

Numerical Simulation Analysis on the Drop of Fastening Force of Shape Memory Alloy Pipe Connection

Zetian Kang¹, Bo Zhou^{1*}, Changye Zhou², Xirui Zhao², Shifeng Xue¹

¹College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao Shandong

²College of Air Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Email: *zhoubo@upc.edu.cn

Received: Jul. 24th, 2018; accepted: Aug. 10th, 2018; published: Aug. 20th, 2018

Abstract

The drop of the fastening force of the shape memory alloy (SMA) pipe connection will lead to the fall off of the connecting fittings in the process of subsequent use, which will affect the safety and reliability of the whole system. In order to systematically study the drop law of the SMA pipe connection fastening force, the nonlinear finite element ABAQUS user-defined material subroutine (UMAT) program is employed to simulate the assembly process of the pipe connection system with different pipe connection wall thickness. The results show that the drop of the fastening force occurs in the middle part of the SMA pipe connection, and with the same wall thickness of SMA pipe connection, the drop of the fastening force is more obvious before cooling down during the assembly process. The contact pressure between the inner wall of the SMA pipe connection and the outer wall of the connected pipe, and the martensite volume fraction of the inner wall of the pipe connection gradually increase with the increase of the wall thickness of the SMA pipe connection; and in the middle part of the inner wall of the SMA pipe connection, the martensite volume fraction of the inner wall of the pipe connection increases to different degrees. The work in this paper can provide the mechanical foundation and technical reference for the optimization design of SMA pipe connection.

Keywords

Shape Memory Alloy, Pipe Connection, Drop of Fastening Force, Finite Element Analysis

形状记忆合金管接头固紧力跌落数值仿真分析

康泽天¹, 周博^{1*}, 周昌野², 赵夕蕊², 薛世峰¹

¹中国石油大学(华东), 储运与建筑工程学院, 山东 青岛

*通讯作者。

²上海工程技术大学, 航空运输学院, 上海
Email: zhoubo@upc.edu.cn

收稿日期: 2018年7月24日; 录用日期: 2018年8月10日; 发布日期: 2018年8月20日

摘要

形状记忆合金(Shape memory alloy, SMA)管接头固紧力跌落, 会导致连接管件在后续使用过程中发生脱落, 进而影响整个系统的安全可靠性。为系统研究SMA管接头的固紧力跌落规律, 本文借助于非线性有限元软件ABAQUS二次开发用户自定义材料(UMAT)子程序, 对不同管接头壁厚连接系统的装配过程进行数值模拟分析。研究表明: 固紧力跌落发生在SMA管接头接触中间部位; 相同管接头壁厚下, 固紧力跌落现象在装配完成冷却前比冷却后更加明显; 随着管接头壁厚增大, 管接头内壁与被接管外壁之间接触压应力以及管接头内壁马氏体体积分数增大; 管接头内壁的马氏体体积分数在管接头内壁中间部位发生不同程度的增大现象。本文工作可为SMA管接头的优化设计提供力学基础和技术参考。

关键词

形状记忆合金, 管接头, 固紧力跌落, 有限元分析

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

形状记忆合金(Shape memory alloy, SMA)自被发现以来, 被广泛应用于航空航天、微机电系统、生物工程等领域[1] [2] [3]。不同于传统金属材料, SMA材料在热力学耦合作用下, 表现出独特的超弹性和形状记忆效应[4] [5]。其中, Ni-Ti形状记忆合金管接头就是利用SMA的形状记忆效应实现管路管线的固紧连接与密封[6], 并在军事科学领域内用于飞机、轮船等动力输油管路, 相比于传统的连接方式, SMA管接头具有安装环境适应性好、可操作性高, 安装过程简单等优点, 且不会对系统内其它组件产生机械损伤。

近年来, 为了提高SMA管接头的安全可靠性, 降低实验成本, 许多国内外学者对SMA管接系统进行了数值计算模拟。严金良等[7]采用Lagoudas三维本构模型和Total Lagrange增量法编制了SMA轴对称大变形有限元程序, 利用轴对称模型对不同几何尺寸和扩径内压下的SMA管接头与被接管之间的接触压应力进行数值模拟。韩冬等[8]通过将管接头截面简化为不同圆环, 模拟计算了TiNiFe-SMA管接头约束升温状态下紧固力的变化过程。郑雁军等[9]通过对Clausius-Clapeyron方程进行修正, 建立在大预应变下的NiTi-SMA回复力模型。利用此模型, 尹向前[10]和张慧博等[11]对TiNiNb管接头几何尺寸以及材料热胀系数对径向压应力的影响进行了数值分析。除此之外, 智友海等[12]基于马氏体相变晶格理论, 考虑马氏体不同变体种类, 从细观力学角度推导了马氏体不同变体的相变驱动力方程, 并采用有限元方法编制ABAQUS用户子程序, 对有无垫/镀/涂层的SMA管接头和被接管交界面在不同的外载荷和边界条件下的脱粘部位进行了分析和研究。康泽天等[13]借助于有限元软件ABAQUS二次开发用户材料子程序, 通过建立SMA管接头与被接管的光滑无摩擦有限元模型, 对SMA管接系统的装配过程进行数值模拟,

