

The Application and Optimization of New Shape Memory Alloys in Electromechanical Actuators

Xiaohua Li

Qinhuangdao Drainage Co., Ltd., Qinhuangdao, Hebei, 066000, China

Abstract

Shape Memory Alloy (SMA), as a special functional material, is widely used in the electromechanical field, especially in electromechanical actuators, due to its unique temperature responsiveness and shape memory effect. The development of new shape memory alloy materials has made their application prospects in high-precision control systems broader. This paper analyzes the application of shape memory alloys in electromechanical actuators, and discusses their basic principles, performance characteristics, and technical challenges existing in practical applications. Combined with the latest research progress, this paper further discusses the optimization strategies of new shape memory alloys in actuators, including technical improvements in aspects such as material selection, design optimization, temperature control and power management. Through experimental verification and analysis of actual cases, the advantages and limitations of the new shape memory alloy actuator were discussed, and the future development direction was proposed. Research shows that the application of shape memory alloys in electromechanical actuators can not only enhance the flexibility and response speed of the system, but also achieve higher precision control and energy efficiency management, which is of great significance to the development of intelligent and miniaturized equipment.

Keywords

Shape memory alloy, Electromechanical actuator, Application Optimization, Temperature Control, Functional materials

新型形状记忆合金在机电执行器中的应用与优化

李小华

秦皇岛排水有限责任公司, 中国·河北 秦皇岛 066000

摘要

形状记忆合金 (Shape Memory Alloy, SMA) 作为一种特殊功能材料, 凭借其独特的温度响应性和形状记忆效应, 广泛应用于机电领域, 尤其是在机电执行器中。新型形状记忆合金材料的开发, 使得其在高精度控制系统中的应用前景更加广阔。本文通过分析形状记忆合金在机电执行器中的应用, 探讨了其基本原理、性能特点以及在实际应用中存在的技术挑战。结合最新的研究进展, 本文进一步讨论了新型形状记忆合金在执行器中的优化策略, 包括材料选择、设计优化、温度控制与功率管理等方面的技术提升。通过实验验证和实际案例分析, 探讨了新型形状记忆合金执行器的优势与局限, 提出了未来发展方向。研究表明, 形状记忆合金在机电执行器中的应用不仅能够提高系统的灵活性与响应速度, 还能实现更高的精度控制和能效管理, 对智能化和微型化设备的发展具有重要意义。

关键词

形状记忆合金、机电执行器、应用优化、温度控制、功能材料

1 引言

随着现代工业的不断发展, 对机电执行器的性能要求逐步提高, 特别是在精密控制、微型化、能效等方面。传统的机电执行器虽然在许多领域取得了广泛应用, 但其在体积、响应速度、能效和适应性方面存在一定的局限性。为了满足这些需求, 形状记忆合金 (SMA) 作为一种具备温度响应特性的智能材料, 逐渐成为机电执行器中关键的驱动部件。形状记忆合金不仅具有“记忆”效应, 能够在特定条件

下恢复原始形状, 还具备较高的能量密度和快速响应特性, 因此被广泛应用于自动化、精密仪器、机器人技术等领域。

近年来, 随着新型形状记忆合金材料的研发和制造技术的进步, 其在机电执行器中的应用也得到了显著的提升。新型形状记忆合金相比传统材料具有更高的变形能力、更多的响应速度和更长的使用寿命, 因此能够满足更为复杂和精细的控制需求。然而, 尽管新型形状记忆合金在执行器应用中展示了巨大的潜力, 但在实际应用中仍面临着温度控制、功率管理、材料选择和长时间稳定性等方面的挑战。因此, 对新型形状记忆合金在机电执行器中的应用进行深入研究, 探讨其优化设计与运行控制问题, 具有重要的理论意义和应用价值。

【作者简介】李小华 (1979-), 男, 中国河北秦皇岛人, 本科, 助理工程师。

2 形状记忆合金的基本原理与性能特点

2.1 形状记忆合金的基本原理

形状记忆合金（Shape Memory Alloys, SMA）是一类能够在特定条件下“记忆”并恢复到预设形状金属材料。其独特的性质使其在许多机电一体化设备中，特别是在执行器和传感器中具有广泛的应用。形状记忆合金的工作原理基于其晶体结构的变化过程，具体表现为在外界温度变化时，材料会发生相变并引起形变，温度变化结束后，材料则恢复到原始的形状。

在常温下，形状记忆合金处于马氏体相，这是一种相对柔软且易变形的晶体结构。当温度升高至一定值时，形状记忆合金会发生相变，从马氏体相转变为奥氏体相（高温下的晶体结构）。在奥氏体相中，材料的晶格结构更加有序，刚度更大。当温度再次降低时，材料的晶体结构会重新转变为马氏体相，并恢复到预设的形状。

