

文章编号: 1004 - 0609(2003)01 - 0100 - 06

不同材料模型的超弹 TiNi 合金法向接触的有限元分析^①

王立民¹, 徐久军¹, 严立¹, 高玉周¹, 潘新祥², 朱新河², 刘一梅²

(1. 大连海事大学 材料工艺研究所, 大连 116026; 2. 大连海事大学 轮机工程学院, 大连 116026)

摘要: 采用多线性弹性和双线性等向强化两种材料模型, 对在法向力载荷作用下的 TiNi 形状记忆合金进行有限元模拟。结果表明: 多线性弹性模型不适合用来分析 TiNi 合金的超弹性; 而通过用最大弹性变形量(与屈服极限对应的极限应变值)来模拟 TiNi 合金的超弹性, 采用双线性等向强化模型可以描述 TiNi 合金的超弹性与产生的最大 Von Mises 弹性应变及最大 Von Mises 塑性应变之间的关系, 能够为以 TiNi 合金作为机敏材料、耐磨材料及耐磨膜层材料设计提供依据。最后, 在该材料模型下, 将用有限元方法与用纳米力学探针得到的位移与载荷关系曲线进行对比, 两者相差不大。

关键词: 材料模型; TiNi 形状记忆合金; 超弹性; 有限元; 机敏材料; 耐磨材料

中图分类号: TG 139; O 242.21

文献标识码: A

近等摩尔比的 TiNi 合金的形状记忆效应最早是由 Buehler 等人在 1963 年发现的^[1]。许多情况下, 人们并非应用其形状记忆效应, 而是使用它的另一特性——伪弹性, 也称超弹性。近年来的研究表明, TiNi 形状记忆合金还具有良好的耐磨性^[2~9], 有些学者把这种良好的耐磨性归因于 TiNi 合金的超弹性^[3, 9], 但所得结论也是建立在推断的基础上的, 没有直接的证据。Liu 等^[10]曾经就该合金的两微凸体接触模型进行过有限元分析, 但没有阐述是如何在该有限元分析中实现超弹性的, 使得人们对其结论的理解缺乏充分的证据。本文作者^[11, 12]也曾经就 TiNi 合金的沙蚀磨损的机敏行为及该合金在法向位移载荷作用下的有限元模型进行过初步探讨。许多学者对形状记忆合金的本构关系进行了详细研究^[13~17], 这些研究工作都是基于力学专业的基础之上的, 其中不仅涉及到应力和应变等力学参数, 还涉及到温度和马氏体数量等热力学参数。虽然这些本构关系可以在一定程度上描述形状记忆合金的力学行为, 但也只能用来解决比较简单的问题, 而对于复杂应力状态及多约束条件还不太适用。同时, 将这些本构关系的计算程序化也是一个难题^[18], 对于一般的工程技术人员很难掌握。

由于 TiNi 形状记忆合金具有良好的耐磨性, 可以用来制成耐磨材料, 又由于该合金还具有形状记忆效应和超弹性, 在适当的条件下可以产生比较大的回复力, 所以还可以用来制作具有传感和驱动

两种功能的机敏材料。本文作者采用两种现有的材料模型对在法向力载荷作用下的 TiNi 合金的接触模型进行有限元分析, 所得结果可以为把 TiNi 形状记忆合金作为耐磨材料、耐磨膜层材料和机敏材料设计提供依据。

1 TiNi 合金的超弹性及多线性弹性和双线性等向强化模型

图 1 所示为 TiNi 形状记忆合金在拉伸时的应力—应变关系示意图。该合金与普通金属材料的不同之处在于它的弹性阶段由两部分组成, 一段为图 1 中的 OA 段, 为线性弹性阶段, 另一段为图 1 中的 ABC 段, 为非线性弹性阶段。根据合金的成分及热处理条件的不同, 屈服点可以位于 ABC 段中的不同位置, 最大弹性变形量(与屈服极限对应的极限弹性应变)最高可以达到 17%^[19]。图 2 和图 3 所示是本文所采用的两种力学模型示意图。图 2