讨论了管接头几何尺寸和扩径压力对管接头和被接管之间接触压应力水平和压力峰值的影响规律。

文献[13]发现管接头壁厚较大时,管接头内壁与被接管外壁之间产生的接触压应力在管接头内壁中间部位会发生跌落现象。为系统研究 SMA 管接头壁厚对固紧力跌落现象的影响规律,本文借助 ABAQUS-UMAT 程序,对不同 SMA 管接头壁厚下的管接系统的装配过程进行数值模拟并对不同管接头壁厚下的应力跌落现象进行对比分析,考察壁厚对 SMA 管接头相变行为以及管接系统在装配完成冷却前后管接头和被接管之间接触压应力跌落现象的影响,为 SMA 管接系统的设计和优化提供指导意义。

2. 理论模型

2.1. SMA 本构关系

不考虑塑性应变, SMA 的热力学应变表达式[14]为

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}(\xi, T, \sigma_{ij}) = \varepsilon_{ij}^{el} + \varepsilon_{ij}^{tr} + \varepsilon_{ij}^{th} \quad (1)$$

其中, 马氏体体积分数 ξ , 温度 T 和应力分量 σ_{ij} 为内变量, ε_{ij}^{el} , ε_{ij}^{tr} 和 ε_{ij}^{th} 分别表示弹性应变分量, 相变应变分量和热应变分量。由式(1), 根据链式法则可得应变增量表达式为

$$d\varepsilon_{ij} = S_{ijkl}d\sigma_{kl} + \Lambda_{ij}d\xi + \Theta_{ij}dT \quad (2)$$

式中, $d\sigma_{ij}$, $d\xi$ 和 dT 分别表示应力张量增量分量, 马氏体体积分数增量和温度增量, S_{ijkl} , Λ_{ij} 和 Θ_{ij} 分别表示柔度张量分量, 相变流动张量分量和热膨胀张量分量。

由复合材料力学夹杂理论, Brison [15]将 S_{ijkl} 和 Θ_{ij} 看作马氏体体积分数的函数并表示为

$$F(\xi) = (1 - \xi)F_A + \xi F_M \quad (3)$$

其中, F 表示 S_{ijkl} 和 Θ_{ij} , 下标“ A ”和“ M ”分别表示奥氏体和马氏体。

类比 Mises 塑性流动法则, SMA 相变流动张量分量可以表示为

$$\Lambda_{ij} = \begin{cases} \frac{3H}{2\sigma^{eq}} \tilde{\sigma}_{ij} & \dot{\xi} > 0 \\ \frac{H}{\bar{\varepsilon}^{tr}} \varepsilon_{ij}^{tr} & \dot{\xi} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, H 为 SMA 在单轴拉伸过程中可产生的最大相变应变,

$$\sigma^{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} \tilde{\sigma}_{ij}^2} \quad (5)$$

表示等效应力, $\tilde{\sigma}_{ij}$ 表示偏应力张量分量,

$$\bar{\varepsilon}^{tr} = \sqrt{\frac{2}{3} (\varepsilon_{ij}^{tr})^2} \quad (6)$$

表示等效相变应变。

由式(2)~(4), 可得 SMA 增量型本构关系为

$$d\sigma_{kl} = C_{ijkl}(\xi)(d\varepsilon_{ij} - \Lambda_{ij}d\xi - \Theta_{ij}(\xi)dT) \quad (7)$$

