

# 相变温度对 NiTi 形状记忆合金耐磨性的影响

潘毅<sup>1</sup>, 于学勇<sup>1</sup>, 程凤军<sup>2</sup>, 杨廷贵<sup>2</sup>

(1. 常熟理工学院 机电系, 江苏 常熟 215500; 2. 四川大学 材料成型系, 四川 成都 610065)

**摘要:** 利用 WMW-1 型摩擦磨损试验机研究了在相同条件下相变温度对 6 种 NiTi 形状记忆合金耐磨性的影响, 并分析其磨损机制. 结果表明: 超弹状态 NiTi 合金具有热弹性马氏体相变、高阻尼效应、应力诱发马氏体和超弹性等特性而使得其耐磨性较好, 合金的耐磨性主要取决于相变温度、Ni 原子的析出情况和合金硬度.

**关键词:** 形状记忆合金; 镍钛合金; 超弹性; 磨粒磨损性能

**中图分类号:** TB381; TH117.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-0595(2007)04-0398-03

近年来, 形状记忆合金 (SMA) 作为智能材料的应用为世人所瞩目, 尤其是 NiTi 合金, 因其具有超弹性效应和良好的耐磨性, 在生物医学领域已获得广泛应用. 传统材料的硬度和加工硬化等机械性能直接决定材料的耐磨性. 工况不同时, 这些机械性能指标对材料耐磨性的影响也不同. 而马氏体的择优取向和超弹性效应使得 NiTi 形状记忆合金具有良好的耐磨性<sup>[1,2]</sup>. 迄今为止, 人们对形状记忆合金耐磨性的研究主要集中于 NiTi 合金上, 且大多研究发现, NiTi 合金具有良好的耐磨性归因于其超弹性, 也有研究认为 NiTi 合金在高载荷作用下其耐磨性比 38CoCrMoAl 和 Co45 等高硬度合金优良<sup>[3]</sup>, 但关于其耐磨性影响因素的报道还较为欠缺. 为此, 本文着重对 NiTi 合金的磨损特性进一步研究, 并分析 NiTi 合金的相变温度和硬度对其耐磨性的影响机制, 以

期为镍钛形状记忆合金的应用提供实验依据.

## 1 实验部分

### 1.1 试样制备

试验所用合金为商业用纯金属材料在氩气保护下通过真空感应炉熔炼制得. 铸锭在 1 100 均匀化退火 15 h, 然后在 850 热锻成  $\phi 10$  mm 的棒材, 再机加工为尺寸  $\phi 9$  mm  $\times 18$  mm 的试样, 最后将试样在 530 退火 1 h 后空冷至室温, 经 1 000# 砂纸抛光后制成摩擦试样供试验使用. 本试验对 6 种 NiTi 合金进行磨损性能测试, 合金的化学成分、相变温度、相组成和硬度的测试结果见表 1.

### 1.2 试验方法

在 WMW-1 型销盘摩擦磨损试验机上进行磨损试验, 偶件为 316L 不锈钢 (硬度 57 ~ 60HRC, 尺

表 1 试验用合金的化学成分、相组成、转变温度和硬度

Table 1 Chemical composition, structure, transformation temperature and hardness of the tested alloy

Alloy	Ni (atomic) / %	Ti (atomic) / %	$M_s /$	Phase	$HV_1$
1#	50.1	49.9	60	+M	220
2#	53.3	46.7	35	+M	394
3#	50.2	49.8	20		189
4#	50.9	49.1	-24		275
5#	51.2	48.8	-38		338
6#	49.3	50.7	78	M	264

寸  $\phi 40$  mm  $\times 10$  mm), 与试样面接触. 试验条件: 载荷为 5 N, 相对速度为 0.2 m/s, 干摩擦状态, 每次

试验时间为 0.5 h, 连续试验 6 次. 磨损试验前后均采用超声波清洗仪清洗试样 (清洗液为丙酮). 采用

基金项目: 江苏省高校自然科学基金研究计划资助项目 (04KJD460005).

收稿日期: 2006-08-09; 修回日期: 2006-11-30. 联系人潘毅, e-mail: fanchi10@126.com

作者简介: 潘毅, 男, 1955 年生, 高级工程师, 目前主要从事金属功能材料及数字化制造技术研究.

精度 0.01 mg 的电子天平称量磨损质量损失,并以此评价 6 种合金的耐磨性.采用 OLYMPUS-BX61 型金相显微镜观察试样磨损表面形貌.采用 MH252VM 型显微硬度仪测定合金原始表面的显微硬度.

