文章编号: 1004-0609(2013)07-1866-07

# Ti-Ni-V 形状记忆合金的循环形变特性

贺志荣1,王 芳2

(1. 陕西理工学院 材料科学与工程学院,汉中 723003;
 2. 陕西理工学院 图书馆,汉中 723003)

**摘 要:**用示差扫描热分析仪、光学显微镜、X 射线衍射仪和拉伸实验研究退火态 Ti-50.8Ni-0.5V(摩尔分数,%) 形状记忆合金的相变行为、显微组织和循环形变特性。结果表明:400、500 和 600 ℃退火态合金的相变类型分别 为 *A→R/R→A、A→R→M/M→R→A* 和 *A→M/M→A*(*A*—母相 *B*2, *R*—*R* 相,*M*—马氏体),合金的室温组成相为 *B*2 和 *R* 相。400、500 和 600 ℃退火态合金的显微组织形态分别呈纤维状、纤维状和等轴状。Ti-50.8Ni-0.5V 合金在 室温下呈超弹性特性,600 ℃退火态合金的应力诱发 *M* 临界应力(σ<sub>M</sub>)高于 400 和 500 ℃退火态合金的。400 ℃退 火态合金的应力—应变的循环特性稳定,超弹性特性优异,经一次循环后合金即可呈现完全非线性超弹性;500 和 600 ℃退火态合金的应力—应变的循环稳定性较差。随循环次数增加,合金的 σ<sub>M</sub>降低,循环耗能减小。随循 环应变量增大,合金的循环耗能增加,而循环稳定性有所降低。

关键词: Ti-Ni-V 合金; 形状记忆合金; 循环形变; 超弹性 中图法分类号: TG113.25 文献标志码: A

# Cyclic deformation characteristics of Ti-Ni-V shape memory alloy

HE Zhi-rong<sup>1</sup>, WANG Fang<sup>2</sup>

School of Materials Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723003, China;
 Library, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723003, China)

**Abstract:** The transformation behavior, microstructure and cyclic deformation characteristics of annealing Ti-50.8Ni-0.5V (mole fraction, %) alloy were investigated by differential scanning calorimetry, optical microscopy, XRD and tensile test. The results show that the transformation types of the 400, 500 and 600 °C annealed alloys are  $A \rightarrow R/R \rightarrow A$ ,  $A \rightarrow R \rightarrow M/M \rightarrow R \rightarrow A$  and  $A \rightarrow M/M \rightarrow A$  (A—parent phase, R—rhombohedral phase, M—martensite phase) upon cooling/heating, respectively. The constituent phases of the alloy at room temperature are B2 and R phases. The microstructure morphology of the 400, 500 and 600 °C annealed alloys are fibrous, fibrous and equiaxed, respectively. Ti-50.8Ni-0.5V alloy shows superelasticity at room temperature. The critical stress for inducing martensitic transformation ( $\sigma_M$ ) of the 600 °C annealed alloy is higher than those of the 400 and 500 °C annealed alloys. The stress—strain cycling characteristics of the 400 °C annealed alloy is stable, the superelasticity is excellent, and the alloy shows completely nonlinear superelasticity after one stress—strain cyclic energy dissipation of the alloy decrease. With increasing cyclic energy dissipation increases, while the cyclic energy dissipation of the alloy decrease. With increasing cyclic energy dissipation increases, while the cyclic stability decreases in the alloy. **Key words:** Ti-Ni-V alloy; shape memory alloy; cyclic deformation; superelasticity

收稿日期: 2012-10-08; 修订日期: 2013-01-10

基金项目: 陕西省科技计划资助项目(2011KTDZ01-03-06); 陕西省教育厅科研计划资助项目(12JK0436)