式中, $C_{ijkl}(\xi)$ 为 SMA 材料的刚度张量分量, 可对柔度张量进行逆运算求得。

2.2. SMA 相变控制方程

采用 Liang-Rogers 余弦模型描述 SMA 在相变过程中马氏体体积分数与应力和温度之间的关系。假设

SMA 初始状态为奥氏体, 当温度 T 满足 $T > M_s$, 等效应力 σ^{eq} 满足 $\sigma_{ms} \leq \sigma^{eq} \leq \sigma_{mf}$ 时, SMA 发生正相变, 此时马氏体体积分数为

$$\xi = \frac{1}{2} \cos \left[\frac{\pi}{\sigma_{ms} - \sigma_{mf}} (\sigma^{eq} - \sigma_{mf}) \right] + \frac{1}{2} \quad (8)$$

式中, σ_{ms} 和 σ_{mf} 表示马氏体开始应力和结束应力, 且在相变过程中, 随着温度变化而发生变化, 采用 Brison 线性方程对其变化关系进行描述

$$\begin{cases} \sigma_{ms} = \sigma_{scr} + C_M (T - M_s) \\ \sigma_{mf} = \sigma_{fcr} + C_M (T - M_f) \end{cases} \quad (9)$$

其中, σ_{scr} 和 σ_{fcr} 表示马氏体开始应力和结束应力的初始值, C_M 为马氏体应力影响系数, M_s 和 M_f 表示马氏体开始温度和结束温度。同样, 采用 Brison 线性关系, 奥氏体开始和结束应力可以表示为

$$\begin{cases} \sigma_{as} = C_A (T - A_s) \\ \sigma_{af} = C_A (T - A_f) \end{cases} \quad (10)$$

当温度 T 满足 $T > A_s$, 等效应力 σ^{eq} 满足 $\sigma_{af} \leq \sigma^{eq} \leq \sigma_{as}$ 时, SMA 发生逆相变, 此时马氏体体积分数为

$$\xi = \frac{\xi_0}{2} \left\{ \cos \left[\frac{\pi}{A_f - A_s} \left(T - A_s - \frac{\sigma^{eq}}{C_A} \right) \right] + 1 \right\} \quad (11)$$

式中, ξ_0 表示逆相变开始时刻马氏体体积分数的初始值, C_A 为奥氏体应力影响系数, A_s 和 A_f 表示奥氏体开始和结束温度。

2.3. 物理模型

图 1 所示为 SMA 管接系统的装配剖面示意图。SMA 管接头内径 3.00 mm, 长度 11.00 mm, 初始壁厚 t 为 1.40 mm, 被接管外径为 3.16 mm, 壁厚 0.58 mm。取被接管与管接头接触一端, 长度 13.00 mm。取管接头的对称结构并建立 SMA 管接系统的全尺寸有限元模型, 考虑到实际工况, 对管接头中间部位面上节点施加轴向位移约束, 被接管远离管接头的端面上节点施加径向位移约束。在温度 45℃ 时, 对管接头进行扩径后卸载, 将被接管插入到管接头中, 对管接头加热至 80℃ 与连接管接触进行固紧, 然后将管接头冷却到加载温度 45℃, 完成整个装配冷却过程。

形状记忆合金管接头材料选取 Ni-Ti 合金, 其材料参数如表 1 所示。 E_A , E_M 为奥氏体和马氏体的弹性模量, θ_A , θ_M 为奥氏体和马氏体的热膨胀系数, 假设奥氏体和马氏体泊松比相等同为 μ , 且在热力加载过程中保持不变。被接管选取某种双线性随动强化弹塑性合金材料, 材料弹性模量为 122 GPa, 泊松比为 0.325, 屈服应力为 992 MPa, 强化模量为 18,676 MPa。

3. 模拟结果及分析

通过对不同管接头壁厚下 SMA 管接系统的装配过程进行有限元数值模拟, 得到装配完成冷却前后的应力分布情况。图 2 和图 3 所示为壁厚为 2.50 mm, 扩径内压为 170 MPa 时, 装配完成冷却前 80℃ 与冷却后 45℃ 被接管与管接头对称结构的 1/4 模型的等效应力分布云图。可以看出, 整个管接系统在装配完成冷却后的应力水平有明显降低, 因此对装配完成冷却前管接头内壁与被接管外壁之间接触压应力的分析研究具有重要意义。

图 4 和图 5 所示为管接头壁厚为 2.10 mm 和 2.50 mm 时, SMA 管接系统装配完成冷却前后管接头内

壁与被接管外壁之间接触压应力沿管接头内壁的变化曲线。通过对比可知，随着管接头壁厚增大，冷却前和冷却后管接头内壁接触压应力水平均增大，且相较于临近区域，接触压应力均在管接头内壁中间部位均发生跌落现象。当管接头壁厚为 2.10 mm 时，该部位接触压应力在冷却前较临近区域下降约 15.98 MPa，冷却后下降约 18.02 MPa。当管接头壁厚为 2.50 mm 时，该部位接触压应力较临近区域冷却前下降约 16.47 MPa，冷却后下降约 19.49 MPa。通过对比以上数据，可以看出，相同壁厚情况下，管接头内壁中间部位的接触压应力在冷却后的跌落现象更加明显。

