

形状记忆合金管接头结构优化与有限元分析

马彦, 李威

(北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为了解决油管接口处的慢性泄漏问题, 研究了一种舰艇核反应堆管路用形状记忆合金管接头. 建立了 NiTiNb 形状记忆合金管接头结构优化模型, 并采用遗传算法, 对 NiTiNb 形状记忆合金管接头进行了结构优化设计. 采用有限元法对优化后的 NiTiNb 形状记忆合金管接头进行了热结构耦合仿真分析, 仿真试验结果与理论分析结果取得了较好的一致性, 从而证明本文提出的方法是可行、有效的, 具有很大的通用性和工程实际意义.

关键词: 形状记忆合金; 管接头; 设计优化; 遗传算法; 仿真分析

中图分类号: TH 122

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2013)08-1166-05

Structure Optimization and Finite Element Analysis of Shape Memory Alloy Coupling

MA Yan, LI Wei

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China.
Corresponding author: LI Wei, E-mail: liwei@me.ustb.edu.cn)

Abstract: In order to solve the chronic leakage problem at the tubing interface, a shape memory alloy (SMA) used for naval nuclear reactor coupling was studied. A structural optimal model for the NiTiNb shape memory alloy coupling was established. Using the genetic algorithm, the structural design of the NiTiNb pipe coupling was optimized. The NiTiNb shape memory alloy coupling was then analyzed through the thermal-structural coupled simulation using the finite element method. The results suggest that the computational results agree well with the theoretical data. Therefore, the method proposed is feasible and effective, and has great versatility and practical significance.

Key words: shape memory alloy; coupling; design optimization; genetic algorithm; simulation analysis

形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)是20世纪60年代初发展起来的新型功能材料^[1], 近年来正在作为飞机智能结构中的传感器和制动器的候选材料被广泛研究. NiTiNb 形状记忆合金管接头是利用形状记忆合金的记忆效应实现燃油、液、空气、水等各系统管路管线的紧固连接与密封^[2-8]. 记忆合金管接头为简单圆筒体, 内孔加工有凸脊, 其内径比被接管的外径略小, 在低温下对管接头扩径使其比被接管的外径略大; 装配时, 将被接管插入连接件中, 随后加热, 管接头因形状

回复而收缩, 即实现管路的紧密连接^[9-11]. 与目前管路的法兰连接、螺纹接头连接、卡套接头连接等传统连接形式相比, 记忆合金连接件具有结构简单、占用空间小、安装方便、连接可靠和重量轻等优点, 特别适用于管路密集、空间狭小的场合.

1 建立记忆合金管接头优化模型

NiTiNb 形状记忆合金管接头分为管接头的制备和使用两个阶段, 按先后顺序可分为低温扩

径、室温装配、升温接触、抱紧升温、降至室温五个过程^[12-13]。NiTiNb 合金存在一个特征形变温度和临界形变量范围,在该范围内形变可有效增大相变滞后,同时,应变恢复率仍保持在较高水平;在 -60℃左右变形 16% 被认为是 NiTiNb 合金较理想的预变形条件^[14]。

在研究用于舰艇油路管道连接的 NiTiNb 形状记忆合金管接头时,主要问题是管接头系统的抱紧力和内部的应力强度。形状记忆合金管接头

是通过其内部的马氏体逆相变产生的相变回复力将被接管抱紧的;抱紧力越大,NiTiNb 管接头与被接管之间的连接性能越好。

抱紧时 NiTiNb 形状记忆合金管接头与被接管的受力分析如图 1 所示。本文研究的被接管是不锈钢管,用下标(上标)A 表示,其主要成分是 0Cr18Ni11Ti;NiTiNb 形状记忆合金管接头用下标(上标)B 表示。两种材料的物理力学参数如表 1 所示。

