

# 弹簧指数对镍钛合金弹簧缓冲吸能能力的影响

孙俊, 钱明芳, 张学习, 耿林

(哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 形状记忆合金 (SMAs) 弹簧具有大应变可逆变形能力, 在吸能缓冲和振动控制等领域具有重要应用潜力。本工作研究了弹簧结构设计对镍钛 SMAs 性能的影响规律。采用冷拉拔和退火相结合的方法制备直径 1.2 mm 的 Ti-52.5at%Ni 合金丝, 并通过室温下芯轴绕制成型和高温退火相结合的方式制备弹簧指数  $C$  分别为 6.0、7.7 和 9.3 的弹簧, 通过测试合金丝和弹簧的超弹性曲线研究弹簧结构的吸能性能。研究表明, 基于弹簧的超弹性变形过程, 室温 (298 K) 下 3 类弹簧在 120 mm 的最大位移幅值下单位体积吸能分别为 4618、2225 和 1143  $\text{kJ/m}^3$ , 弹簧指数  $C$  为 6.0 的弹簧吸能能力最优。318 K 下, 弹簧处于完全奥氏体态, 弹簧指数  $C$  为 6.0 的弹簧单位体积吸能 (6662  $\text{kJ/m}^3$ ) 是同等载荷 (47 N) 条件下合金丝 (34.7  $\text{kJ/m}^3$ ) 的 192 倍。同等条件下, 弹簧结构具有比合金丝优异的吸能能力。因此, 超弹性 SMAs 弹簧在缓冲减振结构上具有良好的应用前景。

**关键词:** 形状记忆合金; 弹簧; 超弹性; 吸能; Ni-Ti 合金

**中图分类号:** TG146.1<sup>+</sup>5; TG139<sup>+</sup>.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2023)04-1543-06

形状记忆合金 (SMAs) 具有优异的形状记忆效应、超弹性、高阻尼性、生物相容性等性能, 被广泛应用于航空航天、机械电子、土木工程、生物医学等领域中<sup>[1-5]</sup>。应用最多的形状记忆合金有 Ni-Ti 基、Fe 基和 Cu 基合金 3 类, 其中 Ni-Ti 基合金是目前研究和应用最为广泛的一类形状记忆合金<sup>[6-11]</sup>。SMAs 超弹性的本质是应力作用下的可逆马氏体相变<sup>[12-14]</sup>, Ni-Ti 合金可逆超弹性应变可以达到 6% 以上, 远大于结构材料 (通常小于 1.5%), 这使其成为性能优异的缓冲吸能与减振材料<sup>[15-17]</sup>。

丝状和棒状 SMAs 由于结构简单、便于计算, 在缓冲减振领域中被大量使用<sup>[18-19]</sup>。Casciati 等<sup>[20]</sup>采用直径为 3.5 mm 的棒材研发制备了自复位减震支座, 结果表明直径为 3.5 mm 的棒材具有较大的吸收能量的能力和自复位能力。Dolce 等人<sup>[21]</sup>提出了一类自复位 SMAs 吸能装置, 吸收能量的结构由 2 组奥氏体状态的 SMAs 丝缠绕到 3 个可以活动的圆轴上, 复位组利用 SMAs 的超弹性性能。然而, 合金丝不能承受压缩载荷、棒材受压缩时易失稳, 同时合金丝和棒材应变小, 吸能能力有限。

通过结构设计, 可以进一步增大 SMAs 的能量吸收性能, 如泡沫及弹簧结构<sup>[22-23]</sup>。泡沫在受力变形时孔棱和结点的变形、坍塌、断裂可以吸收大量能量,

并且应力保持恒定<sup>[24]</sup>。但是泡沫结构不均一, 孔棱和结点处受力不均匀、容易发生不可逆变形, 使得泡沫难以多次重复应用<sup>[25]</sup>。

与此相反, 弹簧结构均一、稳定, 能够同时承受拉伸和压缩作用, 具有更好的变形驱动和吸能能力。Sobrinho 等<sup>[26]</sup>设计制造了一种由 Ni-Ti 合金弹簧驱动连续旋转电机, 驱动时弹簧可承受高达其初始长度 600% 的变形。Huang 等<sup>[27]</sup>提出了一种由超弹性 Ni-Ti 合金螺旋弹簧组成的新型消能支撑体系来降低框架结构的地震反应。刘爱荣等<sup>[28]</sup>通过修正后的 Brinson 本构模型对 SMAs 弹簧变形的分析, 提出可以改变弹簧刚度影响系统共振频率进而进行振动控制。贺志荣等<sup>[29]</sup>研究了退火温度、热循环及力循环等因素对 Ti<sub>49.4</sub>Ni<sub>50.6</sub> 超弹性弹簧相变和形变特性的影响。

