

智能紧固件的材料与制造技术研究

鲁鹏¹ 付永亮¹ 陈浩然¹ 刘吉¹ 倪健童¹ 陈飞²

1.中国第一汽车股份有限公司；2.河南航天精工制造有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v5i10.7319

[摘要] 智能紧固件是一类集成了传感、通信等功能新型连接件，在工业制造、汽车、航空航天等领域广泛应用。本文系统地研究了智能紧固件的常用材料及其性能优化，以及先进制造技术在智能紧固件生产中的应用。首先对常见的智能紧固件材料，如金属合金、复合材料、智能材料等进行了分析和比较，探讨了材料性能、加工性、成本等因素对材料选择的影响。其次，针对智能紧固件的特殊结构和功能要求，研究了3D打印、激光焊接、精密注塑等先进制造工艺及其在智能紧固件生产中的应用。最后，提出了未来智能紧固件材料与制造技术的发展方向，为推动智能紧固件的广泛应用提供技术支持。

[关键词] 智能紧固件；材料选择；制造工艺；性能优化

Research on material and manufacturing technology of intelligent fasteners

Lu peng¹ Fu yongliang¹ Chen haoran¹ Liu ji¹ Ni jiantong¹ Chen fei²

1.Engineering and technology department, China FAW Corporation Limited;

2.Henan Aerospace Precision Maching Co., Ltd

[Abstract] Intelligent fastener is a new type of connector that integrates sensing, communication and other functions. It is widely used in industrial manufacturing, automobile, aerospace and other fields. This paper systematically studies the common materials and performance optimization of intelligent fasteners, as well as the application of advanced manufacturing technology in the production of intelligent fasteners. Firstly, the common smart fastener materials, such as metal alloys, composite materials and smart materials, are analyzed and compared. The effects of material properties, processability and cost on material selection are discussed. Secondly, according to the special structure and functional requirements of intelligent fasteners, the advanced manufacturing processes such as 3D printing, laser welding, precision injection molding and their applications in the production of intelligent fasteners are studied. Finally, the development direction of intelligent fastener materials and manufacturing technology in the future is put forward, which provides technical support for promoting the wide application of intelligent fasteners.

[Key words] Intelligent fasteners; material selection; manufacturing process; performance optimization

引言

随着工业自动化和智能制造的发展，紧固件作为连接关键零部件的重要元器件，其功能和性能也逐步提升^[1-2]。智能紧固件作为一种新型的智能化材料，具有对结构承载状态进行监测、预测和调整的功能，为工程结构的安全运行提供了新的保障。智能紧固件的出现不仅提高了结构的安全性和稳定性，也为结构的维护和管理带来了便利^[3-4]。其作为一种结合了传统机

械件和智能化技术的产物，具有重要的应用前景。

智能紧固件是一种结合了传统紧固件（如螺钉、螺栓、螺母等）和智能技术（如传感器、控制器等）的新型产品，能够实现监测、反馈和调节功能，提高紧固件在工程结构中的效能和安全性。在材料和制造技术方面的研究对于智能紧固件的发展至关重要。工程结构领域中，智能紧固件具有广阔的应用前景和潜在的巨大价值。通过将传感器、控制器和执行器等智能

元件嵌入到紧固件中, 可以实现对结构状态的实时监测和调节, 有效地提高结构的抗风、抗震、抗变形等性能, 从而延长结构的使用寿命并降低维护成本^[5]。此外, 智能紧固件还能够为结构的智能化管理和自动化控制提供支持, 为工程结构的智能化发展提供强有力的技术支撑。

智能紧固件的关键在于选择合适的材料, 并采用先进的制造工艺^[6]。材料的力学性能、导电性、耐腐蚀性等特性直接影响智能紧固件的使用寿命和可靠性^[7]。同时, 制造工艺的精度和效率也决定了智能紧固件的性能和生产成本。因此, 深入研究智能紧固件的材料选择和制造技术, 对于推动该领域的发展具有重要意义。

本文从材料选择和制造工艺两个方面, 系统地研究了智能紧固件的关键技术。首先, 分析了金属合金、复合材料、智能材料等常见的智能紧固件材料, 探讨了各类材料的优缺点及其适用场景。其次, 针对智能紧固件的特殊结构和功能要求, 研究了3D打印、激光焊接、精密注塑等先进制造工艺在智能紧固件生产中的应用^[8]。最后, 提出了未来智能紧固件材料与制造技术的发展方向, 为智能紧固件的广泛应用提供技术支撑。