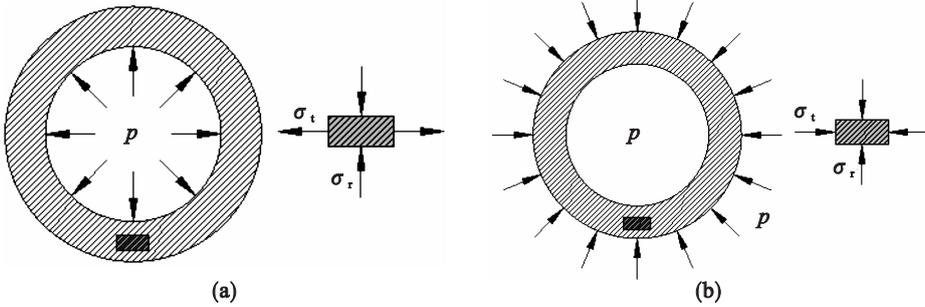


图 1 抱紧时 NiTiNb 管接头与被接管的受力分析

Fig. 1 Stress analysis of the NiTiNb pipe coupling and the connected pipe when they are connected
(a)—NiTiNb 管接头; (b)—被接管。

表 1 NiTiNb 管接头和被接管材料的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the NiTiNb pipe coupling and the connected pipe

参数	NiTiNb 材料		不锈钢材料	
	20 ℃	300 ℃	20 ℃	300 ℃
弹性模量 E/GPa	87	97	198	182
热膨胀系数 $\alpha \times 10^6$	11.7	11.4	16.6	17.2
产生 0.2% 塑性应变时的屈服极限 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	520	341	270	210
抗拉强度 σ_b/MPa	750	721	655	500
延伸率 $\delta/\%$	40	40	55	29
泊松比 ν	0.3	0.3	0.3	0.3

被接管室温时初始内径 $r_A^0 = 5.5 \text{ mm}$, 初始外径 $R_A^0 = 6.5 \text{ mm}$, r_A^0, R_A^0 和 E_A, ν_A, α_A 分别是被接管室温时的初始内外径以及材料的弹性模量、泊松比和热膨胀系数; r_B^0, R_B^0 和 E_B, ν_B, α_B 为 NiTiNb 管接头室温时的初始内外径以及材料的弹性模量、泊松比和热膨胀系数; $p(t_0)$ 是室温下的抱紧力, $\sigma_N^A(t_0)$ 为被接管室温下的最大应力, $\sigma_N^B(t_0)$ 为管接头室温下的最大应力。

$$p(t) = \frac{(\alpha_A - \alpha_B) \cdot (t - t_0)}{S_B(1 + \alpha_B(t - t_0)) + S_A(1 + \alpha_A(t - t_0))} + p(t_0), \quad (1)$$

$$\sigma_N^A(t) = \sigma_N^A(t_0) + \frac{2}{1 - (r_A^0/R_A^0)^2} (p(t) - p(t_0)), \quad (2)$$

$$\sigma_N^B(t) = \sigma_N^B(t_0) + \frac{2}{1 - (r_B^0/R_B^0)^2} (p(t) - p(t_0)). \quad (3)$$

式中:

$$S_A = \frac{1 + \nu_A}{E_A} \cdot \frac{1 + (1 - 2\nu_A)(R_A^0/r_A^0)^2}{(R_A^0/r_A^0)^2 - 1}, \quad (4)$$

$$S_B = \frac{1 + \nu_B}{E_B} \cdot \frac{1 + (1 - 2\nu_B)(r_B^0/R_B^0)^2}{(r_B^0/R_B^0)^2 - 1}. \quad (5)$$

由于不锈钢在每个温度时的热膨胀系数都比 NiTiNb 形状记忆合金在该温度时的大,分析得出, NiTiNb 形状记忆合金管接头与不锈钢管之间的抱紧力在管接头使用最高温度 $t_{\text{max}} = 300 \text{ ℃}$ 时达到最大,即此时 NiTiNb 形状记忆合金管接头系统的强度最低,是最危险状态;因此,本文的设计针对此状态进行,优化目标是 NiTiNb 管接头

