

文章编号:1673-9981(2007)02-0099-04

NiTi 形状记忆合金抗磨损性能的研究

于学勇¹, 华征潇¹, 程凤军², 杨廷贵²

(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: 为了弄清 NiTi 形状记忆合金的相与磨损性能之间的关系以及合金的磨损特征, 研究了六种 NiTi 合金在相同条件下 Ms 转变温度对磨损量的影响. 研究表明, Ni 原子分数越高, 合金硬度越高, β 相含量越高, NiTi 合金的抗磨损性能越好.

关键词: 形状记忆合金; 粘着磨损; 镍钛合金; 超弹性

中图分类号: TB381

文献标识码: A

近年来, 形状记忆合金(SMA)的应用日益为世人所瞩目, 尤其是 NiTi 合金, 因其具有超弹性效应和良好的抗磨损性能, 而在生物医学领域获得了广泛的应用.

对于传统材料来说, 硬度、加工硬化等机械性能决定了材料的抗磨损性能. 工况不同, 这些机械性能指标对材料的抗磨损性能的影响也不同, 对于 NiTi 形状记忆合金来说, 马氏体片的重新取向和超弹性效应使其具有良好的抗磨损性能^[1]. 超弹性是 NiTi 形状记忆合金的重要力学性能之一. 当合金受到应力时, 母相经诱发发生相变, 形成马氏体, 去除应力后, 发生逆马氏体相变, 应变恢复, 即为超弹性; 而马氏体的重新取向是指不稳定类型的马氏体在受热或应力的作用下, 重新形成了带有热形核质点的马氏体或具有很高热力学稳定性的马氏体^[2].

迄今为止, 人们对 NiTi 合金研究更多的是它的形状记忆效应, 对它的抗磨损性能的研究还不够深入. 有的研究者认为在高载荷作用下, NiTi 合金的耐磨性比 38CoCrMoAl 和 Co45 等高硬度合金要好^[3]. 本文着重对 NiTi 合金的粘着磨损特征进行了研究, 并分析了合金的 Ms 转变温度和硬度对其抗磨损性能的影响.

1 试样制备与实验方法

1.1 试样制备

将纯度为 99% 的电解镍和 TA3 在氩气保护下, 通过感应炉熔炼制得实验用合金. 首先将铸锭在 1100℃ 均匀退火 15 h, 然后在 850℃ 热锻成直径 9 mm 的棒材, 再经机加工得到直径 9 mm、长 8 mm 的试样, 最后将试样在 530℃ 退火 1 h 后空冷至室温. 合金的化学成分、Ms 转变温度和相组成的测试结果列于表 1.

表 1 实验用 NiTi 合金的化学成分、相组成和转变温度
Table 1 Chemical composition structure and transformation temperatures of the NiTi studied alloys

合金 编号	元素含量(原子分数)/%		Ms/℃	相组成
	Ni	Ti		
1	50.1	49.9	60	$\beta + M$
2	53.3	46.7	35	$\beta + M$
3	50.2	49.8	20	β
4	50.9	49.1	-24	β
5	51.2	48.8	-38	β
6	49.3	50.7	78	M

收稿日期: 2006-08-21

作者简介: 于学勇(1975-), 男, 辽宁沈阳人, 讲师, 硕士.

1.2 实验方法

在 WMW-1 型试验机上进行环/盘磨损试验, 将 NiTi 合金按照试验机的要求加工成环形或盘形的标准试样。磨偶件为 316L 不锈钢, 硬度 57~60HRC。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)。用电子天平(量程 0~200 g, 精度 0.1 mg)称重。试验条件: 载荷 5 N、相对速度 0.2 m/s、干摩擦。为避免试样发热, 摩擦 0.5 h 后空冷, 然后再摩擦, 共摩擦 6 次。用 MH252VM 型显微硬度仪测定 NiTi 合金表面的原始硬度。

2 结果与讨论

2.1 硬度分析

六种 NiTi 合金的维氏硬度列于表 2。由表 2 可见, 2 号合金的硬度最高, 3 号合金的硬度最低。

表 2 实验用 NiTi 合金的硬度

Table 2 Hardness of the NiTi studied shape memory alloys

合金编号	1	2	3	4	5	6
硬度(HV)	220	394	189	275	338	264

合金硬度与 Ni 原子分数的关系见图 1(a)。在本试验所配制的 Ni/Ti 原子比例的范围, 当 Ni 原子分数超过 50% 后, 合金的硬度有逐渐升高的趋势; Ni 原子分数为 53.3% 时, 合金的硬度达到最大值 394HV(2 号合金)。

