

工程探索

多片复合式转轴偏置记忆合金热机研究

黄毅¹ 郭楷淇¹ 王拴² 彭曦辉¹ 姚文祺¹ 韩建卫²
钟瑞² 过聪²

(¹ 哈尔滨工业大学(深圳)前沿学部材料科学与工程学院, 广东 深圳 518000;

² 哈尔滨工业大学(深圳)实验与创新实践教育中心(分析测试中心), 广东 深圳 518000)

摘要 形状记忆合金热机因其可在低温差条件下运行的特点, 在地热温泉发电等特殊应用场景展现出独特优势。本研究设计了一种具有实用前景的新型多片复合式转轴偏置型记忆合金热机, 该装置可在较低温差工况下可实现持续稳定运转。本研究通过装置搭建和实验测试, 测量了该热机的输出功率和转速, 结合实验数据与理论分析, 揭示了温度与负载对输出功率的影响规律, 并计算了该热机的能量转换效率。

关键词 热机; 形状记忆合金; 热机功率

DOI: 10.27024/j.wlygc.2025.10.31.03

RESEARCH ON MULTI-DISC COMPOSITE OFFSET-SHAFT SMA HEAT ENGINE

HUANG Yi¹ GUO Kaiqi¹ WANG Shuan² PENG Xihui¹ YAO Wenqi¹ HAN Jianwei²
ZHONG Rui² GUO Cong²

(¹ School of Materials Science and Engineering, Faculty of Frontier Studies, Harbin Institute of Technology (Shenzhen),
Shenzhen, Guangdong 518000;

² Experimental and Innovative Practice Education Center, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen, Guangdong 518000)

Abstract Shape memory alloy (SMA) heat engines have attracted attention because of their ability to operate under low-temperature-difference conditions, showing potential for applications such as geothermal and waste-heat energy recovery. In this study, a novel multi-disc composite offset-shaft SMA heat engine was designed and fabricated. The device can achieve sustained and stable operation under relatively low-temperature-difference conditions. The output power and rotational speed of the prototype were measured through experimental tests. By combining experimental results with theoretical analysis, the effects of heat-source temperature and external load on the output power were investigated. The results show that, under the tested conditions, the output power increases with increasing heat-source temperature, while it first increases and then decreases with increasing load. In addition, the energy conversion efficiency of the heat engine was quantitatively evaluated. This study provides a feasible design and experimental reference for the development of SMA heat engines and related teaching demonstrations.

Key words heat engine; shape memory alloy (SMA); heat-engine power

收稿日期: 2025-10-31; 修回日期: 2026-03-20; 出版日期: 2026-05-20

基金项目: 广东省教育科学规划项目(2023GXJK684); 教育部产学研合作协同育人项目(231000532123109)。

通信作者: 王拴, wangshuan@hit.edu.cn。

引文格式: 黄毅, 郭楷淇, 王拴, 等. 多片复合式转轴偏置记忆合金热机研究[J]. 物理与工程, 2026, 36(3): 231-237.

Cite this article: HUANG Y, GUO K Q, WANG S, et al. Research on multi-disc composite offset-shaft SMA heat engine[J]. Physics and Engineering, 2026, 36(3): 231-237. (in Chinese)

传统热机一般采用高温气体作为工作物质,其主要依赖于煤炭、石油等不可再生资源,且运行需要稳定的热源和冷源,难以适应复杂工况,同时也带来大气污染和碳排放问题^[1,2]。针对以上传统热机的局限性,一种基于形状记忆合金(Shape Memory Alloy, SMA)的热机应运而生^[3-9]。而当前对于记忆合金热机的设计与研究工作大多停留在理论层面,在实践中难以复现或无法实现规模化应用^[10-13]。本研究工作设计和制作了一种新型的多片复合式转轴偏置记忆合金热机,可在温和的工况条件下实现可靠稳定运行,同时对热机的输出功率和转速进行了实验测量与理论分析。该热机采用模块化设计,运行工况范围广,绿色无污染,安全性高,稳定性强,具有较好的实际应用潜力。同时,该热机结构简单、运行直观,非常适合作为热力学与材料科学相关课程的教学演示装置,有助于学生深入理解形状记忆合金材料特性和能量转换原理。

