

FeMnSiCr 系形状记忆合金管道连接件理论与试验研究

王伟*, 王博, 阎石, 孙丽

(沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要: 以 Brinson 本构模型为基础, 结合平面轴对称问题中的拉梅公式, 推导出一个简化的本构模型, 该模型可以用来计算形状记忆合金管道连接件与被连接钢管接触面上的径向压应力, 并对形状记忆合金管道接头结构进行数值模拟分析. 对 3 组 FeMnSiCr 系形状记忆合金管道连接件与被连接钢管进行了高温连接试验, 并测试了连接后管道连接件的拉脱力. 通过经验公式可得到管道接头结构接触面上径向压应力的大小. 数值模拟和试验结果对比表明, 简化的本构模型是有效的, 能够为形状记忆合金管道连接件的应用提供一定的依据.

关键词: 形状记忆合金; 管道连接件; 高温连接; 智能材料; 拉拔试验

中图分类号: TG139.6; TB34 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201806004

0 引言

管道运输作为目前非常重要的一种物资运送方式, 被世界上许多国家广泛采用. 然而, 由于各种原因所导致的管道结构泄漏事故也经常发生, 同时引起火灾、爆炸等灾难性后果, 造成巨大的经济损失和人员伤亡^[1-2]. 大部分泄漏事故是由管道连接处的腐蚀等破坏^[3]而引起的, 针对传统连接方式的缺陷, 研究者开始寻找新型的管道连接件来替代传统的连接件, 形状记忆合金(SMA)在发生形状记忆效应(SME)时所产生的恢复力, 恰好可以用来作为连接管道的紧固力, 因此 SMA 被认为是一种很有潜力的管道连接件替代材料^[4-7]. 20 世纪 90 年代, 日本学者 Ohtsuka 等^[8-9]在 FeMnSi 合金中加入了适当的 Cr 和 Ni 元素, 不仅改善了铁基合金的耐腐蚀性, 同时提高了其形状记忆效应. 这种合金还具有易加工且强度较高的特点, 而且价格低廉, 这些特点使铁基形状记忆合金在大型管道连接领域的普遍应用成为可能.

近年来国内外学者针对铁基 SMA 材料和管道连接件进行了大量的研究工作: 刘兴江等^[10]提

出了通过电脉冲磁场技术, 改变 FeMnSiCr 合金材料的内部结构, 进而提高其形状记忆效应; 杨军等^[11]对 FeMnSi 系形状记忆合金试样采用快速凝固的方法, 提高材料的屈服强度, 从而提高材料的形状回复率; 王巍^[12]针对大庆石油总厂的碱管道接头腐蚀泄漏问题, 采用铁基 SMA 管道接头连接方式, 防漏效果明显; 万家琨等^[13]将特制的黏结剂涂在铁基形状记忆合金管接头与被连接管的接触面上, 以此来增强管接头的耐腐蚀性、密封性与抗拉拔能力. 随着人们对铁基 SMA 材料性能的进一步开发, 加工技术的不断完善, 相信该材料被大规模应用于管道连接领域的前景将很广阔. 然而, 大多数研究者比较热衷于从材料试验的角度出发, 研究铁基 SMA 材料的热训练方法以及管道连接件的加工方式, 而对于形状记忆合金材料的本构模型, 以及管道接头结构的应力分布数值模拟方法等问题研究不够深入.

本文通过分析形状记忆合金管道连接件(简称 SMA 管接头)与被连接钢管之间的应力分布状态, 利用弹塑性理论相关知识以及形状记忆合金材料的相变动力学相关模型, 推导出管道接头

收稿日期: 2018-01-29; 修回日期: 2018-08-30.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51308357); 辽宁省自然科学基金资助项目(201602627); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划资助项目(LJQ2015091).

