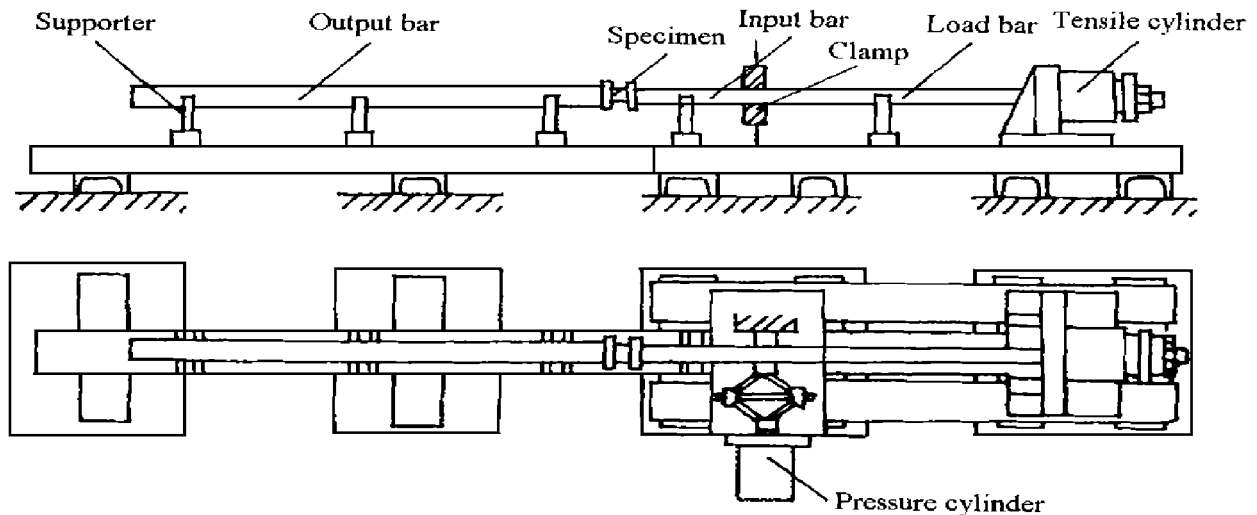


图 1 SHTB 试验装置示意图

Fig.1 Schematic of SHTB apparatus

应力波。试件与测试杆采用螺纹连接。

测输入杆和输出杆上应变波形的应变片贴在距试件两端面 30mm 处。在每个测位上沿与杆轴成 $\pm 45^\circ$ 的方向贴有应变片。为了测量加载的大小,在加载杆上也按上述方式贴应变片。将这三对应变片接入自行研制的六通道多节差动式前置放大器、瞬态数据采集卡和微机组成的测试记录与处理系统。在试验中采用了短路信号外触发方式。

设输入杆和输出杆上的应变片记录的入射波、反射波和透射波分别为 ϵ_I 、 ϵ_R 和 ϵ_T 。输入杆和输出杆的材料相同,弹性剪切波波速为 c_T ,剪切弹性模量为 G ,输入杆和输出杆的外径分别为 D_1 和 D_2 ,抗扭截面系数分别为 W_1 和 W_2 ,极惯性矩分别为 I_1 和 I_2 。薄壁圆筒试件受扭段的内径、长度和厚度分别为 r_s 、 l_s 和 h_s ,极惯性矩为 I_s ,输入杆和输出杆的应变片距试件端面的距离均为 l 。当试件扭段的剪应力和剪应变达到均匀状态时,试件任意截面处的剪应变、剪应变率和剪应力分别为

$$\gamma_s = \frac{r_s}{l_s} \int_0^t \left[2W_2 c_T \left[\frac{1}{I_1} - \frac{1}{I_2} \right] \epsilon_T \left[t + \frac{l}{c_T} \right] - \frac{4W_1 c_T}{I_1} \epsilon_R \left[t + \frac{l}{c_T} \right] \right] dt$$

$$\dot{\gamma}_s = \frac{2r_s c_T}{l_s} \left[W_2 \left[\frac{1}{I_1} - \frac{1}{I_2} \right] \epsilon_T \left[t + \frac{l}{c_T} \right] - \frac{2W_1}{I_1} \epsilon_R \left[t + \frac{l}{c_T} \right] \right]$$

$$\tau_s = \frac{2Gr_s W_2}{I_s} \epsilon_T \left[t + \frac{l}{c_T} \right]$$

高温高应变率实验采用自行研制的以二硅化钼 (MoSi_2) 作高效发热元件的新型快速加热电炉,棒状发热元件沿炉体轴心对称排列,发热元件首尾串接形成一个串联回路。炉体选用具有良好隔热性能的三氧化二铝 (Al_2O_3) 陶瓷纤维材料,从而提高了加热速度,同时也减小了炉体尺寸。该电炉的额定功率 1kW,工作电压为 8V。将炉子的两端接在专用变压器的输出端,炉子的工作电压通过 220V 和变压器之间的自耦调压器的输出来控制。试件和炉内的温度由热电偶测温系统进行监测。热电偶信号可以和装有 A/D 瞬态数据采集卡的微机联机工作,记录动态试验时极短的时间间隔内温度的变化。