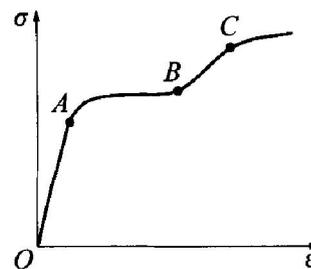


图 1 TiNi 合金应力—应变曲线示意图

Fig. 1 Schematic of stress—strain curve of TiNi alloy

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59905003, 50071014)

收稿日期: 2002 - 01 - 29; 修订日期: 2002 - 05 - 27

作者简介: 王立民(1971 -), 男, 博士研究生

通讯联系人: 王立民, 大连海事大学材料工艺研究所, 大连 116026; 电话: 0411-

4726776; E-mail: wanglimin502@sina.com.cn

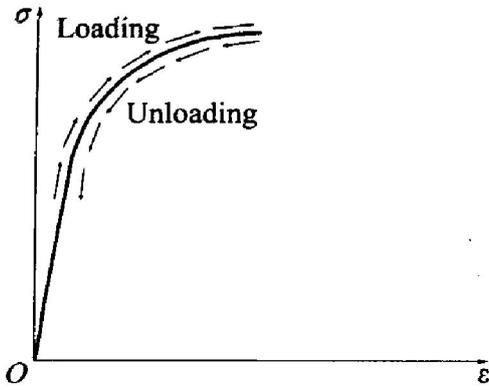


图 2 多线性弹性模型示意图

Fig. 2 Schematic of multilinear elastic model

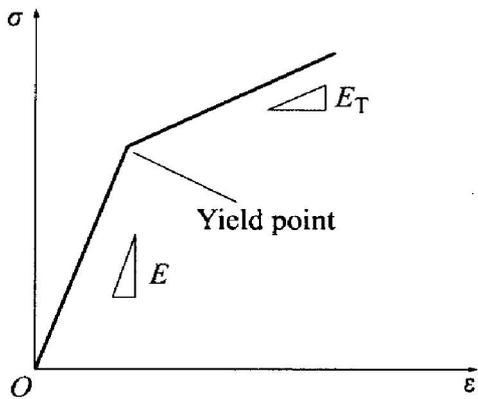


图 3 双线性等向强化模型示意图

Fig. 3 Schematic of bilinear hardening model

所示是多线性弹性模型, 在该模型中, 整个弹性阶段由若干个线性弹性阶段组成, 可以把整个弹性阶段看成是非线性的, 在该阶段卸载, 应力、应变沿加载的路径原路退回。图 3 所示的双线性等向强化模型由弹性和塑性两部分组成, 其弹性模量为 E , 屈服之后的应力和应变关系按切线模量 E_T 变化。考虑到 TiNi 合金弹性部分中有非线性部分, 而多线性弹性模型可以描述材料的非线性弹性行为, 并且如果 TiNi 合金的屈服点位于图 1 中的 AB 段, 那么它的整个应力-应变曲线还包含有强化部分, 而双线性等向强化模型可以描述这种强化特性, 因此采用这两种模型来进行比较。

2 有限元模型

在本研究中采用轴对称模型来模拟压入体与 TiNi 形状记忆合金的接触, 用 ANSYS 软件进行分析, 其有限元模型如图 4 所示。上部压入体尖端曲率半径为 1 mm, 弹性模量为 1 120 GPa, 泊松比为 0.3, 用来模拟金刚石或 SiO_2 , 整个模型可以用来模拟磨粒与 TiNi 形状记忆合金的接触。下部取 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ($FG = GI = HI = FH = 4 \text{ mm}$) 的区域为研究对象。在双线性等向强化模型中采用 3 种参数的组合来分析最大弹性变形量对结果的影响, 该参数见表 1。其中模型 2 用来模拟普通的结构钢, 模型 3 和模型 4 用来模拟具有超弹性的 TiNi 形状记忆合金。模型 1 采用的是多线性弹性模型, 在该模型中不需要输入象双线性等向强化模型那样的各种参数, 只需要输入各个点的应力、应变值, 在本文中, 输入的最大应力值为 500 MPa, 最大的应变值为 4%。整个模型用平面四节点单元来划分网格, 为保证计算的精度和节约计算时间, 只在接触区域及其附近进行适当的细化。在该分析中, 取 FG