1 智能紧固件的材料选择和优化

1.1 金属合金材料

金属合金是智能紧固件最常见的材料。常用的金属合金包括不锈钢、钛合金、铝合金等。这些金属合金具有良好的力学性能、耐腐蚀性和加工性, 广泛应用于智能紧固件的制造。材料的选择还要考虑到智能部件的集成性和互操作性, 以确保传感器和控制器的正常运行。

1.1.1 不锈钢

不锈钢是智能紧固件的首选材料之一。常见的不锈钢牌号有304、316L等, 制造出来的产品如图1所示。这类不锈钢生产出来的螺钉和螺母具有优异的抗腐蚀性、良好的机械强度和较低的成本, 是工业生产中广泛使用的材料。但是, 不锈钢的导电性较差, 不利于集成电子功能模块, 需要采取特殊的处理措施。

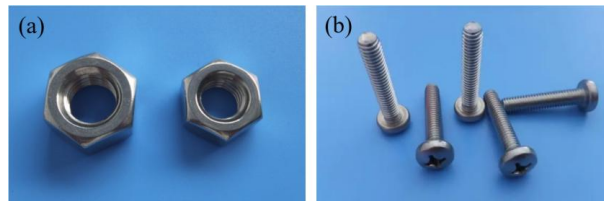
为了提升不锈钢的导电性, 可以采用离子注入技术在表面镀覆导电涂层, 如银、铜等。这种方法可以在保留不锈钢优异机械性能的基础上, 显著改善其导电性能, 为集成电子元件创造有利条件。此外, 还可以采用激光表面改性技术, 通过局部熔融和再凝固, 在不锈钢表面形成致密的导电层, 实现同样的效果。传统的不锈钢、合金钢料具备较好的力学性能和耐腐蚀性能, 在智能紧固件中也得到了广泛应用。然而, 智能紧固件的材料选择不仅要考虑到力学性能和耐腐蚀性能, 还需要考虑到智能部件的集成性和互操作性, 以确保传感器和控制器的正常运行。^[9]

17-4PH 沉淀硬化型不锈钢由于其成型性好, 可通过简单热处理获得高强度, 并且其碳含量低、铬含量高, 含有铜、镍和铌等元素耐蚀性优于普通标准不锈钢^[10], 目前已作为紧固件材料在航空航天领域得到广泛使用。但在恶劣的服役环境下, 不锈钢紧固件在温度、压力和腐蚀介质的联合作用下则可能发生局部腐蚀。不锈钢产品的局部腐蚀不仅危害极大, 而且严重

妨碍了耐蚀合金的应用和推广。因此, 在航空工业生产中对抗空紧固件材料的耐腐蚀性能有了更高的要求^[11]。

性能优化方法: 探究了不同热处理方式对17-4PH航空紧固件材料耐蚀性、微观形貌及显微维氏硬度的影响^[10]。

综上, 紧固件螺栓、螺母、螺柱采用不锈钢材料具有可行性, 但在具体替代过程中, 应与设计人员及项目业主深入讨论达成共识^[12]。



(a) 防腐防锈六角螺母

(b) 防腐防锈螺钉

图1 304和316L不锈钢

1.1.2 钛合金

钛合金以其出色的比强度、耐腐蚀性和生物相容性而广受青睐, 钛合金的强度可达到高强钢的水平, 密度仅为钢的一半, 是理想的轻量化材料^[13, 15]。此外, 钛合金具有良好的生物相容性, 在医疗器械领域有广泛应用, 使用铸造生产出来的钛合金经过适当的热处理进行提高合金的综合性能, 最终加工成的紧固件如图2所示。

但是, 钛合金的加工性较差, 需要采用专门的加工工艺。此外, 钛合金的成本较高, 限制了其在某些对成本敏感的领域的应用。为了降低成本, 可以采用粉末冶金等新型制造工艺, 利用近净成形技术制造复杂结构的智能紧固件^[16]。



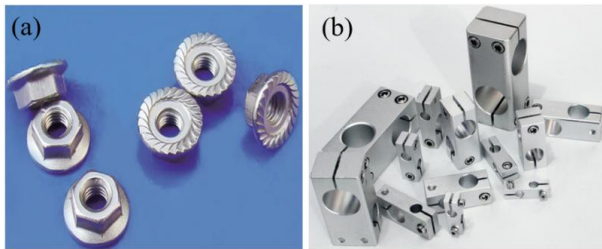
(a) 螺母螺钉, (b) 螺钉紧固件, (c) 螺丝紧固件

图2 高强度、耐腐蚀钛及钛合金紧固件

1.1.3 铝合金

铝合金以其轻质、耐腐蚀的特点, 在智能紧固件领域也有广泛应用, 可以用来制作航空航天、风电和汽车等领域中, 常用的紧固件如图3所示。常见的铝合金牌号有6061、7075等。铝合金具有良好的导电性, 有利于电子功能的集成。同时, 铝合金的加工性较好, 易于实现复杂结构的制造。

