

# 形状记忆合金管道接头连接性能研究

谷凡,宋景睿,侯钰鑫,张玲

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究在轴向荷载作用下形状记忆合金(SMA)管道接头的连接性能,为SMA管道连接件的设计提供依据.方法 对SMA管道接头连接性能进行轴向拉伸试验,基于AURICCHIO提出SMA本构方程,采用ABAQUS有限元软件对SMA管道接头连接性能进行数值模拟研究.结果 在SMA管道连接件两端与被连接钢管相接触的部位,发生应力集中现象.随着过盈量的增加或者管道连接件壁厚的增加,SMA管道连接件与被连接钢管之间的径向应力、管道接头的极限轴向拉伸荷载均随之增大.结论 在SMA管道连接件的实际设计过程中,建议管道连接件与钢管的设计壁厚相等,过盈量控制在0.055 mm以内,并通过增加管道连接件轴向长度的方式来提高SMA管道接头的轴向拉伸强度.

**关键词** SMA管道接头;连接性能;轴向拉伸荷载;数值模拟

中图分类号 TU375 文献标志码 A

## Research on Connection Performance of Shape-Memory-Alloy Pipe Joint

GU Fan, SONG Jingrui, HOU Yuxin, ZHANG Ling

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** To study the connection performance of SMA pipe joint for providing the reference to SMA pipe connector design, the axial tensile experiment and numerical simulation by ABAQUS were carried out, which based on the SMA constitutive equation proposed by AURICCHIO. The numerical simulation result shows that with the increase of interference amount or the increase of the wall thickness of SMA pipe connector, the radial stress on SMA pipe connector and connected steel pipe increases, besides the ultimate axial tensile load of SMA pipe joint increases. In addition, the stress concentration occurs on the end of SMA pipe connector in contact with steel pipe. In the process of SMA pipe connector design, it is suggested that the wall thickness of SMA pipe connector should be equal to that of steel pipe, and the interference amount should be controlled within 0.055 mm. Moreover, the ultimate axial tensile load of SMA pipe joint can be improved by means of increasing the axial length of SMA pipe connector.

**Key words:** SMA pipe joint; connection performance; axial tensile load; numerical simulation

收稿日期:2019-06-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51308357);辽宁省科技厅科学技术计划项目(2016010626)

作者简介:谷凡(1973—),男,副教授,博士,主要从事结构工程和工程力学等方面研究.

20世纪40年代,美国学者 OLANDER 在 Au - Cd 合金中首次发现了形状记忆效应.之后各国学者陆续在 Cu - Sn 合金和 Cu - Zn合金中也发现了形状记忆效应<sup>[1-2]</sup>.目前,形状记忆合金(Shape-Memory-Alloys, SMA)已经发展为普通 SMA、高温 SMA、磁性 SMA 和复合 SMA 四类<sup>[3-7]</sup>.SMA 作为新型智能材料,具有优异的形状记忆效应、超弹性、耐腐蚀、高阻尼、高电阻等特性,采用 SMA 制造的管道连接件具有良好的稳定性和耐久性<sup>[8-11]</sup>.C. VELMURUGAN<sup>[12]</sup>通过试验研究了粒径和温度对模拟体液中 Ni - Ti 密度、微观结构和腐蚀行为的影响.白静<sup>[13]</sup>通过试验探究了制备方法以及 Ti 含量对 SMA 性能的影响规律.陈强<sup>[14]</sup>对 Ni - Ti - Nb 形状记忆合金接头径向应力、拉脱力和温度的关系进行了数值模拟研究.X. H. MIN<sup>[15-16]</sup>通过试验研究了 Mn 含量对 Fe - Mn - Si 形状记忆合金可回复应变的影响规律.金炼炼<sup>[17]</sup>对 Ni - Ti - Nb 形状记忆合金管道接头进行了恢复性能试验研究,探索了 SMA 管道连接件径向可恢复应变和恢复率的范围,并提出最佳预变形温度.康泽天<sup>[18]</sup>对 SMA 管道接头的热机耦合行为进行了数值模拟研究,并对 SMA 管道接头紧固力的影响因素进行了分析.由于 SMA 本构关系的复杂性,目前国内外学者对 SMA 管道接头连接性能的研究多局限于试验层面.

