

镍钛形状记忆合金管接头有限元分析

徐 祥, 阚前华, 康国政

(西南交通大学力学与工程学院, 成都 610031)

摘 要:采用三维形状记忆合金相变本构模型预测了镍钛合金的形状记忆行为,进而建立了镍钛形状记忆合金连接钛合金管的轴对称有限元模型,考虑大变形和接触非线性,模拟了镍钛形状记忆管接头的装配过程。结果表明回复力由卸载过程中的自由应变回复以及形状记忆合金升温回复时的应变回复两部分组成。最后,给出了形状记忆合金管接头内径和摩擦系数的优化方法。

关键词:形状记忆合金;管接头;本构模型;有限元分析;回复力

中图分类号:TG139.6

文献标志码:A

引 言

形状记忆合金(SMA)作为一种新型的功能材料,它所具有的形状记忆效应和超弹性等性能使其在工业、航空和机械制造等各个领域都得到了广泛应用^[1],其中,镍钛形状记忆合金材料的工程应用涉及多学科的交叉与融合。SMA 管接头相比于传统的连接方式,它有一些优点:(1)装配过程简单、安全,不需要过多零件,也不会产生有害物,对周围环境损害小;(2)可以根据不同的用途选择不同的被连接管;(3)即使在狭窄的工作环境里 SMA 管接头也可以完成连接工作并且不会影响到周围零部件。由于形状记忆合金热力学变形过程的复杂性,其本构模型研究仍有不足,限制了 SMA 管接头的有限元模拟。目前,国内外所报道的关于 SMA 管接头模拟方面的工作较少^[2-6],主要集中在不同结构形式^[7]或不同的加载形式下^[8-10]的管接头。

基于目前应用最广泛的 Auricchio 等^[11]提出的三维热力学本构模型和 SMA 管接头有限元模型,模拟了形状记忆合金管接头的装配过程,讨论了管接头拉脱力的影响因素,所获结果对管接头的设计和应用具有一定的

指导意义。

1 镍钛形状记忆热力学本构模型

SMA 的热力学变形过程通过 ANSYS 内嵌的 Auricchio 三维唯象热力学模型进行描述。该模型选择应变 ε 和绝对温度 T 作为控制变量,奥氏体向马氏体相变过程产生的应变或者马氏体解孪过程产生的应变 e^r 为内变量。自由能函数定义为:

$$\psi(\theta, e, T, e^r) = \frac{1}{2}K\theta^2 + G\|e - e^r\|^2 + \tau_M(T)\|e^r\| + \frac{h}{2}e^{r2} + \Gamma_{\varepsilon_L}(e^r) \quad (1)$$

其中, K 和 G 分别为体积模量和剪切模量, $\theta = \varepsilon:1$ 为体积应变, $\|\cdot\|$ 是欧几里得范数, τ_M 是一个与温度相关的正单调递增函数, h 是相变硬化模量, $\Gamma_{\varepsilon_L}(e^r)$ 为相变应变约束,其定义为:

$$\Gamma_{\varepsilon_L}(e^r) = \begin{cases} 0 & \|e^r\| \leq \varepsilon_L \\ +\infty & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

其中, ε_L 为单轴最大相变应变,相变开始驱动力定义为:

$$X = s - (\tau_M + \delta) \frac{s}{\|s\|} \quad (3)$$

收稿日期:2016-03-28

基金项目:国家自然科学基金项目(11532010;11572265)

作者简介:徐 祥(1992-),男,安徽无为,人,硕士生,主要从事形状记忆合金本构方面的研究,(E-mail)superxud@126.com;

阚前华(1980-),男,河南信阳人,副教授,博士,主要从事智能材料疲劳与断裂方面的研究,(E-mail)qianhuakan@foxmail.com

其中, δ 为求解处于初始无应力和无约束状态下的完全奥氏体状态下的内标量,其表达式为:

$$\delta = [\|s\| - [\tau_M - R]^+]^- \quad (4)$$

其中 R 为弹性域半径。

引入相变压力相关的屈服函数 $F(X)$ 来考虑拉压非对称性。该函数基于偏应力第二不变量 J_2 和第三不变量 J_3 :

$$F(X) = F(J_2, J_3) = \sqrt{2J_2} + M \frac{J_3}{J_2} - R \quad (5)$$

其中, M 和 R 为拉压试验中的参数,可以用临界转换拉应力 σ_t 和压应力 σ_c 表示:

$$M = 2 \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\sigma_c \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \quad (6)$$

$$R = \sqrt{\frac{27}{2}} \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \quad (7)$$