## 2 结果与讨论

### 2.1 NiTi 合金的硬度与相组成

表 1 列出了 6 种 NiTi 合金的相组成及维氏硬度值的对比结果.可以看出,2<sup>#</sup>合金的硬度最高,3<sup>#</sup>合金的硬度最低,且随着  $M_s$  温度升高,硬度迅速降低,在 20 时硬度最低(约 190HV<sub>1</sub>),进一步提高  $M_s$  温度至 40,由于出现硬化效果,硬度迅速升高并达到最大值(约 395HV<sub>1</sub>),这是因为沉淀相的形核和长大强烈依赖于  $M_s$  温度,而最佳  $M_s$  温度能够在合适的相组成时获得最佳硬度值<sup>[3,4]</sup>.本试验的最佳  $M_s$  温度为 35 左右.另外,随着 Ni 原子百分含量的增加,显微硬度值先降后升,当合金组分中 Ni 原子接近等原子比时,合金的显微硬度值最低.由于含有单相合金的  $M_s$  温度接近室温,含马氏体相合金的  $M_s$  温度较单相合金的  $M_s$  温度高,且合金中 Ni 的原子百分含量对  $M_s$  温度影响较大,所以合金的硬度变化趋势受到合金相组成和 Ni 含量的综合影响.

可以认为,NiTi 合金的硬度取决于  $M_s$  温度和 Ni 的原子百分含量.当 Ni 的原子百分含量超过 50% 后合金硬度发生变化,其中 2<sup>#</sup>合金的含 Ni 量最大,硬度也最高.一般来说,含有单相合金的硬度比相组成为 +M 和 M 的 NiTi 合金硬度高.相含量越高,相组成为 +M 的 NiTi 合金的硬度越大<sup>[4]</sup>,所以相组成为 +M 的 2<sup>#</sup>合金的硬度比 1<sup>#</sup>合金高.

### 2.2 磨损机制分析

图 1 所示为 6 种试样(不同  $M_s$  温度)的磨损质量损失.可见,在干摩擦条件下,含有单相的 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup> 和 5<sup>#</sup>合金和硬度最高的 2<sup>#</sup>合金的磨损质量损失均很小(0.5~1.1 mg 之间),尤其是单相合金磨损量在 0.76~1.1 mg 之间.值得注意的是,除了 2<sup>#</sup>合金以外,含有马氏体相合金的磨损质量损失较大,说明马氏体的耐磨性较差.

相变温度决定在一定工作温度范围内合金的组织,只有处于母相的合金才能在应力作用下产生应力诱发马氏体相变,相变过程容易发生协调变形,而不易发生应力集中或成为裂纹源<sup>[5,6]</sup>.3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>和 5<sup>#</sup>合金的相变温度均比 6<sup>#</sup>合金低,室温组织为相,6<sup>#</sup>合金的室温组织为马氏体相;由于母相具有超弹性,马氏体相则无超弹性,在应力的作用下易产生塑性变

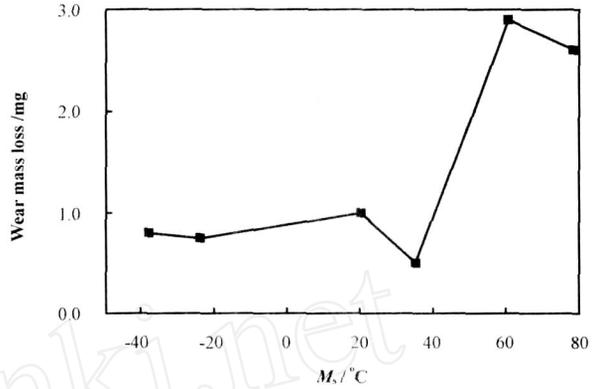
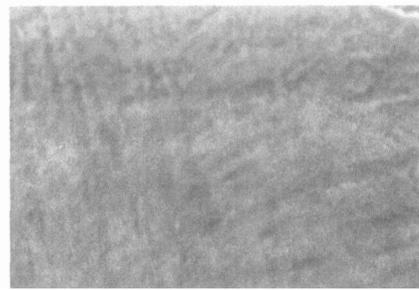


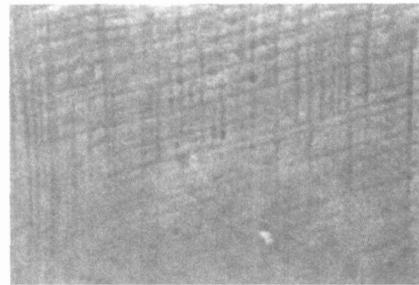
Fig 1 Wear mass loss of  $M_s$  transformation temperature for NiTi

图 1 NiTi 合金的磨损质量损失与  $M_s$  温度之间的关系曲线形,因此 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>和 5<sup>#</sup>合金的超弹性优于 6<sup>#</sup>合金,耐磨性亦更佳.当摩擦热引起的温升超过合金相变温度上限,相变温度低的合金不利于保持合金的超弹性<sup>[7]</sup>,由此可见,硬度和相变温度共同影响 NiTi 合金的耐磨性.