1 热机的设计与制作

1.1 热机结构设计

图 1(a)为形状记忆合金热机的结构设计图,主要结构包括仓筒、转子、偏心轴、轴承以及记忆合金弹簧。仓筒由两块带有圆形凸台的半圆形铝合金板和一块半圆柱壁的亚克力板(长 300mm、外径 240mm)组成;转子(长 276mm、外接圆直径 210mm)由两侧的聚碳酸酯材质(PC)圆环和多辐铝合金条组成空心圆柱状;偏心轴为 304 不锈钢杆,位置与转子圆心等高,与圆心的水平偏心距为 35mm(见图 1(b)~(c))。

该热机具有多片复合转轴偏置结构(16 片结构),同时相邻的片与片之间设置一个偏转角(1.875°)。其单片结构单元由法兰盘和 12 根形状记忆合金弹簧组成,形状记忆合金弹簧一端固定在转子的铝合金杆上,另一端固定在偏心轴的法兰盘上,并可以绕偏心轴转动(见图 1(c))。记忆合金热机下半部分的仓筒中可注入循环加热的水(如控制水温 75.0°C),作为热源;上半部分置于常温空气中(如空气温度 25.0°C),作为冷源。

图 1(e)为记忆合金热机实物装置图,其主要参数见表 1。其中,偏心轴、仓筒板、转子铝合金辐条通过金属冷加工获得;聚碳酸酯(PC)部件采用

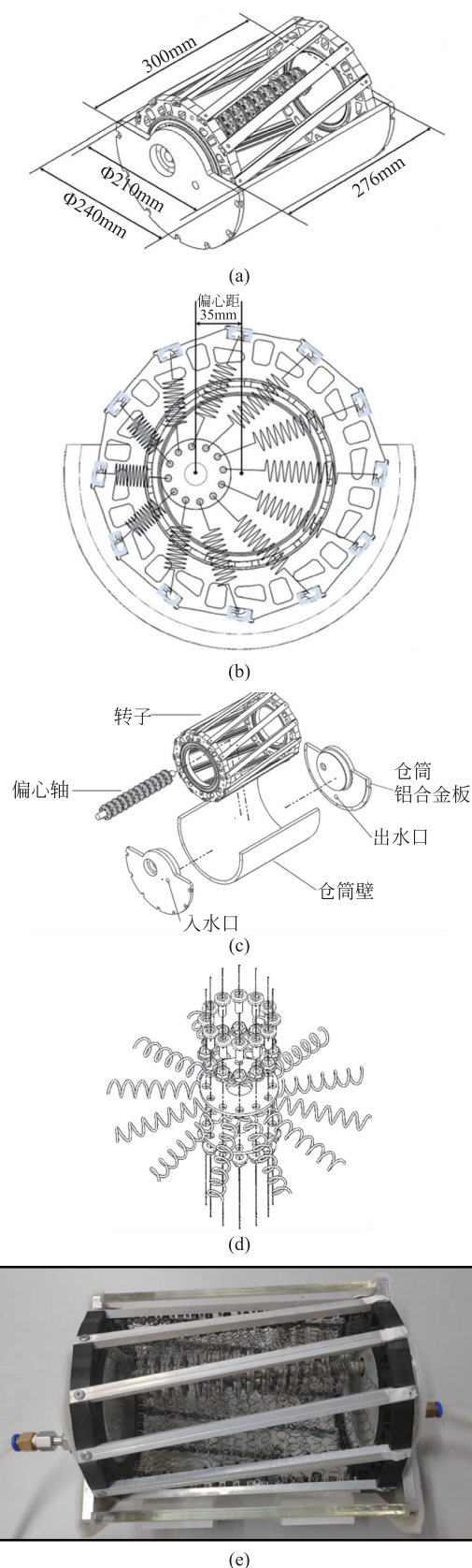


图 1 多片复合式转轴偏置记忆合金热机的结构设计
(a) 总体结构图; (b) 装置截面图; (c) 各功能模块组装图; (d) 单片结构; (e) 装置实物图

3D 打印技术加工制作;法兰盘采用激光切割技术加工。

表 1 记忆合金热机组件特征参数

组件名称	特征参数
多片结构	16 片, 每片 12 根记忆合金弹簧