形状记忆合金的相变并非仅仅是晶体结构的变化，它还伴随着宏观形变。温度变化是触发相变的主要原因，具体表现为温度升高时，材料会从变形的状态恢复到原来的形状，反之亦然。因此，形状记忆合金的工作原理可以总结为：温度引发的相变导致形状的变化和恢复。

在形状记忆合金的应用中，温度的控制和精确的相变过程是其工作的基础。例如，在医疗器械中，形状记忆合金被用作支架材料，通过温度控制，使其在体内恢复到所需的形状；在航空航天领域，形状记忆合金常用于执行器的驱动，通过温度变化实现机械的动作。

2.2 形状记忆合金的性能特点

形状记忆合金因其独特的物理特性和工作机制，在机电执行器、医疗器械、机器人等多个领域展现出强大的应用潜力。以下是形状记忆合金的主要性能特点：

高能量密度：形状记忆合金具有显著的能量存储能力，相比于传统材料，形状记忆合金能够在较小的体积内存储大量的能量。这种高能量密度使得形状记忆合金在需要小型化的应用中具有巨大优势。在执行器应用中，形状记忆合金可以通过温度的变化产生较大的形变，从而达到较高的驱动力。这一特点使得形状记忆合金广泛应用于微型设备和精密仪器中，如微型机器人、传感器等。

精确的控制能力：形状记忆合金能够根据外部温度的变化精准地恢复到预设形状，提供非常精细的控制能力。通过控制合金的温度，能够使其实现非常精确的形变和恢复，从而在高精度的机电系统中得到广泛应用。例如，在精密机械和自动化设备中，形状记忆合金能够执行精细的机械动作，如微型夹具、自动调节系统等。

自适应性与可靠性：形状记忆合金不仅能根据外部环境的温度变化自适应地调整形状，还能够在复杂的工作环境中保持良好的工作性能。形状记忆合金具有较强的抗腐蚀性，适用于恶劣环境中的工作。此外，形状记忆合金具有较

长的疲劳寿命和耐久性，能够承受长期的温度变化和形变过程，因此在需要长时间稳定工作和高可靠性的应用中尤为重要。

微型化特性：形状记忆合金能够在微小空间内实现较大的形变，这使得它非常适合于微型化机电执行器的设计。微型化是现代设备趋向小型、高效的一个重要方向，形状记忆合金的微型化特性使其成为微型机器人、微型传感器和医疗器械等领域的重要材料。例如，形状记忆合金被广泛应用于心脏支架、眼科手术器械等微型医疗设备中，通过精确的形变来执行非常小而复杂的操作。

温度驱动特性：形状记忆合金的形变与其温度变化密切相关，这使得其在很多应用场合中具有优越的性能。例如，在温控系统中，形状记忆合金可以作为驱动元件，通过改变其温度来实现设备的开启、关闭、调节等操作，这种温度驱动的特性使其适用于航空航天、医疗、精密机械等领域。

2.3 新型形状记忆合金的优化

随着技术的不断发展和应用需求的多样化，新型形状记忆合金的研发不断朝着更高的性能目标迈进。研究者们正在探索通过合金成分的优化、制造工艺的改进以及智能控制系统的集成来进一步提升形状记忆合金的性能和应用范围。具体的研发方向主要集中在以下几个方面：

合金成分的优化：合金成分的优化是提高形状记忆合金性能的关键之一。通过调整合金的成分，可以改善其形状记忆效应、转换温度范围和机械性能。例如，传统的镍钛合金（NiTi 合金）在许多应用中表现出色，但其工作温度范围和机械性能仍有一定的局限性。因此，研究者们通过添加铜（Cu）、锌（Zn）、铝（Al）等元素来提高形状记忆合金的相变温度范围，以适应更为复杂和苛刻的工作环境。新型形状记忆合金的研究还集中在提高合金的应变能力、提高其转换速度和减少材料的疲劳损耗等方面。

制造工艺的改进：形状记忆合金的性能不仅取决于其化学成分，还受到制造工艺的影响。现代制造工艺，如热处理、冷加工、退火等，可以显著改善合金的微观结构，从而提高其形状记忆效应和疲劳寿命。热处理过程通过调整合金的晶体结构，使得形状记忆合金能够在特定的温度范围内表现出更好的性能。与此同时，通过改进冷加工工艺，能够精确控制形状记忆合金的晶体结构，从而提升其力学性能和稳定性。

智能控制系统的集成：形状记忆合金的一个关键优势是其能够根据温度变化精确地调整形状。因此，在许多高精度应用中，结合智能控制系统进行温度和形变的精准调控，将大大提升形状记忆合金的整体性能。通过集成温控系统、传感器以及控制算法，形状记忆合金可以在更广泛的工作环境中进行自动调节，从而实现精细化控制。例如，在医疗设备中，结合智能控制系统，形状记忆合金能够根据实时温度变化和患者的需求调整其形状，实现个性化治疗和精准