硬度与 Ms 转变温度的关系如图 1(b) 所示。由图 1(b) 可见, 随着 Ms 转变温度的升高, 合金硬度迅速降低。在 Ms 为 20℃ 时, 硬度最小, 约为 190HV(3 号合金)。当 Ms 提高至 35℃ 时, 由于出现硬化效应, 硬度迅速升高, 并出现最大值 394HV, 这与沉淀相的形核和长大有关。

由合金的相组成(表 1)可发现, 含单一 β 相的合金的 Ms 转变温度为 -38~20℃, 含马氏体相的合金的 Ms 转变温度为 35~78℃, 比只含单一 β 相合金的 Ms 转变温度高。

考察合金硬度的试验数据与合金中 Ni 的原子分数, 以及合金相组成之间的关系可发现, 对于相组成为 $\beta+M$ 的 NiTi 合金来说, Ni 的原子分数和 β 相的含量越高, 合金的硬度相对越高, 这与文献[4]结

果一致。即 NiTi 合金的硬度取决于 Ms 转变温度和 Ni 的原子分数, 在六种合金中 2 号合金的 Ni 含量最高, 其硬度也最高。对于相组成为 $\beta+M$ 的 NiTi 合金来说, 其硬度的变化趋势很明确, 即 β 相含量越高, 合金的硬度越高^[5]。而对于含马氏体相的合金来说, 其硬度变化又受到 Ni 含量的强烈影响^[6]。

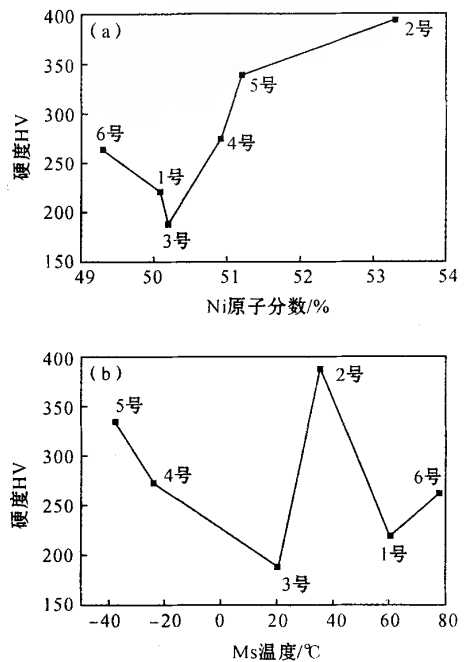


图 1 NiTi 合金的硬度与 Ni 含量和 Ms 转变温度的关系
Fig. 1 Effect of Ms martensitic transformation and Ni atomic fraction on hardness of the NiTi alloys

2.2 抗粘着磨损分析

磨损试验的结果表明, NiTi 形状记忆合金的抗磨损性能主要取决于合金的硬度和相组成。由试验结果(图 2)可知, 在干摩擦的条件下, 含有单一 β 相的 3, 4, 5 号合金的磨损量为 0.76~1.1 mg, 硬度最高的 2 号合金的磨损量为 0.5 mg, 其磨损量最小。1 号合金含马氏体相且硬度较低, 其抗磨损性能最差, 磨损量约为 2.8 mg, 是 2 号合金磨损量的 5 倍多。在干摩擦试验中, 由于 NiTi 合金发生应力诱发马氏体相变后弹性变形量大幅度增加, 这种弹性变形能力的增强使 NiTi 合金发生塑性变形所需的临界载荷更高, 减小了磨粒在合金表面滑过时产生犁沟的可能性; NiTi 合金在磨粒的接触载荷作用下, 会产

生很大的弹性变形,把磨粒的动能转化为自身的弹性变形能,减轻了磨粒对材料表面的冲击和破坏;超弹性 NiTi 合金产生塑性应变以及塑性应变的区域都小于不锈钢,可以大大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. 2 号合金的硬度最高,抵抗滑移变形的能力最强. 由于 β 相具有超弹性而马氏体相无超弹性,因此 3,4,5 号合金的超弹性优于 6 号合金,相应地其抗磨损性能亦较好. 值得注意的是,硬度和相组成对 NiTi 合金的抗磨损性同时起作用的^[7-8].