作者简介: 王伟* (1978-), 女, 博士, 副教授, E-mail: starwei2002@163.com; 王博 (1992-), 女, 硕士, E-mail: 379481479@qq.com; 阎石 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: syan1962@163.com; 孙丽 (1974-), 女, 教授, 博士生导师, E-mail: sunli2000sy@163.com.

结构的简化计算模型,利用该模型可以计算 SMA 管接头与被连接钢管之间的径向压应力与各参数(如 SMA 管接头厚度、SMA 管接头扩径率、被连接钢管外半径等)之间的关系.作为验证,对 3 组 SMA 管接头进行高温连接试验与拉拔试验,以证明 FeMnSiCr 系 SMA 管接头作为新型管接头的可行性及简化模型的有效性.

1 SMA 管接头理论模型

1.1 Brinson 模型

SMA 管接头安装前的初始半径需要比被连接钢管小,将其扩径后套到被连接钢管外侧,然后在 SMA 管接头外侧对其进行加热,使 SMA 产生奥氏体相变,在 SMA 管接头半径回复的过程中,由于受到被连接钢管的限制,在 SMA 管接头中就会产生恢复应力 σ ,该恢复应力可以近似地利用 Brinson 模型来计算.Brinson^[14]将马氏体百分数分成 ξ_σ 、 ξ_T 两部分,分别表示由应力和温度诱发的马氏体相变含量,于是 SMA 的本构关系可由下式得到:

$$\sigma - \sigma_0 = D(\xi)\bar{\epsilon} - D(\xi_0)\bar{\epsilon}_0 + \Omega(\xi)\xi_\sigma - \Omega(\xi_0)\xi_{\sigma 0} + \Theta(T - T_0) \quad (1)$$

式中: D 为弹性模量, $D(\xi) = D_A + \xi(D_M - D_A)$,其中 D_A 和 D_M 分别为奥氏体态和马氏体态的弹性模量; $\bar{\epsilon}$ 为材料应变; Θ 为热弹性张量(在计算中一般取常数); Ω 为相变张量,看成一个非独立的材料常数,可利用关系式 $\Omega = -D\bar{\epsilon}_1$ 求出,其中 $\bar{\epsilon}_1$ 为材料的最大残余应变;下标 0 表示施加荷载前材料的初始状态值.

在 Brinson 模型中还给出了不同的相变过程中两种马氏体体积含量的表达式:

(1) 变为单一的马氏体变体

当 $T > T_{Ms}$ 且 $\sigma_s^{cr} + C_M(T - T_{Ms}) < \sigma < \sigma_f^{cr} + C_M(T - T_{Ms})$ 时

$$\xi_\sigma = \frac{1 - \xi_{\sigma 0}}{2} \cos \left\{ \frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} [\sigma - \sigma_f^{cr} - C_M(T - T_{Ms})] \right\} + \frac{1 + \xi_{\sigma 0}}{2} \quad (2)$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{1 - \xi_{\sigma 0}} (\xi_\sigma - \xi_{\sigma 0}) \quad (3)$$

当 $T < T_{Ms}$ 且 $\sigma_s^{cr} < \sigma < \sigma_f^{cr}$ 时

$$\xi_\sigma = \frac{1 - \xi_{\sigma 0}}{2} \cos \left[\frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} (\sigma - \sigma_f^{cr}) \right] + \frac{1 + \xi_{\sigma 0}}{2} \quad (4)$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{1 - \xi_{\sigma 0}} (\xi_\sigma - \xi_{\sigma 0}) + \Delta T_{\xi} \quad (5)$$

其中,当 $T_{Mf} < T < T_{Ms}$ 且 $T < T_0$ 时, $\Delta T_{\xi} = \frac{1 - \xi_{T0}}{2} \{ \cos[a_M(T - T_{Mf})] + 1 \}$. 否则 $\Delta T_{\xi} = 0$.