2 材料参数和有限元模型

2.1 材料参数

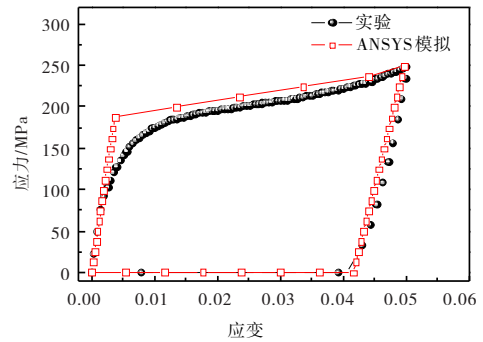
管接头采用 SMA,被接管采用弹塑性 TA19 钛合金,材料模型采用双线性随动硬化模型。管接头和被接管的摩擦系数设初始设定为 0.2,SMA 和 TA19 钛合金的材料参数见表 1。

表 1 SMA 和 TA19 钛合金材料参数

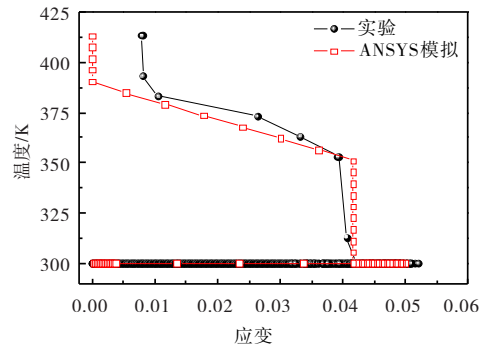
类型	参数	含义	单位	数值
SMA	E_a	奥氏体弹性模量	MPa	50950
	ν	泊松比	--	0.33
	α	热膨胀系数	$\times 10^{-5}K$	1.1
	C_1	硬化参数	MPa	900
	C_2	参考温度	K	280
	C_3	弹性极限	MPa	130
	C_4	温度定标参数	MPa/K	1.2
TA19 ^[12]	C_5	最大相变应变	--	0.051
	C_6	马氏体模量	MPa	30561
	C_7	屈服函数相关量	--	0.05
	E	弹性模量	MPa	122000
	ν	泊松比	--	0.325
	σ_y	屈服应力	MPa	992
	σ_b	极限应力	MPa	1036
h	正切模量	MPa	18676	
	α	热膨胀系数	$\times 10^{-5}K$	1.05

采用有限元软件 ANSYS 和表 1 所示参数对 SMA 的低温加载-卸载和升温回复过程进行模拟,模拟结果和实验结果的对比如图 1 所示。

由图 1 可知,无论是拉伸到卸载过程中的应力-应变曲线还是升温时的温度-应变曲线模拟曲线均与实验曲线比较吻合。图 1(b) 还显示,升温完成后 SMA 存在 0.8% 的不可恢复变形,这在本构模型里没有考虑,模拟



(a) 应力-应变曲线



(b) 温度-应变曲线

图 1 SMA 实验值和模拟结果对比

中予以忽略。

2.2 有限元模型

2.2.1 几何模型

表 2 为 SMA 管接头和被接管的几何尺寸。在实际应用中,管接头内径比被接管外径小 4% 左右^[13]。

表 2 管接头和被接管几何尺寸

名称	内径/mm	外径/mm	厚度/mm	长度/mm
TA19 被接管	2.00	3.16	0.58	13.00
SMA 管接头	3.00	5.80	1.40	11.00

2.2.2 有限元网格

由于管接头在低温下的扩径、管接头与被接管的连接装配以及升温抱紧的过程是典型轴对称问题,建立的轴对称有限元模型如图 2 所示。在有限元模型的网格划分中,接触单元选择 CONTACT172 和 TARGET169,单元划分尺寸均设置为 0.5 mm。