操作。

耐久性和稳定性的提升：在长时间使用的情况下，形状记忆合金容易出现疲劳失效和性能衰减。因此，提升形状记忆合金的耐久性和稳定性，延长其工作寿命，成为当前研究的重点。通过改进合金成分和优化制造工艺，能够显著提高形状记忆合金的循环寿命，降低其疲劳损耗。

3 新型形状记忆合金在机电执行器中的应用

3.1 应用背景与需求

随着现代工业自动化程度的提升，机电一体化设备对执行器的精度、响应速度和灵活性提出了更高的要求。特别是在精密工程、医疗设备、机器人技术等领域，对执行器的尺寸、效率、稳定性和控制精度有着严格的需求。传统的电动执行器或气动执行器在体积、控制精度和能效方面存在局限，而形状记忆合金作为一种新型的智能材料，能够在这些应用中发挥重要作用。

3.2 机电执行器中的应用实例

微型机器人驱动系统：微型机器人在很多领域（如医疗、维修等）中的应用越来越广泛。由于其小型化和对精密操作的需求，传统的执行器往往无法满足其性能要求。形状记忆合金驱动的执行器因其小巧、轻便和响应速度快，成为微型机器人驱动系统的理想选择。

智能医疗器械：在智能医疗器械领域，形状记忆合金可用于人工关节、血管支架等设备的控制。通过精确调控合金的形变，能够实现对这些设备的微调和精密控制，从而提高治疗效果和舒适性。

航空航天领域：在航空航天领域，形状记忆合金可用于翼型调节、推进系统和自动化控制系统的执行器中。其高能量密度和高精度控制能力，能够满足航空航天设备对可靠性和性能的严格要求。

3.3 形状记忆合金机电执行器的优化设计

温度控制与功率管理：形状记忆合金机电执行器的性能依赖于温度变化，因此，温度控制系统的设计至关重要。通过精确控制加热元件和冷却系统，可以有效地管理合金的相变温度，实现精准的形状恢复。

驱动方式的优化：为了提高执行器的效率和响应速度，驱动方式的设计需要与形状记忆合金的特性相匹配。例如，可以通过脉冲宽度调制（PWM）等方法来调节电流，从而精确控制温度和形状恢复的过程。

结构设计的优化：为了使形状记忆合金在执行器中发

挥最佳性能，执行器的结构设计需要充分考虑合金的变形特性。通过合理设计合金的几何形状、加载方式和力学约束条件，可以使其在工作过程中达到最佳的形变效果。

4 新型形状记忆合金在机电执行器中的应用优化方向

4.1 提升执行器的响应速度与精度

形状记忆合金的响应速度和精度是决定其在机电执行器中应用效果的关键因素。未来的研究可以通过优化合金材料、改进驱动技术以及提高温控系统的精度来提升执行器的响应速度和精度。

4.2 延长使用寿命与提高可靠性

形状记忆合金在高温、反复工作等条件下容易发生疲劳，因此延长其使用寿命和提高可靠性是未来优化的重点。通过选择更为耐高温、耐腐蚀的合金材料，并采用先进的制造工艺，可以提高其长期稳定性。

4.3 降低能耗与提升效率

通过优化功率管理和温度控制策略，可以有效降低形状记忆合金机电执行器的能耗，提高其工作效率。结合智能算法，能够实现对工作状态的实时调整，从而减少能量浪费。

5 结语

新型形状记忆合金在机电执行器中的应用展现出广阔的前景。通过优化合金材料、设计控制系统和改进驱动方式，形状记忆合金能够为机电一体化设备提供高效、精确和灵活的控制方式。未来，随着材料技术、控制技术的不断发展，形状记忆合金将在更多高端领域中发挥重要作用。通过深入研究其优化方法，进一步提升执行器的性能和可靠性，将为智能化设备的发展提供强有力的支持。

参考文献

- [1] 谭鑫,张洪跃,赵玉婵,等.形状记忆合金在辅助器具和康复设备中的应用[J].中国组织工程研究,2025,29(10):2113-2123.
- [2] 戚孟飞.基于形状记忆合金的机械臂结构设计与优化[J].冶金与材料,2024,44(05):16-18.
- [3] 黄思著.钛锆铌铝形状记忆合金热循环稳定性研究[D].西安石油大学,2024.DOI:10.27400/d.cnki.gxasc.2024.000452.
- [4] 党明珠.激光选区熔化Cu-Al-Mn-Ti/Si形状记忆合金的组织与性能研究[D].华中科技大学,2024.DOI:10.27157/d.cnki.ghzku.2024.000096.
- [5] 王博.SLM成形CuAlFe形状记忆合金的组织与性能调控[D].西安工业大学,2024.DOI:10.27391/d.cnki.gxagu.2024.000030.