(2) 马氏体逆相变

当 $T > T_{As}$ 且 $C_A(T - T_{Af}) < \sigma < C_A(T - T_{As})$

时

$$\xi = \frac{\xi_0}{2} \left\{ \cos \left[a_A \left(T - T_{As} - \frac{\sigma}{C_A} \right) \right] + 1 \right\} \quad (6)$$

$$\xi_\sigma = \xi_{\sigma 0} - \frac{\xi_{\sigma 0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi) \quad (7)$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi) \quad (8)$$

式中: T_{Ms} 、 T_{Mf} 、 T_{As} 和 T_{Af} 分别是 SMA 的马氏体相变开始和结束温度、奥氏体相变开始和结束温度; σ_s^{cr} 和 σ_f^{cr} 分别是马氏体相变开始和结束的临界应力; C_M 和 C_A 分别是正逆相变线的斜率; a_A 和 a_M 为材料常数,定义为

$$a_A = \frac{\pi}{T_{Af} - T_{As}}, a_M = \frac{\pi}{T_{Ms} - T_{Mf}} \quad (9)$$

SMA 管接头初始半径比被连接钢管的要小,扩径后对其进行加热,使其产生奥氏体相变,在 SMA 管接头半径回复的过程中,由于受到被连接钢管的限制,在 SMA 管接头中就会产生恢复应力 σ ,而该恢复应力在管道接头结构中提供环向应力 σ_θ ,继而在被连接钢管与 SMA 管接头的接触面上产生径向压应力 σ_r ,对被连接钢管产生紧固力,达到紧固的目的.

1.2 被连接钢管与 SMA 管接头之间的应力状态分析

由弹塑性理论可知,本文所研究的 SMA 管接头与被连接钢管之间的应力状态满足平面轴对称问题^[15].管道接头结构的受力如图 1 所示,图中 R_a 、 R_b 、 R_c 、 R_d 分别表示被连接钢管的内径与外径,以及 SMA 管接头的内径和外径.如图 1(a) 所示,被连接钢管只受到外压力 p_2 作用,如图 1(b) 所示,SMA 管接头只受到内压力 p_1 作用.根据拉梅公式可以得到被连接钢管中径向应力、环向应力及紧固力之间的关系:

$$\begin{aligned} \sigma_{sr} &= -\frac{R_b^2 p_2}{R_b^2 - R_a^2} \left(1 - \frac{R_a^2}{r^2} \right) \\ \sigma_{s\theta} &= -\frac{R_b^2 p_2}{R_b^2 - R_a^2} \left(1 + \frac{R_a^2}{r^2} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

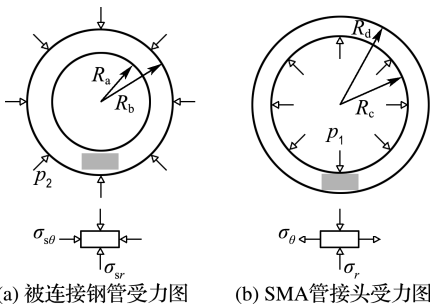


图 1 管道接头结构受力分析

Fig. 1 Stress analysis of pipe joint structure

以及 SMA 管接头中径向应力、环向应力及紧固力之间的关系：

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{R_c^2 p_1}{R_d^2 - R_c^2} \left(1 - \frac{R_d^2}{r^2} \right) \\ \sigma_\theta &= \frac{R_c^2 p_1}{R_d^2 - R_c^2} \left(1 + \frac{R_d^2}{r^2} \right)\end{aligned}\tag{11}$$