表1 SMA 管道接头试件参数

Table 1 Geometric parameters of SMA pipe joint specimen

试件	SMA 管道连接件					被连接钢管			配合间隙/ mm	过盈量/ mm
	外径/ mm	内径/ mm	壁厚/ mm	扩径前内径/ mm	预应变/ %	外径/ mm	内径/ mm	壁厚/ mm		
试件 1	41.2	37.1	2.0	36.55	1.5	36.88	34.88	1.0	0.110	0.165
试件 2	41.2	37.1	2.0	36.55	1.5	36.78	34.78	1.0	0.160	0.115

注:预应变 =  $\frac{\text{SMA 管道连接件扩径后的内径} - \text{SMA 管道连接件扩径前的内径}}{\text{SMA 管道连接件扩径前的内径}}$ ;配合间隙 =  $0.5 \times (\text{SMA 管道连接件扩}$

径后的内径 - 钢管外径);过盈量 =  $0.5 \times (\text{钢管外径} - \text{SMA 管道连接件扩径前的内径})$ .

## 1.2 试验过程

SMA 管道接头连接性能试验包括两部

笔者基于 AURICCHIO 提出的 SMA 本构方程,采用 ABAQUS 有限元软件对 SMA 管道接头连接性能进行数值模拟研究,分析了 SMA 管道接头的应力分布情况以及失效机理,探索了过盈量、SMA 管道连接件壁厚和 SMA 管道连接件长度等因素对 SMA 管道接头连接性能的影响规律,以期为 SMA 管道连接件的优化设计提供理论依据.

## 1 SMA 管道接头连接性能试验

### 1.1 试件参数

试验包括两个 SMA 管道接头试件.被连接钢管材质为 304 钢,试件 1 中的被连接钢管加工过程如下:首先在车床上加工出两根直径 36.88 mm、长度 80 mm 的钢棒,然后在车床上对每根钢棒加工出一端封闭的壁厚 1 mm、长度 50 mm 的钢管,最后在长度 30 mm 的封闭段加工出  $\Phi 18$  的螺纹以便于在夹具上固定.试件 2 中的被连接钢管外径为 36.78 mm,其加工过程与试件 1 中被连接钢管加工过程相同.两个 SMA 管道接头试件中的 SMA 管道连接件壁厚均为 2 mm,长度均为 30 mm,且均经过高温加热训练.高温加热训练过程如下:首先对 SMA 管道连接件进行扩径,然后在 600 °C 恒温加热 2h,最后冷却至室温,重复上述步骤两次.SMA 管道接头试件几何参数见表 1.

分:SMA 管道接头高温连接试验和 SMA 管道接头轴向拉拔试验.

### 1.2.1 高温连接试验

首先采用虎台钳将支架固定在试验台上,将 SMA 管道连接件与被连接钢管安装到固定支架上;然后在 SMA 管道连接件外部套上陶瓷加热器套管,在陶瓷加热器套管的开口处布置温度传感器,并通过温度表实时监控温度传感器的温度数据. SMA 管道接头高温连接试验装置如图 1 所示. 通过陶瓷加热器将 SMA 管道连接件加热至  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,此时 SMA 管道连接件发生马氏体逆相变并恢复至扩径前尺寸,使 SMA 管道连接件与被连接钢管之间产生过盈配合,进而将被连接钢管连接在一起(见图 2).

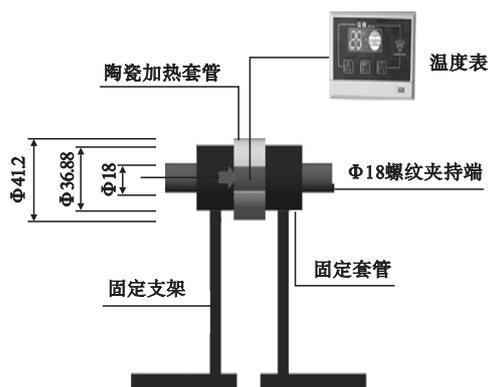


图 1 高温连接试验装置

Fig. 1 Schematic of high temperature connection test device

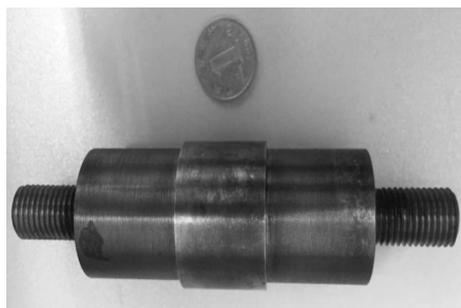


图 2 连接后的 SMA 管道接头

Fig. 2 SMA pipe joint specimen

### 1.2.2 轴向拉拔试验

将贴有应变片的 SMA 管道接头试件固定到万能试验机上进行轴向拉拔试验,加载速率为  $50\text{ N/s}$ ,试验装置如图 3 所示.



