

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.10.003

采用记忆合金垫片的12 kV/1 250 A开关柜安全试验研究

殷立庚, 陈天翔, 刘勇铭, 黄哲志

(厦门理工学院高压技术福建省重点实验室, 福建 厦门 361024)

摘要: 开关柜过热直接影响设备的安全稳定运行, 开关柜柜内铜排连接部位的接触电阻是引起过热的重要原因之一。为了降低接触电阻提高设备运行的安全性, 文中在开关柜中采用了记忆合金垫片, 通过测试记忆合金垫片回复力随温度变化的关系, 对比研究了采用普通垫片和记忆合金垫片的连接部位温度升高对接触电阻的影响, 试验研究了额定电流下采用两种垫片时开关柜内部的温升。研究发现记忆合金垫片在预应变约束下回复力随温度升高显著增大, 在连接部位松动条件下, 采用记忆合金垫片比普通垫片的接触电阻明显降低, 温升下降3~6 °C。记忆合金垫片的应用有助于提高开关柜运行的安全性。

关键词: 记忆合金; 垫片; 接触电阻; 温升; 试验研究

Experimental Study on Safety in 12 kV/1 250 A Switchgear Applied Shape Memory Alloy Spacer

YIN Ligeng, CHEN Tianxiang, LIU Yongming, HUANG Zhezhi

(Fujian Key Laboratory of High Voltage Engineering, Xiamen University of Technology, Fujian Xiamen 361024, China)

Abstract: Overheating may affect the security and stability of operation in switchgears. Contact resistance of copper connection is one of the most important causes of overheating. In order to reduce contact resistance and to improve the safety of equipment operation, the switchgears mentioned in paper use shape memory alloy spacer. Through the experiment of shape memory alloy spacer, the relationship between recovery stress and temperature is analyzed. The effect of temperature rise on the contact resistance is studied in connection used common spacer and shape memory alloy spacer, and the inner temperature rise of switchgears used both spacers at rated current is also studied. The results show that, the recovery stress of memory alloy spacer increases significantly with the rise of temperature in the condition of tightening loose, the contact resistance of connection applied shape memory alloy spacer decreases significantly compared to the commons, and there is also 3~6 °C temperature drop of the temperature rise, which will help the improvement of stability of switchgears.

Key words: shape memory alloy; spacer; contact resistance; temperature rise; experimental research

0 引言

随着电网发展, 铠装中置式金属封闭开关柜在10 kV 电网中得到了广泛的应用, 由于开关柜柜体密封性较高, 其内部常出现过热现象, 尤其是在一些负荷较重的地区, 普遍存在开关柜柜内温升超标问题, 温升超标直接影响设备的安全运行^[1-3]。目前, 针对开关柜过热问题的研究主要集中在两个方面:

开关柜温度在线监测系统的研究^[4-6]以及减小接触电阻的设计方法^[7-9]。但在线监测系统只能对温度进行监控, 并不能从根本上减小发热, 而减小接触电阻的设计方法往往忽略了长期运行时过热引起的接触压力下降, 接触压力下降导致接触电阻增大, 接触电阻增大导致温度进一步升高, 如此恶性循环必将引发安全问题。

文中对记忆合金垫片进行了热力学特性试验, 研究其在预应变约束条件下回复力随温度升高的

收稿日期:2016-05-11; 修回日期:2016-07-13

基金项目:福建省科技项目(2014H6028, 2015H0041);厦门市科技计划项目(3502Z20153024)。

Project Supported by Science and Technology Program of Fujian Province (2014H6028, 2015H0041), Xiamen Science and Technology Research Program(3502Z20153024).