其中 r 表示所求应力的点到圆心的距离^[16]。由上式可推导出在 SMA 管接头中用环向应力表示的紧固力和径向应力的表达式：

$$p_1 = \left[\left(\frac{R_d^2}{R_c^2} - 1 \right) / \left(1 + \frac{R_d^2}{r^2} \right) \right] \sigma_\theta\tag{12}$$

$$\sigma_r = \left[\left(1 - \frac{R_d^2}{r^2} \right) / \left(1 + \frac{R_d^2}{r^2} \right) \right] \sigma_\theta\tag{13}$$

$$p_1 = -p_2\tag{14}$$

1.3 数值计算

SMA 管接头要想和被连接钢管紧固在一起，在母相状态下内径必须要比被连接钢管外径小。在低温情况下对其进行扩径，在扩径的过程中实际上是孪晶马氏体在外力作用下转变成解孪晶马氏体的过程，其应力应变关系满足式(1)~(5)。将 SMA 管接头套在被连接钢管外侧以后对 SMA 管接头进行加热，使其产生形状记忆效应，SMA 管接头欲恢复到扩径前的半径，但其形状的回复受到了被连接钢管的限制，所以在 SMA 管接头中产生了较大的恢复力。此时的应力应变与温度之间的关系满足式(1)、(6)~(8)、(10)~(13)，根据以上公式，编制 Matlab 程序对 SMA 管接头进行模拟计算，可以计算出在不同扩径率、不同壁厚等条件下，SMA 管接头与被连接钢管之间径向压应力的大小，并描述出该径向压应力与各影响因素之间的关系。图 2 为 Matlab 程序框图。铁基 SMA 材料参数如下： $D_A = 5\ 001\ \text{GPa}$ ， $D_M = 170\ \text{GPa}$ ， $T_{Mf} = 20\ ^\circ\text{C}$ ， $T_{Ms} = 50\ ^\circ\text{C}$ ， $T_{As} = 170\ ^\circ\text{C}$ ，

$T_{Af} = 340\ ^\circ\text{C}$ ， $C_M = 8\ \text{MPa}/^\circ\text{C}$ ， $C_A = 13.8\ \text{MPa}/^\circ\text{C}$ ， $\Theta = 1.1\ \text{MPa}/^\circ\text{C}$ 。

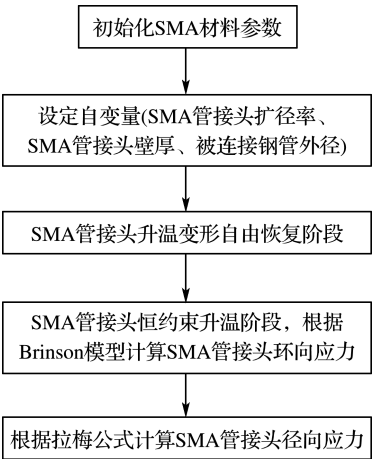


图 2 Matlab 程序框图

Fig. 2 Flow chart of Matlab program

2 FeMnSiCr 系 SMA 管接头试验

本次试验主要分两部分进行：第一部分为 SMA 管接头的高温连接试验，利用 SMA 材料的形状记忆效应，使 SMA 管接头与被连接钢管连接在一起；第二部分为 SMA 管接头的拉拔试验，将连接好的 SMA 管接头与被连接钢管放在万能拉拔试验机上进行拉拔试验，测试计算 SMA 管接头的紧固力大小。

2.1 试验用材料与设备

试验中的铁基 SMA 管接头(图 3 所示)由日本 AWAJI 金属股份有限公司生产加工。管接头化学成分均匀，表面质量良好，主要成分所占比例为锰(Mn)28%，硅(Si)6%，铬(Cr)5%，剩余为铁(Fe)。为了得到更好的形状记忆效应，该公司对一部分管接头进行了热训练，其训练过程如下：先将 SMA 管接头在室温中扩径 5%，然后在 600℃ 高温下加热 2 h，再经室温冷却；上述步骤重复两次。试验用 3 种尺寸的管接头，第 1 种与第 3 种尺寸管接头为训练过的，第 2 种尺寸管接头是未经过训练的，具体尺寸参数如表 1 所示。