图 3 轴向拉拔试验装置

Fig. 3 Axial tensile test device

### 1.3 试验结果

SMA 管道接头试件的轴向拉伸荷载 - 位移曲线如图 4 所示. 从图中可以看出,当轴向拉伸荷载较小时,SMA 管道接头轴向位移与轴向拉伸荷载呈线性关系;当试件 1、试件 2 的轴向拉伸荷载分别达到  $4.2\text{ kN}$ 、 $3.0\text{ kN}$  时,SMA 管道连接件与被连接钢管间出现滑移现象;当轴向位移约为  $13\text{ mm}$  时,轴向拉伸荷载急剧降低,被连接钢管从 SMA 管道连接件中拔出,破坏形态如图 5 所示.

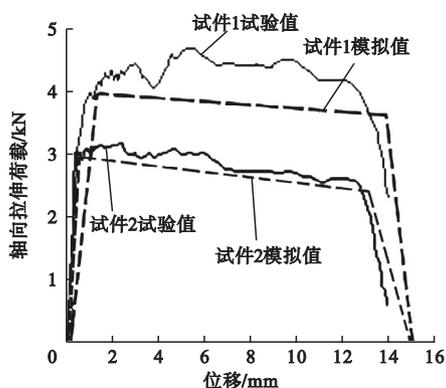


图 4 轴向拉伸荷载 - 位移曲线

Fig. 4 Axial tensile load-displacement curves

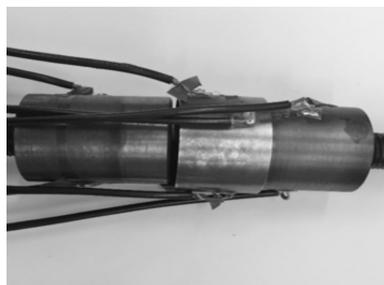


图 5 SMA 管道接头的破坏形态

Fig. 5 Destructive form of SMA pipe joint

## 2 SMA 管道接头数值模拟分析

### 2.1 建立数值模型

按照表1中试件1、试件2的几何参数,采用 ABAQUS 有限元软件建立 SMA 管道接头数值模型, SMA 管道连接件与被连接钢管均采用 CAX4R 轴对称实体单元. 由于 SMA 管道接头具有轴对称性,可采用母面建模. SMA 管道连接件采用 F. AURICCHIO<sup>[19]</sup>提出的 SMA 本构关系,材料参数见表2. 表

表2 SMA 管道连接件的材料参数

Table 2 Material parameters of SMA pipe connector

泊松比	弹性模量/GPa	相变临界应力/MPa	相变常数/(MPa·°C <sup>-1</sup> )	相变应变 $\epsilon_L$	参考温度 $t_0/°C$
0.33	$E_M = 55$	$\sigma_{TL}^S = 520$	$\left(\frac{\delta_\sigma}{\delta_t}\right)_L = 8.0$	0.067	600
		$\sigma_{TL}^E = 750$			
0.33	$E_A = 170$	$\sigma_{TU}^S = 550$	$\left(\frac{\delta_\sigma}{\delta_t}\right)_U = 13.8$	0.067	600
		$\sigma_{TU}^E = 200$			
		$\sigma_{CL}^S = 520$			

### 2.2 数值模拟结果与分析

在 SMA 管道接头轴向拉伸试验中,试件1、试件2 极限轴向拉伸荷载分别为 4.2 kN、3.0 kN;在 SMA 管道接头轴向拉伸数值模拟中,试件1、试件2 极限拉伸荷载分别为 3.95 kN、2.96 kN,误差分别为 6.3%、1.4%.