然而 SMAs 在不同温度下加载后可能出现形状记忆效应或者超弹性变形的回复, 导致弹簧在定型时因具有较大的回弹力而难以精确定型。因此本工作采用冷拉拔制备 Ni-Ti 合金丝, 通过芯轴绕制和退火获得螺旋弹簧, 研究弹簧结构对其超弹性变形过程中吸能能力的影响规律。

## 1 实验

原材料为直径  $\Phi 2.0$  mm 的富镍 Ti-52.5at%Ni 合金

收稿日期: 2022-07-03

基金项目: 国家自然科学基金 (51701052); 中国科协青年人才托举工程 (2019QRC001); 中央高校基本科研业务费专项基金 (FRFCU5710050820)

作者简介: 孙俊, 女, 1996 年生, 博士, 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001, E-mail: 23B309009@stu.hit.edu.cn

棒，购于上海欣柏实业有限公司。采用冷拉拔的方式制备直径  $\Phi 1.2$  mm 的合金丝，采用金刚石模具，按模具道次对原始直径  $\Phi 2.0$  mm 的合金棒进行拉拔，不同道次对应的模具孔径依次是 2.00-1.85-1.60-1.45-1.30-1.20 mm，每 2 个拉拔道次后对合金丝进行一次退火，退火工艺为在自然气氛下（有氧条件）随炉加热至 723 K，退火 90 min，取出空冷。采用合金钢作为芯轴，在室温下绕制成型制备弹簧，弹簧总圈数 22，有效圈数 20，节距  $t$  为 1.2 mm，长度  $L$  为 26.4 mm，弹簧中径  $D$  分别为 7.2、9.2 和 11.2 mm，由此计算得到弹簧指数  $C$ （弹簧中径  $D$ /簧丝直径  $d$ ）分别为 6.0、7.7 和 9.3。绕制得到的弹簧采用上述相同的退火工艺进行退火，使其定形并恢复超弹性性能，图 1 为退火后具有不同弹簧指数（对应不同  $D$ ）的弹簧实物图。

退火后的合金丝采用差示扫描量热法（DSC）分析马氏体相变（martensitic transformation, MT）行为，冷却/加热速率为 5 K/min，温度范围为 223~393 K。采用 INSTRON 5982 型电子万能试验机在不同温度、位移幅值和应变速率下测试合金丝和弹簧的载荷-位移曲线，应变速率为 256 mm/min。根据载荷-位移曲线，由切线法获得超弹性临界载荷，通过加载阶段载荷与位移的曲线积分计算吸能值。图 2 为螺旋弹簧参数及拉伸辅助装置示意图。

## 2 结果及分析

### 2.1 Ti-52.5at%Ni 合金丝基本性能

图 3 显示了室温下退火态 Ti-52.5at%Ni 合金丝升降温过程中的 DSC 曲线。结果显示，合金在正逆相变过程中均只出现 1 个热流峰，说明发生一步马氏体相变。由基线外推法得到退火态合金丝的特征温度  $M_s$ 、 $M_f$ 、 $A_s$  和  $A_f$  分别为 309、291、295 和 314 K。因此，室温（298 K）下合金丝处于马氏体和奥氏体共存状态。

图 4a 显示了退火态 Ti-52.5at%Ni 合金丝 318 K 下的载荷-位移曲线，合金丝标距为 120 mm，设置拉伸最大应变为 8%。由图 4a 可得加载过程中超弹性变形临界载荷约为 250 N，由加载曲线积分获得的总吸能值为 2.5 J，由加卸载曲线包围的面积获得阻尼吸能 1.4 J。根据丝材试样的标距（120 mm）和直径（ $\Phi 1.2$  mm），可得到单位体积吸能 18 600 kJ/m<sup>3</sup>，单位体积阻尼吸能 10 500 kJ/m<sup>3</sup>。根据合金丝轴向拉伸受力分析，如图 4b，任一截面的切应力（ $\tau_\alpha$ ）如式（1）：

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_0}{2} \sin 2\alpha \quad (1)$$