外观尺寸	长宽高 300mm×240mm×240mm
记忆合金弹簧	Ni-Ti 合金(Ni:55.8%, Ti:44.0%) 丝径 0.6mm, 内径 10.0mm, 长度 19.3mm (25℃)
仓筒壁	半圆柱壳状亚克力板(厚度 10.0mm)
仓筒板	铝合金
转子	PC 塑料(两侧圆环状固定件) 铝合金(辐条)
偏心轴	304 不锈钢杆
法兰盘	带孔亚克力圆片(厚 2.0mm)

1.2 热机运行原理

记忆合金热机所采用的弹簧型记忆合金为 Ni-Ti 合金(Ni:55.8%, Ti:44.0%, 其余成分≤0.2%), 其长度随温度变化如图 2 所示, 在室温 25.0℃ 时, 长度为 19.3mm, 置于在 75.0℃ 热水中, 长度变为 8.1mm。

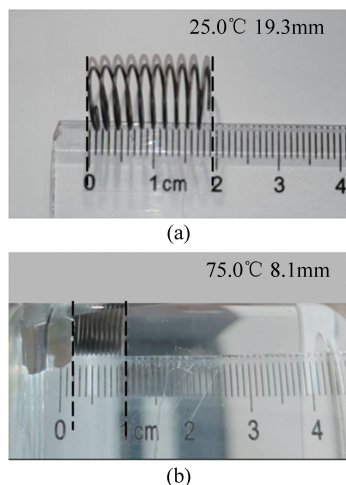


图 2 记忆合金弹簧长度测量
(a) 25℃ 室温环境中; (b) 75℃ 热水中

图 3 为热机运行原理示意图, 以单片结构简化模型的转动过程作为说明:

图 3(a): 当装置处于温度均一的冷源中时, 上下两侧弹簧拉力对称, 装置合力矩为零, 保持平衡;

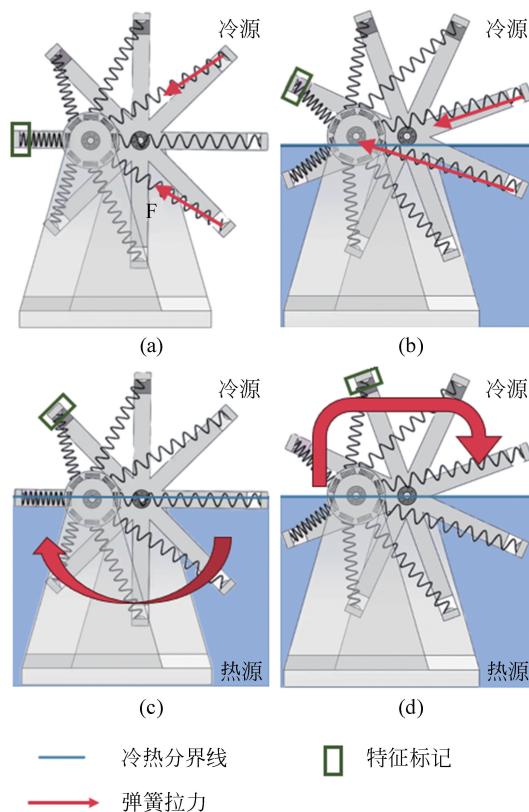


图 3 循环原理说明图

(a) 温度均一的冷源中; (b) 热源中的弹簧受热拉力增大; (c) 转子合力矩不为零, 开始转动; (d) 转子循环运转

图 3(b): 当装置仓筒加入热源后, 热源中的弹簧弹性系数增大, 拉力增大, 沿转子圆周切线方向的分力也随之增大;

图 3(c): 热源中弹簧的拉力增加而其他弹簧拉力不变, 使得转子所受合力矩不再为零, 转子逆时针转动;