与不锈钢被接管之间的抱紧力最大. 优化的约束条件如下. 首先, 扩径后管接头内径须大于被接管外径. 对于管接头系统, 太大的抱紧力可使系统内的应力过大, 影响其安全性; 因此, 优化的第二个约束条件是系统内的应力不能太大, 必须低于材料的抗拉强度. 为保证安全性, 本文要求系统内的最大应力低于材料抗拉强度的 80%. 又因为 NiTiNb 形状记忆合金在 300 °C 时的抗拉强度是 721 MPa, 不锈钢材料在 300 °C 时的抗拉强度是 500 MPa, 进而得出 NiTiNb 形状记忆合金管接头进行优化设计的数学模型如下所示.

已知参数: r_A^0, R_A^0 ; 设计变量: r_B^0, R_B^0 .

目标函数:

$$\max p(t_{\max}) = \frac{(\alpha_A - \alpha_B)(t_{\max} - t_0)}{S_B(1 + \alpha_B(t_{\max} - t_0)) + S_A(1 + \alpha_A(t_{\max} - t_0))} + p(t_0). \quad (6)$$

约束条件:

1) NiTiNb 形状记忆合金管接头在 300 °C 时的最大应力应低于 NiTiNb 形状记忆合金材料在该温度时抗拉强度的 80%, 即

$$\sigma_N^B(t_{\max}) - \sigma_b^B \times 80\% = \sigma_N^B(t_0) + \frac{2}{1 - (r_B^0/R_B^0)^2}(p(t_{\max}) - p(t_0)) - 721 \times 80\% \leq 0; \quad (7)$$

2) 不锈钢被接管在 300 °C 时的最大应力应低于不锈钢材料在该温度时抗拉强度的 80%, 即

$$\sigma_N^A(t) - \sigma_b^A \times 80\% = \sigma_N^A(t_0) + \frac{2}{1 - (r_A^0/R_A^0)^2}(p(t) - p(t_0)) - 500 \times 80\% \leq 0; \quad (8)$$

3) NiTiNb 管接头低温扩径后的内径应大于被接管的外径, 即

$$R_A^0 - (1 + \eta_r)r_B^0 \leq 0. \quad (9)$$

η_r 为 NiTiNb 形状记忆合金管接头在低温扩径时的扩径率, $\eta_r = 11.6\%$.

2 优化设计记忆合金管接头

优化算法的选择首先要明确优化模型的特点, 问题维数、目标函数及约束函数的性态是选择优化算法的主要依据. 对于 NiTiNb 形状记忆合金管接头而言, 抱紧力最大的优化模型为多维约束优化问题, 且目标函数和约束条件为非线性的. 长期以来, 在机械最优化设计中, 应用最多的是传统的复合形法. 对于复合形法来说, 它的寻优关键

是初始复合形的构成和复合形顶点的改善性移动. 对于低维线性优化问题, 此法收敛比较快; 但对于多维非线性优化问题, 由于可行域变得复杂, 用随机法很难构成初始复合形, 同时不能保证中心点落入可行域, 致使非可行点很难调入可行域或映射失败, 而且收敛速度慢, 容易收敛某一局部最优点, 即伪最优点. 要想从根本上解决上述问题, 需要引入现代优化算法中的工程遗传算法. 遗传算法是一种基于自然选择和基因遗传学原理的优化搜索方法, 与传统的优化算法相比具有如下特点: ① 不是从单个点, 而是从多个点构成的群体开始搜索; ② 在搜索最优解过程中, 只需要由目标函数值转换得来的适应信息值, 而不需要导数、连续等其他辅助信息; ③ 搜索过程不易陷入局部最优点. 根据以上几点, 遗传算法适合 NiTiNb 形状记忆合金管接头的多维非线性优化模型, 且结果比复合形法更优.