以 SMA 管道接头试件2 的数值模拟计算结果为例, SMA 管道连接件径向应力沿轴向方向分布较为均匀,沿径向方向由内向外逐渐减小;被连接钢管径向应力沿轴向方向分布较为均匀,沿径向方向由内向外逐渐增加(见图6). SMA 管道连接件环向应力在轴向方向、径向方向上分布均匀,仅在 134.7 ~ 146.5 MPa 波动;被连接钢管环向应力在轴向、径向方向上分布均匀,仅在 -275.8 ~ -302.3 MPa 波动(见图7). 在 SMA 管道连接件两端与被连接钢管相接触的部位,发生应力集中现象,两者相互作用的径向应力约为 -25.2 MPa,环向应力分别为 146.5 MPa 和 -302.3 MPa. 由于 SMA 管道连接件和被连接钢管均为薄壁圆管结构,因此根据内外

中,  $E_M$  为马氏体弹性模量;  $E_A$  为奥氏体弹性模量;  $\sigma_{TL}^S$ 、 $\sigma_{TL}^E$  分别为在参考温度  $t_0$  情况下,在拉伸加载过程中, SMA 发生正相变的开始临界应力、结束临界应力;  $\sigma_{TU}^S$ 、 $\sigma_{TU}^E$  分别为在参考温度  $t_0$  情况下,在拉伸卸载过程中, SMA 发生逆相变的开始临界应力、结束临界应力;  $\sigma_{CL}^S$  为在参考温度  $t_0$  情况下,在压缩加载过程中, SMA 发生正相变的开始临界应力;  $(\delta_\sigma/\delta_t)_L$ 、 $(\delta_\sigma/\delta_t)_U$  分别为 SMA 在加载、卸载过程中的相变常数;  $\epsilon_L$  为相变应变.

压作用下薄壁圆筒应力分布的 Lamè 公式可知,环向应力远大于径向应力.

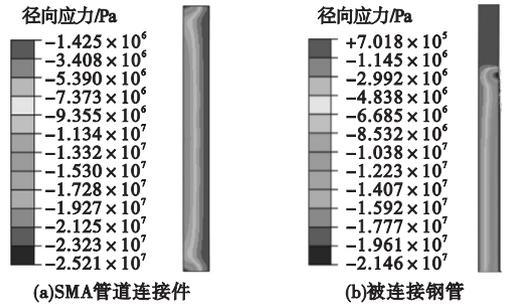


图6 SMA 管道接头径向应力云图

Fig. 6 Radial stress contour plots of SMA joint

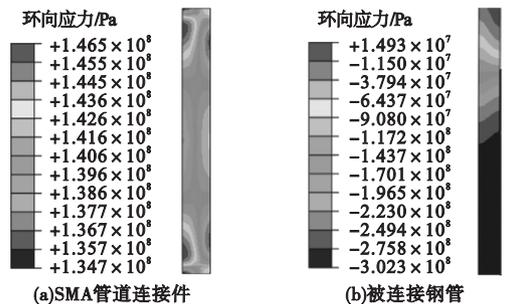


图7 SMA 管道接头环向应力云图

Fig. 7 Circumferential stress contour plots of SMA joint

### 2.3 SMA 管道接头连接性能的影响因素

#### 2.3.1 过盈量对 SMA 连接接头的影响

采用 ABAQUS 软件建立 5 组 SMA 管道接头的数值模型, SMA 管道连接件与被连接钢管之间的过盈量分别为 0.065 mm、0.115 mm、0.165 mm、0.215 mm 和 0.265 mm, 其他几何参数与表 1 中试件 2 几何参数相同. 如前所述, 在 SMA 管道连接件两端与被连接钢管相接触的部位, 发生应力集中现象. 提取该部位处的径向应力值(在该部位处, SMA 管道连接件径向应力值与被连接钢管径向应力值相等), 可以得到 SMA 管道连接件与被连接钢管的最大径向应力值与过盈量之间的关系曲线(见图 8). 同时, 根据数值模拟计算结果, 可以得到 SMA 管道接头的极限轴向拉伸荷载与过盈量之间的关系曲线(见图 9).