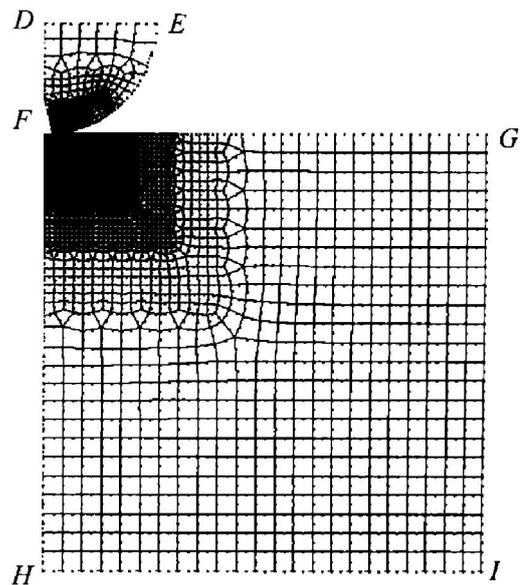


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

表 1 4 种模型的参数

Table 1 Parameters of four models

Model	E/GPa	σ_s/MPa	Strain of yield point/%	Poisson ratio	E_T/GPa
Model 1(multilinear elastic model)					
Model 2(bilinear isotropic hardening model)	250	500	0.2	0.3	6
Model 3(bilinear isotropic hardening model)	50	500	1	0.3	6
Model 4(bilinear isotropic hardening model)	12.5	500	4	0.3	6

线为目标面，弧线 EF 为接触面。 F 点为接触点，也为整体笛卡尔坐标原点， FG 方向为 X 轴正方向， FD 方向为 Y 轴正方向。约束条件为 DFH 线 X 方向的位移为零， HI 线 X 方向和 Y 方向的位移均为零。载荷加在压入体中心点 D 点，方向垂直向下，大小为 50 N ，整个载荷采用阶跃式载荷，即采用逐渐加载方式，把整个载荷共分成 100 份，由 100 个子步来完成，每个子步完成 0.5 N 的力。接触算法采用扩展拉格朗日算法。

3 结果及讨论

3.1 多线性弹性模型与双线性等向强化模型的比较

图5和图6所示分别是4种模型的最大 Von Mises 应力与最大 Von Mises 弹性应变随法向载荷变化的曲线，本分析中的最大弹性应变及最大塑性应变都是在 Von Mises 准则下求得的。从图5中可