图 6 和图 7 所示为管接头壁厚为 2.10 mm 和 2.50 mm 时，SMA 管接系统装配完成冷却前后管接头内壁马氏体体积分数沿管接头内壁的变化曲线。通过对比可知，随着管接头壁厚增大，管接头内壁与被接管外壁接触部位马氏体体积分数均增大。两种不同管接头壁厚的管接系统在冷却前后，管接头内壁马氏体体积分数均沿长度方向由两端向中间均先增大后逐渐减小后趋于稳定，但在管壁中间部位又突然增大。装配完成冷却前，不同壁厚管接头内壁与被接管外壁接触部位马氏体体积分数最大位置均出现在距离端口约 0.2 mm 处，当壁厚为 2.10 mm 时，马氏体体积分数最大约为 0.78，当壁厚为 2.50 mm 时，马氏体体积分数最大约为 0.82。装配完成冷却后，不同壁厚管接头内壁与被接管外壁接触部位马氏体体积分数最大位置出现位置不同，且当壁厚为 2.10 mm 时，马氏体体积分数最大位置出现在距离端口约 0.2 mm 处，

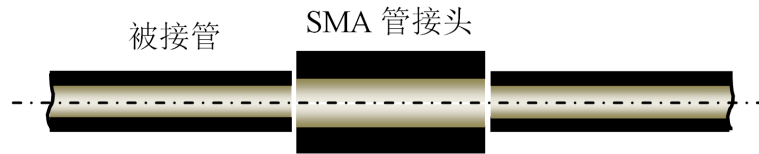


Figure 1. SMA pipe connection system assembly profile

图 1. SMA 管接系统装配剖面示意图

Table 1. Material parameters of NiTi shape memory alloy

表 1. NiTi 形状记忆合金材料参数[13]

E_N/GPa	E_M/GPa	μ	$\theta_A/(10^{-6}/^\circ\text{C})$	$\theta_M/(10^{-6}/^\circ\text{C})$	$C_N/(\text{MPa}/^\circ\text{C})$	$C_M/(\text{MPa}/^\circ\text{C})$
67	26.3	0.25	11	6.6	13.8	8
$M_s/^\circ\text{C}$	$M_f/^\circ\text{C}$	$A_s/^\circ\text{C}$	$A_f/^\circ\text{C}$	σ_{scr}/MPa	σ_{icr}/MPa	$H/10^{-2}$
39.35	28.24	51.75	72.05	100	170	6.7

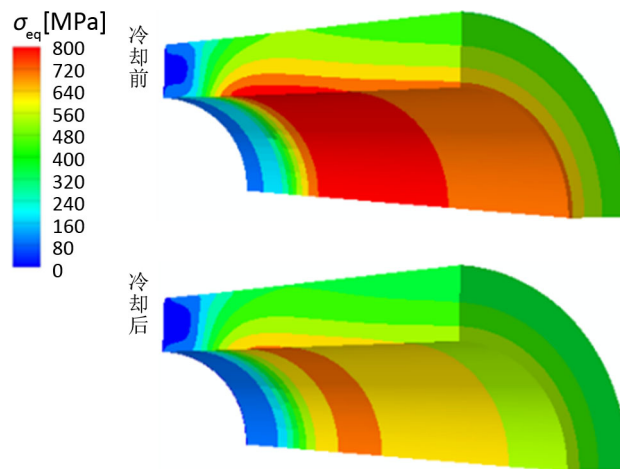


Figure 2. Equivalent stress distribution of the connected pipe before and after cooling down

图 2. 冷却前后被接管等效应力分布云图

最大值约为 0.86，当壁厚为 2.50 mm 时，马氏体体积分数最大位置出现在距离端口约 0.1 mm 处，最大值约为 0.92。

4. 结论

通过有限元数值模拟不同管接头壁厚的形状记忆合金(SMA)管接系统的装配过程，并对装配完成冷却前后管接头内壁与被接管外壁之间接触压应力以及管接头内壁马氏体体积分数分布情况进行分析讨论，