试验中所需的被连接钢管(图 4 所示)选用 304 钢。为了保证被连接钢管的整体性，并且方便在万能拉拔试验机上进行拉拔试验，选择使用整根钢棒在车床上车出一端封闭的 50 mm 钢管，并在封闭端留出 30 mm 长的 $\phi 18$ 的螺纹钢棒，便于

固定在夹具上。



图 3 形状记忆合金管接头
Fig. 3 SMA pipe joint

表 1 AWAJI 公司提供的 Fe-Mn-Si-Cr 形状记忆合金管接头尺寸参数

Tab.1 The size parameters of Fe-Mn-Si-Cr SMA pipe joint provided by AWAJI company

编号	外径/mm	内径/mm	长度/mm	扩径率/%
1	41.163	37.1	30.1	5.8
2	41.442	37.1	30.0	5.9
3	41.218	37.1	29.9	5.4



图 4 被连接钢管
Fig. 4 Connected steel pipe

加热过程中必要的试验器材是加热器。为了得到更加精确的试验数据,避免被连接钢管的热膨胀现象影响试验结果,使用圆管式陶瓷加热器来对管道连接件进行加热。陶瓷加热套管的尺寸是定制的,与 SMA 管接头的尺寸基本吻合,内径 41.4 mm,长度 30 mm。图 5 即为定制好的陶瓷加热器。

除此之外,还有拉拔试验中用来测量应变的应变片、电线与采集板,以及进行拉拔试验的万能拉拔试验机,用来进行拉拔试验并记录数据。

2.2 SMA 管接头高温连接试验

考虑到加热温度超过 300 ℃,远高于室温,表面热量的流失会造成被加热的 SMA 管接头在加

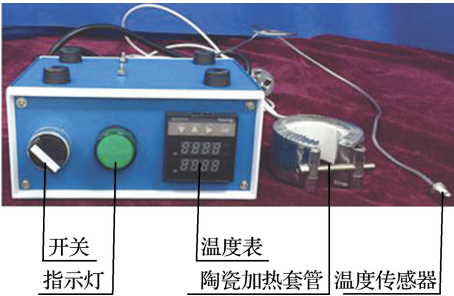


图 5 陶瓷加热器
Fig. 5 Ceramic heater

热过程中的实际温度要比仪表显示的温度低。为避免由此带来的误差,设计了一个小的温度监控试验,由此试验得知:当加热时,加热器开口处的温度到达 300~319 ℃则 SMA 管接头的内部温度就能达到相变温度区间 300~350 ℃。因此,将温度表预设温度调至 319 ℃,此时 SMA 管接头整体将达到 350 ℃。如图 6、7 所示,将各个试件连接好,再将传感器固定,最后将整个试件覆盖上高

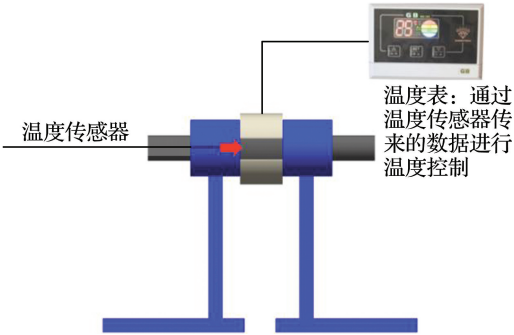


图 6 高温连接试验整体示意图
Fig. 6 Overall schematic diagram of high temperature connection experiment

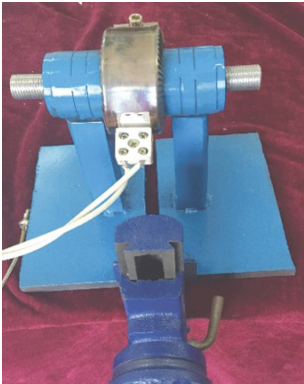


图 7 高温连接试验
Fig. 7 High temperature connection experiment

温保温棉,避免热量损失对试验结果产生较大影响。

如图 8 所示,经过高温加热,当温度超过奥氏体相变开始温度后,铁基 SMA 管接头由于发生奥氏体相变,其直径逐渐缩小,最终 SMA 管接头与被连接钢管产生过盈配合,固定并连接了两根被连接钢管.加热后用游标卡尺测量了 SMA 管接头内外径,具体尺寸如表 2 所示.与表 1 对比,各试件的内外径都有了较大变化,验证了该形状记忆合金作为管接头的可行性。