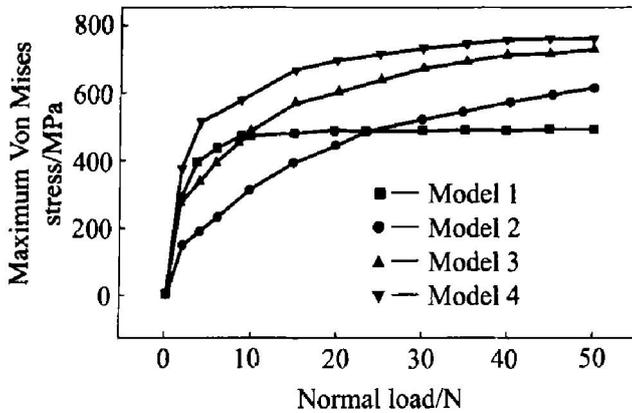


图5 最大 Von Mises 应力分布曲线

Fig. 5 Maximum Von Mises stress distributions

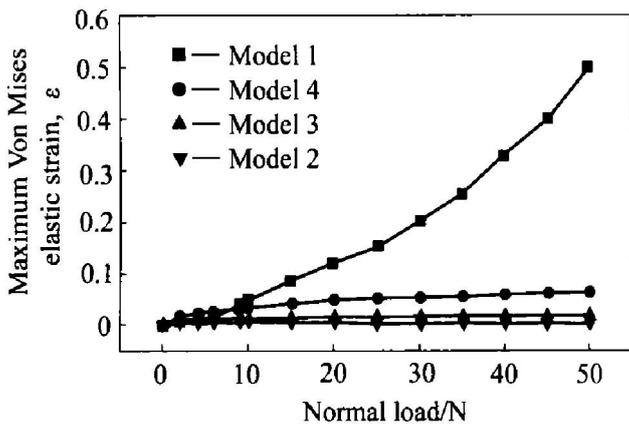


图6 最大 Von Mises 弹性应变分布曲线

Fig. 6 Maximum Von Mises elastic strain distributions

以看出，随着法向载荷的增加，双线性等向强化的3种模型的最大 Von Mises 应力均有所增加，而且是随着最大弹性变形量的降低，增加的幅度逐渐加大。而对于多线性弹性模型，在加载的初始阶段，Von Mises 应力增加得很快，但当载荷增加到一定程度时，该应力增加得非常缓慢，基本保持在低于 500 MPa 的水平，所能达到的最大应力值与输入的最大应力值有关，但当载荷增加到一定程度后，最大 Von Mises 应力增加得非常缓慢。这却是由该种材料模型的特性所决定的，那就是在较大载荷情况下，产生很大的弹性应变，而且该弹性应变增加的幅度非常大，这从图6中可以直接看出。由载荷所产生的应力可以被弹性应变所缓解，由于该模型所产生的弹性应变如此之大，使得其在受外载荷作用时能够缓解很大一部分应力，因此，应力增加很慢。但是在使用多线性弹性模型时，由外载荷所产生的应变完全由弹性应变来描述，没有任何塑性应变，这就使得所研究的材料呈现出一种类似于橡胶类材料的性质，这与 TiNi 合金有很大的差别。因为 TiNi 合金虽然具有很高的最大弹性变形量，但也有塑性应变产生，而采用双线性等向强化模型不仅可以描述所产生的弹性应变，也可以描述所产生的塑性应变(如图6, 7所示)。用该种模型也可以分析 TiNi 合金比较高的最大弹性变形量对产生的最大 Von Mises 弹性应变及最大 Von Mises 塑性应变的影响。综合考虑所研究材料的整体力学性质，包括弹性和塑性两部分，用多线性弹性模型来分析 TiNi 合金的材料特性是不合适的，就是单纯从弹性部分来讲，该模型所能描述的材料特性与 TiNi 形状记忆合金的超弹性也有很大差距。

3.2 3种双线性等向强化模型的应变分析

3种双线性等向强化模型在不同力的载荷作用

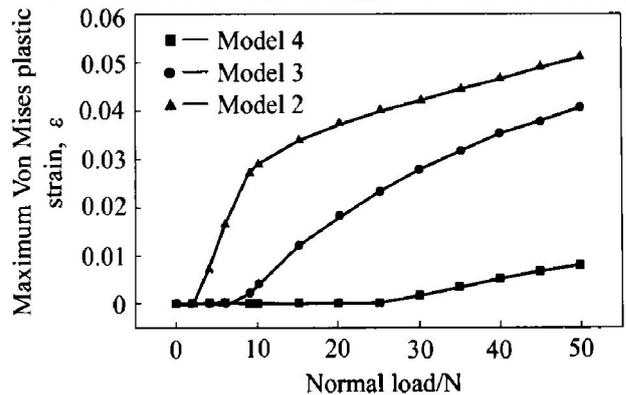


图7 最大 Von Mises 塑性应变分布曲线

Fig. 7 Maximum Von Mises plastic strain distributions

下的材料下部的最大 Von Mises 弹性应变和最大 Von Mises 塑性应变分布曲线分别见图 6 和图 7。从图中可以看出, 在相同的力载荷作用下, 随着最大弹性变形量的升高, 产生的最大 Von Mises 弹性应变逐渐增加, 而产生的最大 Von Mises 塑性应变逐渐减小。3 种模型发生塑性变形时的载荷值各不相同, 也是随着最大弹性变形量的升高而逐渐增加, 对应模型 2、3 和 4 三种模型发生塑性变形的载荷值分别为 4 N、9 N 和 25 N。