变化关系,分析了记忆合金垫片对铜排接触部位接触电阻的影响,以及对整体开关柜温升的影响。

1 形状记忆效应

一般金属材料在承受应力达到材料屈服点后,会产生塑性形变,即使应力卸载后也会造成永久性变形,而记忆合金在低温状态下承受应力所产生的塑性形变,在受热后则会消失,恢复到原来的形状,称此特性为形状记忆效应(shape memory effect, SME)^[10]。

形状记忆合金在高温和低温状态下晶体结构分别呈现奥氏体相和马氏体相,由奥氏体相转变为马氏体相的过程称之为马氏体相变,反之为马氏体逆相变。马氏体相变及逆相变过程受到温度、载荷影响^[11]。

形状记忆效应示意图见图 1。相变及逆相变过程中分别有 4 个特征温度点和 2 个特征应力点,分别是:马氏体相变起始温度 M_s ; 马氏体相变结束温度 M_f ; 马氏体逆相变起始温度 A_s ; 马氏体逆相变结束温度 A_f ; 退孪晶起始应力 σ_s ; 退孪晶结束应力 σ_f 。对奥氏体相记忆合金进行降温处理,发生马氏体相变,温度 $T < M_f$ 后,记忆合金处于孪晶马氏体状态,储存弹性能,施加外应力 $\sigma > \sigma_f$ 后,诱发孪晶马氏体去孪晶释放弹性能且宏观上产生塑性形变,载荷卸除后形状基本保持不变,待加热升温 $T > A_f$ 后,马氏体逆相变使记忆合金恢复原来的形状^[12-13]。

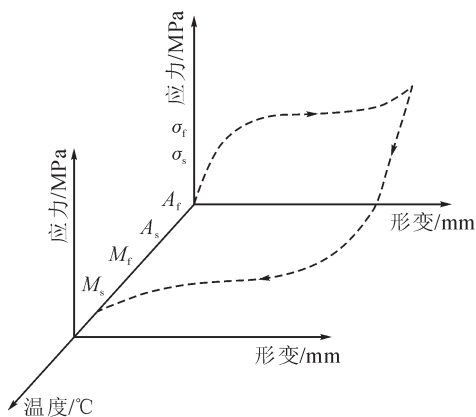


图 1 形状记忆效应示意图

Fig. 1 The curve of shape memory effect

记忆合金在预应变约束条件下加热并非恢复原来的形状而是因恢复受阻产生回复力,回复力计算模型见图 2。采用卸载引起的马氏体逆相变关系修正无相变过程的克劳修斯—克拉珀龙方程描述^[14-15]。

假设记忆合金由状态 1(T, σ, ξ)到状态 3($T+dT, \sigma+d\sigma, \xi+d\xi$)拆分为由状态 1(T, σ, ξ)到状态 2($T+dT, \sigma+d\sigma, \xi$)再到状态 3($T+dT, \sigma+d\sigma, \xi+d\xi$)的过程,其中

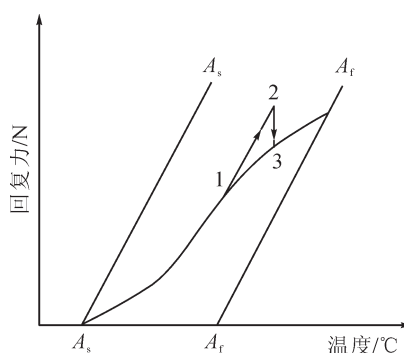


图 2 回复力计算模型

Fig. 2 The model of recovery stress

T 为温度, σ 为回复力, ξ 马氏体分数。

状态 1 到状态 2 过程中无马氏体逆相变,满足克劳修斯—克拉珀龙方程,弹性形变 ε 下对应的回复力为

$$d\sigma = E\varepsilon. \quad (1)$$

式(1)中, $E = \xi(E_M - E_A) + E_A$ 。

状态 2 到状态 3 过程中发生马氏体逆相变,弹性形变 ε 卸载引起回复力降低

$$d\sigma_u = E_u \varepsilon. \quad (2)$$

式(2)中, E_u 为伪弹性卸载模量。

由状态 1 到状态 3, 回复力总变化为两个过程回复力变化的差值

$$d\sigma_r = d\sigma - d\sigma_u = d\sigma(1 - E_u/E). \quad (3)$$

回复力与温度的关系为

$$d\sigma_r/dT = C_A(1 - E_u/E). \quad (4)$$

记忆合金在预应变约束条件下加热产生的回复力最大可达 600 MPa, 在工程上具有广泛的应用前景^[16]。

2 记忆合金垫片试验

采用 12 mm 规格记忆合金垫片 (Ni=50%, Ti=50%, 均为质量分数) 进行回复力测试, 并安装在 12 kV/1 250 A 开关柜上进行接触电阻和温升试验。