图 2 所示为 2<sup>#</sup>和 5<sup>#</sup> NiTi 合金试样磨损表面形貌



(a) 2<sup>#</sup> sample



(b) 5<sup>#</sup> sample

Fig 2 Optical micrographs of NiTi SMA specimens after dry friction (400 ×)

图 2 NiTi 合金试样磨损表面形貌的光学显微照片 (×400) 的光学显微照片.可见,含有单相的 2<sup>#</sup>与 5<sup>#</sup>合金的磨损表面形貌相似,2<sup>#</sup>合金表面磨损犁沟较浅,而 5<sup>#</sup>合金磨损表面的犁沟较深,有明显材料剥落痕迹,所以其耐磨性能较差,合金表面的磨损机制主要为磨

粒磨损. 在干摩擦试验过程中, 由于 NiTi 合金发生应力诱发马氏体相变后的弹性变形量增加, 使得 NiTi 合金发生塑性变形所需的临界载荷升高, 从而减小了磨粒在合金表面滑过时产生犁沟的可能性; NiTi 合金在承受磨粒的接触载荷作用时产生较大弹性变形, 能够将磨粒的动能转化为自身的弹性变形能, 从而减轻了磨粒对材料表面的冲击和破坏<sup>[4,6]</sup>; 超弹 NiTi 合金产生的塑性应变区域小于不锈钢, 可以降低犁沟两侧的隆起以及沟底材料的硬化, 从而减少磨屑的形成, 所以超弹 NiTi 合金在磨粒磨损过程中表现出较好的耐磨性.

### 3 结论

- a 相的耐磨性与  $M_s$  温度密切相关, 含单相的 NiTi 合金在 Ni 含量接近等原子比时, 合金的耐磨性最佳, 这主要归因于合金的超弹性.
- b 在干摩擦条件下, NiTi 形状记忆合金的磨损机制主要为磨粒磨损, 合金的热弹性马氏体相变对其磨损特性影响较大.

### 参考文献:

- [1] 李启全, 祁珊. NiTi 形状记忆合金超弹性的研究进展 [J]. 国外金属热处理, 2003, 24(4): 5-9.  
Li Q Q, Qi S. Present status of research of superelastic NiTi shape

- memory alloy [J]. Heat Treatment of Metals Abroad, 2003, 24(4): 5-9.
- [2] 舟久保, 熙康 [日]. 形状记忆合金 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [3] Li D Y. A new type of wear-resistant material: pseudoelastic Ti<sub>2</sub>Ni alloy [J]. Wear, 1998, 221: 116-123.
- [4] 李昂, 李安, 张凌云, 等. 激光熔化沉积 NiTi/Ni<sub>3</sub>Ti 金属间化合物合金的显微组织和耐磨性 [J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(5): 867-873.  
Li A, Li A, Zhang L Y, et al. Microstructure and wear resistance of laser melting deposited NiTi/Ni<sub>3</sub>Ti intermetallic alloys [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(5): 867-873.
- [5] 卢启明, 王海忠, 陈晓伯, 等. 骨科用镍钛形状记忆合金摩擦磨损性能研究 [J]. 摩擦学学报, 2005, 25(2): 164-168.  
LU Q M, Wang H Z, Chen X B, et al. Friction and wear behavior of NiTi shape memory alloy used for orthopaedics fixation [J]. Tribology, 2005, 25(2): 164-168.
- [6] 黄学文, 董光能, 王慧, 等. 超弹 Ti-Ni 合金的摩擦学特性研究 [J]. 摩擦学学报, 2002, 22(6): 409-413.  
Huang X W, Dong G N, Wang H, et al. Study on tribological characteristics of pseudoelastic Ti-Ni alloys [J]. Tribology, 2002, 22(6): 409-413.
- [7] 徐久军, 严立, 朱新河, 等. NiTi 形状记忆合金沙蚀磨损的机敏行为 [J]. 中国有色金属学报, 2001, 10(10): 52-56.  
Xu J J, Yan L, Zhu X H, et al. Smart behavior of NiTi shape memory alloy under sand-erosion wear [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 10(10): 52-56.

## Effect of Transformation Temperature on Anti-wear Behavior of NiTi Shape Memory Alloys

PAN Yi<sup>1</sup>, YU Xue-yong<sup>1</sup>, CHENG Feng-jun<sup>2</sup>, YANG Ting-gui<sup>2</sup>

(1. Department of Mechatronics Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China;

2. Department of Material Forming Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Characterization and correlation of wear behaviour of NiTi SMA in different phases were investigated by using pin-on-disk friction and wear tester, XRD and Optical micrographs. The experimental results indicate that the thermoelastic martensitic transformations caused superelastic effect, the high damping effect and reorientation and coalescence of martensitic plates promoted a high ability to accommodate large deformation without generating permanent damages which may cause wear. The wear resistance was mainly dependent on the transformation temperature for both alloys. Ni atomic percentage and the hardness of the alloys are also important parameters in the wear behavior of NiTi alloys.

**Key words:** shape memory alloy, NiTi alloy, superelasticity, abrasive wear behavior

**Author:** PAN Yi, male, born in 1955, Senior Engineer, e-mail: fanch10@126.com