通信作者: 贺志荣, 教授, 博士; 电话: 0916-2291079; E-mail: hezhirong01@163.com

Ti-Ni 形状记忆合金(SMA)作为一种集传感与驱 动于一体的功能材料,具有良好的形状记忆效应(SME) 和超弹性(SE)特性<sup>[1-3]</sup>,广泛应用于机械、电子,航空 航天、能源、交通及医疗等领域<sup>[4-6]</sup>。Ti-Ni SMA 的 SME 和 SE 特性受合金成分、热处理工艺以及试验温 度等因素的影响<sup>[7-8]</sup>。Ti-Ni 合金在室温下是呈现 SME 还是 SE 主要取决于合金的相变温度,当使用温度低 于合金的马氏体相变开始温度M,时,合金表现为SME 特性; 当使用温度高于合金的马氏体逆相变结束温度  $A_{\rm f}$ 时,合金表现为SE特性;当使用温度处于 $M_{\rm s}$ 和 $A_{\rm f}$ 之间时,合金表现为部分 SME 和部分 SE 特性。通过 热处理可以改变合金的室温相组成、组织形貌及亚结 构等,进而改变合金的相变温度和力学特性;在Ti-Ni 合金中加入 Co、Cr、V、Nb 等第 3 组元,也可显著 改变合金的相变温度、力学性能和恢复特性[8-12]。因 此,可以通过适当的热处理和添加合金元素来改善合 金的 SME 和 SE 特性,从而扩展 SMA 的应用场合, 满足不同的实际应用需要。研究表明<sup>[8]</sup>,在 Ti-Ni 二元 SMA 中加入 V 可降低相变温度, 据此制作了 Ti-50.8Ni-0.5V(摩尔分数,%)低温超弹性型 SMA。低 温超弹性型 SMA 在极地考察、空间探测及北方地区 等低温环境中具有广泛用途。在文献[13-14]中,本文 作者对该合金的相变行为和形状记忆特性进行了系统 研究,给出了热处理工艺、实验温度、应变量等对该 合金相变、形状记忆和超弹行为的影响规律。为了考 察 SMA 超弹性的稳定性, 需研究其应力一应变循环 形变特性,目前对 Ti-50.8Ni-0.5V 合金的循环形变行 为尚缺乏研究。本文作者旨在系统研究退火态 Ti-50.8Ni-0.5V 合金的循环形变特性,为开发性能稳定 的 Ti-Ni-V 低温超弹性 SMA 提供理论依据。

# 1 实验

实验材料是直径为0.8 mm的Ti-50.8Ni-0.5V(摩尔 分数,%)合金丝材,其加工过程是,以纯度分别为 99.7%,99.9%和99.9%的海绵Ti,电解Ni和V粉为 原料,采用真空中频感应炉+石墨坩埚熔炼,合金铸 块经压锻、旋锻、拉拔等多道工序制成丝材,拉拔时 每道次变形量为20%,合金的供货状态为冷拉拔态, 变形量为20%。退火处理工艺为:350~800 ℃保温 30min,空冷。用ShimadzuDSC-50型示差扫描量热 仪(DSC)分析不同热处理态合金的相变特性,冷却/加 热温度范围为-150~100 ℃,冷却/加热速率为10 ℃/min。用XJL-300型金相显微镜分析不同热处理态 Ti-50.8Ni-0.5V 合金的显微组织, 腐蚀剂为  $V(HF):V(HNO_3):V(H_2O)=1:4:5$ 的溶液。用DX-2500型 X 射线衍射仪(XRD)分析不同热处理态合金的室温相 组成,扫描速率为0.1 (°)/s,靶材为CuK<sub>a</sub>。用带有高 低温测试系统的CMT5105型微机控制电子万能试验 机测定合金在室温下的应力—应变循环特性,标距为 50 mm,加载/卸载速率为2 mm/min。