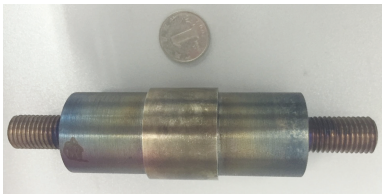


图 8 连接完成的管道连接件
Fig. 8 Connected pipe joint

表 2 加热后 Fe-Mn-Si-Cr 形状记忆合金管接头内外径

Tab. 2 Inside and outside diameters of Fe-Mn-Si-Cr SMA pipe joint after heating		
编号	外径/mm	内径/mm
1	40.940	36.850
2	41.097	36.915
3	40.943	36.753

2.3 拉拔试验

将连接好的 SMA 管接头和被连接钢管固定在万能拉拔试验机上,设置加载步为每秒加载 50 N,每加载到 200 N 停顿 3 s 记录应变片数据,加载到 10 kN,停止加载.拉拔加载过程,发现管件呈滑移破坏,基本没有明显变形。

图 9 为万能拉拔试验机上所记录的 3 组 SMA 管接头的位移与拉拔力曲线.3 组 SMA 管接头在加热前与被连接钢管的配合间隙分别为 0.225、0.150 和 0.320 mm.由试件 1 与试件 3 曲线对比可以看出,对于同样为训练过的 SMA 管接头,试件 3 由于配合间隙较大,在奥氏体相变过程中无约束变形的能量损失较大,因此其轴向承载力比试件 1 要小,但两者的轴向承载力均大于试件 2,这是由于未训练的 SMA 管接头形状记忆效应较差,变形回复较小的缘故。

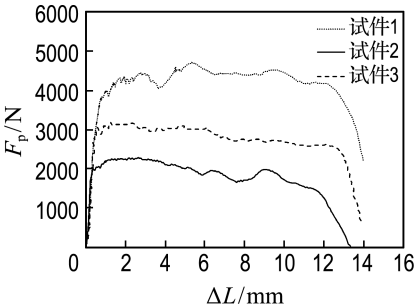


图 9 位移-拉拔力曲线
Fig. 9 Curve of displacement and pulling force

3 理论与试验结果对比

根据图 9 中的试验数据,可以近似得到 3 组试件的拉拔力分别为 4、2 和 3 kN,将其代入径向应力近似公式^[17]:

$$\sigma_r = -\frac{F_p}{\pi d \mu l_e}$$

(15)

式中: F_p 为拉拔力, μ 为 SMA 管接头与被连接钢管之间的摩擦因数,取 0.15; d 为被连接钢管的外径; l_e 为 SMA 管接头的连接长度,可取实际管接头长度的一半。

试验用 FeMnSiCr 系形状记忆合金管道连接件相关参数见 1.3 节,最大残余应变 $\bar{\epsilon}_1$ 取 0.067,1.1 MPa/℃的热弹性张量 Θ 适合经过热训练的 SMA 材料,对于没有经过热训练的 SMA 材料该值取 0.55 MPa/℃.经计算可得到 3 组试件的径向应力大小,并与试验得到的径向应力进行了比较,如表 3 所示.结果表明,模型计算结果与试验验证结果具有良好的吻合性,证明了 FeMnSiCr 系形状记忆合金管接头作为新型管接头的可行性及简化模型的有效性.此外,经过热训练的 SMA 管接头具有更好的效果。

表 3 径向应力结果对比表
Tab. 3 The results contrast table of radial stress

编号	径向应力试验值/MPa	径向应力计算值/MPa	误差/%
1	15.30	14.39	5.9
2	7.66	7.15	6.7
3	11.58	12.15	4.9

4 结 论

(1)利用形状记忆合金材料的 Brinson 模型,

结合平面轴对称问题的拉梅公式,推导出适合于 SMA 管接头受力特点的计算模型,可以用该模型来计算 SMA 管接头产生形状记忆效应时,因为变形受到被连接钢管的限制而产生的径向恢复力的大小.计算结果与试验测得的结果较为接近,误差在 7% 以内.

