

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.10.005

记忆合金弹簧在断路器梅花触头中的应用试验研究

熊磊, 陈天翔, 张哲诚, 吴姿婷, 田洪

(厦门理工学院电气工程与自动化学院, 福建 厦门 361024)

摘要: 断路器处于长期运行状态,梅花触头会出现松动,导致接触电阻增大,引起触头发热,带来严重的安全隐患。记忆合金是一种随温度变化能自动产生形变的新材料,笔者将记忆合金制成的弹簧运用于梅花触头以达到降低接触电阻,减少触头发热的目的。通过对普通弹簧和记忆合金弹簧进行温度与弹簧拉力对比试验,及对应用的2种弹簧梅花触头进行了大电流温升对比试验。试验结果表明:记忆合金弹簧能够有效降低触头接触电阻和减少发热,具有广泛应用前景。

关键词: 断路器; 记忆合金弹簧; 接触电阻; 温升; 试验研究

Experiment Research for Application of Memory Alloy Spring on Circuit Breaker Clubs Contactor

XIONG Lei, CHEN Tianxiang, ZHANG Zhecheng, WU Ziting, TIAN Hong

(School of Electrical Engineering & Automation, Xiamen University of Technology, Fujian Xiamen 361024, China)

Abstract: As circuit breaker operates in a long-term state, the clubs contacts will be loosening. As a result, the contact resistance has been increased as well as the heating of the contact, which will lead to serious security problem. Memory alloy is a new material whose shape can be changed with the temperature. The clubs contacts are able to decrease resistance and contact heating with memory alloy spring. A comparative test on the tension of springs under different temperature between normal spring and memory alloy spring has been conducted. Also, the heavy current temperature rise experiment on the clubs contacts which used normal spring and memory alloy spring has been conducted. The test results show that the memory alloy springs can reduce the contact resistance and heating effectively. Therefore, the memory alloy spring may have a broad application prospects in the future.

Key words: circuit breaker; memory alloy spring; contact resistance; temperature rise; experiment research

0 引言

随着金属封闭高压开关柜的推广使用,开关柜内手车断路器触头发热而导致的故障事故增多,触头发热的问题已经引起了各运行单位的重视^[1-3]。实际运行过程中,10 kV 金属开关柜所采用的断路器通常为手车式,其断路器动静触头之间更容易出现发热故障^[4-5]。工作人员倘若没有及时处理故障发热,器件过热可能会影响开关元件的电气性能,甚至还会出现开关设备烧毁和供电网停电事故^[6]。

针对手车断路器触头的发热问题,已有不少防

范措施方面的研究和报道,主要包括规范检修维护的制度、预防性试验、改良手车触头材料等^[7-9]。检修和预防性试验不能从根本上解决触头发热的问题,而选择更为完善的触头材料技术难度也是相当之大。归根结底,解决触头发热可以从减小触头间接接触电阻入手。如果在触头发热初期能够减小触头接触电阻,就有希望从根本上改善触头的发热问题。断路器触头接触电阻与材料的电阻率、接触面积、平整程度以及触头上施加压力等因素有关^[10-12]。记忆合金具有温度形变特性,可以加以利用达到改善触头压力,减小触头间接接触电阻的目的,从而实现节能和安全。文中对记忆合金弹簧和普通弹簧进行试验

收稿日期:2017-07-15; 修回日期:2017-08-08

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

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

对比,研究了记忆合金弹簧能否达到减小接触电阻和触头发热的作用。

1 记忆合金的形状记忆效应和性能

具有一定形状的固体材料,在某一低温状态下经过塑性变形后,通过加热到这种材料固有的某一温度以上时,材料又恢复到初始形状的现象,称为形状记忆效应^[13]。合金材料的形状记忆效应与热弹性马氏体相变和应力诱发马氏体相变有关,当这类材料在马氏体状态下进行一定限度的变形后,在随后的加热过程中出现超过马氏体相消失温度时,材料能够完全恢复到变形前的状态和体积^[14-15]。马氏体相变的体积分数和温度的关系见图 1。其中 M_f 、 A_s 分别表示马氏体相变和逆相变的初始温度, M_s 、 A_f 分别表示马氏体相变和逆相变的结束温度。