但是, 铝合金的强度相对较低, 需要采取一定的增强措施, 如添加硬质颗粒强化或热处理等。此外, 铝合金的耐腐蚀性也略逊于不锈钢, 在腐蚀性环境下使用时需要采取防护措施。



(a) 连接件法兰螺母, (b) 航空航天、汽车紧固件用铝合金
图3 轻质、耐腐蚀铝合金紧固件

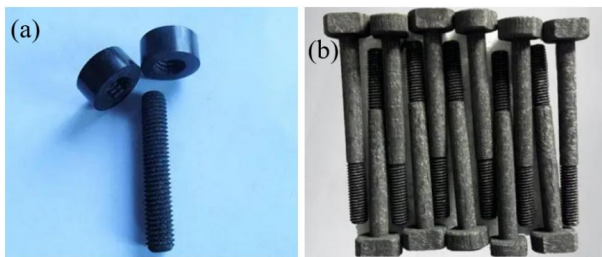
1.2 复合材料

复合材料凭借其优异的比强度、比刚度等特点,越来越多地应用于智能紧固件的制造。常见的复合材料包括碳纤维复合材料、玻璃纤维复合材料等^[17, 19]。

1.2.1 碳纤维复合材料

碳纤维复合材料以其出色的机械性能而备受青睐。碳纤维复合材料的比强度可达到钢材的5-10倍,比刚度也远高于金属材料。同时,碳纤维复合材料还具有良好的耐腐蚀性和电磁屏蔽性能,在防电磁屏蔽领域中具有较好的使用效果,具体的产品如图4所示。这些特点使其成为智能紧固件的理想材料选择。

但是,碳纤维复合材料的导电性较差,不利于电子功能的集成。为此,可以采用碳纳米管或导电纤维增强的方式,提高复合材料的导电性,实现紧固件的智能化。此外,碳纤维复合材料的成本相对较高,限制了其在某些对成本敏感的领域的应用。



(a) 电子屏蔽螺母螺钉, (b) 长螺钉

图4 碳纤维材料作紧固件

1.2.2 玻璃纤维复合材料

玻璃纤维复合材料兼具良好的机械性能、耐腐蚀性和较低的成本,也是智能紧固件的常用材料之一。与碳纤维相比,玻璃纤维复合材料的比强度和比刚度略逊一筹,但其成本更低。

为了提高玻璃纤维复合材料的导电性,可以在基体树脂中添加导电填料,如碳黑、金属粉末等。这种方法可以赋予复合材料一定的导电性,为集成电子功能提供可能^[9]。此外,还可以采用表面镀覆的方式,在玻璃纤维复合材料表面沉积导电涂层,实现同样的目的。

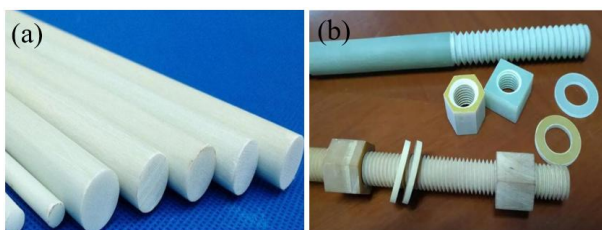


图5 玻璃纤维材料紧固件

1.3 智能材料

智能材料是一类能够感知外界刺激并作出相应响应的新型材料,在智能紧固件领域也有重要应用。常见的智能材料包括形状记忆合金、压电 ceramics、磁性合金等。

1.3.1 形状记忆合金

形状记忆合金是一种能够在受热或机械应力作用下发生相变并恢复原始形状的合金材料,图5所示为生产出紧固件部分材料。这种特性使其非常适合应用于可重复连接/断开的智能紧固件。当受到外力作用时,形状记忆合金件会发生相变并发生变形,从而带动紧固件的连接/断开动作。当外力消失时,材料又会恢复原始形状,实现自动复位^[10]。