2.1 记忆合金垫片回复力测试

回复力测试在电子万能试验机 UTM4104 和恒温箱 WGDN-7150S 上进行, 常温下在电子万能试验机上对记忆合金垫片进行压缩应变获得预应变, 设定恒温箱温度对约束状态下的记忆合金垫片加热, 采用热电偶检测垫片温度, 通过万能试验机记录加热冷却过程中回复力的变化曲线。试验共研究了 10%、20%、30%、40% 等 4 种预应变下的回复力随温度升高的变化曲线以及 40% 预应变热循环的回复力变化。

2.2 接触电阻试验

将 3 根规格相同的铜排分别用紧固螺栓以相同的扭矩两两锁紧, 两处连接部位分别采用记忆合金垫片和普通垫片, 将铜排放入温控箱中加热, 回路电阻测试仪记录加热过程中接触电阻的变化曲线。试验共研究了 6 种扭矩下(5、10、15、20、40、60 N·m)采用记忆合金垫片与普通垫片接触电阻变化曲线。

2.3 整体开关柜温升试验

将记忆合金垫片和普通垫片以相同的初始扭矩分别装在 12 kV/1 250 A 开关柜铜排的连接部位, 开关柜以额定电流运行, 采用热电偶实时监测连接部位的温度变化, 直至接触点温升稳定后则停止通电。试验中扭矩值设定为 40 N·m 和 60 N·m。

3 试验结果与分析

3.1 记忆合金垫片不同预应变下回复力的变化

记忆合金垫片回复力曲线见图 3。记忆合金垫片在预应变约束条件下回复力随温度的升高而增大, 大致可划分 3 个阶段: 相变回复阶段; 应力诱发马氏体阶段; 奥氏体屈服阶段^[17]。第 2 阶段回复率增大速率高于第 1、3 阶段, 并且第 2 阶段的温度范围随着预应变的增大而增大。

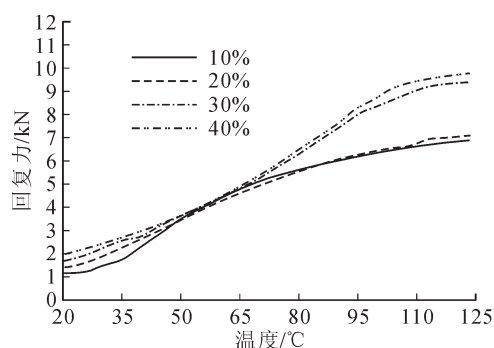


图 3 记忆合金垫片回复力曲线

Fig. 3 The recovery stress curve of shape memory alloy spacer

不同的预应变对记忆合金垫片受热产生的回复力有着较大的影响。相同温度下回复力随着预应变的增大而变大, 预应变到达 40% 时, 回复力最大可达 9.77 kN。

记忆合金垫片热循环回复力曲线见图 4。在第 1 次循环过程中降温曲线的回复力初始下降不明显且高于升温过程中同温度下的回复力, 随后在 100 °C 出现了明显下降, 与升温曲线差值越来越小, 出现交叉点后继续下降至 0.9 kN, 远低于最初加载时力值 1.9 kN。

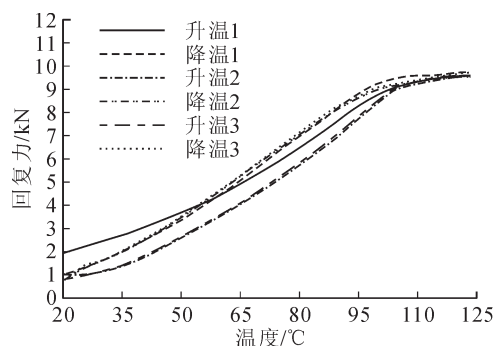


图 4 记忆合金垫片热循环回复力曲线

Fig. 4 Thermal cyclic recovery stress curve of shape memory alloy spacer

在随后的 2 次循环过程中, 后 2 次降温曲线与第 1 次降温曲线基本保持一致, 后 2 次升温曲线几乎无差异但明显低于第 1 次升温曲线, 由此可看出, 记忆合金垫片在 2 次热循环后回复力—温度曲线趋于稳定, 在高温状态下能够保持较大的回复力。文[15, 18]提到记忆合金在加载约束条件下经过一定次数循环后形状记忆效应便趋于稳定。