遗传算法的基本思想是模拟自然界优胜劣汰的进化现象, 它把搜索空间映射为遗传空间, 把可能解编码成一个向量, 即染色体, 染色体群一代代不断进化, 包括选择、交叉和变异等, 通过不断地计算各染色体的适应度值, 选择最好的染色体, 获得最优解. 遗传算法的基本流程如图 2 所示.

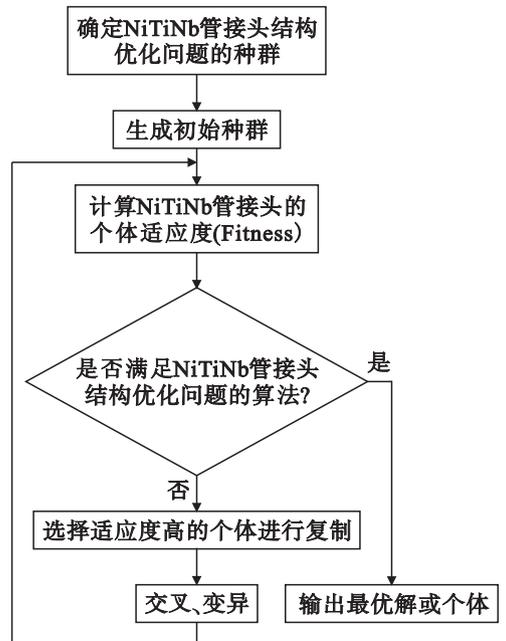


图 2 NiTiNb 管接头的遗传算法流程图
Fig. 2 Genetic algorithm flowchart of the NiTiNb coupling

调用 MATLAB 的遗传优化算法函数, 初始种群个体数目取 10, $r_A^0 = 6.5 \text{ mm}$, $R_A^0 = 8.5 \text{ mm}$, 进化繁殖 200 代, 其他默认为缺省参数, 编写 M 文件进行计算. 运算结果表明, 繁殖到第 17 代时

获得最优解,此时求得 NiTiNb 管接头室温时的初始内径 $r_B^0 = 8 \text{ mm}$,初始外径 $R_B^0 = 11 \text{ mm}$,从室温加热到 $t_{\max} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ 时 NiTiNb 管接头与被接管之间的抱紧力为 $p(t_{\max}) = 42.48 \text{ MPa}$,运算结果如图 3 所示.图 3 中横坐标为遗传算法中种群繁殖的代数,纵坐标为 NiTiNb 管接头与被接管在 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的抱紧力,即遗传算法中的适应度函数.

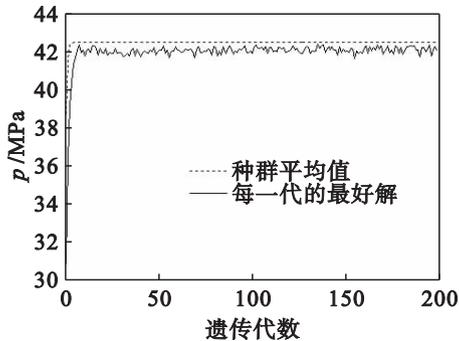


图 3 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 时 NiTiNb 管接头系统的抱紧力随遗传迭代的进化曲线

Fig. 3 Evolutionary curves of the NiTiNb coupling system's connecting force vs. genetic iterations at $300 \text{ }^\circ\text{C}$

3 NiTiNb 管接头的仿真分析

本文应用物理环境分析方法对 NiTiNb 形状记忆合金管接头进行热结构耦合分析,将在 Pro/E 环境下建立的优化后的实体模型导入 ANSYS 中,对 NiTiNb 管接头施加约束:温度场约束和 NiTiNb 管接头与不锈钢被接管之间的抱紧力约束.由图 3 所示优化设计计算结果知,NiTiNb 管接头与不锈钢被接管在 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的抱紧力为 42 MPa ,即 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 时 NiTiNb 管接头内壁受 42 MPa 的均布载荷,在对管接头划分单元时,材料采用 NiTiNb 形状记忆合金,材料弹性模量 $E = 97 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.3$,采用智能网格划分方法,NiTiNb 形状记忆合金管接头的等效应力分布云图如图 4 所示,径向、周向应力随壁厚的变化如图 5 所示.