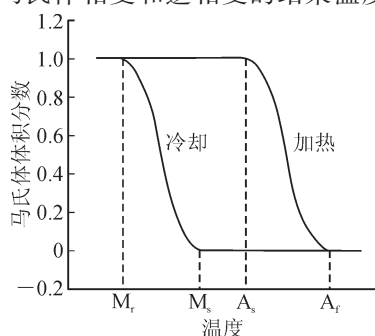


图 1 马氏体体积分数与温度变化曲线

Fig. 1 The curve of martensite volume fraction versus temperature

根据形状记忆合金在温度变化下所产生的不同形状变化,可以将形状记忆效应分为 3 类:①如果反复对记忆合金进行加热或冷却,其形状保持不变,称为单程形状记忆效应;②记忆合金进行特殊处理后,使得加热和冷却过程中,记忆合金能够在高温和低温呈现出 2 种不同形状,称为双程形状记忆效应;③在双程效应的基础上,若将温度降到更低时,出现了与高温时相反的形状,称为全程形状记忆效应^[16-17]。

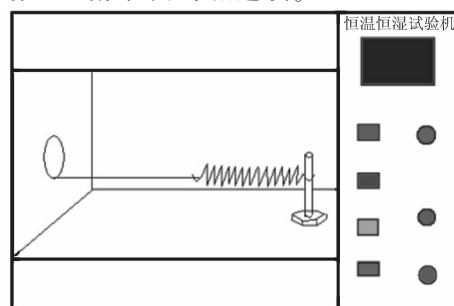
形状记忆合金相比普通金属而言,最大的不同之处在于它能够记住某一温度和应力条件下的形状。此外,形状记忆合金还存在其特有的性能:形状记忆合金的杨氏模量在高温下约为低温下的 3~4 倍,这一点与普通金属的杨氏模量随着温度的升高而降低截然不同^[18];形状记忆合金在相变的过程中,马氏体状态发生内耗使得记忆合金具有比普通金属更为优良的阻尼特性^[19-20]。

2 温度与弹簧拉力研究试验

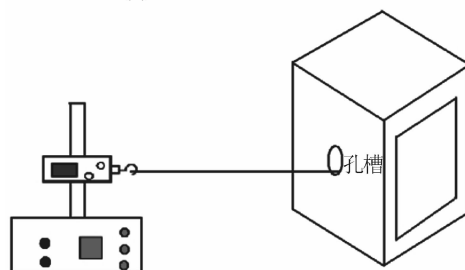
2.1 温度与弹簧拉力试验测试方法

温度与弹簧拉力测量试验装置见图 2。该试验

采用了恒温箱和数显式推拉力计。将弹簧的一端固定在恒温箱内,另一端则用铜导线穿过恒温箱侧面孔槽和数显式推拉力计相连接。



(a) 恒温箱内弹簧连接图



(b) 数显推拉力计连接图

图 2 温度与弹簧弹性测量装置图

Fig. 2 The set-up program of measuring spring elastic and temperature

试验时,依图 2 所示组装好设备。为减少误差和安全,将拉力计水平放置并调节高度与孔槽一致。对普通弹簧测量 12 组拉力值,温度范围为 30~150 ℃,以 10 ℃作为测量间隔。然后将温度降至 25 ℃,待普通弹簧温度降至 25 ℃且恢复原长后,测量 -40~25 ℃范围内的拉力。然后将普通弹簧更换为记忆合金弹簧重复进行试验。

2.2 温度与弹簧拉力试验数据分析

依据上述的试验方法,分别针对普通弹簧和记忆合金弹簧在不同温度下进行弹簧拉力测试。

记忆合金弹簧和普通弹簧在 25~150 ℃下拉力随温度的变化曲线见图 3。图 3 中曲线显示:记忆合金弹簧和普通弹簧在温度上升过程中拉力随温度的变化特性有着明显的区别。随着温度的上升,记忆合金的拉力始终不断增加,但增加的速率有所不同:从 25~55 ℃拉力上升速率随着温度的升高而降低,温度到达 60 ℃,拉力上升速率基本保持稳定。普通弹簧随着温度的变化,拉力基本上保持在 50 N 左右。