3.2 采用普通垫片和记忆合金垫片的连接部位接触电阻对比试验

采用普通垫片和记忆合金垫片的接触电阻—温度曲线见图 5。由图 5(a)、(b)、(c) 可知, 在 5、10、15 N·m 扭矩下, 采用记忆合金垫片的接触电阻随温度升高明显降低, 在 20~50 °C 接触电阻下降很大, 随后温度升高接触电阻下降减小并逐渐趋于稳定。扭矩为 5、10、15 N·m 时接触电阻最大下降分别为 5、2.5、2 $\mu\Omega$, 下降率为 83.3%、62.5%、66.7%, 而采用普通垫片的接触电阻则无明显减小。

由图 5(e)、(d)、(f) 可知, 在 20、40、60 N·m 扭矩下, 采用记忆合金垫片和普通垫片的接触电阻均无明显变化, 没有因温度升高而产生下降, 在现有仪器精度条件下(1 $\mu\Omega$) 接触电阻基本都保持在 1~1.5 $\mu\Omega$ 之间。

记忆合金垫片在预应变约束条件下随着温度升高而产生回复力, 回复力增大了连接部位的正压力, 根据工程上接触电阻估算公式 $R_j = K(0.102F)^{-0.5}$, 接触压力的增大必将造成接触电阻下降。接触电阻下降在 20~50 °C 间较大, 是由于记忆合金垫片回复力在第 2 阶段上升速率较大。而普通垫片连接部位接触电阻的波动则可能受到材料膨胀和电阻率增大的双重影响, 相比采用记忆合金垫片的并无明显下降趋势。