图 3(d): 转子转动, 离开热源的弹簧冷却, 拉力减小, 进入热源的弹簧受热, 拉力增大, 装置整体的受力状况与运动状态可近似认为不变, 从而实现稳定循环运转。

1.3 理论分析

装置中记忆合金弹簧的弹性系数 k 与温度 T 呈正相关, 可用如下公式描述^[14]

$$k(T) = \frac{d^4}{16ND^3(1+\nu)} \left\{ E_a + (E_m - E_a) \cdot \left[\xi_0 + (1 + \xi_0) \left[\eta_0 + (1 - \eta_0) \frac{T - M_s}{M_f - M_s} \right] \right] \right\} \quad (1)$$

其中, E_a 、 E_m 分别为奥氏体、马氏体弹性模量, ξ_0

为马氏体体积分数初始值, η_0 为温度诱发的马氏体体积分数初始值, M_s 与 M_f 分别为马氏体开始形成温度与结束温度, N 为单根弹簧匝数, D 为弹簧线圈直径, d 为弹簧丝径, ν 为泊松比。

该式可简化为

$$k(T) = \alpha_T T + C_0 \quad (2)$$

在实验所涉及热源温度区间 (45.0 ~ 75.0 °C) 内, α_T 与 C_0 近似为常数。因此在冷源温度不变时, 且散热情况良好的理想情况下, 热源温度越高, 工作状态下的转子所受合力矩越大, 转速会增大。

对装置进行受力分析, 设单根弹簧对转子的切向分力的大小 τ , 根据图 4 所示几何与受力关系, 可得

$$\tau = k(T) \left[\sqrt{R^2 + D_p^2 - 2RD_p \cos\theta} - l_0 \right] \cdot \frac{D_p \sin\theta}{\sqrt{R^2 + D_p^2 - 2RD_p \cos\theta}} \quad (3)$$

其中 O_1 为转子圆心位置, O_2 为偏心轴投影点, D_p 为偏心距离, l 为弹簧长度, l_0 为弹簧原长, 其中 O_2A 为弹簧的位置, 以 O_1 为坐标原点进行分析。

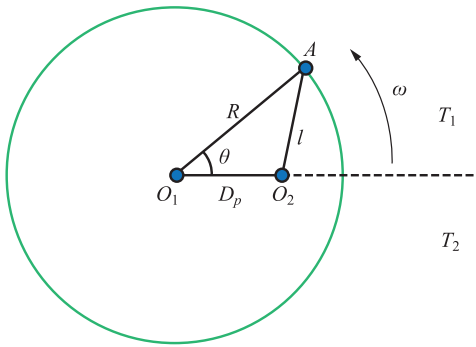


图 4 单根弹簧单元转动分析示意图

理想情况下, 处于冷源和热源的温度分别为 T_1 和 T_2 , 可得装置内弹簧的合力矩

$$M = \sum \tau R = \kappa R (k(T_2) - k(T_1)) \quad (4)$$

其中, κ 为与几何结构有关的参数, 在 T_2 和 T_1 不变时, 可认为 M 是定值。

热机运行过程中近似认为 转子以角速度 ω 匀速转动, 其所受阻为 f , 可用

$$f = C_1 + C_2 \omega + C_3 \omega^2 \quad (5)$$

表示, 且

$$\frac{M}{R} - C_1 - F_T = C_2 \omega + C_3 \omega^2 \quad (6)$$

其中, F_T 为装置外加负载, C_1 、 C_2 与 C_3 是与摩擦有关的常数系数。因此当负载 F_T 增大, ω 应减小。

计算装置输出功率

$$P = F_T \omega R \quad (7)$$

其中, 根据理论分析, ω 随着热源温度 T_2 的增大而增大, 若 F_T 不变, P 会随着 F_T 的增大而增大; ω 随着 F_T 的增大而减小, 且 $F_T = 0$ 时 $\omega > 0$ 、当 F_T 足够大时 $\omega = 0$, 所以 P 会随着 F_T 的增大先增大后减小。