图 8, 9, 10 分别是 3 种模型在载荷为 50N 时接触点附近经过相同的局部放大的 Von Mises 塑性应变分布图。从 3 张图中上下部分之间的缝隙可以看出, 随着最大弹性变形量的增加, 上部压入体的压入深度逐渐增加, 但产生的最大塑性应变值却逐渐减小。这是因为随着最大弹性变形量的增加, 在外载荷作用下, 材料以较大的弹性变形来缓解所产生的应力, 当外载荷去除后, 产生的弹性应变可以恢复。由于 TiNi 合金有很高的最大弹性变形量, 也就可以产生很高的弹性应变, 虽然材料的变形很大, 但其中的弹性部分也相应地占了很大的比重, 这对材料的性能影响并不是很大。同时, 高的最大弹性变形量的另一贡献是使得产生的塑性应变很小, 产生的塑性应变区域也随着最大弹性变形量的增加而减小, 如图 8、9 和 10 所示。在循环载荷作用下, 产生的累积效果也比较弱, 在摩擦系统当中, 就可以抵抗比较高的循环载荷, 从而呈现出较

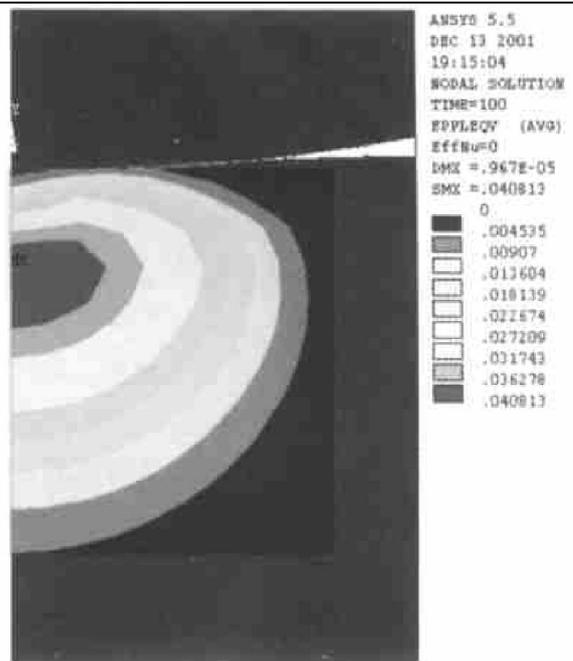
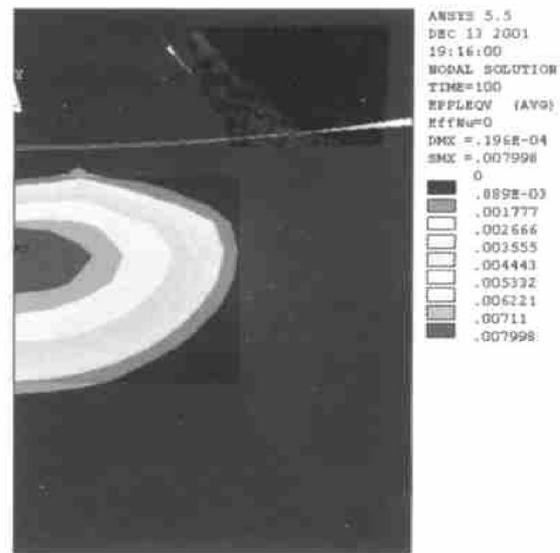


图 9 模型 3 的 Von Mises 塑性应变图

Fig. 9 Von Mises plastic strain of Model 3 (The load is 50 N)



3.3 有限元结果与纳米力学探针结果的对照

采用 Hysitron 公司的 Triboindenter 型纳米力学探针、Berkovich 金刚石压头, 对直径 1.4 mm 的超弹态 TiNi 合金丝进行压入实验, 并采用双线性等向强化模型对该过程进行有限元模拟, 用两种方法得到的加载阶段的位移与载荷关系曲线如图 11 所示。从图中可以看出, 有限元结果与实验结果相差不大, 但在相同载荷下, 用有限元方法得到的压头位移普遍比实验得到的大一些。这是因为在材料表面有一定程度的加工硬化存在, 而在有限元中分析的则是理想的、无缺陷的均质体, 这必然导致有限元结果比实验结果偏大。但随着载荷的增加, 压头的位移越来越大, 加工硬化对内部的影响越来越小, 实验结果与有限元结果也就越来越接近。