图6 形状记忆合金紧固件

1.3.2 压电 ceramics

压电 ceramics 是一类在受到机械应力作用时会产生电压的陶瓷材料。这种材料可以用作智能紧固件内置的传感器,检测紧固件受力状态,为智能监测提供信号源。同时,压电 ceramics 还可以反向工作,当施加电压时会产生机械变形,从而带动紧固件的连接/断开动作。

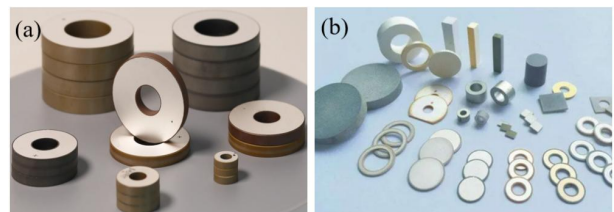


图7 压电陶瓷材料

1.3.3 磁性合金

磁性合金具有可调节的磁性能,可以用作智能紧固件的执行机构。当施加磁场时,磁性合金会发生形变,从而带动紧固件的连接/断开动作。这种方式可以实现无接触、无磨损的智能控制。

综上所述,金属合金、复合材料、智能材料等是智能紧固件的常用材料。不同材料具有各自的优缺点,需要针对具体应用场景进行权衡取舍。在材料选择时,应考虑力学性能、导电性、耐腐蚀性、成本等因素,同时还要注重材料的加工性和兼容性。通过材料性能的优化和创新,可以推动智能紧固件技术的进一步发展。



图8 磁性螺塞

2 智能紧固件的制造工艺及工装研究

2.1 紧固件用材制造工艺

航空航天紧固件用合金材料研制生产主要采用制备技术，通过真空感应 + 真空自耗重熔双联冶炼技术制备成铸锭，再通过锻造、轧制、挤压等方式加工变形材，涉及的关键核心技术主要有：合金成分调控技术、双联纯净化冶炼、热轧坯的成分和组织均匀性控制技术、高速连续轧制稳定性控制技术、棒材冷拉变形对强韧性及尺寸精度的控制技术；航空航天紧固件研制生产主要采用锻制成型工艺，涉及的关键核心技术主要有：棒丝材全面性能测试分析技术、多工位温锻成型技术、高精度搓丝滚丝技术、自润滑涂层涂覆技术、综合考核验证技术等[3]。

智能紧固件的制造技术需要考虑到智能部件的集成和保护。例如，传感器的安装位置和方法需要精确控制，以确保其能够正常工作并且不受外界环境的干扰。同时，制造过程中还需要考虑到紧固件的性能和可靠性，包括表面处理、热处理等工艺。

2.2 紧固件成型制造工艺及性能优化

2.2.1 滚压技术

由于螺纹是紧固件的典型特征，其成形质量极大地影响紧固件产品的结构强度和性能水平，因此，航空航天等领域高性能紧固件大部分采用滚压加工螺纹。滚压螺纹是指在精密滚丝机床上对金属坯料进行径向挤压，使金属产生塑性变形而形成螺纹，并使螺纹强化的加工技术。与车制螺纹相比，滚压螺纹具有材料利用率高、表面质量好、螺纹强度和表面硬度高及疲劳寿命和生产效率高等特点。螺纹在滚压成形过程中，材料的塑性变形抗力加大，硬度和强度得到提高，而塑性和韧性下降，即产生加工硬化现象，极易使螺纹牙顶形成裂纹和折叠等缺陷。对于这类难加工材料的螺纹加工技术，通过对螺纹成形过程分析，计算及验证滚压螺纹的螺纹坯径，确定滚压力、滚轮转速、滚轮进给速度及切削液选配等主要工艺要素，解决了冷滚压加工中存在的滚丝轮崩牙和紧固件螺纹折叠超标等问题，保证了滚压螺纹后外螺纹表面质量。

2.2.2 3D 打印技术

3D 打印技术凭借其能够实现个性化定制、缩短生产周期等优势，在智能紧固件制造中得到广泛应用。3D 打印可以制造具有复杂内腔结构的智能紧固件，为集成传感器、执行机构等提供可能。常用的 3D 打印技术包括熔融沉积成型法（FDM）、选区激光烧结（SLS）、数字光处理（DLP）等。这些技术可以加工金属、陶瓷、高分子等多种材料，满足智能紧固件的多样化需求。3D 打印技术的优势在于能够实现复杂结构的一体化成型，大幅缩短生产周期。但是，3D 打印件通常存在力学性能略低于传统制造工艺的问题，需要采取优化措施。此外，3D 打印设备的成本相对较高，也限制了其在某些领域的应用。