其中， $\alpha$  为任一截面法线与合金丝轴线之间的夹角， $\sigma_0$  为正应力，当  $\alpha=45^\circ$  时，如式（2）：

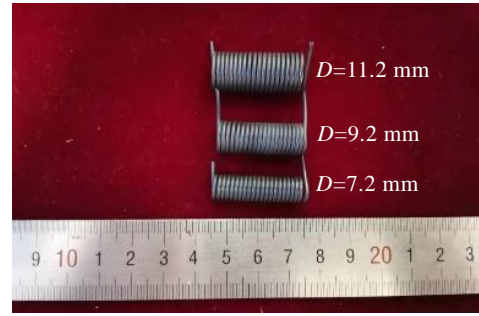


图 1 退火后不同弹簧指数弹簧的实物图

Fig.1 Springs with different spring index  $C$  values after annealing

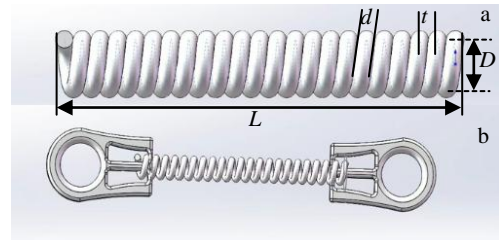


图 2 Ti-52.5at%Ni 合金弹簧参数及拉伸辅助装置示意图

Fig.2 Illustration of Ti-52.5at%Ni alloy spring: (a) spring parameters and (b) auxiliary device for tensile test

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_0}{2} = \frac{F}{2s} = \frac{F}{2\pi r^2} \quad (2)$$

其中， $s$  为合金丝横截面积， $r$  为合金丝直径， $F$  为合金丝所受轴向拉力。由此可得合金丝截面最大切应力随外加载荷的变化关系，结合图 4a 和切应力与外加载荷的变化关系可得合金丝的超弹性临界切应力大约为 110 MPa。

### 2.2 Ti-52.5at%Ni 弹簧超弹性性能

图 5 为不同弹簧指数的螺旋弹簧在不同温度和不同位移幅值下的载荷-位移曲线。由螺旋弹簧力学模型<sup>[30]</sup>可得，当弹簧螺旋角  $\beta$  近似为  $0^\circ$  时（ $d$  远小于  $D$ ），弹簧受到轴向载荷  $F$  作用时簧丝横截面所受的切应力包括剪力  $Q$  引起的切应力和扭矩  $T$  引起的切应力。剪力  $Q$  引起的切应力：

$$\tau_Q = \frac{4F}{\pi d^2} \quad (3)$$

由扭矩  $T$  引起的簧丝横截面最大切应力：

$$\tau_{\max} = \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (4)$$

因此簧丝横截面最大切应力：

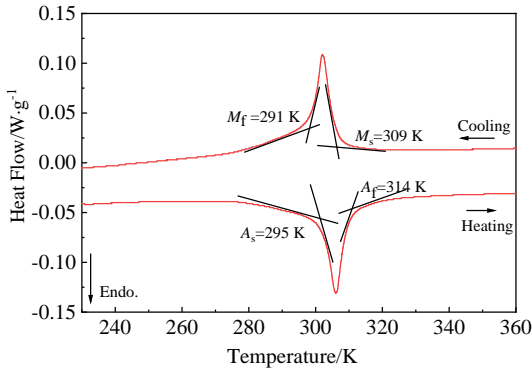


图 3 室温下退火态 Ti-52.5at%Ni 合金丝 DSC 曲线

Fig.3 DSC curves of annealed Ti-52.5at%Ni alloy wire at room temperature

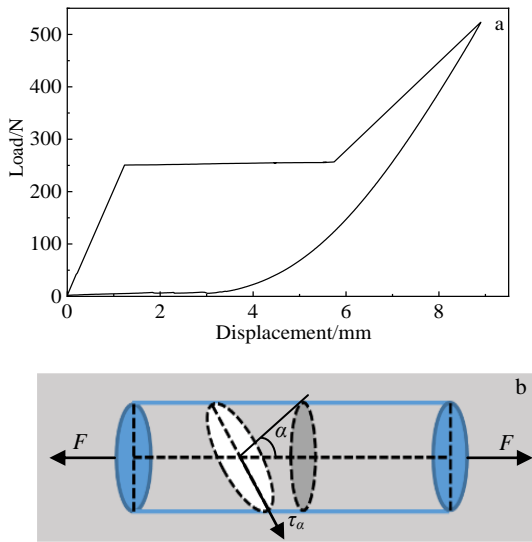


图 4 退火态 Ti-52.5at%Ni 合金丝 318 K 下超弹性变形曲线

Fig.4 Superelastic deformation curve of annealed Ti-52.5at%Ni alloy wire: (a) load-displacement and (b) schematic diagram of the stress analysis