-40~25 ℃下的 2 种弹簧拉力随温度变化曲线见图 4。记忆合金弹簧在 -10~25 ℃时,弹簧拉力随温度的降低而显著降低。当温度持续下降时,拉力基本保持稳定。普通弹簧对温度敏感度很低,随着温度的变化,其拉力值仍然保持恒定。

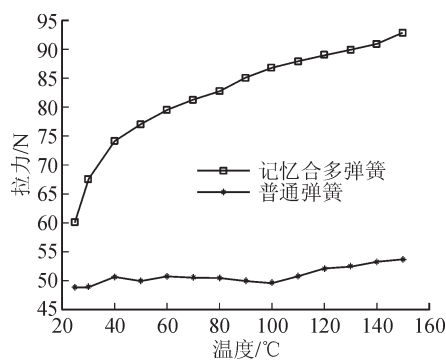


图 3 弹簧在 25~150 °C 范围内的拉力与温度变化曲线

Fig. 3 Tension of the spring under 25~150 °C range

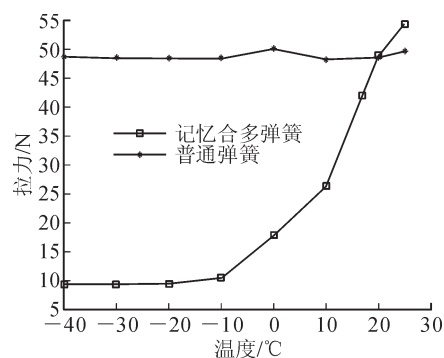


图 4 弹簧在 -40~25 °C 范围内的拉力与温度变化曲线

Fig. 4 Tension of the spring under -40~25 °C range

3 梅花触头在不同弹簧组合下的温度测试

依据记忆合金弹簧和普通弹簧随温度变化表现出的不同特性,将这 2 种弹簧配合安装到梅花触头上,并在不同的温度下进行测试。在试验过程中,梅花触头接触电阻不容易测量得到,将其转换为测量梅花触头和触臂组合体的回路电阻。

3.1 梅花触头温度测试试验方法

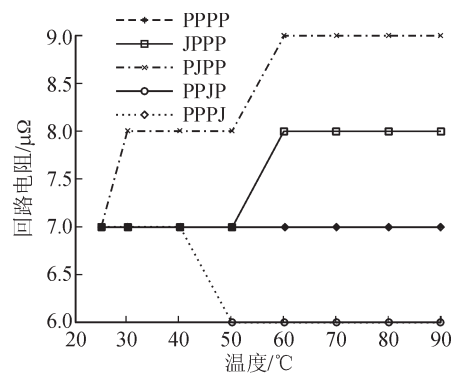
以回路电阻测试仪、微电脑恒温恒湿试验机搭建试验平台。利用恒温箱控制温度在 30~90 °C 范围内变化,以 10 °C 作为测量间隔,并且改变梅花触头上弹簧的组合测量其回路电阻。

3.2 梅花触头温度测试数据分析

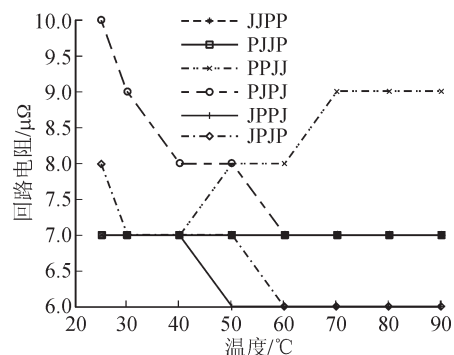
将记忆合金弹簧与普通弹簧按照不同的组合方式装配到梅花触头上,其组合体的回路电阻和温度的关系见图 5。其中 P 表示普通弹簧, J 表示记忆合金弹簧。