## 2 结果与分析

### 2.1 合金的相变行为

样品经 350~800 ℃保温 30min 退火后, 退火温度 (tan)对拉拔态 Ti-50.8Ni-0.5V 合金的相变行为(见图 1(a))和相变温度(见图 1(b))有显著影响。在图 1(a)中, 冷却曲线上的R和M分别代表R相(菱方结构)和马氏 体 M(单斜结构)的相变峰,加热曲线上的 R<sub>r</sub>和 M<sub>r</sub>分别 代表 R 和 M 相变的逆相变峰。由图 1(a)可以看出,冷 却/加热过程中,350~400 ℃退火态合金的相变类型为  $A \rightarrow R/R \rightarrow A(A - \oplus H B2, CsCl 型结构)型一阶段可逆$ 相变, M相变峰在测试温度范围内未检测出; 450~500 ℃退火态合金的相变类型为  $A \rightarrow R \rightarrow M/M \rightarrow R \rightarrow A$  型两 阶段可逆相变: 550 ℃以上温度退火态合金加热时仅 发生  $M \rightarrow A$  一阶段相变<sup>[15]</sup>, R 相变不再出现。随  $t_{an}$ 升 高, R 相变峰先移向高温后移向低温, M 相变峰先移 向高温后移向低温最后趋于稳定。当tan超过600℃后, 合金的 R 和 M 相变峰部分重合, 形成一个较大的相变 峰, M 及其逆相变峰的特征趋于稳定, 不再发生明显 变化。

 $t_{an}$ 对 Ti-50.8Ni-0.5V 合金 R 和 M 相变温度的影响 如图 1(b)所示。由图 1(b)可以看出,随  $t_{an}$ 升高,合金 的 R 相变温度( $t_R$ )先升高后降低,400 ℃退火态合金的  $t_R$ 达到最高值 28.1 ℃。合金的 M 相变温度( $t_M$ )先升高 后趋于定值(约-67 ℃),600 ℃退火态合金的  $t_M$ 达到最 大值-55.8 ℃。

由上述结果可知,400、500 和 600 ℃退火态合金 具有典型的代表性,下面将以这 3 种状态合金为对象, 研究合金的显微组织和循环形变行为。

#### 2.2 合金的显微组织和相组成

图 2 所示为 400、500 和 600 ℃ 退火态 Ti-50.8Ni-0.5V 合金室温下的显微组织和 XRD 谱。由 图 2 可知,400 和 500 ℃退火态合金的组织形态呈纤 维状,随 t<sub>an</sub>升高,纤维密度降低,纤维连续性变差, 逐渐由纤维状晶粒向等轴晶粒过度,当 t<sub>an</sub>升至 600 ℃



图 1 退火温度 tan 对 Ti-50.8Ni-0.5V 合金相变行为和相变温度的影响

Fig. 1 Effects of annealing temperature  $t_{an}$  on transformation behaviors (a) and transformation temperatures (b) of Ti-50.8Ni-0.5V alloy



图 2 tan 对 Ti-50.8Ni-0.5V 合金显微组织和相组成的影响

**Fig. 2** Effects of  $t_{an}$  on microstructure and phase composition of Ti-50.8Ni-0.5V alloy: (a) 400 °C; (b) 500 °C; (c) 600 °C; (d) XRD patterns

时,合金的显微组织由细小等轴晶粒组成。由图 2(d) 可知,该合金在室温下的相组成主要为母相 B2 和 R 相,此外还有少量 TiO<sub>2</sub>。

# **2.3** 退火温度和应力一应变循环对合金循环形变特 性的影响

在室温(20 ℃)下, 按照 6%的应变量对 400、500

和 600 ℃退火态 Ti-50.8Ni-0.5V 合金进行了应力—应 变循环测试,所得结果如图 3 所示。图 3(a)所示为连 续加载/卸载的应力—应变循环结果,循环次数为 20 次;图 3(b)~(d)所示为非连续加载/卸载应力—应变循 环结果,循环次数为 40 次。二者所得结果类似,均表 明 Ti-50.8Ni-0.5V 合金在室温下呈 SE 特性, *t*an 和应 力—应变循环对合金的 SE 有显著影响。



**图 3**  $t_{an}$  和循环次数 N 对 Ti-50.8Ni-0.5V 合金应力—应变循环特性的影响 **Fig. 3** Effects of  $t_{an}$  and cycle number N on cyclic deformation characteristics of Ti-50.8Ni-0.5V alloy: (a) Continues cycle, N=20; (b), (c) and (d) Non-continues cycle, N=40 (test at 20 °C)