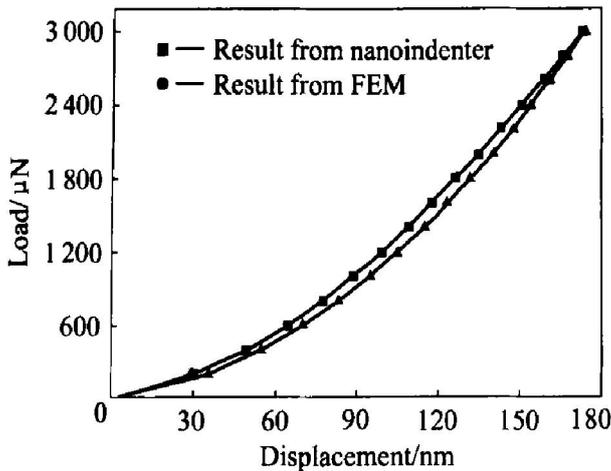


图 11 有限元方法与纳米力学探针得到的载荷与位移关系曲线

Fig. 11 Curves of load—displacement gotten from FEM and nanoindenter

4 结论

1) 用多线性弹性模型来分析 TiNi 合金的包括弹性和塑性两部分的整体力学性能是不合适的, 即使只对于弹性部分而言, 从该模型所产生的效果来看, 与 TiNi 合金的真实的材料特性也有很大的差距。

2) 用双线性等向强化模型可以描述 TiNi 合金的超弹性与产生的弹性应变及塑性应变之间的关系, 可以为将 TiNi 合金作为机敏材料和耐磨材料的设计提供依据。

3) 通过有限元方法与纳米力学探针得到的位移与载荷关系曲线的对比, 发现两者相差不大, 从而说明使用该种材料模型来分析超弹 TiNi 合金在压入阶段所产生的内部响应是合适的。

REFERENCES

[1] 吴承建, 陈国良, 强文江. 金属材料学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000. 238 - 243.
WU Chengjian, CHEN Guoliang, QIANG Wenjiang. Metal Materials [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000. 238 - 243.

[2] WANG H W, YANG D Y. Friction and wear of unlubricated copper-based CuZnAl shape memory alloys [J]. Wear, 1991, 148: 113 - 121.

[3] 金嘉陵, 王宏亮. NiTi 合金耐磨性研究[J]. 金属学报, 1988, 24(1): A66 - A69.
JIN Jiāling, WANG Hongliang. Investigation of wear resistance of NiTi alloys [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1988, 24(1): A66 - A69.

[4] 王红卫, 吴望子, 王凤庭, 等. Cu 基形状记忆合金干滑动磨损研究[J]. 金属学报, 1991, 27(6): 444 - 448.
WANG Hongwei, WU Wangzi, WANG Fengting, et al. Dry sliding wear Cu-based shape memory alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1991, 27(6): 444 - 448.

[5] Ball A. On the importance of work hardening in the design of wear-resistant materials [J]. Wear, 1983, 91: 201 - 207.

[6] Clayton P. Tribological behavior of a titanium-nickel alloy [J]. Wear, 1993, 162: 202 - 209.

[7] Shida Y, Sugimoto Y. Water jet erosion behavior of Ti-Ni binary alloys [J]. Wear, 1991, 146: 219 - 228.

[8] Singh J, Alpas A T. Dry sliding wear mechanism in a TiNiFe intermetallic alloy [J]. Wear, 1995, 182: 302 - 311.

[9] Li D Y. Wear behavior of TiNi shape memory alloys [J]. Scripta Materialia, 1996, 54: 195 - 200.

[10] Liu R, Li D Y. A finite element model study on wear resistance of pseudoelastic TiNi alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2000, A277: 169 - 175.

[11] 徐久军, 严立, 朱新河, 等. 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(2): 188 - 191.
XU Jiujun, YAN li, ZHU Xinhe, et al. Smart behavior of NiTi shape memory alloy under sand-erosion wear [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(2): 188 - 191.