$$\tau = \frac{8FD}{\pi d^3} \left(1 + \frac{d}{2D}\right) \quad (5)$$

由此可以获得切应力与外加载荷的变化关系。

图 5a 为不同  $D$  值弹簧在室温下的载荷-位移曲线, 由图可见 3 种弹簧的曲线均显示出超弹性的特征。曲线存在残余位移, 分别为 14.4、27.4 和 20.9 mm, 但对其进行加热至奥氏体状态, 残余位移完全恢复, 说明不存在塑性变形。结合图 5a 和弹簧切应力与外加载荷的变化关系可得, 相同位移条件下, 弹簧受到的载荷和切应力随着  $D$  值的增加而减小。由加载阶段曲线与横坐标的积分, 获得  $D$  为 7.2、9.2 和 11.2

mm (对应弹簧指数  $C$  为 6.0、7.7 和 9.3) 的弹簧的吸能分别为 2.6、1.6 和 1.0 J, 由加卸载曲线包围的面积获得阻尼吸能分别为 1.15、0.58 和 0.29 J;  $D$  为 7.2、9.2 和 11.2 mm 时对应的弹簧丝展开长度分别为 498、636 和 774 mm, 单位体积吸能分别为 4618、2225 和 1143 kJ/m<sup>3</sup>, 单位体积阻尼吸能分别为 2042、807 和 331 kJ/m<sup>3</sup>。随着弹簧指数  $C$  的增大, 单位体积吸能和阻尼吸能逐渐减小, 是由于弹簧指数  $C$  越大, 弹簧的弹性系数越低。因此选择弹簧指数  $C$  为 6.0 的弹簧进一步研究其性能。

图 5b 为弹簧指数  $C$  为 6.0 的弹簧在不同温度下的载荷-位移曲线。结合图 5b 和弹簧切应力与外加载荷的变化关系可得, 簧丝横截面切应力随着环境温度的升高而增大。318 K 下弹簧超弹性临界切应力约为 400 MPa, 大于合金丝的临界切应力 110 MPa, 这是由于弹簧拉伸时簧丝横截面承受纯切应力, 而合金丝横截面承受正应力<sup>[30]</sup>。由图 4a 和 5b 可见, 在相同外载条件下, 即 318 K 下最大外载为 47 N 时, 合金丝此时的最大切应力约为 21 MPa, 小于合金丝超弹性临界切应力, 说明合金丝此时处于弹性变形阶段未发生马氏体相变, 此时合金丝的位移约为 0.2 mm。如前所述, 弹簧展开的有效工作合金丝长度约为 498 mm, 由此计算出 318 K 下, 与弹簧有效展开长度相同的合金丝在相同外载条件下, 即最大外载 47 N 时, 产生的位移约为 0.83 mm, 由于处在弹性变形阶段, 总吸能约为 0.0195 J, 单位体积吸能 34.7 kJ/m<sup>3</sup>。而 318 K 下, 弹簧的总吸能为 3.75 J, 单位体积吸能 6662 kJ/m<sup>3</sup>。因此 Ni-Ti 弹簧在 47 N 外载条件下位移和单位体积吸能分别为合金丝的 145 倍和 192 倍。这是由于弹簧承受纯剪切应力远大于合金丝, 且弹簧在相同载荷作用下具有更大的位移。3 个测试温度下弹簧卸载后依然存在残余变形, 残余位移随着温度的升高而逐渐降低, 分别为 14.4、6.8 和 0.89 mm, 即在 318 K 下, 弹簧基本处于完全超弹性状态。

图 5c 为弹簧指数  $C$  为 6.0 的弹簧在 318 K 下不同位移幅值的载荷-位移曲线。由图可见, 随着位移幅值的增大, 弹簧的超弹性特征越来越明显, 位移幅值为 120 mm 时弹簧超弹性临界载荷约为 32 N, 临界位移约为 50 mm, 单位体积总吸能 6075 kJ/m<sup>3</sup>。此时 318 K 下的载荷-位移曲线与图 5b 中 318 K 下的曲线稍有区别, 原因在于 SMA 的超弹性与加卸载历史有关, 多次加卸载使合金受到了训练效果, 产生应力诱发马氏体临界应力降低或者参与变形减小等影响。结合图 5c 和切应力与外加载荷的变化关系可得超弹性临界切应力约为 360 MPa。同时, 60 和 90 mm 位移的加载曲线