在开始升温 and 开始降温时,采取了分段升压和降压的方法,以避免产生过大的冲击电流而

使电器设备过载。经试验,该电炉能在 1min 左右将试件加热至 500 °C,最高可加热至 1000 °C,调控温度非常方便。由于加热速度较快,又采取了冷却措施,所以输入杆和输出杆上只有很短的一段有很小的温度梯度,输入杆和输出杆上的应变片不在此区域内。

3 试验结果

将铁基形状记忆合金材料制成薄壁圆筒试件,在不同的温度下进行不同剪应变历史的准静态试验和高应变率试验。每种条件的试验重复做三次,取其平均值作为试验结果。研究分两大类。

3.1 不同温度下剪应变率历史对高应变率扭转加载下铁基形状记忆合金本构关系的影响

(1) 在 20 °C 下使三组试件分别在剪切准静态及剪应变率 419s^{-1} 和 182s^{-1} 下发生塑性变形(预应变过程中的剪应变率称为预变率),然后卸载。20min 后,再做剪应变率为 $795 \sim 810\text{s}^{-1}$ 的

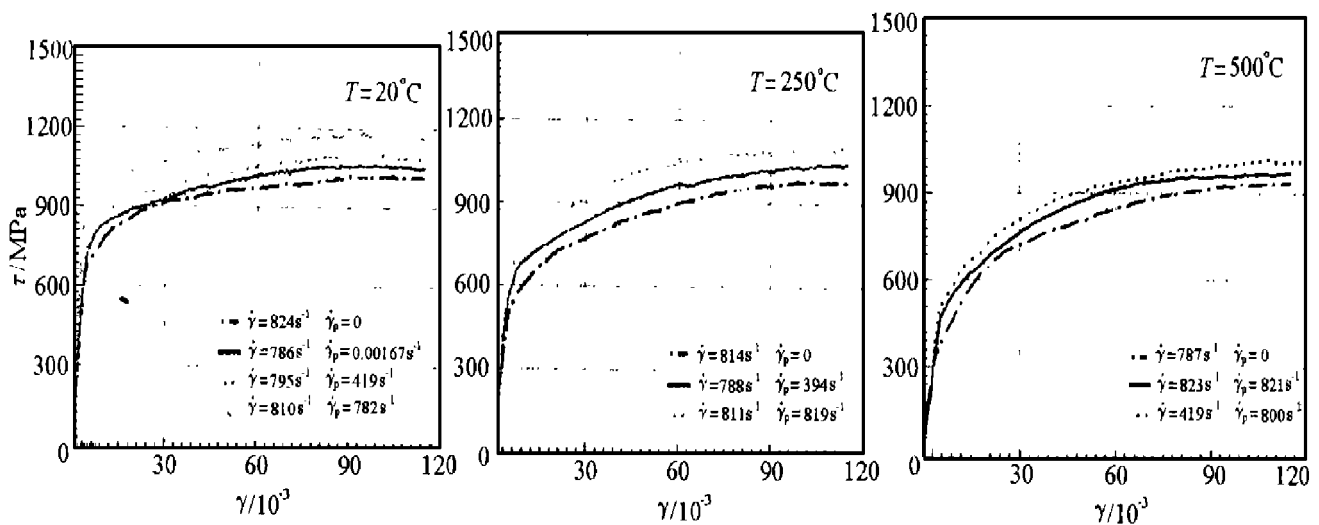


图2 剪应变历史对材料本构关系的影响

Fig.2 Effects of different shear strain-rate histories on constitutive relation

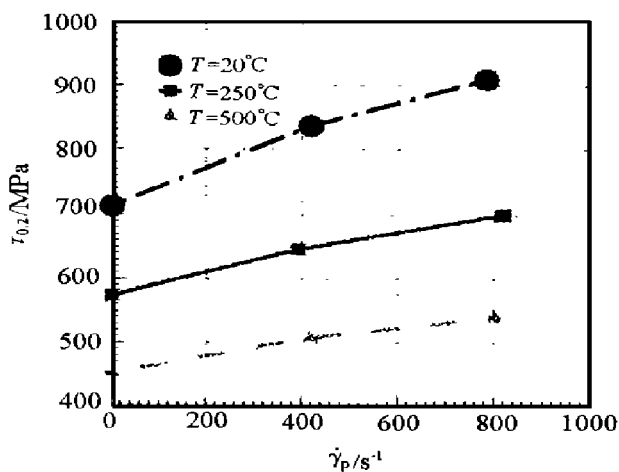


图3 剪应变历史对材料名义屈服极限的影响

Fig.3 Effects of different shear strain-rate histories on 0.2% yield shear stress