记忆合金弹簧拉力随着温度升高而不断增大,原理上可以有效地降低梅花触头组合体的接触电阻,达到节能的目的。然而试验数据显示,并非所有使用记忆合金弹簧和普通弹簧组合下的梅花触头都能够达到降低接触电阻的目的,梅花触头接触电阻的降低与 2 种弹簧使用数量和组合方式有关。

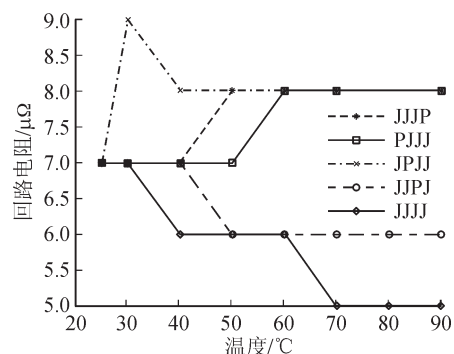
图 5(a)、(b)、(c) 分别为至多安装 1 根、安装 2 根、至少安装 3 根记忆合金弹簧时回路电阻与温度变化曲线。图 5(a) 显示:使用 1 根记忆合金弹簧时,只



(a) 至多安装 1 根记忆合金弹簧时回路电阻与温度曲线图



(b) 安装 2 根记忆合金弹簧时回路电阻与温度曲线图



(c) 至少安装 3 根记忆合金弹簧时回路电阻与温度曲线图

图 5 不同弹簧组合下梅花触头回路电阻与温度变化曲线图

Fig. 5 The curve of loop resistance versus temperature under the different combinations of spring

有 PPJP 组合才能够明显降低回路电阻;其他弹簧组合方式下的梅花触头回路电阻并没有太大改善,甚至产生相反结果。图 5(b) 显示:使用 2 根记忆合金弹簧时, JPPJ 和 JPJP 2 种组合方式能够明显降低,但降低效果和使用 1 根记忆合金弹簧 PPJP 效果类似;其他组合方式并不能降低回路电阻。图 5(c) 显示:当全部使用记忆合金弹簧时,梅花触头降低效果最为显著;使用 3 根记忆合金弹簧 JJPJ 组合也能够明显降低回路电阻。

4 1600 A 大电流温升试验

温升试验由大电流温升试验装置、10 kV 真空开关设备为基础搭建而成的,试验接线见图 6。对装

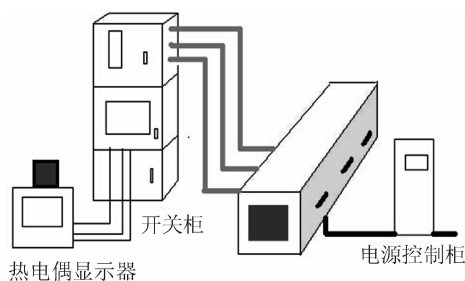


图6 1600 A 电流温升试验原理图

Fig. 6 The schematic of the temperature rise testing on 1600 A current

设有普通弹簧和记忆合金弹簧的10 kV真空断路器开关柜通以1600 A的电流。在断路器中布置多个利用热电偶的测量点,在模拟断路器正常工作的状态下进行试验测试。

对断路器B相,2个使用记忆合金弹簧和普通弹簧的梅花触头分别进行温升对比试验。温升试验时间设定为6 h,每隔0.5 h分别记录断路器中各个布点的温度变化情况。B相触头热电偶所测得温升数据曲线见图7。