1) 400 ℃退火态合金的循环稳定性较好,只需经 过一次循环即可呈现完全非线性 SE,随循环次数 *N* 增加,应力一应变回滞曲线形态比较稳定,应力诱发 *M*临界应力和合金的循环耗能(即应力一应变回滞曲 线所包围的面积)略有降低但变化不大,合金的累积残 余应变较小(约 0.82%), SE 稳定性良好。

2) 500 ℃退火态合金的循环稳定性较差,随 N 增加,合金的应力一应变回滞曲线形态变化较大,由部分非线性 SE 转变为近似平行四边形的完全 SE;合金的应力诱发 M 临界应力和循环耗能均先减小后趋于稳定,其累积残余应变较大(达 3.1%);合金的应力诱发 M 相变平台长度有所减小,斜率有所增加。

3) 600 ℃退火态合金的应力诱发 *M* 临界应力高于 400 和 500 ℃退火态合金。随 *N* 增加,合金的循环稳 定性亦较差,应力一应变曲线形状变化显著,由部分 非线性 SE 转变为完全线性 SE,应力诱发 *M* 相变平台 逐渐消失,平台斜率增大,滞后面积先快速衰减后趋 于稳定。

应力—应变循环次数对 Ti-50.8Ni-0.5V SMA 应力 诱发 *M* 临界应力( $\sigma_M$ )、残余应变( $\varepsilon_R$ )和循环耗能( $W_D$ ) 的影响如图 4 所示。 由图 4(a)可知,随循环次数增加,400、500 和 600 C退火态合金的  $\sigma_M$ 均呈下降趋势,且  $\sigma_M^{600} > \sigma_M^{400} >$   $\sigma_M^{500}$ 。其中,600 C退火态合金的  $\sigma_M$ 下降最快,由第 1 次循环时的 551 MPa 下降到第 40 次循环时的 380 MPa,下降幅度为 171 MPa; 500 C退火态合金的  $\sigma_M$ 下降幅度低于 600 C退火态合金,其数值由第 1 次循 环时的 387 MPa 下降到第 40 次循环时的 275 MPa,下 降幅度为 112 MPa; 而 400 C退火态合金的  $\sigma_M$ 则变化 不大,由第 1 次循环时的 391 MPa 下降到第 40 次循 环时的 342 MPa,下降幅度仅为 49 MPa,说明 400 C退火态合金的应力—应变循环稳定性好。

由图 4(b)可知,随循环次数增加,400、500 和 600 ℃退火态合金的 ε<sub>R</sub>均先快速减小后趋于稳定,因此, SMA 在使用前一般要进行一定次数的循环,以获得稳 定的性能。此外,由该图还可以看出,400 ℃退火态 合金的 ε<sub>R</sub>趋于稳定的速率快于其它退火态合金,即其 只需要循环较少的次数就可以达到稳定,而 600 ℃退 火态合金的 ε<sub>R</sub>趋于稳定的速率最慢,其要达到稳定需 要多次循环。

由图 4(c)可知,随循环次数增加,400、500 和 600 ℃退火态合金的 W<sub>D</sub>均呈下降趋势。其中,400℃退火 时合金的 W<sub>D</sub>下降速率较小,下降幅度较小(由第1次 循环时的 1136 N·mm 下降到第 40 次循环时的 971 N·mm,下降幅度仅为 165 N·mm),循环耗能较稳定; 500 和 600 ℃退火态合金的 W<sub>D</sub>均先快速下降后趋于稳 定,其中 600 ℃退火态合金的 W<sub>D</sub>下降幅度高于 500 ℃ 退火态合金(600 ℃退火态合金的 W<sub>D</sub>,由第1次循环 时的 1 490 N·mm 下降到第 40 次循环时的 475 N·mm, 下降幅度为 1 015 N·mm,而 500 ℃退火态合金的 W<sub>D</sub> 由第1次循环时的 1 551 N·mm 下降到第 40 次循环时 的 963 N·mm,下降幅度仅为 588 N·mm)。