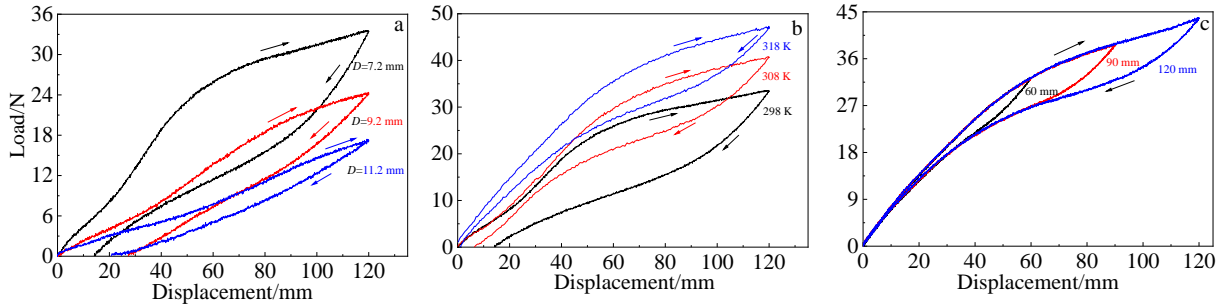


图 5 弹簧在不同测试条件下的载荷-位移曲线

Fig.5 Load-displacement curves of the spring under different conditions: (a) different mean diameter  $D$  and room temperature; (b)  $C=6$  and different temperatures; (c)  $C=6$ , temperature of 318 K and different displacement amplitudes

与 120 mm 的加载曲线基本重合, 说明弹簧的受力情况并不因位移幅值的不同而改变。载荷超过弹簧线弹性阶段后, 发生应力诱发马氏体相变, 即产生超弹性<sup>[13]</sup>。

根据图 5c, 在最大外加载荷为 32 N 时, 弹簧总吸能 1.10 J, 单位体积吸能为 1954 kJ/m<sup>3</sup>, 与弹簧有效展开长度相同的合金丝产生的位移约为 0.54 mm, 单位体积吸能为 15.3 kJ/m<sup>3</sup>, 此外载下弹簧单位体积吸能为合金丝的 128 倍; 在最大外加载荷为 39 N 时, 弹簧总吸能 2.18 J, 单位体积吸能为 3872 kJ/m<sup>3</sup>, 与弹簧有效展开长度相同的合金丝产生的位移约为 0.66 mm, 单位体积吸能为 22.9 kJ/m<sup>3</sup>, 此外载下弹簧单位体积吸能为合金丝的 169 倍。

### 2.3 Ti-52.5at%Ni 弹簧超弹性循环稳定性

图 6a 为弹簧在 318 K 温度下 (完全奥氏体态) 的超弹性循环曲线, 可以看出弹簧超弹性平台载荷变化很小。图 6b 是由图 6a 中获得的超弹性临界载荷和残余位移随循环次数的变化曲线, 图 6c 为由图 6a 中曲线计算得到的总吸能和阻尼吸能随循环次数

的变化曲线。由图 6b 和 6c 可以看出, 弹簧的超弹性残余位移随着循环次数的增加逐渐趋近于 0, 超弹性临界载荷和总吸能力整体上呈现增加的趋势, 而阻尼吸能力整体上呈现减小的趋势。通常情况下, 随着循环次数的增加, SMAs 超弹性滞回曲线逐渐向下移动, 相变临界应力减小, 且正相变临界应力的降低幅度大于逆相变, 循环耗能逐渐减小, 而残余应变逐渐累积, 若干循环次数后滞回特性趋于稳定<sup>[30-31]</sup>。这是由于循环加载过程中材料内部形成残余应力或位错等缺陷, 而残余应力和位错等缺陷会促进马氏体相变, 使相变临界应力减小, 残余应变增加。然而, 由图 6 可见, 本研究中超弹性平台应力随着循环次数的增加呈现上升的趋势, 这主要来自于环境温度对其超弹性影响, 即由于马氏体正相变过程中将释放大热量, 逆相变需要吸收大量热量, 当应变速率较大时正相变释放的热量来不及散失, 会导致环境温度升高。本研究中弹簧循环测试应变速率为 256 mm/min, 应变速率较大, 因此弹簧的超弹性循环曲线整体上向上移动。