综上所述, 根据理论预测, 在工作负载不变时, 热机功率与热源温度呈正相关; 在热源与冷源温度不变时, 存在一个最佳工作负载使得热机功率最大。

2 实验方法

2.1 实验装置与参数

记忆合金热机的输出功率采用提升重物的方式进行测量, 即通过测量重物上升固定高度 h (810.0 mm) 所用的时间, 测出热机对外的平均输出功率, 图 5 为功率测量的示意图, 功率计算公式为

$$P = \frac{mgh}{t} \quad (8)$$

其中, m 为外加载荷质量, g 取 9.80 m/s², t 为测得的上升时间。

热机转子转动角速度通过激光转速仪进行测量或通过 t 推算。实验条件参数设置如表 2 所示。

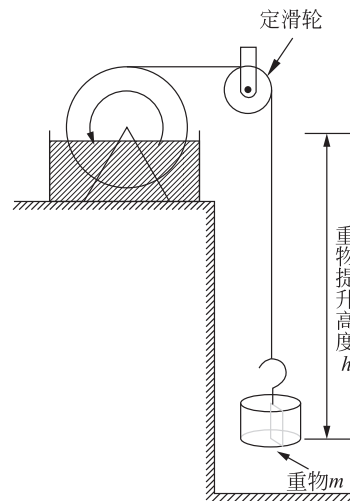


图 5 功率测试示意图

表 2 实验条件参数设置

	外加载荷/g	冷源温度/℃	热源温度/℃
1	0	25.0	45.0~65.0
2	300~650	25.0	75.0
3	400	25.0	60.0~75.0

3 实验结果与分析

3.1 转子角速度与热源温度的关系

为探究热机开始稳定持续转动的热源温度条件,在无外加载荷条件下,冷源温度(T_1)为恒定室温 25.0℃,改变热源温度(T_2)从 45.0~65.0℃,分别测量不同热源温度下热机转子的角速度。经过实验,当热源温度达到 50.0℃时,热机转子可以实现稳定持续转动,随着温度的升高,角速度逐渐增大:当热源 50.0℃时转子转动角速度为 1.047rad/s,热源 65.0℃时转子转动角速度提升至 2.515rad/s。

为进一步探究热源温度对热机角速度及功率的影响,在冷源为室温 25.0℃下,设置外加载荷为 400g,分别测量不同热源温度下角速度与输出功率,最终数据取 5 次测量平均值,如图 6(a)~(b)所

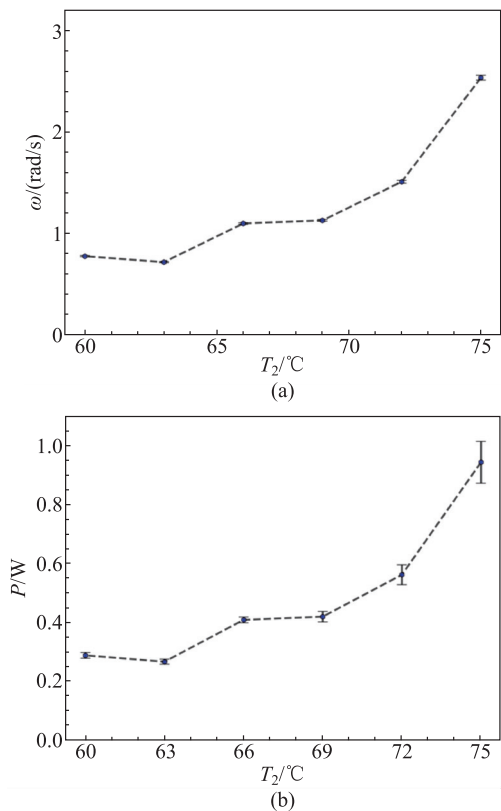


图 6 热源温度-角速度-功率曲线

(a) 400g 载荷下热源温度-角速度曲线; (b) 400g 载荷下热源温度-功率曲线

示,热源 60.0℃时角速度为 0.773rad/s、输出功率为 0.288W,热源 75.0℃角速度达到 2.532rad/s、输出功率提高至 0.943W。由此可知在测试范围内,随着热源温度升高,功率与角速度逐渐增加。该结果与理论分析的结果相符。