**Fig. 4** Effect of cycle number *N* on critical stress for inducing martensitic transformation ( $\sigma_M$ ) (a), residual strain ( $\varepsilon_R$ ) (b) and cyclic energy dissipation ( $W_D$ ) (c) of Ti-50.8Ni-0.5V alloy

#### 2.4 应变量对合金循环变形特性的影响

以循环稳定性较好的 400 ℃ 退火态 Ti-50.8Ni-0.5V 合金为对象,研究应变量对合金循环变 形特性的影响。循环应变量分别取 4%、5%、6%、7% 和 8%,循环次数为 20次,典型试验结果如图 5 所示。 由图 5 可知,合金在不同应变量下拉伸时,只需经过 1 次循环,合金的应力一应变曲线形态即可趋于稳定。 随循环应变量增大,合金的循环稳定性有所降低,循 环耗能(回线面积)增加。

此外,由图 5 还可以看出,第 1 次循环拉伸与第 2 次以后循环拉伸曲线差距较大,且在第 1 次拉伸过 程中,在应力小于 100 MPa 时,曲线存在一个拐点。 第 1 次循环拉伸时,由于 400 ℃退火态合金中形变织 构较多,母相和应力诱发 *M* 相界面处的摩擦较大,故 回线面积较大;应力小于 100 MPa 时,曲线中的拐点 系应力诱发 *R* 相变应变所致。从第 2 次循开始,因位 错等晶体缺陷状态逐渐稳定等熟路往返效应,使应力 一应变循环曲线逐渐稳定,且应变量很小的应力诱发 *R* 相变应变消失。



图 5 应变量对 Ti-50.8Ni-0.5V 合金应力一应变循环特性的 影响

**Fig. 5** Effect of tensile—strain on stress-strain cycling characteristics of Ti-50.8Ni-0.5V alloy (test at 20 °C)

### 3 讨论

应 力 一 应 变 循 环 次 数 和 退 火 温 度 对 Ti-50.8Ni-0.5V 合金的 SE 特性有显著影响。

400 ℃退火态合金经过1次循环后即可呈现良好的SE,且在多次循环后合金的应力一应变曲线形态比较稳定。这是由于在该温度退火时,退火温度较低,合金的显微组织呈纤维状,合金组织中仍残留有大量因冷拉拔而引入的形变织构和各种应力,这些结构缺陷对位错起到钉扎作用,使位错不易发生滑移<sup>[16]</sup>,在

加载/卸载过程中,只需经过1次循环即可获得形态稳定的应力一应变回滞曲线和优异的 SE 性能。

500 ℃退火态合金在起初几次循环时的应力—应 变曲线形态比较稳定,随循环次数增加,合金的 σ<sub>M</sub> 逐渐降低,循环耗能逐渐减小。这是由于合金的退火 温度较高,显微组织中纤维连续性变差,纤维密度降 低,形变织构减少,形变应力消除,组织中结构缺陷 对位错的定扎作用逐渐减弱,应力诱发 *M* 所需的临界 应力降低,耗能减小。

600 ℃退火态合金的滞后面积衰减较快,随循环 次数增加,应力一应变平台变得不明显且斜率逐渐增 大。这是由于 600 ℃退火后,合金处于再结晶状态, 位错密度显著降低,在开始几次循环过程中,母相界 面的可动性较高,其耗能不仅包括应力诱发 *M* 相变产 生的耗能,还包括由于母相界面的运动而产生的耗能, 因此其开始具有较大的耗能作用,随应力一应变循环 次数增加,母相界面的可动性变差,由于母相界面运 动产生的耗能逐渐消失<sup>[17]</sup>,故随应力一应变循环次数 增加其耗能逐渐减小,并逐渐趋于稳定。

应变量对Ti-50.8Ni-0.5V 合金循环时的SE性能也 有影响。当拉伸应变量较小(小于 6%)时,合金在加载 时发生应力诱发 *M* 相变后,由于应变量小于 *M* 发生 塑性变形的临界应变量,卸载后应变可完全回复,表 现出良好的SE。当应变量大于 6%时,在加载过程中 可能引入了少量不可逆塑性变形,使得卸载后应变有 少量残余,且随应变量增大,累积残余应变量逐渐增 大。