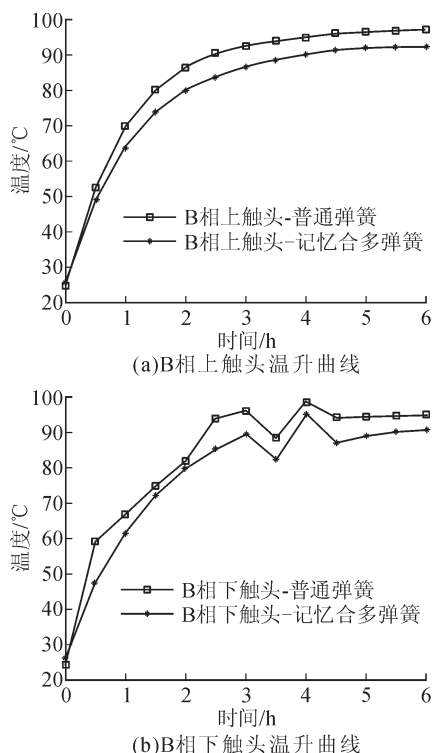


图7 B相触头温升数据曲线图

Fig. 7 The curve of phase B contact temperature rise

图7曲线显示:由于断路器的结构设计和试验测量精准度等因素,导致使用同种弹簧的上下触头的温升数值并非完全相同。在通电1 h内,温升尚未达到稳定时,B相触头上的温升与弹簧使用情况基本无关。但随着试验时间的延长,记忆合金弹簧的优势有了明显的体现,使用记忆合金弹簧的触头温升

明显低于普通弹簧触头,最大温差可以达到6.5℃。

5 结论

1)记忆合金弹簧的温度特性与普通弹簧有着明显的差别,温度大幅度变化时,作用在普通弹簧上的拉力基本不会发生改变,而作用在记忆合金弹簧上的拉力会随着温度升高而明显增加,当温度从-40℃增加至150℃时,记忆合金弹簧拉力也从9.3 N升高至92.7 N。

2)记忆合金弹簧应用于真空断路器梅花触头时,梅花触头接触电阻不仅仅与环境温度有关,而且还和记忆合金弹簧使用数量和弹簧组合有关。全部使用记忆合金弹簧时,接触电阻降低水平最高。另外,使用1根记忆合金弹簧在PPJP组合下接触电阻降低水平也比较明显,其经济性最好。

3)与使用普通弹簧的梅花触头相比,应用记忆合金弹簧的梅花触头在温升试验中能够明显降低温升。由B相温升数据可知,当温升基本稳定时,使用记忆合金弹簧的断路器梅花触头至少可以降低4.5℃。

总之,在断路器触头上应用记忆合金弹簧能够有效降低触头的接触电阻,从而降低接触部位的温升。目前,记忆合金弹簧已经能够批量生产,但由于材料稀缺和加工过程比较困难,使得记忆合金弹簧比普通弹簧的造价要昂贵许多,价格一般在0.7~1.0元/g。根据焦耳定律,应用记忆合金弹簧的开关柜在正常运行条件下,每年大约可以节省近30元的电费,能够有效地减少因为发热而损失的电能。此外,记忆合金弹簧的使用降低了动静触头接触部位的温升,在一定程度上提高了开关柜运行期间的可靠性,减小了因梅花触头过热而造成的设备烧蚀和停电事故的发生可能性。从节能和安全的角度出发,记忆合金弹簧依然具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 赵亮,贾西贝. 10 kV 抽屉式开关柜触头发热原因分析及解决措施研究[J]. 科技传播,2010(12):120.
ZHAO Liang, JIA Xibei. The reason and solution of 10 kV draw-out switch cabinet contact heating[J]. Public Communication of Science and Technology, 2010(12):120.
- [2] 孟波. 电气静态接触发热的原因及处理方法[J]. 电气开关,2008(4):58-59.
MENG Bo. Reason and solution of electrical static contact heating[J]. Electric Switchgear, 2008(4):58-59.
- [3] 梁珂. 金属封闭高压开关柜触头发热机理及预防过热措施探讨[J]. 中国高新技术企业,2015(31):74-75.