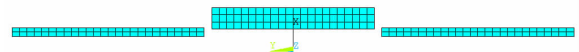


图 2 有限元模型

2.2.3 边界条件和加载工况

考虑到管接头的实际装配工况,在轴对称模型中只对管接头中间部位的节点施加了 Y 方向的位移约束。SMA 管接头一般在低温下进行一定变形的扩径,然后进行装配,最后再升温回复抱紧。因此,有限元分析中设

定以下五个载荷步骤:

(1) 在室温下,对 SMA 管接头内壁施加 300 MPa 的均布载荷对 SMA 管接头进行扩径。

(2) 在被连接管的端部施加位移载荷,移动被连接管,使之插入到扩径后的 SMA 管接头中。

(3) 卸载 SMA 管接头内壁上的载荷,设置管接头和被连接管之间的接触。

(4) 升温至 413 K,管接头将恢复形变,抱紧被连接管。

(5) 降温至室温 298 K。

3 模拟结果

图 3 显示了 TA19 被连接管在装配完成并恢复至室温后的等效应力云图。由图 3 可以看出,被连接管的等效应力中间区域的应力大于两端,并沿内壁向外壁延伸逐渐减小,最大应力值出现在内壁靠近 SMA 管接头端口水平方向位置处。

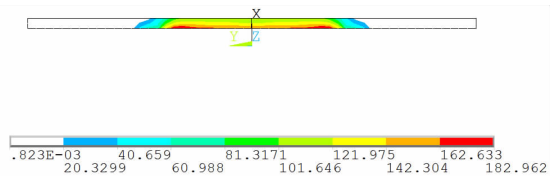


图 3 TA19 被连接管装配完成后的等效应力云图

如图 4 所示,SMA 管接头中的等效应力径向呈梯度分布,原因是 SMA 管接头在扩径完成后各个部分产生的变形量不同。

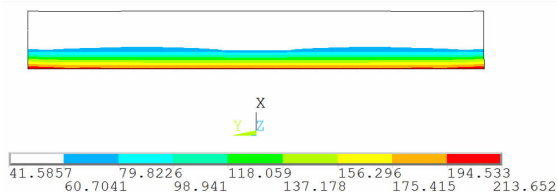


图 4 SMA 管接头装配完成后的等效应力云图

如图 5 所示,SMA 管接头内壁产生了 0.12 mm 变形量,达到了 8% 的应变,越往外壁延伸相变程度越低,因此内外相变温度不同,相变开始于管接头的外端,而结束于管接头的内端^[14]。最终导致 SMA 管接头中的等效应力分布不均匀。

图 6 为 SMA 管接头与 TA19 被连接管之间的接触压力分布图。由图 6 可知,接触压力在中间位置最小,在靠近两端位置接触压力达到最大值 61.15 MPa。而在端部位置,接触应力又有所减小。

图 7 为仅考虑 SMA 管和考虑装配过程中的 SMA 管

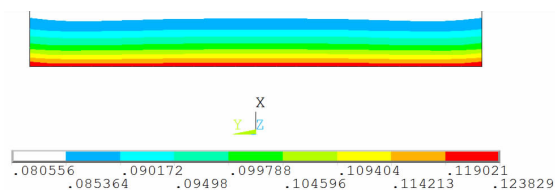


图 5 扩径后 SMA 管接头的相变应变

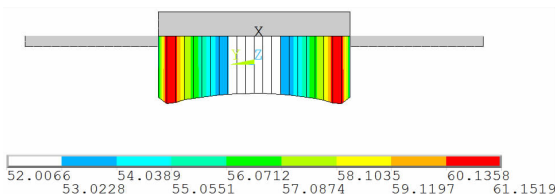
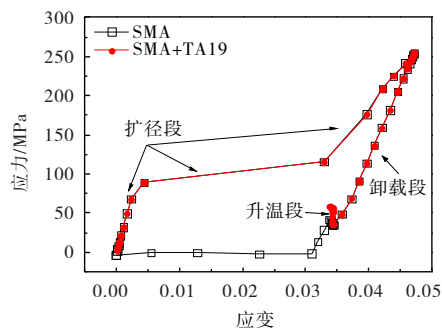
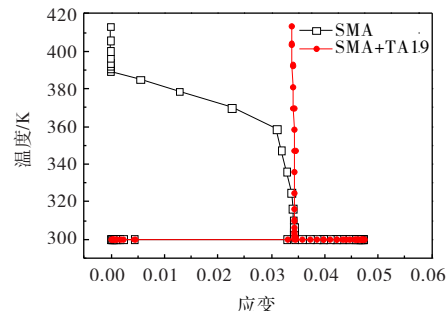