3.3 采用普通垫片和记忆合金垫片的开关柜温升对比试验

采用普通垫片和记忆合金垫片下的温升曲线

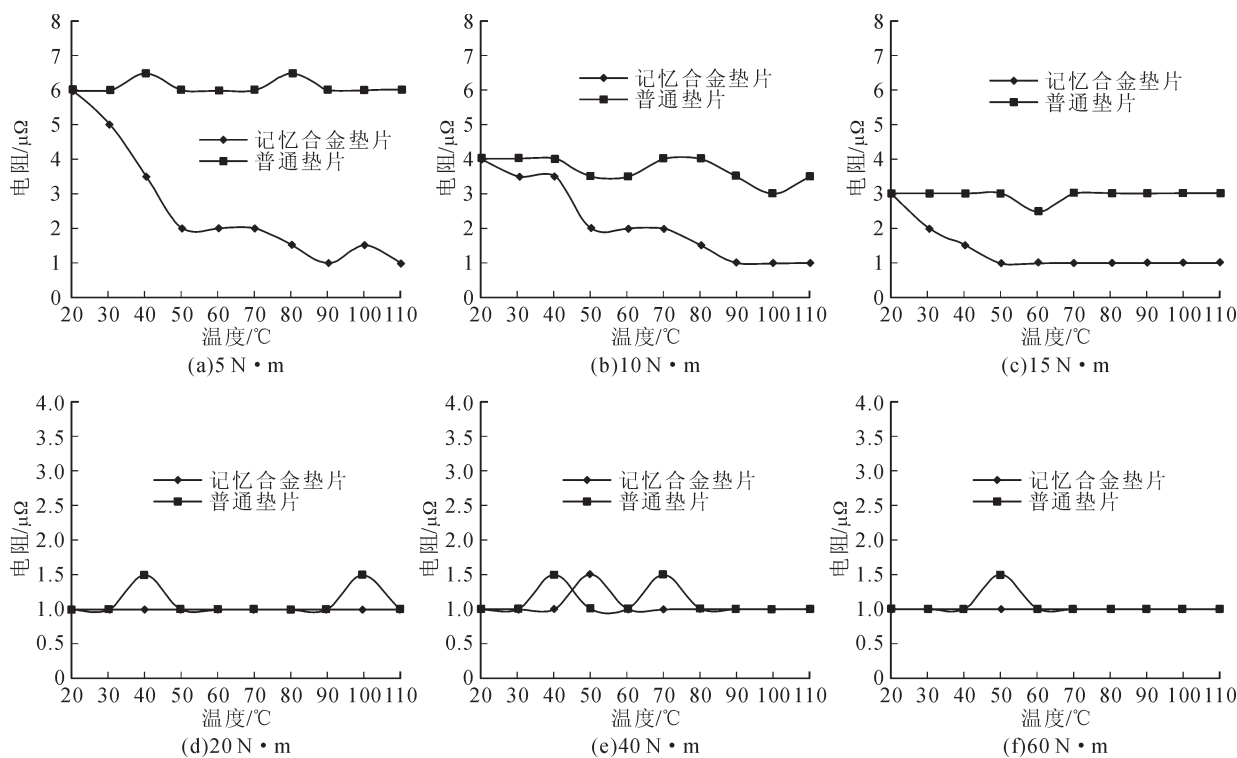


图 5 接触电阻—温度曲线

Fig. 5 The curve of contact resistance-temperature

见图 6。采用记忆合金垫片的温升曲线较低于采用普通垫片的温升曲线。

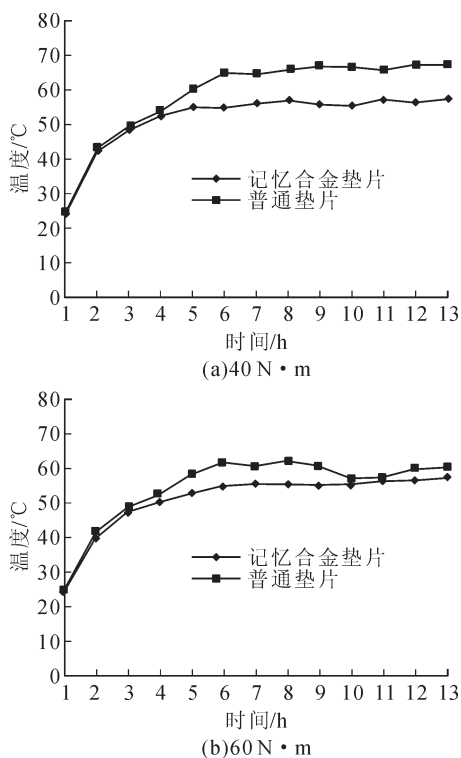


图 6 不同垫片下温升曲线

Fig. 6 The curve of temperature rise used different spacers

由图 6(a)可知,扭矩为 40 N·m 时,在温升稳定

后两者温度相差为 6 °C;由图 6(b)可知,扭矩为 60 N·m 时,在温升稳定后二者温度相差为 3 °C。二者稳定温升的差值说明了形状记忆合金垫片在降低开关柜内部温升上起到一定的作用,并且预紧扭矩越小,温升下降越明显。

不同初始扭矩的温升曲线见图 7。由图 7(a)可知,采用普通垫片的连接部位在 40 N·m 扭矩下的稳定温升明显高于 60 N·m,故采用普通垫片时在出现初始扭矩不足或因长时间运行导致的紧固松弛等情况下温升将明显增大,严重影响整体开关柜的安全运行。

由图 7(b)可知,采用记忆合金垫片的连接部位在 40 N·m 和 60 N·m 的初始扭矩下稳定温升变化不大,原因是开关柜运行中连接部位温度升高导致预应变约束条件下的记忆合金垫片产生了较大的回复力,降低了接触电阻,减小了发热,避免因初始扭矩不足导致的发热—接触电阻恶性循环。因此采用记忆合金垫片有利于整体开关柜的安全运行。

4 结论

通过分析,可以得出以下结论:

1)形状记忆合金垫片在预应变约束条件下加热能产生一定的回复力,温度越高回复力越大。相同温度下回复力随着预应变的增大而变大,预应变到

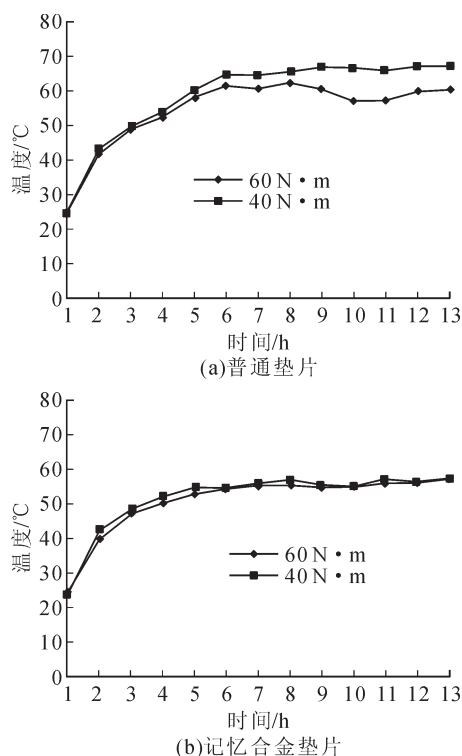


图7 不同扭矩的温升曲线

Fig. 7 The curve of temperature at different torque

达 40% 时, 回复力最大可达 9.77 kN。

2) 回复力随温度升高的增大可分 3 段: 相变回复阶段; 应力诱发马氏体阶段; 奥氏体屈服阶段。其中第 2 段增大速率高于第 1、3 段, 第 2 段温度范围随预应变的增大而增大。

3) 扭矩较小的情况下, 采用记忆合金垫片在受热时降低接触电阻最大达 $5 \mu\Omega$, 能够有效地解决因初始紧固扭矩不足或长期运行紧固松动等情况下造成的接触电阻过大问题。

4) 相比采用普通垫片连接部位的温升, 采用记忆合金垫片的有不同程度地下降。预紧扭矩越小, 温升下降越明显, 扭矩为 40 N·m 时温升降低可达 6 °C, 故采用记忆合金垫片有助于提高开关柜运行的安全性。

参考文献:

- [1] 陈志刚. 一起金属封闭开关柜过热原因分析[J]. 浙江电力, 2008, 27(1): 76-78.
CHEN Zhigang. Analysis for a fault of metal-enclosed switchgear overheat[J]. Zhejiang Electric Power, 2008, 27(1): 76-78.
- [2] 王秉政, 江健武, 赵 灵, 等. 高压开关柜接触发热温度场数值计算[J]. 高压电器, 2013, 49(12): 42-48.
WANG Bingzheng, JIANG Jianwu, ZHAO Ling, et al. Temperature field simulation of contact heating in high

- voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 42-48.
- [3] 戴水东. 断路器主回路电接触的可靠性分析[J]. 电工电气, 2010(7): 4-7.
DAI Shuidong. Reliability analysis for circuit-breaker main circuit electric contacting[J]. Electrotechnics Electric, 2010(7): 4-7.
- [4] 巩宪锋, 衣红钢, 王长松, 等. 高压开关柜隔离触头温度监测研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 155-158.
GONG Xianfeng, YI Honggang, WANG Changsong, et al. Research on temperature monitoring of isolators in HV switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(1): 155-158.
- [5] 田 毅, 黄新波. 高压开关柜温升在线监测系统[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 64-67.
TIAN Yi, HUANG Xinbo. On-line monitoring system of temperature inside HV switchgear cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 64-67.
- [6] 张良胜, 张 杰. 红外在线监测系统在封闭开关柜中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(1): 150-153.
ZHANG Liangsheng, ZHANG Jie. Application of switch tank temperature online monitor system based on infrared[J]. Power System Technology, 2008, 32(1): 150-153.
- [7] 堵永国, 张为军, 胡君遂. 电接触与电接触材料(二)[J]. 电工材料, 2005(3): 42-46.
DU Yongguo, ZHANG Weijun, HU Junsui. Electrical contact and the electrical contact material (II)[J]. Electrical Engineering Materials, 2005(3): 42-46.
- [8] 谭志龙, 郭俊梅, 陈 松, 等. 电接触现象数值模拟的研究现状及发展趋势[J]. 电工材料, 2010(1): 3-8.
TAN Zhilong, GUO Junmei, CHEN Song, et al. Review of the numerical simulation of the electric contact phenomena[J]. Electrical Engineering Materials, 2010(1): 3-8.
- [9] 丁 健. 金属封闭高压开关柜触头发热机理分析及预防过热故障措施探讨[J]. 高压电器, 2012, 48(8): 114-117.
DING Jian. Heating mechanism analysis on metal-enclosed high voltage switchgear contact with measures to prevent overheating[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8): 114-117.
- [10] 陈天翔, 方晓临, 苏晓艺, 等. 记忆合金垫片在电力设备安全和节能中的应用试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(4): 494-497.
CHEN Tianxiang, FANG Xiaolin, SU Xiaoyi, et al. Experimental research on application of memory alloy spacer to power device security and energy saving[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47(4): 494-497.
- [11] 金学军, 金明江, 耿永红. 铁基形状记忆合金马氏体相变研究进展[J]. 中国材料进展, 2011, 30(9): 32-41.
JIN Xuejun, JIN Mingjiang, GENG Yonghong. Recent developments of martensitic transformation in ferrous shape memory alloys[J]. Rare Metals Letters, 2011, 30(9): 32-41.