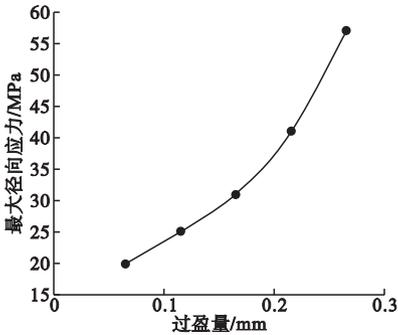


图 8 最大径向应力与过盈量关系曲线

Fig. 8 Relationship between the maximum radial stress value and interference amount

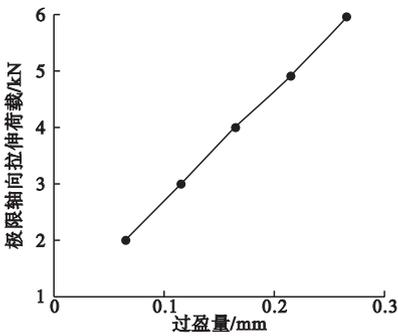


图 9 极限轴向拉伸荷载与过盈量关系曲线

Fig. 9 Relationship between ultimate axial tensile load and interference amount

从图 8 和图 9 可以看出, 随着 SMA 管道连接件与被连接钢管之间过盈量的增加, 两

者之间的径向应力和 SMA 管道接头的极限轴向拉伸荷载均随之增大.

#### 2.3.2 连接件壁厚对 SMA 连接接头的影响

采用 ABAQUS 软件建立 5 组 SMA 管道接头的数值模型, SMA 管道连接件的壁厚分别为 1 mm、2 mm、3 mm、4 mm 和 5 mm, 其他几何参数与表 1 中试件 2 几何参数相同. 提取 SMA 管道连接件两端与被连接钢管相接触部位处的径向应力值, 可以得到 SMA 管道连接件与被连接钢管最大径向应力值与 SMA 管道连接件壁厚之间的关系曲线(见图 10). 同时根据数值模拟计算结果, 可以得到 SMA 管道接头的极限轴向拉伸荷载与 SMA 管道连接件壁厚之间的关系曲线(见图 11).

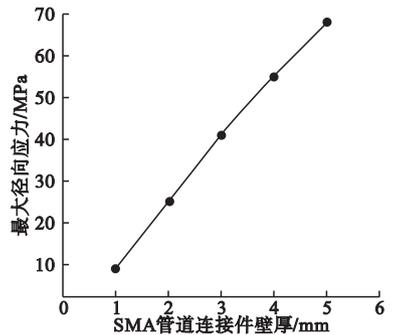


图 10 最大径向应力与 SMA 管道连接件壁厚关系曲线

Fig. 10 Relationship between the maximum radial stress value and the wall thickness of SMA pipe connector

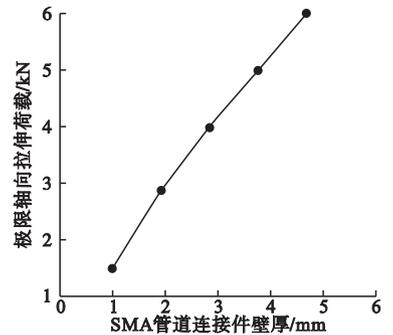


图 11 极限轴向拉伸荷载与 SMA 管道连接件壁厚关系曲线

Fig. 11 Relationship between ultimate axial tensile load and the wall thickness of SMA pipe connector

从图 10 和图 11 可以看出,随着 SMA 管道连接件壁厚的增加,两者之间的径向应力和 SMA 管道接头的极限轴向拉伸荷载均随之增大,且与 SMA 管道连接件壁厚近似呈线性关系.同时,随着 SMA 管道连接件壁厚的增加,被连接钢管的 Mises 应力随之增加,而 SMA 管道接头的 Mises 应力随之降低.

### 2.3.3 连接件长度对 SMA 连接接头的影响

采用 ABAQUS 软件建立 5 组 SMA 管道接头数值模型, SMA 管道连接件长度分别为 30 mm、32 mm、34 mm、36 mm 和 38 mm,其他几何参数与表 1 中试件 2 几何参数相同.提取 SMA 管道连接件两端与被连接钢管相接触部位处的径向应力值,可以得到 SMA 管道连接件与被连接钢管的最大径向应力值与 SMA 管道连接件长度之间的关系曲线(见图 12).同时根据数值模拟计算结果,可以得到 SMA 管道接头的极限轴向拉伸荷载与 SMA 管道连接件长度之间的关系曲线(见图 13).从图 12 和图 13 可以看出,随着 SMA 管道连接件长度的增加,两者之间的径向应力几乎保持不变,而 SMA 管道接头的极限轴向拉伸荷载均随之增大,且与 SMA 管道连接件长度近似呈线性关系.