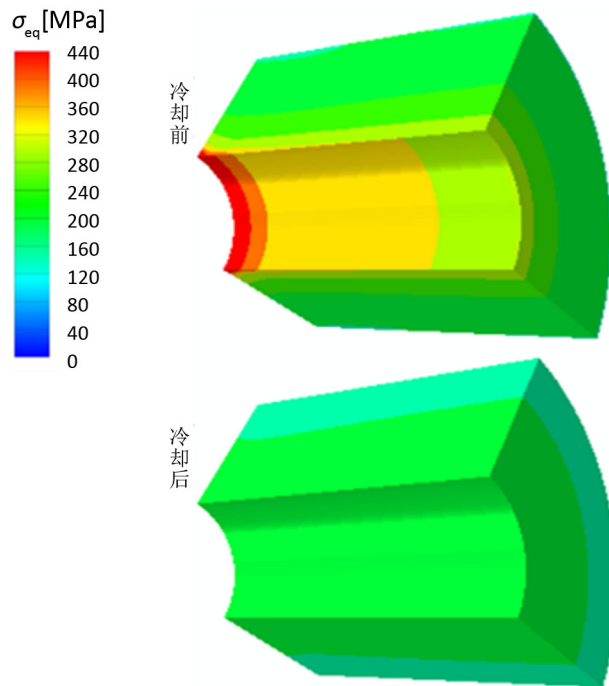


Figure 3. Equivalent stress distribution of the pipe connection before and after cooling down

图 3. 冷却前后管接头等效应力分布云图

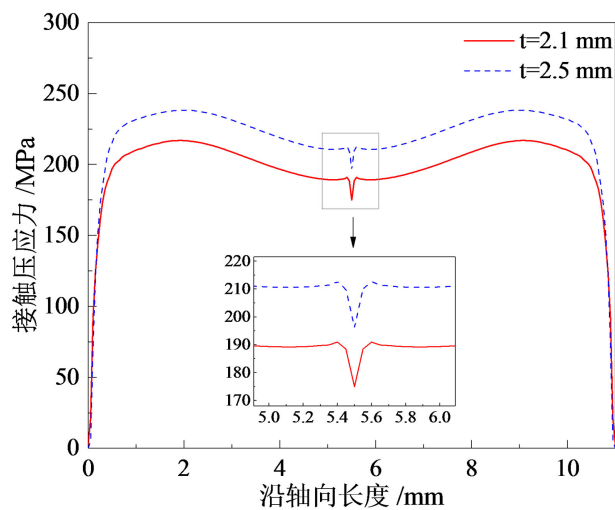


Figure 4. Contact pressure distribution curve of inner wall of pipe connection before cooling down

图 4. 冷却前管接头内壁接触压应力分布曲线

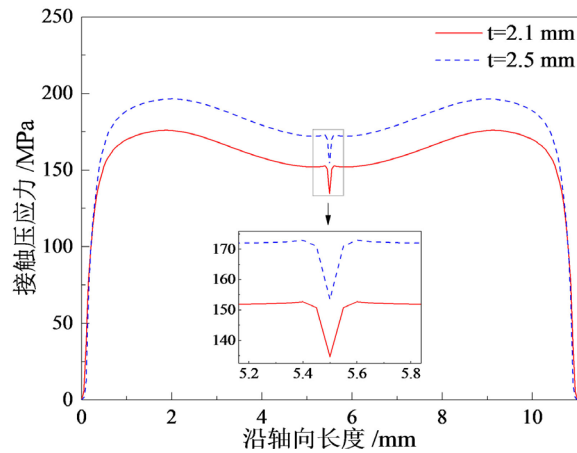


Figure 5. Contact pressure distribution curve of inner wall of pipe connection after cooling

图 5. 冷却后管接头内壁接触压应力分布曲线

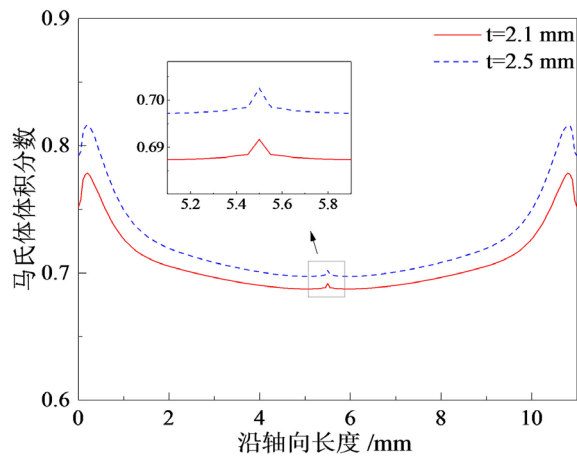


Figure 6. Martensite volume fraction distribution curve of inner wall of pipe connection before cooling down