图 5 中,横坐标 0 表示 NiTiNb 管接头的内壁处,横坐标的正方向表示从 NiTiNb 管接头的内壁沿着 NiTiNb 管接头的壁厚向外延伸;纵坐标表示 NiTiNb 管接头所受的抱紧力,负数表示受压应力,正数表示受拉应力,具体数值表示 NiTiNb 管接头所受抱紧力的大小.

应力仿真结果表明:NiTiNb 管接头在内壁处的径向应力和周向应力都为最大,此时径向应力为压应力,径向应力 $\sigma_r = 23.68 \text{ MPa}$,周向应力为拉应力,周向应力 $\sigma_t = 76.90 \text{ MPa}$,此处总应力值最大,

为 83.30 MPa ,远小于 NiTiNb 形状记忆合金在该温度下的抗拉强度 721 MPa ,因此满足设计要求.

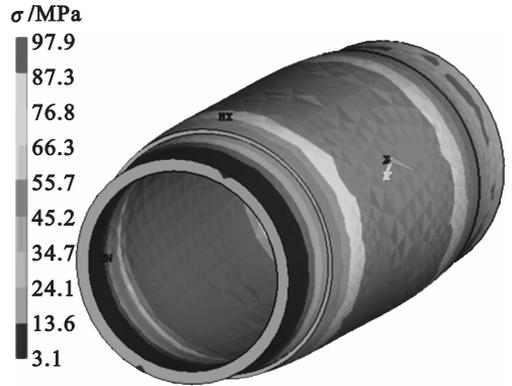


图 4 NiTiNb 管接头的等效应力分布云图
Fig. 4 Equivalent stress contour of the NiTiNb pipe coupling

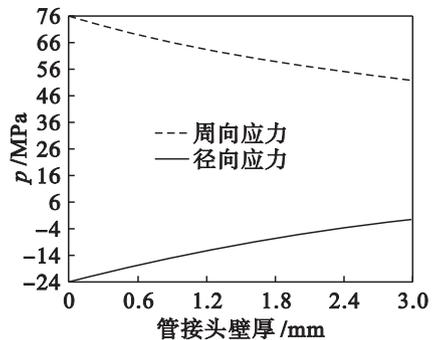


图 5 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 时 NiTiNb 管接头径向、周向应力与壁厚的关系
Fig. 5 Relationship between the NiTiNb pipe coupling radial, circumferential stress and wall thickness at $300 \text{ }^\circ\text{C}$

4 结 论

1) 采用有限元法得到的计算结果表明, NiTiNb 形状记忆合金管接头发生变形时,最大应力及变形均发生在 NiTiNb 管接头内壁处,此处是整个 NiTiNb 管接头的薄弱环节,其强度决定 NiTiNb 管接头能否安全工作.在本文的 NiTiNb 形状记忆合金管接头的结构设计中,仿真结果接近工程实际,此处的强度满足设计要求.

2) 按照本文创建的约束模型,利用基于遗传算法和仿真分析的 NiTiNb 管接头优化设计方法,不仅可以解决记忆合金管接头结构优化设计中面临的抱紧力和材料强度、温度与壁厚等不确定因素引起的连接性能波动问题,确保了记忆合金管接头连接性能最优化,而且节省了开发时间和原材料.