[12] 王立民, 徐久军, 严力. TiNi 合金在法向位移接触载荷作用下的有限元分析[J]. 中国表面工程, 2001, 14(3): 37 - 40.
WANG Limin, XU Jiujun, YAN li. The finite element analysis of a TiNi alloy under the normal displacement contact load [J]. Surface Engineering of China,

- 2001, 14(3): 37 - 40.
- [13] 邹 静, 钟伟芳. 形状记忆合金的多维本构关系[J]. 固体力学学报, 1999, 20(2): 171 - 176.
ZOU Jin, ZHONG Weifang. The multi-dimensional constitutive relations of shape memory alloys [J]. Acta Mechanica Solid Sinica, 1999, 20(2): 171 - 176.
- [14] 佟景伟, 高丛峰, 李鸿琦, 等. 温度对高应变率扭-拉复合加载形状记忆合金本构关系影响的研究[J]. 固体力学学报, 2001, 22(1): 69 - 73.
TONG Jingwei, GAO Congfeng, LI Hongqi, et al. The effect of temperature on the constitutive relation of Fe-based shape memory alloy under torsion-tension combined high strain rate [J]. Acta Mechanica Solid Sinica, 2001, 22(1): 69 - 73.
- [15] 王 健, 沈亚鹏, 王社良. 形状记忆合金的本构关系[J]. 上海力学, 1998, 19(3): 185 - 195.
WANG Jian, SHEN Yaping, WANG Sheliang. The development of the constitutive relation of a shape memory alloy [J]. Shanghai Journal of Mechanics, 1998, 19(3): 185 - 195.
- [16] 王志刚, 黄克智. 一种描述形状记忆合金拟弹性变形行为的本构关系[J]. 固体力学学报, 1991, 23(2): 201 - 210.
WANG Zhigang, HUANG Kezhi. A constitutive relation for pseudo-elastic behaviour in shape memory alloys [J]. Acta Mechanica Solid Sinica, 1991, 23(2): 201 - 210.
- [17] 杨兆海, 高丛峰, 梁丽杰. 高温高应变率扭-拉复合加载下铁基记忆合金的本构关系[J]. 吉林大学自然科学学报, 2000(3): 65 - 67.
YANG Zhaohai, GAO Congfeng, LIANG Lirjie. Constitutive relation of Fe-based shape memory alloy under torsion-tension at a high strain rate and an elevated temperature [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Jilinensis, 2000(3): 65 - 67.
- [18] 王跃方, 杨大智, 陈腓瑕, 等. 含形状记忆合金智能材料系统的力学分析与设计研究[J]. 功能材料, 2000, 31(6): 569 - 571.
WANG Yuefang, YANG Dazhi, CHEN Feixia, et al. Study on mechanical analysis and design of shape memory alloy reinforced intelligent material systems [J]. Journal of Functional Materials, 2000, 31(6): 569 - 571.
- [19] Li D Y. A new type of wear-resistant material: pseudo-elastic TiNi alloy [J]. Wear, 1998, 221: 116 - 123.

FEM analysis of pseudoelastic TiNi alloy under normal contact using two material models

WANG Limin¹, XU Jijun¹, YAN Li¹, GAO Yuzhou¹,
PAN Xixiang², ZHU Xirhe², LIU Yimei²

(1. Institute of Material and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
2. Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Two different material models (multilinear elastic model and bilinear isotropic hardening model) were used to carry out the finite element analysis of TiNi shape memory alloy with pseudoelasticity feature under normal force load. The results show that the multilinear elastic model is not appropriate for analyzing the pseudoelasticity of TiNi alloy, but through using the maximum elastic deformation (the strain value at the yield point) to simulate the pseudoelasticity of TiNi shape memory alloy, the bilinear isotropic hardening model can describe the relationships between the pseudoelasticity of TiNi shape memory alloys and strains including elastic strain and plastic strain. The results gotten from this analysis using the bilinear isotropic hardening model can be used to provide the reference for designing TiNi alloy as smart material and anti-wear material. Finally, under the bilinear isotropic hardening model, the relationship between load and displacement gotten from FEM was compared with that derived from nanoindenter, results indicate that they are at close range.

Key words: material model; TiNi shape memory alloys; pseudoelasticity; finite element; smart material; anti-wear material

(编辑 袁赛前)