扭转试验。还用一组试件直接做应变率为 824s^{-1} 的无预应变率扭转试验。

(2) 在 250 °C 下做预应变率为 394s^{-1} 和 819s^{-1} 及无预应变的高应变率扭转试验,剪应变率为 $788 \sim 814\text{s}^{-1}$ 。

(3) 在 500 °C 下做预应变率为 419s^{-1} 和 800s^{-1} 及无预应变的高应变率扭转试验,剪应变率为 $787 \sim 823\text{s}^{-1}$ 。

上述三种情形的结果见图 2。根据图 2 可以得出对应不同温度、高剪应变率下的名义剪切屈服极限 $\tau_{0.2}$ 随预剪应变率 $\dot{\gamma}_p$ 变化的曲线,见图 3。

3.2 室温下应变率历史对准静态扭转加载下铁基形状记忆合金本构关系的影响

在 20 °C 下使两组试件分别在准静态和剪应变率 798s^{-1} 下发生塑性变形, 然后卸载, 20min 后, 再使这些试件在 20 °C 下做准静态试验, 直至扭断。还用一组试件在 20 °C 下做准静态试验, 直至扭断。结果见图 4。

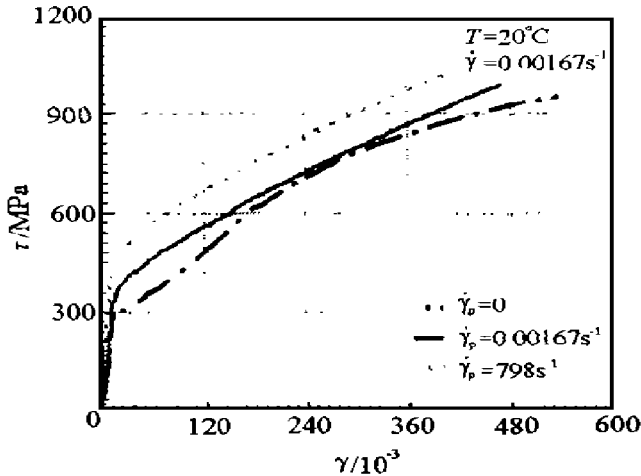


图4 不同剪应变历史对材料准静态本构关系的影响

Fig.4 Effects of different shear strain-rate histories on quasi-static constitutive relation

时给定剪应变所对应的剪应力总是比无预应变时高, 而且给定剪应变所对应的剪应力随预应变的升高而提高。有预应变时的名义剪切屈服极限和剪切强度极限总是比无预应变时高, 而且随预应变率的升高而提高。有预应变时的断裂剪应变总是比无预应变时低。

5 结论

(1) 应变率历史对铁基合金材料高应变率和准静态扭转加载下的本构关系有明显影响, 其剪切强度提高。另外, 应变率历史对其材料准静态扭转加载下本构关系的影响明显小于对其高应变率扭转加载下本构关系的影响。

(2) 铁基合金材料对应变率历史敏感性随温度的升高而降低。铁基合金材料对剪应变率的敏感性随温度的升高而降低。

参考文献:

- [1] Frantz R A, Duffy J. The Dynamic Stress-strain Behavior in Torsion of 1100-0 Aluminum Subjected to Sharp Increase in Strain Rate[J]. ASEM J Appl Mech, 1972, 39: 939 ~ 945.
- [2] Nicholas T, Campbell J D. Shear-strain-rate Effect in a High-strength Aluminum Alloy [J]. Experimental Mechanics, 1972, 12: 441 ~ 447.
- [3] 乌时毅, 佟景伟, 李鸿琦. 高应变率扭转 SHB 实验技术[J]. 天津大学学报, 1994, 27(3): 277 ~ 283.

4 讨论

(1) 由图 2 可以看出, 无论哪一种温度情况, 有预应变的给定剪应变所对应的剪应力高于无预应变的。而且给定剪应变所对应的剪应力随预应变率的升高而提高。由图 4 可以看出, 在同一温度下, 有预应变时的名义剪切屈服极限总是比无预应变时高, 而且随预应变率的升高而提高。

(2) 由图 2 还可以看出, 温度越高, 所对应的剪应变率不同而剪应变基本相同的曲线之间的间距越小, 给定剪应变所对应的流动剪应力随预应变率的变化就越小。

(3) 由图 4 可以看出, 在 20 °C 下, 有预应变

Research for Temperature and Shear Strain-rate History Effects on Constitutive Relation of Fe-base Alloy under Torsion

TONG Jing-wei, GAO Cong-feng, LI Lin-an, XU Bu-qing

(*Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: Temperature and shear strain-rate history effects on the constitutive relations of Fe-base alloy under torsion have been studied by means of interrupted load at temperatures from 20 °C to 500 °C and shear strain-rates from 0.00167s^{-1} to 800s^{-1} . The experimental results show that shear strain-rate history strengthens this material and its strength increases with the rising prestrain rate. Its sensitivity to the shear strain-rate history decreases with the increasing temperature.

Key words: shear strain-rate history; Fe-base alloy; temperature; constitutive relation