- [12] 龙血松. Ni-Ti 形状记忆合金微—宏观本构模型及其应用[D]. 重庆:重庆大学航空航天学院, 2014.
- LONG Xiesong. Micro-macro constitutive model for NiTi shape memory alloys and its applications[D]. Chongqing: College of Aerospace Engineering of Chongqing University, 2014.
- [13] 李春梅. 形状记忆合金的弹性和马氏体相变的第一性原理研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2011.
- LI Chunmei. Elastic properties and phase stability of shape memory alloys[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [14] 郑雁军, 崔立山, 杨大智. NiTi 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.
- ZHENG Yanjun, CUI Lishan, YANG Dazhi. Modelling of recovery stress of NiTi shape memory alloys[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000, 40(2): 180-182.
- [15] 郑雁军, 崔立山, 李岩. NiTi 及 NiTiCu 形状记忆合金的回复力特征[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(10): 1642-1647.
- ZHENG Yanjun, CUI Lishan, LI Yan. Recovery stress characteristics of TiNi and TiNiCu shape memory alloys[J]. the Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(10): 1642-1647.
- [16] 曾忠敏. 镍钛形状记忆合金循环为弹性特性描述[D]. 重庆:重庆大学航空航天学院, 2014.
- ZENG Zhongmin. A constitutive description for cyclic pseudo elasticity of NiTi shape memory alloy[D]. Chongqing: College of Aerospace Engineering of Chongqing University, 2014.
- [17] 金伟, 王健, 曹名洲, 等. 预应变对 Ni-50.4Ti 合金记忆应变和回复力的影响[J]. 材料研究学报, 2000, 14(6): 573-577.
- JIN Wei, WANG Jian, CAO Mingzhou, et al. Effects of prestrain on recovery strain and stress in Ni-50.4Ti alloy[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2000, 14(6): 573-577.
- [18] 罗洪艳, 牟波, 廖彦剑, 等. 热机械循环方法对训练 NiTi 合金双程形状记忆效应的影响[J]. 材料导报, 2009, 23(12): 55-58.
- LUO Hongyan, MOU Bo, LIAO Yanjian, et al. Influence of thermomechanical cyclic methods on training NiTi alloy for two-way shape memory effect[J]. Materials Review, 2009, 23(12): 55-58.

殷立庚(1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高电压与绝缘技术。

(上接第 12 页)

- DAI Min, ZHOU Peihong, LOU Ying, et al. Overvoltage and insulation coordination of 1 000 kV AC compact transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(8): 1843-1849.
- [14] 林莘, 李学斌, 徐建源. 特高压同塔双回线路感应电压、电流仿真分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2193-2198.
- LIN Xin, LI Xuebin, XU Jianyuan. Simulation and analysis of induced voltage and current for UHV double circuit transmission lines on the same tower[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2193-2198.
- [15] 孙秋芹, 王冠, 李庆民, 等. 特高压双回线路耦合效应的计算与分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 737-742.
- SUN Qiuqin, WANG Guan, LI Qingmin, et al. Calculation and analysis of the coupling effects of the UHV double-circuit transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 737-742.
- [16] Electric Power Research Institute (EPRI). EPRI AC transmission lines reference book: 200 kV and above[M]. 3rd ed.. California, USA: EPRI, 2005.
- [17] XU Guozheng, ZHANG Jierong, QIAN Jiali, et al. Principle and application of high voltage circuit breakers[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- 何柏娜(1977—), 女, 博士, 副教授, 从事电力系统仿真及高电压绝缘技术方面的教学与科研工作。
- 赵云伟(1981—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事机电系统检测、诊断与控制方面的教学与研究工作。