3.2 转速-功率-负载关系

设置冷源为恒定室温 25.0℃,热源(热水)温度为 75.0℃,分别测量不同载荷下热机转子的角速度与功率,数据取 5 次测量平均值。如图 7(a)~(b)所示,随着负载的增加,角速度与功率呈先增大后减小的趋势:当负载为 300g(2.94N)时转子转动角速度为 1.552rad/s、功率 0.441W;当负载为 400g(3.92N)时转子转动角速度增大至 2.532rad/s、功率达到 0.943W;而当负载提升至 650g(6.37N)时,角速度减小到 0.927rad/s,同时功率减小至 0.561W。

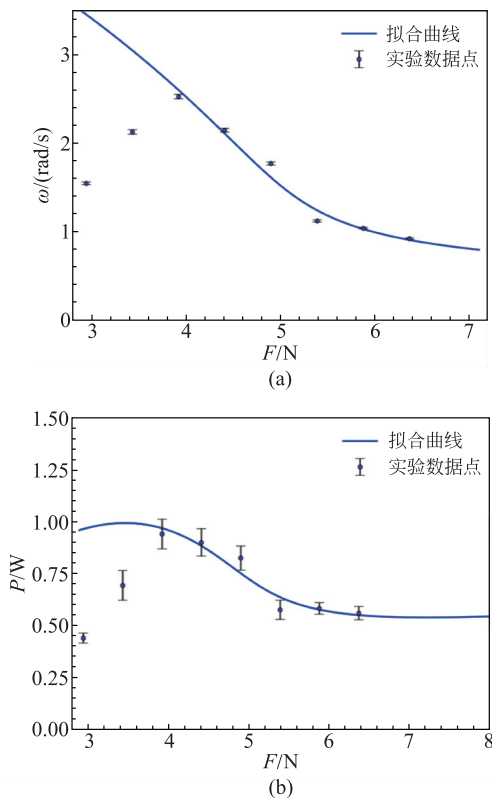


图 7 负载-角速度-功率曲线

(a) 热源 75.0℃下负载-角速度理论预测与实验数据对比; (b) 热源 75.0℃下负载-功率理论预测与实验数据对比

根据理论分析,当负载 F_T 增大,角速度 ω 理应减小,这与图 7(a)实验数据点所反映趋势基本吻合。然而,当负载小于 400g(3.92N)时, ω 反而随 F_T 增大而增大,与理想状况下的理论推测结果

不符。

如果考虑非理想情况,由于冷源与弹簧间的热交换需要时间,会使得实际情况冷源中弹簧温度高于冷源温度 T_1 。当 ω 足够大时,冷源中弹簧的温度等于或高于 NiTi 形状记忆合金产生回复应力的阈值温度^[15],其拉力与热源中弹簧拉力相对抗,导致装置出现间断性的停滞,装置匀速运转这一理想近似条件失效,装置处于非正常工况。图 7(a)起始段中角速度 ω 随着 F_T 增大而增大的反常现象,可能正是由该非正常工况引起。

该非正常工况导致负载 F_T 较小、功率-负载关系处于上升段时,装置角速度与功率相比理论预测偏低,而对功率-负载关系的整体趋势没有影响。图 7(b)中的实验结果为装置功率随着负载的增加先增大后减小,与理论预测相符。

为进一步分析 ω 随负载 F_T 变化的趋势变化,我们采用牛顿冷却定律描述冷源中弹簧冷却的过程,结合式(2)(3)(4)(6),通过数值模拟的方法辅助分析 ω - F_T 以及 P - F_T 关系的变化趋势。

图 7(a)~(b)为数值模拟得到的理论曲线与实验值对比图,其中,在此前讨论中的两个非正常工况数据点(负载 300、350g)不被用于模拟和对比。图 7(b)中的理论预测曲线则通过图 7(a)中的曲线经过换算获得,并与实验数据点进行对比研究。图 7(a)~(b)中的实验数据变化趋势与理论预测曲线基本吻合。