图 6 SMA 管接头装配完成后的接触压力分布

接头的应力 - 应变和温度曲线对比图。由图 7(a)可知,装配过程中的 SMA 管接头,扩径阶段和卸载的初始阶段,材料的应力应变曲线与单独作用下的曲线基本重合且未卸载至零,并在升温段应力有所提升。图 8 为装配过程中卸载完成时的 SMA 管接头的应力 - 应变曲线。由图 7 和图 8 可知,在插入 TA19 被连接管以后,SMA 管接头存在残余应力场来维持管内的应力自平衡。再由图 7(b)可知,升温回复的应变由于装配了被连接管而无法回复,故在图 7(a)中升温段只有应力增加,应变几乎不变。



(a) 应力应变曲线



(b) 应变温度曲线

图 7 仅考虑 SMA 和同时考虑 SMA 管接头与 TA19 被连接管情况下的应力 - 应变和应变 - 温度曲线对比图

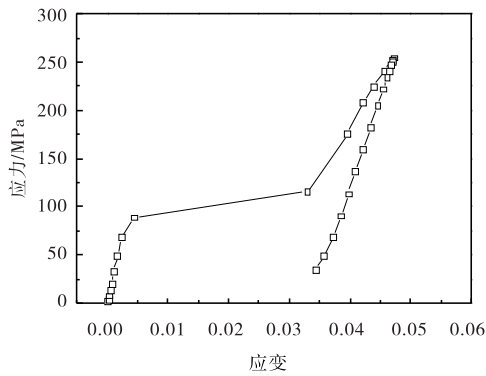


图 8 装配过程中的 SMA 管接头卸载完成时的应力 - 应变曲线

4 讨论

对于管接头而言,连接强度是评判其连接可靠性重要标准。管接头和被连接管之间的连接强度可以用拉脱力 F 表示^[15]:

$$F = \sigma_r \mu \pi D_i L_s / 2 \quad (7)$$

其中, σ_r 为回复应力, μ 为摩擦系数, D_i 为 TA19 被连接管外径, L_s 为 SMA 管接头连接长度。接下来讨论 SMA 管接头的内径 D_s 和 SMA 管接头与 TA19 被连接管间的摩擦系数 μ 对连接强度的影响。

对比图 9 和图 10 中不同摩擦系数和管接头内径取值情况下的拉脱力大小和 TA19 被连接管中最大等效应力值的大小可以发现,管接头内径越小,拉脱力越大,被连接管中最大等效应力值也越大;而当摩擦系数增加时,拉脱力随之增加;在管接头内径较大时拉脱力的增加值比较小且管接头内径越小,拉脱力随摩擦系数的增大而增加的幅度越大。考虑到实际应用中,回复应力不能过大从而破坏被连接管,且 TA19 被连接管在 373 K 下的屈服强度约为 900 MPa^[12],最终优化后的选择为内径为 2.9 mm,摩擦系数为 0.3,该值对应的被连接管最大等效应力为 684.86 MPa,拉脱力为 3.21 kN。