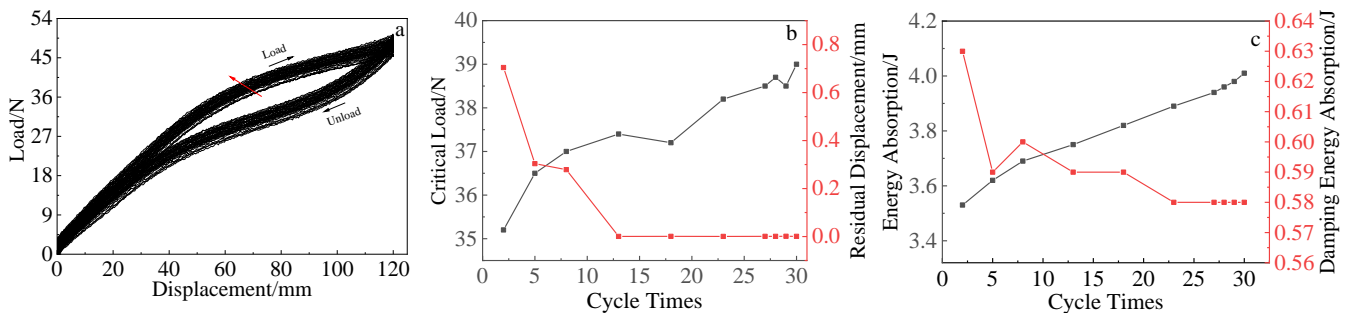


图 6 弹簧指数  $C$  为 6.0 的弹簧在 318 K 温度下超弹性循环 30 次曲线

Fig.6 Superelasticity of spring with  $C=6$  at 318 K: (a) 30 times of superelasticity cycles; (b) critical load and residual displacement vs cycle times; (c) energy absorption and damping energy absorption vs cycle times

### 3 结论

1) 室温下  $C$  为 6.0、7.7 和 9.3 的弹簧单位体积吸能随  $C$  的增加而下降, 3 类弹簧在室温及 120 mm 最大位移幅值条件下的单位体积吸能分别为 4618、2225 和 1143 kJ/m<sup>3</sup>。

2) 同等条件下, 弹簧具有比合金丝优异的吸能能力。318 K 下, 本研究中  $C$  为 6.0 的弹簧在 32 N 的外载下弹簧单位体积吸能是同等载荷条件下合金丝 128 倍, 39 N 下是 169 倍, 47 N 下是 192 倍。

3) 318 K 下,  $C$  为 6.0 弹簧超弹性循环残余位移随着循环次数的增加逐渐趋于 0, 总吸能能力、超弹性临界载荷随着循环次数的增加呈现递增趋势, 而阻尼吸能能力呈现减小趋势。