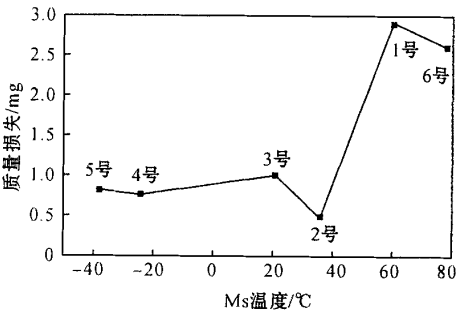


图 2 NiTi 合金的质量损失与 Ms 转变温度的关系
Fig. 2 Relation between weight loss and Ms transformation temperature for the NiTi

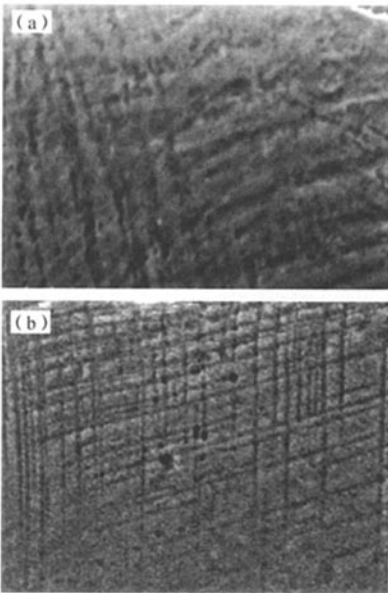


图 3 干摩擦后 NiTi 合金试样的 SEM 图,400×
(a) 2 号合金; (b) 5 号合金
Fig. 3 SEM micrographs of NiTi SMA specimens after dry friction

当摩擦热使合金的温度升高到 A_s 温度以上时,合金的抗磨损性能主要取决于合金的硬度和应变硬化效应^[3]. 2 号合金的硬度明显高于其它合金,随着温度的上升,其它合金的硬度急剧下降,磨损量急剧增加,而 2 号合金依然保持较好的高温耐磨性能.

磨损试验中发现,含有单一 β 相的 3,4,5 号合金磨损后的表面形貌与硬度最高的 2 号合金磨损后的表面形貌很相似. 图 3 为干摩擦后试样的表面形貌. 由图 3 可见,2 号合金的表面粘着现象较轻,有微犁沟的痕迹,5 号合金的粘着较为严重,有明显的表面材料撕脱的痕迹,并且犁沟的痕迹明显,抗磨损性能较差. 2 号合金的抗粘着磨损性能明显优于 5 号合金.

3 结 论

(1)当 Ni 的原子分数超过 50%后,合金的硬度有增高的趋势. 合金中的 Ni 原子分数为 53.3%时硬度最高,达到 394HV.

(2)在干摩擦条件下,NiTi 形状记忆合金的抗粘着磨损性能受合金硬度和相组成的影响很大,硬度最高的合金,其抗粘着磨损性能最好. 单一 β 相合金的抗粘着磨损性能较好,而含马氏体相的合金抗磨损性能较差,最佳的含单一 β 相合金的抗磨损量是单相马氏体合金的 5 倍左右.

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.
[2] 舟久保,熙康. 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_2Ni alloy[J]. Wear,1998,221: 116-123.
[4] 李昂,李安,张凌云,等. 激光熔化沉积 NiTi/Ni₃Ti 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.
[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.
[6] SUNG S Y, KIM Y J. Microstructural evolution in NiTi alloys during partial melting[J]. Materials Science and Technology,2005,21(5):517-560.

- [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,2000,10(增刊1): 188-191.
- [8] 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.

Study of the anti-wear behaviour of NiTi shape memory alloys

YU Xue-yong¹, HUA Zheng-xiao¹, CHENG Feng-jun², YANG Ting-gui²

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

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

Abstract: The main objective of this work has been the characterisation and correlation of the wear behaviour of the NiTi SMA in their different phases. The weight losses for the different alloys in function of the present phase, and of the Ms transformation temperature are studied. The thermoelastic martensitic transformations that cause the superelastic effect, the reorientation and coalescence of martensitic plates and the damping effect promotes a high ability to accommodate large deformations without generating permanent damages that causes the wear. The resulting plastic deformation may be accumulated during wear process. The results show that the wear resistance is mainly dependent of the Ms transformation temperature for both alloys. For the NiTi alloys also the Ni atomic percentage and the hardness of the alloys are important parameters in the wear behavior.

Key words: shape memory alloy; adhesive wear; NiTi alloy; superelasticity