- LIANG Ke. Heating mechanism on metal-enclosed high voltage switchgear contact with measures to prevent overheating[J]. China High Tech Enterprises, 2015(31): 74-75.
- [4] 蒋立斌. 刍议 10 kV 开关柜发热原因及防范措施[J]. 中国新技术新产品, 2015(15): 67-68.
- JIANG Libin. The reason and precaution measure of the 10 kV switchgear[J]. New Technology and New Products of China, 2015(15): 67-68.
- [5] 任振峰, 张建忠. 真空断路器触头发热原因分析[J]. 科技创新与应用, 2015(2): 82.
- REN Zhenfeng, ZHANG Jianzhong. Analysis on vacuum circuit breaker contact heating[J]. Technology Innovation and Application, 2015(2): 82.
- [6] 陈世昌. 浅析 10 kV 手车式金属封闭开关柜触头发热原因及对策[J]. 电气开关, 2013(3): 77-82.
- CHEN Shichang. The reason and countermeasure of the contact heating of 10 kV metal switch cubicle[J]. Electric Switchgear, 2013(3): 77-82.
- [7] 刘永军. 高压开关柜触头发热原因分析及解决措施研究[J]. 科技风, 2010(24): 249-250.
- LIU Yongjun. The reason and solution of high voltage switchgear contact heating[J]. Technology Trend, 2010 (24): 249-250.
- [8] 皮秋如. 浅谈 10 kV 开关柜发热原因及改进措施[J]. 硅谷, 2010(18): 193-194.
- PI Qiuru. The reason and improvement measure of the 10 kV switchgear[J]. Silicon Valley, 2010(18): 193-194.
- [9] 丁健. 金属封闭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] 吴国华, 周洲, 涂春华. 高压断路器接触电阻的研究[J]. 华中电力, 2011, 24(6): 80-82.
- WU GUOHua, ZHOU Zhou, TU Chunhua. Research on contact resistance of high voltage circuit breaker[J]. Central China Electric Power, 2011, 24(6): 80-82.
- [11] 柏小平, 李国伟, 翁桅, 等. 电触头表面状态对接触电阻的影响和改善方法[J]. 电工材料, 2013(1): 10-23.
- BAI Xiaoping, LI Guowei, WENG Wei, et al. Effects of contact surface condition on contact resistance and improving methods[J]. Electrical Engineering Material, 2013(1): 10-23.
- [12] 纽春萍, 强若辰, 王小华, 等. 高压断路器接触电阻的耦合面积法分析[J]. 高压电器, 2015, 51(2): 18-22.
- NIU Chunping, QIANG Ruochen, WANG Xiaohua, et al. Simulation of high-voltage circuit breaker contact resistance via contact area coupling method[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(2): 18-22.
- [13] 赵连成, 蔡伟, 郑玉峰. 合金的形状记忆效应与超弹性[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- ZHAO Liancheng, CAI Wei, ZHENG Yufeng. Shape memory effect and super elasticity in alloys[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.
- [14] 陈玉安, 王必本, 廖其龙. 现代功能材料[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2008.
- CHEN Yu'an, WANG Biben, LIAO Qilong. Modern functional materials[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2008.
- [15] 施绍裘, 陈江瑛, 董新龙, 等. 钛镍形状记忆合金冲击变形后形状记忆效应的研究[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(3): 168-171.
- SHI Shaoqiu, CHEN Jiangying, DONG Xinglong, et al. Study on shape memory effect of TiNi alloy after impact deformation[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(3): 168-171.
- [16] 龙血松. NiTi 形状记忆合金微-宏观本构模型及其应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- LONG Xuesong. Micro-macro constitutive model for NiTi shape memory alloys and its applications[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [17] 郭卫红, 汪济奎. 现代功能材料及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- GUO Weihong, WANG Jikui. Modern functional materials and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [18] 刘爱荣, 潘亦苏, 周本宽. 形状记忆合金弹簧变形分析及其在振动控制中的应用[J]. 西南交通大学学报, 2000, 35(1): 81-84.
- LIU Airong, PAN Yisu, ZHOU Benkuan. Deformation analysis of SMA spring and its application to vibration control[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2000, 35(1): 81-84.
- [19] 商泽进, 王忠民, 冯振宇. 含形状记忆合金的智能材料结构的应用[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(3): 163-166.
- SHANG Zejin, WANG Zhongmin, FENG Zhenyu. Application of smart material and structure with shape memory alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(3): 163-166.
- [20] 杨军, 贺志荣, 王芳. 添加 Cr 对 Ti-Ni 形状记忆合金相变和低温变形特性的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(3): 426-430.
- YANG Jun, HE Zhirong, WANG Fang. Effect of adding cr on transformation and low temperature deformation characteristics in Ti-Ni shape memory alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(3): 426-430.

熊磊(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压与绝缘技术。