3.3 误差与不确定度计算

不确定度的测量与计算采用 GB/T 27418—2017 中对于合成不确定度的计算方法^[16]。图 6~图 7 中所得合成不确定度见表 3,并以误差棒形式表示在图 6~图 7 中。

3.4 能量转换效率

在计算效率时,我们考虑装置核心部分的功率计算。对装置转过转角 π 这一过程的进行分析,该过程中所有弹簧吸收和放出的热量分别为 Q_{in} 、 Q_{out} ,输出功为 W ,装置的摩擦损耗为 E_{loss} ,装置能量转换效率为 η 。

计算采用如下公式

$$Q_{in} = Q_{out} + W + E_{loss} \quad (9)$$

$$\eta = \frac{W}{Q_{out}} \quad (10)$$

$$W = \bar{P}t \quad (11)$$

表 3a 角速度-功率-热源温度数据及不确定度

$T_2/^\circ\text{C}$	$\omega/(\text{rad/s})$	$u_\omega/(\text{rad/s})$	P/W	u_p/W
75	2.533	0.013	0.943	0.036
72	1.508	0.007	0.562	0.017
69	1.127	0.005	0.420	0.009
66	1.097	0.004	0.409	0.005
63	0.716	0.003	0.267	0.004
60	0.774	0.003	0.288	0.005

表 3b 角速度-功率-负载数据及不确定度

F_T/N	$\omega/(\text{rad/s})$	$u_\omega/(\text{rad/s})$	P/W	u_p/W
2.94	1.552	0.007	0.441	0.012
3.43	2.133	0.013	0.695	0.036
3.92	2.533	0.013	0.943	0.036
4.41	2.152	0.011	0.902	0.033
4.9	1.776	0.009	0.827	0.029
5.39	1.126	0.006	0.577	0.023
5.88	1.044	0.004	0.584	0.014
6.37	0.927	0.004	0.561	0.016

我们对装置转动半周的过程进行分析,该过程时间为

$$t = \pi/\omega \quad (12)$$

E_{loss} 为转动过程中摩擦阻力导致的能量损失,相关参数由实验数据拟合计算

$$E_{loss} = f \cdot R \cdot \omega \cdot t \quad (13)$$

Q_{out} 为装置转动半周过程中弹簧散失的总热量

$$Q_{out} = \sum_{i=1}^{96} c(T_2 - T(\theta_i))m + \sum_{i=1}^{96} c(T(\theta_i) - T_{end})m \quad (14)$$

其中, c 为弹簧比热容, m 为单根弹簧质量,96 为装置弹簧总数 192(16 片,每片 12 根)的一半,即装置转动半周过程中进入热源、离开热源的弹簧数量。 T_{end} 为弹簧经过冷源冷却再次进入热源前的温度,通过牛顿冷却定律计算

$$T_{end} = T_1 + (T_2 - T_1)e^{-C_0 t} \quad (15)$$

按照式(9)~(15)计算,在负载 400g 的情况下,可以得到热机能量转换效率(0.11%~0.51%)如图 8 所示,在热源温度为 75℃最高效率为 0.51%。

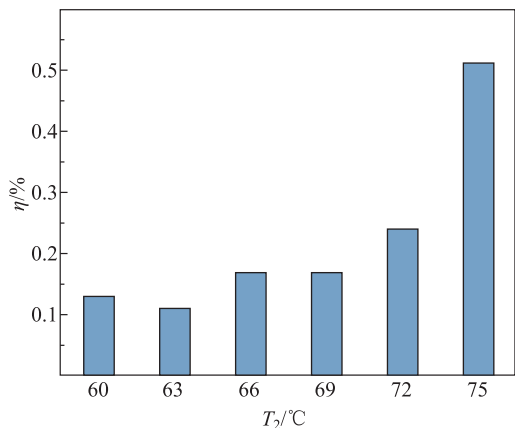


图8 不同热源温度下热机能量转换效率

4 结论

本研究设计的多片复合式转轴偏置记忆合金热机,通过记忆合金弹簧作为介质进行热功转换,可以在较低的温差下实现热功转化,持续输出机械功或进一步转化为电能;并通过多片并联与偏转角的设计增加了装置的输出功率与运转流畅度。由于其低启动温差以及无排放等优点,该装置有望应用于温泉地热发电、工厂废热的回收等绿色能源开发领域或部分特殊离网区域的供能。