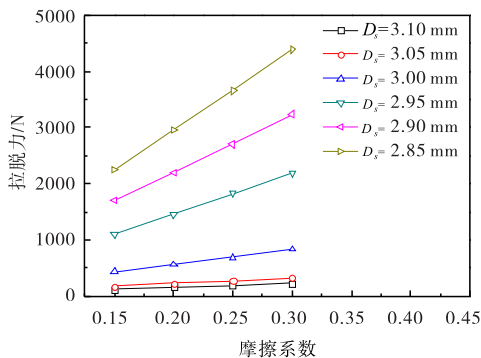


图 9 不同摩擦系数和管接头内径取值下的拉脱力

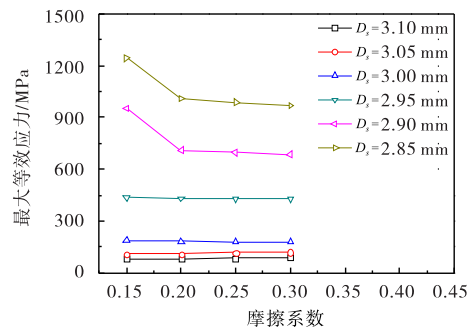


图 10 不同摩擦系数和管接头内径下的 TA19 被连接管最大等效应力

5 结论

采用三维形状记忆合金热力学本构模型,建立的镍钛 SMA 连接 TA19 钛合金管的轴对称有限元模型,模拟了镍钛 SMA 管接头的装配过程,仿真结果表明:

- (1) ANSYS 内嵌的三维本构模型可以用于模拟 SMA 的形状记忆效应。
- (2) 装配完成后 SMA 管接头应力由内壁向外壁逐渐减小,TA19 被连接管最大应力出现在靠近中部的内壁位置,最大接触压力出现在靠近管接头端部。
- (3) 回复应力由卸载过程中的自由应变回复以及形状记忆合金升温回复时的应变回复两部分组成。
- (4) 给出的 SMA 管接头参数优化方法能对管接头的设计和应用提供有益参考。

参考文献:

- [1] 孙洪志. 钛镍形状记忆合金管接头[J]. 稀有金属快报, 2001(6):16.
- [2] 曾攀, 杜泓飞. NiTi 形状记忆合金的本构关系及有限元模拟研究进展[J]. 锻压技术, 2011, 36(1):1-6.
- [3] 马彦, 李威. 形状记忆合金管接头结构优化与有限元分析[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2013, 34(8):1166-1170.
- [4] 陈斌. 镍钛铌形状记忆合金宏观细观力学行为研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [5] HELM D. Numerical simulation of martensitic phase transitions in shape memory alloys using an improved integration algorithm[J]. International journal for numerical methods in engineering, 2007, 69(10):1997-2035.
- [6] 严金良, 沈亚鹏, 陈儒. 形状记忆合金管接头空间轴对称有限元分析[J]. 力学学报, 1998, 30(3):370-378.
- [7] 张慧博, 金伟, 杨锐. 内脊型 TiNiFe 记忆合金管接头

- 拉脱力的三维有限元模拟[J].金属学报,2012,48(12):1520-1524.
- [8] 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.
- [9] 智友海,史向平,刘永寿,等.SMA管接头系统的蠕变及热应力分析[J].强度与环境,2009,36(3):59-64.
- [10] 刘永寿,智友海,刘军,等.管道系统中Ti-Ni合金管接头的疲劳寿命(S-N)分析[J].飞机设计,2009,29(2):13-17.
- [11] AURICCHIO F,PETRINI L.Improvements and algorithmical considerations on a recent three-dimensional model describing stress-induced solid phase transformations[J].International Journal for Numerical Methods in Engineering,2002,55(11):1255-1284.
- [12] 阚前华,杨强军,康国政,等.钛合金Ti6242S高温棘轮行为实验研究[J].北京理工大学学报,2014,34(S1):90-93.
- [13] 王健,沈亚鹏.基于Total-Lagrange法SMA管接头的有限元分析[J].机械强度,2000,22(4):275-275.
- [14] 张振兴.NiTiNb合金管件扩径变形行为及其对记忆性能的影响[D].北京:北京有色金属研究总院,2014.
- [15] 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):579-583.

Finite Element Analysis of NiTi Shape Memory Alloy Pipe Coupling

XU Xiang, KAN Qianhua, KANG Guozheng

(School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The three-dimensional shape memory alloy thermo-mechanical constitutive model was used to predict the behavior of NiTi shape memory alloy. Considering large deformation and contact nonlinearity, an axisymmetric finite element model was established to simulate the assembly process of NiTi shape memory pipe coupling. The simulated results reveal that recovery force consists of resistance of recoverable strain created during elastic unloading and resistance of recoverable strain developed during heating. An optimal method to obtain the inner diameter and friction coefficient of the pipe coupling was proposed finally.

Key words: shape memory alloy; pipe coupling; constitutive model; finite-element analysis; recovery force