由马氏体相变切变理论和热力学基本原理<sup>[1]</sup>知, 在给定实验温度下, SMA的  $\sigma_M$ 主要取决于  $M_s$ 和晶粒 取向,  $\sigma_M$ 随  $M_s$ 的升高而降低;母相的晶粒取向越有 利,  $\sigma_M$ 越低。当  $t_{an}$ 低于合金的再结晶温度(约 580 °C) 时,合金的显微组织始终保持纤维状,晶粒取向对  $\sigma_M$ 的影响较小,因此,该阶段  $\sigma_M$ 降低主要是由合金的  $M_s$ 随  $t_{an}$ 升高而升高(见图 1)造成的。此后,随  $t_{an}$ 升高, 因马氏体逆相变温度降低(见图 1),室温组织中强度较 高的母相 B2 分数增加,以及合金中的纤维状组织逐 渐被等轴状组织所取代,有利于应力诱发 M 形核的晶 粒取向逐渐减少<sup>[18]</sup>等原因,导致  $\sigma_M$ 升高,故 600 °C 退火态 Ti-50.8Ni-0.5V 合金的  $\sigma_M$ 高于 400 和 500 °C 退火态合金的。

### 4 结论

1) 400、500 和 600 ℃退火态 Ti-50.8Ni-0.5V 合金

的相变类型分别为  $A \rightarrow R/R \rightarrow A$ 、 $A \rightarrow R \rightarrow M/M \rightarrow R \rightarrow A$ 和  $A \rightarrow M/M \rightarrow A$ , 合金的室温组成相为 B2 和 R 相。

2) 400 和 500 ℃退火态 Ti-50.8Ni-0.5V 合金的显 微组织形态呈纤维状,600 ℃退火态合金的显微组织 为等轴状。

3) 室温下, Ti-50.8Ni-0.5V 合金呈超弹性特性,
 600 ℃退火态合金的 σ<sub>M</sub>高于 400 和 500 ℃退火态合金
 的 σ<sub>M</sub>。

4) 400 ℃退火态合金的应力一应变循环特性稳定,超弹性特性良好,经一次循环后合金即可呈现完全非线性超弹性;500 和 600 ℃退火态合金的循环稳定性较差,随循环次数增加,合金的应力诱发 M 临界应力降低,循环耗能减小。

5) 随循环应变量增大,Ti-50.8Ni-0.5V 合金的循 环耗能增加,循环稳定性有所降低。

#### REFERENCES

- 赵连城,蔡 伟,郑玉峰. 合金的形状记忆效应与超弹性[M]. 北京:国防工业出版社,2002:23-28,80-90.
   ZHAO Lian-cheng, CAI Wei, ZHENG Yu-feng. Shape memory effect and superelasticity in alloys[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002:23-28, 80-90.
- [2] CHEN J H, SUN W, WANG D Z. Investigation on the fracture behavior of shape memory alloy NiTi[J]. Metall Mater Trans A, 2005, 36: 941–955.
- [3] ZHOU Y M, ZHANG J, FAN G L DING X D, SUN J, REN X B, OSTSUKA K. Origin of 2-stage *R*-phase transformation in low-temperature aged Ni-rich Ti-Ni alloys[J]. Acta Mater, 2005, 53: 5365–5377.
- [4] HORNBOGEN E, MERTINGER V, WURZEL D. Microstructure and tensile properties of two binary NiTi alloys[J]. Scripta Mater, 2001, 44: 171–178.
- [5] CHEN Qing-fu, TIAN Wen-yan, ZUO Xiao-bao, NI Li-feng. Superelastic damping of TiNi alloy wire under heavy mechanical shock in structural engineering[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2004, 14(2): 278–283.
- [6] DONG Y S, XIONG J L, LI A Q, LIN P H. A passive damping device with TiNi shape memory alloy rings and its properties[J]. Mater Sci Eng A, 2006, 416: 92–97.
- [7] TANG W, SUNDMAN B, SANDSTROM R, QUI C. New modelling of the B2 phase and its associated martensitic transformation in the Ti–Ni system[J]. Acta Mater, 1999, 47: 3457–3468.
- [8] 贺志荣,王 芳,王永善,夏鹏举,杨波.V和Cr对Ti-Ni超弹 性合金相变和形变特性的影响[J].金属学报,2007,43(12): 1293-1296.