3) 采用本文提出的遗传优化设计和仿真分析一体化设计方法不仅适合 NiTiNb 管接头的开

发,也适用于其他智能材料产品的开发,可以研究智能材料产品在总体设计甚至全寿命周期研制中不确定因素对产品性能的影响,具有很大的通用性和工程实际意义。

参考文献:

- [1] Otsuka K, Wayman C M. Shape memory materials [M]. London: Cambridge University Press, 1998.
- [2] Melton K N. Engineering design and application of shape memory materials [C]//Proceedings of the International Symposium on Shape Memory Materials. Beijing, 1994: 523 - 526.
- [3] Horikawa H, Suzuki Y, Horie A, *et al.* Ni-Ti-Nb shape-memory alloy pipe couplings [J]. *Furukawa Review*, 1992, 11: 9 - 14.
- [4] Duerig T W. Wide hysteresis NiTiNb alloys [C]//European Conference on Martensitic Transformation in Science and Technology. Bochum, 1989: 191 - 195.
- [5] Dong Z Z, Zhou S L. Study of TiNiNb shape memory alloy pipe coupling [J]. *Transaction of Tianjin University*, 1999 (2): 82 - 84.
- [6] 周旭昌, 曾光廷, 霍永忠, 等. 形状记忆合金管接头的工作原理及研究进展 [J]. *机械*, 2002, 29 (3): 1 - 3. (Zhou Xu-chang, Zeng Guang-ting, Huo Yong-zhong, *et al.* Principle and progress of shape memory alloy pipe coupling [J]. *Machinery*, 2002, 29 (3): 1 - 3.)
- [7] Sari U. Influences of 2.5wt% Mn addition on the microstructure and mechanical properties of Cu-Al-Ni shape memory alloys [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2010, 17 (2): 192 - 198.
- [8] Movahhedy M, Gadala M S, Altintas Y. Simulation of the orthogonal metal cutting process using an arbitrary Lagrangian-Eulerian finite-element method [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 103 (2): 267 - 275.
- [9] 张慧博, 王健, 金伟, 等. TiNiFe 形状记忆合金管接头应力场模拟 [J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20 (1): 510 - 513. (Zhang Hui-bo, Wang Jian, Jin Wei, *et al.* Coupling force simulation of TiNiFe shape memory alloy pipe-coupling [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20 (1): 510 - 513.)
- [10] 尹向前, 高宝东, 米绪军. TiNiNb 形状记忆合金管接头径向压应力的模拟计算 [J]. *稀有金属*, 2008, 32 (5): 579 - 582. (Yin Xiang-qian, Gao Bao-dong, Mi Xu-jun. Numerical simulation of radial pressures for TiNiNb pipe-couplings [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2008, 32 (5): 579 - 582.)
- [11] 王磊, 闫德胜, 姜志民, 等. Ni-Ti-Nb 宽滞后形状记忆合金管接头研究和进展 [J]. *材料工程*, 2004 (7): 60 - 63. (Wang Lei, Yan De-sheng, Jiang Zhi-min, *et al.* Research and development of Ni-Ti-Nb shape memory alloy pipe-joint with wide hysteresis [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2004 (7): 60 - 63.)
- [12] 智友海, 刘永寿, 岳珠峰. 不同载荷下形状记忆合金管接头性能的有限元分析 [J]. *机械设计与制造*, 2009 (2): 4 - 6. (Zhi You-hai, Liu Yong-shou, Yue Zhu-feng. Finite element analysis of shape memory alloy joint under different loads [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009 (2): 4 - 6.)
- [13] Nagaya K, Hirata Y. Analysis of a coupling made of shape memory alloy and its dynamic response due to impacts [J]. *Transactions of the ASME: Journal of Vibration and Acoustics*, 1992, 114 (3): 297 - 304.
- [14] 周清. Ni - Ti - Nb 宽滞后记忆合金管接头 [J]. *机械*, 1994, 21 (5): 41 - 43. (Zhou Qing. Ni-Ti-Nb shape memory alloy pipe coupling with wide hysteresis [J]. *Machinery*, 1994, 21 (5): 41 - 43.)