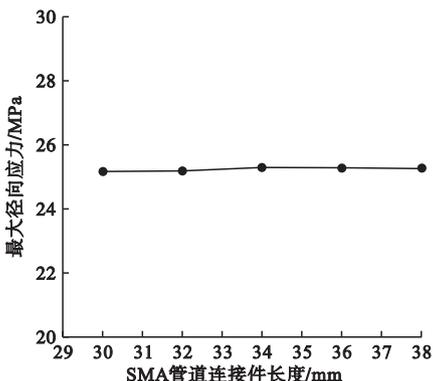


图 12 最大径向应力与 SMA 管道连接件长度关系曲线

Fig. 12 Relationship between the maximum radial stress value and the length of SMA pipe connector

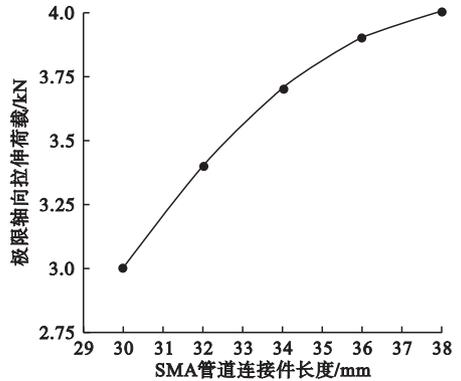


图 13 极限轴向拉伸荷载与 SMA 管道连接件长度关系曲线

Fig. 13 Relationship between ultimate axial tensile load and the length of SMA pipe connector

## 3 结论

(1) 在 SMA 管道连接件两端与被连接钢管相接触的部位发生应力集中现象,因此可考虑在 SMA 管道连接件两端设置内倒角以缓解该部位处的应力集中现象.

(2) 随着过盈量增加, SMA 管道接头连接性能得以提升,但应注意 SMA 管道连接件与被连接钢管 Mises 应力不宜超出材料屈服强度,建议 SMA 管道连接件与被连接钢管之间的过盈量控制在 0.055 mm 以内.

(3) 增加 SMA 管道连接件壁厚,等效于增加 SMA 管道连接件相对刚度,这将导致 SMA 管道连接件环向应力的降低和被连接钢管环向应力的增加.在 SMA 管道接头设计过程中,为了提高 SMA 管道接头的轴向拉伸强度,不宜采取单方面增加 SMA 管道连接件壁厚的方式,建议通过增加 SMA 管道连接件轴向长度的方式来提高 SMA 管道接头的轴向拉伸强度.

## 参考文献

- [1] 任勇生,田继爽,刘银磊,等.形状记忆合金纤维复合材料梁非线性变形、热屈曲和振动[J].山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(1):99-110.  
(REN Yongsheng, TIAN Jishuang, LIU Yinlei,