2.2.3 激光焊接技术

激光焊接是一种高效、高精度的焊接工艺，可用于智能紧

固件的制造。与传统焊接相比，激光焊接具有热量输入小、变形小、焊缝细密等优点，非常适合智能紧固件这类精密部件的加工。激光焊接可用于金属智能紧固件的制造。通过精确控制激光功率、焦斑尺寸等参数，可实现高质量的焊接。同时，激光焊接工艺还可与机器视觉、机器人等技术相结合，实现全自动化生产，提高生产效率。

但是，激光焊接对材料的反射率、热导率等特性要求较高，对设备投资也有一定要求。因此，在应用激光焊接制造智能紧固件时，需要综合考虑工艺特点、设备成本等因素，选择合适的工艺参数。

2.2.4 精密注塑技术

精密注塑技术是一种高效、高精度的塑料成型工艺，在智能紧固件制造中也有广泛应用。通过精密控制注塑参数，可以制造出具有复杂结构和高尺寸精度的塑料智能紧固件[15]。

精密注塑工艺可用于制造塑料壳体、绝缘件等智能紧固件部件。通过优化模具设计、注塑参数等，可以实现紧固件结构的一体化成型，降低装配难度。同时，注塑工艺还可与金属注射成型（MIM）相结合，制造金属-塑料复合结构的智能紧固件。精密注塑的优势在于生产效率高、成本低。但是，注塑件的力学性能相对较低，需要采取增强措施。此外，注塑工艺对模具制造和参数控制的要求也较高，对设备投资有一定需求。

2.3 表面技术性能优化

目前，提高难熔金属在高温有氧环境下抗高温氧化能力的主要途径有合金化和表面涂层两种方式^[20]。合金化的方法可以改善合金的抗氧化性能，但合金化的元素必须超过一定量的临界值才会对基体起到保护作用，这样势必影响合金的其他性能，尤其会造成基体高温力学性能的下降。而在合金表面加制涂层，既可保护合金基体不受高温腐蚀或减缓腐蚀速率，又不会改变合金基体成分，可在最大程度上保留合金的高温力学性能。Nb521 制造的螺栓、螺钉、螺柱和螺母紧固件所采用的表面处理方式为表面加制涂层^[21]，采用料浆熔烧法制备，为性能优良的硅化物复合涂层，涂层厚度为 $(60 \pm 10) \mu\text{m}$ 。涂层检测及高温性能满足大气环境中：1600℃静态抗氧化寿命要求 $\geq 1\text{h}$ ；1800℃静态抗氧化寿命要求 $\geq 0.5\text{h}$ ；1800℃冷却（水冷）至室温，热振寿命 ≥ 50 次。

综上所述，3D 打印、激光焊接、精密注塑等先进制造技术，为智能紧固件的生产提供了新的解决方案。这些技术能够满足智能紧固件复杂结构、高精度的要求，同时也可以提高生产效率、降低成本。未来，智能紧固件制造还将进一步向自动化、柔性化的方向发展。

智能紧固件的制造技术需要考虑到智能部件的集成和保护。传感器的安装位置和方法需要精确控制，以确保其能够正常工作并且不受外界环境的干扰。同时，制造过程中还需要考虑到紧固件的性能和可靠性，包括表面处理、热处理等工艺，以确保智能紧固件的质量和稳定性。

3 总结与展望

智能紧固件的材料与制造技术研究涉及多个方面,需要跨学科的合作和深入的探索。随着智能化技术的不断发展和完善,智能紧固件将在工程结构中发挥越来越重要的作用,为工程安全和效率提供更好的保障。根据已有的研究及智能紧固件的现状,预测未来智能紧固件材料和制造技术的主要发展方向包括:

材料创新: 研发具有更高强度、更轻量、更智能化功能的新型材料,如碳纤维复合材料、智能合金等,以满足更苛刻的应用需求。**制造工艺优化:** 采用3D打印、自动化装配等先进制造技术,提高生产效率和一致性,降低成本。**集成化设计:** 将传感器、通信模块等智能功能与紧固件本体更好地集成,实现全面的智能化。**可靠性提升:** 通过材料选择、工艺控制等手段,确保智能紧固件在复杂环境下的长期可靠运行。**网联应用:** 将智能紧固件融入物联网,实现远程监测、故障诊断等功能,提升产品服务价值。这些发展方向都需要克服一些技术挑战,如材料性能提升、制造精度控制、电子集成等。同时,成本控制、标准化建立等也是需要重点关注的领域。

总的来说,智能紧固件材料和制造技术的未来发展,将推动产品性能不断提升,满足更加智能化和网联化的应用需求。综上所述,智能紧固件的材料与制造技术研究涉及多个方面,需要跨学科的合作和深入的探索,以实现智能紧固件在各种工程应用中的广泛应用。

[参考文献]

[1]Zhang, Y, Li, T, Xu, L, et al. (2019). Intelligent Bolts for Structural Health Monitoring of Aerospace Structures. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 30 (6), 864-877.