(2)通过 FeMnSiCr 系 SMA 管接头装配及拉拔试验,可以进一步验证该 SMA 管接头代替传统管道连接方式的可行性;同时可以看出热训练是影响 SMA 管接头紧固效果的关键因素,在相同情况下,训练过的 SMA 管接头最终的紧固力要优于未经训练的 SMA 管接头;除此以外 SMA 管接头与被连接钢管之间的配合间隙是另一个关键的影响因素,相同情况下配合间隙增大 42.2%,由于 SMA 管接头在加热恢复变形过程中损失的能量比较多,导致最终的紧固力减少 24.3%.

参考文献:

- [1] 戚爱华. 我国油气管道运输发展现状及问题分析[J]. 国际石油经济, 2009, **17**(12):57-59, 84.
QI Aihua. Chinese oil and gas pipeline transport development status and analysis of associated problems [J]. **International Petroleum Economics**, 2009, **17**(12):57-59, 84. (in Chinese)
- [2] 郎需庆,赵志勇,官宏,等. 油气管道事故统计分析与安全运行对策[J]. 安全技术, 2006, **6**(10): 15-17.
LANG Xuqing, ZHAO Zhiyong, GONG Hong, *et al.* Accident statistical analysis and safety operation measures of the oil-gas pipeline [J]. **Journal of Security and Technology**, 2006, **6**(10): 15-17. (in Chinese)
- [3] 李昌连. 大庆油田金属腐蚀防护及其发展趋势[J]. 油田地面工程, 1992, **11**(4):49-52.
LI Changlian. Protection and development trend of metal corrosion in Daqing oil field [J]. **Oil-Gas Field Surface Engineering**, 1992, **11**(4): 49-52. (in Chinese)
- [4] 戴品强,刘声恒. 含碳 Fe-Mn-Si 记忆合金的记忆性能研究[J]. 功能材料, 1998, **29**(5):499-501.
DAI Pinqiang, LIU Shengheng. Investigation on shape memory properties of Fe-Mn-Si alloy with carbon addition [J]. **Journal of Functional**