HE Zhi-rong, WANG Fang, WANG Yong-shan, XIA Peng-ju,

YANG Bo. Effects of V and Cr on transformation and deformation characteristics of Ti-Ni superelastic alloy[J]. Acta Metall Sin, 2007, 43(12): 1293–1296.

- [9] 贺志荣, 蔡继峰, 刘曼倩. 添加 Co对 Ti-Ni 形状记忆合金组织 和性能的影响[J]. 功能材料, 2010, 41(4): 623-626.
  HE Zhi-rong, CAI Ji-feng, LIU Man-qian. Effect of adding Co on microstructure and properties of Ti-Ni shape memory alloy[J]. J Functional Mater, 2010, 41(4): 623-626.
- [10] 颜 莹,金 伟,周亭俊. 热轧 Ni47Ti44Nb9形状记忆合金板材的织构及其对拉伸和恢复性能的影响[J].中国有色金属学报,2010,20(1):2148-2153.
   YAN Ying, JIN Wei, ZHOU Jing-jun. Texture and its influence

on tensile and recoverable properties of hot-rolled  $Ni_{47}Ti_{44}Nb_9$  shape memory alloy sheet[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(1): 2148–2153.

- [11] 司乃潮,赵培根,司松海,李 镭,余松林. 预变形对 TiNiCr 形状记忆合金超弹性及显微组织的影响[J].中国有色金属学 报,2009,19(4):695-700.
  SI Nai-chao, ZHAO Pei-gen, SI Song-hai, LI Lei, YU Song-lin. Effect of pre-deformation on superelasticity and microstructure of TiNiCr shape memory alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(4): 695-700.
- [12] 贺志荣, 王 启, 邵大伟. 时效对 Ti-50.8Ni-0.3Cr 形状记忆合 金组织和超弹性的影响[J]. 金属学报, 2012, 48(1): 56-62.
   HE Zhi-rong, WANG Qi, SHAO Da-wei. Effect of aging on microstructue and superelasticity in Ti-50.8Ni-0.3Cr shape

memory alloy[J]. Acta Metall Sin, 2012, 48(1): 56-62.

- [13] HE Z, LIU M. Effect of heat treatment on transformation behavior of Ti-Ni-V shape memory alloy[J]. Mater Sci Eng A, 2011, 528: 6993-6997.
- [14] HE Z, LIU M. Effects of annealing and deforming temperature on microstructure and deformation characteristics of Ti-Ni-V shape memory alloy[J]. Mater Sci Eng B, 2012, 177: 986–991.
- [15] 贺志荣. Ti-Ni 形状记忆合金多阶段可逆相变的类型及其演化 过程[J]. 金属学报, 2007, 43(4): 353-357.
  HE Zhi-rong. Multi-stage reversible transformation types and their evolving processes of Ti-Ni shape memory alloys[J]. Acta Metall Sin, 2007, 43(4): 353-357.
- [16] ADHARAPURAPU R R, VECCHIO K S. Superelasticity in a new bioimplant material: Ni-rich 55NiTi alloy[J]. Experimental Mechanics, 2007, 47: 365–371.
- [17] 贺志荣,王 启,王 芳,王永善,杨 军.退火温度对 Ti-Ni-Cr 低温超弹性合金组织和拉伸性能的影响[J].稀有金 属材料与工程, 2011, 40(11): 1998-2001.
  HE Zhi-rong, WANG Qi, WANG Fang, WANG Yong-shan, YANG Jun. Effect of annealing temperatures on microstructure and tensile properties of Ti-Ni-Cr low-temperature superelasticity alloy[J]. Rare Met Mater Eng, 2011, 40(11): 1998-2001.
- [18] OTSUKA K, WAYMAN C M. Shape memory materials[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998: 62–65.

(编辑 何学锋)