[2]赵辉. 紧固件用Al-Zn-Mg-Cu合金组织与性能调控研究[D]. 中南大学, 2023.

[3]朱行欣, 胡晓培. 国内航空航天用高温合金紧固件发展现状[J]. *金属制品*, 2023, 49 (03): 1-3.

[4]赵庆云, 刘风雷, 刘华东. 世界先进航空紧固件进展[J]. *航空制造技术*, 2009, (03): 54-56.

[5]Wang, H., Li, J., Hu, J., et al. (2020). Development of Smart Connectors for Electronics Substrates. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 10 (12), 2179-2186.

[6]王兆英, 吴畏, 赵振, 等. 紧固件用SA-540合金钢的强韧化工艺研究[J]. *特殊钢*, 2022, 43 (06): 89-94.

[7]刘欣玉. 国外油田项目管道法兰用紧固件材料探讨[J]. *全面腐蚀控制*, 2023, 37 (12): 68-72.

[8]Wang, L., Zhang, M., Li, X., et al. (2018). Research on the Surface Modification of Fasteners Based on Nano Materials. *Advanced Materials Research*, 1128, 101-105.

[9]徐立军, 范奇达, 张文波, 等. 奥氏体不锈钢螺纹紧固件摩擦系数影响因素的试验研究[J]. *汽车与驾驶维修(维修版)*, 2023, (05): 22-25+29.

[10]纪翔, 张汛涛, 宋先捷, 等. 不同热处理后航空紧固件用17-4PH钢耐腐蚀性及硬度的研究[J]. *热加工工艺*, 2022, 51 (20): 130-136.

[11]王长昱, Enobong Felix DANIEL, 李超, 等. 海洋环境中碳钢和不锈钢螺栓紧固件的腐蚀机制差异研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2023, 43 (04): 737-745.

[12]王振兴, 杨涛, 陈子昂, 等. LNG全容储罐内紧固件材料标准分析[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2023, 43 (12): 7-8+11.

[13]韦利军, 王媛媛, 朱培, 等. 航空钛合金紧固件微弧氧化膜层的制备与耐腐蚀行为研究[J]. *环境技术*, 2022, 40 (06): 12-16.

[14]黄帆, 海敏娜, 孙虎代, 等. 热处理对航空紧固件用TC16钛合金棒材组织性能的影响[J]. *金属世界*, 2022, (05): 46-50.

[15]同晓乐, 岳旭, 阿热达克·阿力玛斯, 等. 热处理工艺对紧固件用TC16钛合金棒材显微组织与力学性能的影响[J]. *世界有色金属*, 2022, (09): 13-15.

[16]吴晨, 马保飞, 赵耕岑, 等. 延时淬火对航天紧固件用TC4钛合金组织和性能的影响[J]. *金属热处理*, 2023, 48 (12): 135-139.

[17]周龙, 朱书华, 陈绍雄, 等. 复合材料紧固件拉脱试验与数值仿真研究[J]. *航空计算技术*, 2022, 52 (05): 97-100+105.

[18]宁蕙, 谭志勇, 张宏宇. 复合材料螺栓连接结构疲劳问题研究进展[J]. *强度与环境*, 2023, 50 (03): 1-9.

[19]马雪寒, 王守财, 陈旭, 等. 陶瓷基复合材料紧固件制造技术及其连接性能研究进展[J]. *复合材料学报*, 2023, 40 (06): 3075-3089.

[20]刘燕, 李国政, 贾丹, 等. 银涂层保护技术在航空发动机紧固件中的应用研究进展[J]. *中国表面工程*, 2023, 36 (04): 21-35.

[21]詹兴刚, 胡军林, 刘燕, 等. 航空发动机用离子镀银紧固件的耐酸性盐雾性能研究[J]. *电镀与精饰*, 2022, 44 (11): 12-17.

通讯作者: 鲁鹏, 中级工程师。