参 考 文 献

- [1] 周雨青. 理想斯特林热机循环原理及其效率的计算和实际工作效率的简单讨论[J]. 物理与工程, 2015, 25(1): 49-52.
ZHOU Y Q. Ideal Stirling heat engine cycle principle and its efficiency calculation and a brief discussion on actual working efficiency[J]. Physics and Engineering, 2015, 25(1): 49-52. (in Chinese)
- [2] 赵小青. 热机与生态环境[J]. 物理与工程, 2001(1): 59-61.
ZHAO X Q. Heat engine and ecological environment[J]. Physics and Engineering, 2001(1): 59-61. (in Chinese)
- [3] CALLISTER Jr W D, RETHWISCH D G. Materials science and engineering: an introduction[M]. John Wiley & sons, 2020.
- [4] HONARMANDI P, JOHNSON L, ARROYAVE R. Bayesian probabilistic prediction of precipitation behavior in Ni-Ti shape memory alloys[J]. Computational Materials Science, 2020, 172: 109334.
- [5] JANI J M, LEARY M, SUBIC A, et al. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities[J]. Materials & Design (1980—2015), 2014, 56: 1078-1113.
- [6] PELEGRINA J L, YAWNY A, SADE M. Diffusive phenomena and the austenite/martensite relative stability in Cu-based shape-memory alloys[J]. Shape Memory and Superelasticity, 2018, 4(1): 48-60.
- [7] TLILI I, VAKKAR A. Thermodynamic analysis and optimization of solar thermal engine: Performance enhancement [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2020, 540: 123012.
- [8] 刘振峰, 顾力强, 冯一均. 形状记忆合金弹簧隔振系统主动控制实验设计[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(12): 68-72.
LIU Z F, GU L Q, FENG Y J. Experimental design of active control for shape memory alloy spring vibration isolation system[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2023, 42(12): 68-72. (in Chinese)
- [9] 姜源, 王维, 徐菁华, 等. 演示记忆合金弹簧的形状记忆效应的实验设计[J]. 物理实验, 2010, 30(2): 31-33.
JIANG Y, WANG W, XU J H, et al. Experimental design for demonstrating shape memory effect of memory alloy spring[J]. Physics Experimentation, 2010, 30(2): 31-33. (in Chinese)
- [10] GAO X Y, HUANG W M. Shape memory motor directly powered by solar energy for space missions[C]// 2006 International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE, 2006: 243-248.
- [11] SATO Y, YOSHIDA N, TANABE Y, et al. Characteristics of a new power generation system with application of a shape memory alloy engine[J]. Electrical Engineering in Japan, 2008, 165(3): 8-15.
- [12] XIONG F, YANG H, LIU K, et al. Forming and two-way shape memory effect of NiTi alloy induced by laser shock imprinting[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 120: 105762.
- [13] PACHTER J J. Engine: U. S. Patent 4,150,544 [P]. 1979-4-24.
- [14] 周博, 王志勇, 薛世峰. 形状记忆合金超弹性螺旋弹簧的力学模型[J]. 机械工程学报, 2019, 55(8): 56-64
ZHOU B, WANG Z Y, XUE S F. Mechanical model of superelastic spiral spring made of shape memory alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(8): 56-64. (in Chinese)
- [15] 王伊卿, 张腾, 郭善光, 等. NiTi 形状记忆合金回复应力-温度模型改进与实验研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(1): 117-121.
WANG Y Q, ZHANG T, GUO S G, et al. Improvement and experimental study on recovery stress-temperature model of NiTi shape memory alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(1): 117-121. (in Chinese)
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 测量不确定度评定和表示: GB/T 27418—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Evaluation and expression of measurement uncertainty: GB/T 27418—2017[S]. Beijing: China Standard Press, 2017. (in Chinese)