#### 参考文献 References

- [1] Dadbakhsh S, Speirs M, Van Humbeeck J *et al.* *MRS Bulletin*[J], 2016, 41(10): 765
- [2] Haberland C, Elahinia M, Walker J M *et al.* *Smart Materials and Structures*[J], 2014, 23(10): 104 002
- [3] Mahtabi M J, Stone T W, Shamsaei N *et al.* *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2018, 148: 307
- [4] Heller L, Šittner P, Sedláček P *et al.* *International Journal of Plasticity*[J], 2019, 116: 232
- [5] Van H J. *Shape Memory and Superelasticity*[J], 2018, 4(2): 309
- [6] Ossmer H, Chluba C, Kauffmann-Weiss S *et al.* *APL Materials*[J], 2016, 4(6): 64 102
- [7] Salonitis Konstantinos, Pandremenos John, Paralikas John *et al.* *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2009, 49(5-8): 803
- [8] Otsuka Kazuhiro, Kakeshita Tomoyuki. *MRS Bulletin*[J], 2002, 27(2): 91
- [9] Hou H L, Simsek E, Ma T *et al.* *Science*[J], 2019, 366(6469): 1116
- [10] Babacan N, Pauly S, Gustmann T. *Materials & Design*[J], 2021, 203: 109 625
- [11] Ferretto I, Kim D, Della V N M *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2021, 46: 102 071
- [12] Lu Bingwen, Cui Xiufang, Liu Erbao *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2018, 736: 130
- [13] Liu Shifeng, Liu Jingbo, Wang Liqiang *et al.* *Scripta Materialia*[J], 2020, 181: 121
- [14] Hou H L, Simsek E, Stasak D *et al.* *Journal of Physics D: Applied Physics*[J], 2017, 50(40): 404 001
- [15] Sobrinho J M B, Emiliavaca A, Cunha M F *et al.* *Sensors and Actuators A: Physical*[J], 2020, 302: 11 823
- [16] Sedláček P, Frost M, Kruisová A *et al.* *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2014, 23(7): 2591
- [17] Dezfūli F H, Alam M S. *Smart Materials and Structures*[J], 2013, 22(4): 45 013
- [18] Yang C S W, DesRoches R, Leon R T. *Engineering Structures*[J], 2010, 32(2): 498
- [19] Miller D J, Fahnestock L A, Eatherton M R. *Engineering Structures*[J], 2012, 40: 288
- [20] Casciati Fabio, Hamdaoui Karim, Faravelli Lucia. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*[J], 2007, 6(4): 401
- [21] Dolce M, Cardone D, Marnetto R. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*[J], 2000, 29(7): 945
- [22] Köhl M, Moser A, Bram M. *Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528(6): 2454
- [23] Speicher Matthew, Hodgson Darel E, DesRoches Reginald *et al.* *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2009, 18(5-6): 746
- [24] Becker B S, Bolton J D, Youseffi M. *Powder Metallurgy*[J], 1995, 38(3): 201
- [25] Wei J N, Cheng H F, Gong C L *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2002, 33(11): 3565
- [26] Sobrinho J M B, Emiliavaca A, Cunha M F *et al.* *Sensors and Actuators A: Physical*[J], 2020, 302: 11 823
- [27] Huang B, Lao Y M, Chen J M *et al.* *Journal of Aerospace Engineering*[J], 2018, 31(6): 4 018 096
- [28] Liu Airong(刘爱荣), Pan Yisu(潘亦苏), Zhou Benkuan(周本宽). *Journal of Southwest Jiaotong University*(西南交通大学学报)[J], 2004, 13(1): 81
- [29] Liu Manqian(刘曼倩), He Zhirong(贺志荣). *Journal of Heat Treatment of Materials*(材料热处理学报)[J], 2012, 33(1): 44
- [30] Zhu Xuejie, Zhang Xuexi, Qian Mingfang *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2022, 838: 142 787
- [31] McCormick J, DesRoches R, Fugazza D *et al.* *Journal of Engineering Materials and Technology*[J], 2006, 128(3): 294



## Effect of Spring Index on the Energy Absorption Capacity of Nitinol Springs

Sun Jun, Qian Mingfang, Zhang Xuexi, Geng Lin

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Shape memory alloys (SMAs) springs have the ability to perform giant reversible strain, which is of great importance to the energy absorption buffer and vibration control applications. In this work, the influence of structure design on the performance of NiTi SMAs springs was studied. Ti-52.5at%Ni alloy wires with diameters of 1.2 mm were prepared by cold drawing and subsequent annealing, and springs with spring index  $C$  of 6.0, 7.7, and 9.3 were prepared by mandrel wound molding and subsequent high temperature annealing. The energy absorption performances of the springs were studied by testing the superelastic curves of the alloy wires and springs. The results show that, based on the superelastic processes, the energy absorption capacity per unit volume of the three types of springs at room temperature (298 K) is 4618, 2225 and 1143  $\text{kJ/m}^3$  at a maximum displacement amplitude of 120 mm, where the spring with spring index  $C$  of 6.0 has the best energy absorption capacity. Furthermore, the energy absorption per unit volume of spring with spring index  $C$  of 6.0 reaches 6662  $\text{kJ/m}^3$  at 318 K due to its full austenite state, which is 192 times higher than that of the alloy wire (34.7  $\text{kJ/m}^3$ ) under the same load (47 N), meaning that under same condition, the spring structure has better energy absorption capacity than that of the alloy wire. Therefore, the superelastic SMAs springs may show great potential in the future application of damping structures.

**Key words:** shape memory alloys; spring; superelasticity; energy absorption; Ni-Ti alloys

---

Corresponding author: Qian Mingfang, Ph. D., Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, Tel: 0086-451-86402380, E-mail: mingfang.qian@hit.edu.cn