图 6. 冷却前管接头内壁马氏体体积分数变化曲线

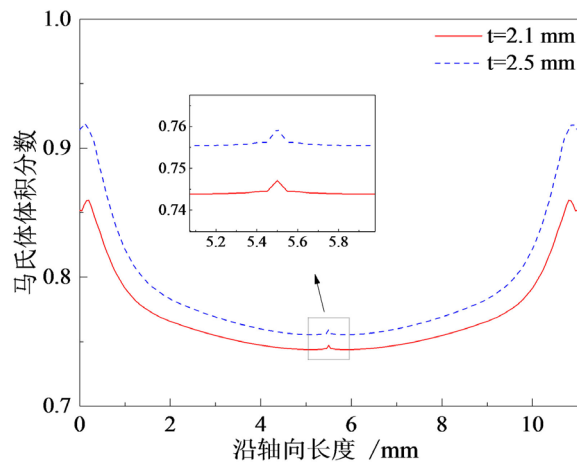


Figure 7. Martensite volume fraction distribution curve of inner wall of pipe connection after cooling down

图 7. 冷却后管接头内壁马氏体体积分数变化曲线

得到以下结论:

- 1) 管接头内壁与被接管外壁之间接触压应力在接触中间部位发生跌落;
- 2) 随着 SMA 管接头壁厚增大, 管接头内壁与被接管接触中间部位的接触压应力以及管接头内壁马氏体体积分数均增大;
- 3) SMA 管接头壁厚较大时, 管接头内壁与被接管接触中间部位的接触压应力在整个管接系统装配完成冷却前后均发生不同程度的跌落现象, 且在相同壁厚下, 冷却后的跌落现象相较于冷却前更加明显;
- 4) SMA 管接头壁厚较大时, 管接头内壁与被接管接触中间部位受力情况较为复杂, 该部位马氏体体积分数较邻近区域在整个管接系统装配冷却前后均发生不同程度的突然增大。

基金项目

国家重点研发计划(2017YFC0307604)资助项目。

参考文献

- [1] Dordoni, E., Meoli, A., Wu, W., *et al.* (2014) Fatigue Behavior of Nitinol Peripheral Stents: The Role of Plaque Shape Studied with Computational Structural Analyses. *Medical Engineering & Physics*, **36**, 842-849. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2014.03.006>
- [2] Azaouzi, M., Makradi, A. and Belouettar, S. (2012) Deployment of a Self-Expanding Stent inside an Artery: A Finite Element Analysis. *Materials & Design*, **41**, 410-420. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.05.019>
- [3] Hartl, D.J., Lagoudas, D.C. and Calkins, F.T. (2011) Advanced Methods for the Analysis, Design, and Optimization of SMA-Based Aero-Structures. *Smart Materials & Structures*, **20**, Article ID: 094006. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/20/9/094006>
- [4] Zhou, B. (2012) A Macroscopic Constitutive Model of Shape Memory Alloy Considering Plasticity. *Mechanics of Materials*, **48**, 71-81. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2012.02.001>
- [5] Cisse, C., Zaki, W. and Zined, T.B. (2016) A Review of Constitutive Models and Modeling Techniques for Shape Memory Alloys. *International Journal of Plasticity*, **76**, 244-284. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2015.08.006>
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 韩冬, 刘福顺, 李岩, 等. 不同壁厚的 TiNiFe 形状记忆合金管接头紧固力的模拟计算[J]. 航空学报, 2006, 27(4): 703-707.
- [9] 郑雁军, 崔立山, 杨大智. TiNi 形状记忆合金回复力模型[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(2): 180-182.
- [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): 579-583.
- [11] 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(b10): 510-513.
- [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.
- [13] 康泽天, 周博, 薛世峰. 形状记忆合金管接头热机耦合行为的有限元数值模拟[J]. 机械工程学报. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20180626.1641.026.html>
- [14] 周博, 刘彦菊, 王振清, 等. 形状记忆合金的热力学本构方程 [J]. 固体力学学报, 2011, 32(1): 21-28.
- [15] Brison, L.C. (1993) One-Dimension Constitutive Behavior of Shape Memory Alloys: Thermomechanical Derivation with Non-Constant Material Functions and Martensite Internal Variable. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **4**, 229-242. <https://doi.org/10.1177/1045389X9300400213>

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2324-8696，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：mos@hanspub.org