- Materials**, 1998, **29**(5):499-501. (in Chinese)
- [5] ZHAO Chenxu, LIANG Gongyin, LI Chenglao, *et al.* Influence of cerium, titanium and nitrogen on shape memory effect of Fe-Mn-Si-Cr-Ni alloys [J]. **Scripta Materialia**, 1998, **38**(7):1163-1168.
- [6] TAN Shiming, LAO Jinhai, YANG Shiwei. Influence of grain size on shape memory effect of polycrystalline Fe-Mn-Si alloys [J]. **Scripta Metallurgica et Materialia**, 1991, **25**(11): 2613-2615.
- [7] 李建忱,吕晓霞,蒋青,等. 铁基形状记忆合金的研究进展与展望[J]. 功能材料, 2000, **31**(1):9-11,14.
LI Jianchen, LV Xiaoxia, JIANG Qing, *et al.* Progress and prospect of iron-base shape memory alloys [J]. **Journal of Functional Materials**, 2000, **31**(1):9-11,14. (in Chinese)
- [8] OHTSUKA H, KAJIWARA S, ISHIHARA T. The effect of cyclic transformation on the shape memory characteristic in an Fe-Mn-Si-Cr-Ni alloy [J]. **Materials Research Society Symposia Proceedings**, 1991, **246**:189-194.
- [9] OHTSUKA H, KAJIWARA S, ISHIHARA T. Effect of $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ cyclic transformations on the shape memory characteristics of an Fe-Mn-Si-Cr-Ni alloy [J]. **Materials Characterization**, 1994, **32**(3): 229-235.
- [10] 刘兴江,史艳华,齐锦刚,等. 电脉冲磁场对 FeMnSiCr 合金铸态管接头形状记忆效应的影响[J]. 功能材料, 2005, **36**(12):1866-1868.
LIU Xingjiang, SHI Yanhua, QI Jingang, *et al.* Influence of electric pulsed magnetic field on SME of FeMnSiCr alloy casting pipe joint [J]. **Journal of Functional Materials**, 2005, **36**(12):1866-1868. (in Chinese)
- [11] 杨军,邓龙江,王昕,等. 快速凝固对 Fe-Mn-Si 系形状记忆合金组织和性能的影响[J]. 功能材料, 2011, **42**(4):711-713,717.
YANG Jun, DENG Longjiang, WANG Xin, *et al.* The influence of rapidly solidification on the structure and property of the Fe-Mn-Si base shape memory alloy [J]. **Journal of Functional Materials**, 2011, **42**(4):711-713, 717. (in Chinese)
- [12] 王巍. 铁基形状记忆合金管接头在碱管道上的应用[J]. 石油化工设备技术, 1998, **19**(1):63-65.

WANG Wei. The application of ferritic shape memory alloy pipe connection on alkali pipe line [J]. **Petro-Chemical Equipment Technology**, 1998, **19**(1):63-65. (in Chinese)

[13] 万家瑰,林柏松. 铁基形状记忆合金管接头在油田管道连接中的应用[J]. 润滑与密封, 2009, **34**(7): 94-96, 101.

WAN Jiagui, LIN Baisong. Application of the iron-based shape memory alloy pipe joint in pipe connection of oil field [J]. **Lubrication Engineering**, 2009, **34**(7):94-96,101. (in Chinese)

[14] BRINSON L C. One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys; thermomechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable [J]. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, 1993, **4**(2):229-242.

[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.

YIN Xiangqian, GAO Baodong, MI Xujun. Numerical simulation of radial pressures for TiNiNb pipe-couplings [J]. **Chinese Journal of Rare Metals**, 2008, **32**(5):579-583. (in Chinese)

[16] 徐秉业,刘信声. 应用弹塑性力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1995:183.

XU Bingye, LIU Xinsheng. **Application of Elastic-Plastic Mechanics** [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995:183. (in Chinese)

[17] 骆华锋,孟祥刚. 铁基形状记忆合金管道接头的性能研究[J]. 化工机械, 2008, **35**(6):327-329,364.

LUO Huafeng, MENG Xianggang. Property study on the iron-base shape memory alloy pipe joints [J]. **Chemical Engineering & Machinery**, 2008, **35**(6):327-329,364. (in Chinese)

Theoretical and experimental study
of FeMnSiCr system shape memory alloy pipe joint

WANG Wei* , WANG Bo, YAN Shi, SUN Li

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

Abstract: The Brinson constitutive model is used in conjunction with the Lamé formula for a plane axial symmetry problem to deduce a simplified constitutive model that can be used to calculate the radial compressive stress on the contact surface between a shape memory alloy (SMA) pipe joint and steel tube. The numerical simulation analyses of the SMA pipe joint structures are also conducted. Three groups of FeMnSiCr series SMA pipe joints connected to steel tubes are tested at high temperatures, and the pull-off forces of these connected pipe joint are measured. Further, the radial compressive stresses on the contact surfaces of these pipe joint structures can be obtained using an empirical formula. The comparisons between the numerical simulations and experimental results show that the simplified constitutive model is effective and can provide a stable basis for application of SMA pipe joints.

Key words: shape memory alloy; pipe joint; high temperature connection; smart materials; pullout test