- et al. Nonlinear deformation, thermal buckling and vibration of SMA fiber composite beams[J]. Journal of Shandong university of science and technology( natural science), 2019, 38(1):99-110.)
- [2] 任红梅,彭功. SMA在结构加固修复中的应用研究[J]. 结构工程师, 2018, 34(6):175-180.  
(REN Hongmei, PENG Gong. Research on application of SMA in structure strengthening and rehabilitation[J]. Structural engineers, 2018, 34(6):175-180.)
- [3] KHAN M I, PEQUEGNAT A, ZHOU Y N. Multiple memory shape memory alloys[J]. Advanced engineering materials, 2013, 15(5):386-393.
- [4] NISKANEN A J, LAITINEN I. Design and simulation of a magnetic shape memory (MSM) alloy energy harvester[J]. Advances in science technology, 2013, 78:58-62.
- [5] GHOSH P, RAO A, SRINIVASA A R. Design of multi-state and smart-bias components using shape memory alloy and shape memory polymer composites[J]. Materials and design, 2013, 44:164-235.
- [6] 贺志荣,王启,邵大伟. 时效对 Ti-50. 8Ni-0. 3Cr 形状记忆合金组织和超弹性的影响[J]. 金属学报, 2012, 48(1):56-62.  
(HE Zhirong, WANG Qi, SHAO Dawei. Effect of aging on microstructure and super elasticity in Ti-50. 8Ni-0. 3Cr shape memory alloy[J]. Acta metallurgica sinica, 2012, 48(1):56-62.)
- [7] HE Z, LIU M. Effect of heat treatment on transformation behavior of Ti-Ni-V shape memory alloy[J]. Materials science and engineering A, 2011, 528:6993-6997.
- [8] SAIKRISHNA C N, RAMAIAH K V, PAUL D, et al. Enhancement in fatigue life of Ni-Ti shape memory alloy thermal actuator wire[J]. Acta materialia, 2016, 102:385-396.
- [9] HE Zhirong, LIU Manqian. Effects of annealing and deforming temperature on microstructure and deformation characteristics of Ti-Ni-V shape memory alloy[J]. Materials science and engineering B, 2012, 177(12):986-991.
- [10] 鲁军,苏超锋. 磁控形状记忆合金传感器优化设计[J]. 电器工程学报, 2018, 13(12):1-6.  
(LU Jun, SU Chaofeng. Optimized design of magnetically controlled shape memory alloy sensor[J]. Journal of electrical engineering, 2018, 13(12):1-6.)
- [11] 董天宇. 形状记忆合金及其应用[J]. 世界有色金属, 2018(18):196-198.  
(DONG Tianyu. Shape memory alloys and their applications[J]. World nonferrous metals, 2018(18):196-198.)
- [12] VELMURUGAN C, SENTHIKUMAR V, KAMALA P S. Microstructure and corrosion behavior of Ni-Ti shape memory alloys sintered in the SPS process[J]. International journal of minerals, metallurgy and materials, 2019, 26(10):1311-1321.
- [13] 白静,杨祺,赵晨羽,等. NiMnGaTi 铁磁形状记忆合金的马氏体相变和磁性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(10):1398-1402.  
(BAI Jing, YANG Zhen, ZHAO Chenyu, et al. Martensitic transformation and magnetic properties of NiMnGaTi ferromagnetic shape memory alloy[J]. Journal of northeastern university( natural science), 2019, 40(10):1398-1402.)
- [14] 陈强,王克鲁,鲁世强,等.  $\Phi 10$  mm NiTiNb 形状记忆合金管接头数值模拟分析[J]. 热加工工艺, 2017, 46(2):74-77.  
(CHEN Qiang, WANG Kelu, LU Shiqiang, et al. Numerical simulation analysis of  $\Phi 10$  mm NiTiNb shape memory alloy pipe joint[J]. Hot working technology, 2017, 46(2):74-77.)
- [15] MIN X H, SAWAGUCHI T, OGAWA K, et al. An attempt to lower Mn content of Fe-17 Mn-6Si-0. 3C shape memory alloy[J]. Journal of alloys and compounds, 2013, 577(11):478-482.
- [16] MIN X H, SAWAGUCHI T, OGAWA K, et al. Shape memory effect in Fe-Mn-Ni-Si-C alloys with low Mn contents[J]. Materials science and engineering A, 2011, 528(15):5251-5258.
- [17] 金炼炼,鲁世强,李贵发,等. 预变形温度对 Ni47-Ti44-Nb9 合金  $\Phi 8$  mm 管接头恢复性能的影响[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2012, 26(4):71-77.  
(JIN Lianlian, LU Shiqiang, LI Guifa, et al. Effect of pre-deformed temperature on recovery property of Ni47-Ti44-Nb9 alloy  $\Phi 8$  mm pipe joint[J]. Journal of Nanchang hangkong university( natural sciences), 2012, 26(4):71-77.)
- [18] 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, 2018, 54(18):68-75.  
(KANG Zetian, ZHOU Bo, XUE Shifeng. Finite element numerical simulation on thermo-mechanical coupling behavior in shape memory alloy pipe connection[J]. Journal of mechanical engineering, 2018, 54(18):68-75.)
- [19] AURICCHIO F, ROBERT L Taylor. Shape-memory alloys: modelling and numerical simulations of the finite-strain super elastic behavior[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1997, 143(1/2):175-194.  
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)