

碳 / 碳复合材料在飞机刹车盘中的制备工艺与性能分析

范丽君

(烟台鲁航炭材料科技有限公司, 山东 烟台 264000)

摘要: 在全球气候变化和能源紧张背景下, 可持续发展和绿色能源已成为当今社会的核心议题。航空业作为全球碳排放的主要贡献者之一, 面临着巨大的减排压力。因此, 开发和应用新型绿色材料成为航空业减碳的关键。碳 / 碳复合材料作为一种先进的高性能材料, 具有轻质、高强度、耐高温等优点, 是航空航天领域理想的候选材料。本文旨在全面探讨碳 / 碳复合材料在飞机刹车盘中的应用, 重点研究其制备工艺及性能, 为推动航空业的绿色发展提供有力支持。

关键词: 碳 / 碳复合材料; 飞机刹车盘; 制备工艺; 性能分析

中图分类号: TB332

文献标识码: A

DOI: 10.12230/j.issn.2095-6657.2024.08.035

在航空工业的飞速发展, 飞机材料的性能要求日益严格, 特别是在关键部件如刹车盘的应用上。由于其独特的高强度、耐高温和轻量化特性, 碳 / 碳复合材料已成为航空领域的关键材料。本研究的核心目标是深入分析碳 / 碳复合材料在飞机刹车盘中的制备工艺和性能, 以满足航空领域对高性能材料的需求。通过详细探讨从原材料选择到最终产品的石墨化处理等不同制备阶段, 我们将揭示这些材料如何满足特定的航空要求。此外, 本文还将对碳 / 碳复合材料的机械、热和摩擦性能进行全面的分析, 以评估其在各种实际应用中的表现。通过这一全面的研究, 期望为航空工业提供有关碳 / 碳复合材料在飞机刹车盘应用中的制备工艺和性能的深入见解, 并为未来的研究和开发提供有价值的参考。

1 碳 / 碳复合材料的制备工艺

1.1 原材料的选择和处理

在碳 / 碳复合材料的制备过程中, 原材料的选择和处理是决定最终产品性能的关键步骤。首先, 选用的碳纤维必须具备高强度和高模量特性, 以确保复合材料在极端条件下的性能稳定性。通常, 这些碳纤维通过特殊的碳化处理获得, 以提升其耐高温和机械性能。其次, 树脂的选择也至关重要, 它不仅需要在高温下保持稳定, 还要能有效地与碳纤维结合, 确保复合材料的整体性和一致性。在处理过程中, 纤维表面进行适当的化学或物理处理, 以改善其与树脂的粘接性能。最后, 原材料的均匀分布和精确配比对于确保最终产品的一致性和性能具有决定性作用。因此, 在原材料的选择和处理上采取精细化管理是碳 / 碳复合材料制备中的关键环节^[1]。

1.2 碳纤维预制体的选择—2.5D 准三维针刺碳纤维预制体

在制备碳 / 碳复合材料时, 碳纤维预制体的选择对最终产

品的性能有重大影响。2.5D 准三维针刺碳纤维预制体因其独特的结构和优异的性能特点, 被广泛应用于高性能的航空领域。这种预制体的结构使得碳纤维在三个方向(两个平面方向和一个垂直方向)上进行排列和连接, 从而提供了更好的力学性能和热稳定性。针刺工艺在这里发挥着关键作用, 它通过机械方式将纤维束穿插连接, 形成稳定而均匀的网络结构。这种结构不仅增强了材料的整体性和耐磨损性, 还提高了其在不同方向上的负载承受能力。与传统的二维布或单向布相比, 2.5D 准三维针刺预制体在处理高应力和复杂载荷时显示出更优越的性能。此外, 这种预制体的制备过程还允许更精确地控制纤维体积分数和分布, 为后续的化学气相沉积(CVD)和石墨化处理提供了良好的基础。因此, 在碳 / 碳复合材料的制备中, 2.5D 准三维针刺碳纤维预制体的选择至关重要, 直接影响到最终材料的综合性能。

1.3 热处理过程

热处理过程是碳 / 碳复合材料制备中的关键步骤, 对材料的热稳定性、机械强度和应用性能有着决定性影响。该过程主要分为碳化和高温石墨化两个阶段: 在碳化阶段, 碳纤维预制体在高温环境(通常在 1000℃以上)中处理, 以去除非碳元素(如氢、氧), 留下纯碳结构。此阶段对提高材料耐高温性能至关重要, 需要精确控制温度和时间, 以保留纤维的结构和性能。接下来的高温石墨化阶段, 在更高温度(通常超过 2000℃)下进行, 目的是通过碳原子重排, 形成类似石墨的结构, 以提高热导率和耐热震性能, 同时改善电导率, 这对电磁屏蔽和静电放电应用尤为重要。石墨化阶段的温度和时间控制对于获得理想微观结构至关重要, 不当控制可能导致纤维损伤或未能完全实现石墨化^[2]。

1.4 化学气相沉积法制备碳 / 碳复合材料(及 PIP 浸渍)

化学气相沉积(CVD)和聚合物浸渍热解(PIP)是制备

高性能碳 / 碳复合材料的两个关键技术，它们在材料科学领域扮演着至关重要的角色。

在 CVD 过程中，含碳的气体（如甲烷、乙烯或丙烯）在高温环境下分解，碳原子从气体相分离并沉积在碳纤维预制体的表面。这个过程在控制的条件下进行，如精确的温度控制、气体流速和压力。通过 CVD，碳原子均匀地沉积在纤维上，形成致密的碳基基体，这一基体不仅填充了预制体的孔隙，还显著提升了材料的密度和机械强度，增强了复合材料的整体结构。CVD 过程的优化对于确保材料的均匀性和性能至关重要，特别是在制备用于承受高负载和高温环境的航空刹车盘时。

PIP 工艺则是另一种提高碳 / 碳复合材料性能的关键方法，在此过程中，碳纤维预制体被浸渍在含有高分子前驱体的溶液中，例如，苯并噻吩树脂或酚醛树脂。浸渍后的预制体经过热解，其中高分子前驱体转化为碳，形成额外的碳基基体。这一步骤有助于提升材料的均匀性和微观结构，从而提高其抗裂性和耐磨性能。此外，PIP 工艺还可以增强材料的热稳定性和化学稳定性，这对于航空刹车盘等应用尤为重要。

CVD 和 PIP 的结合使用为生产具有优越物理和化学性质的碳 / 碳复合材料提供了一种高效的途径。这种方法通过精细的控制和多阶段的处理，实现了对复合材料微观结构的优化，从而提高了其在极端条件下的性能表现。在航空刹车盘等关键应用中，这些优化的材料能够提供更好的性能和更长的使用寿命。然而，CVD 和 PIP 工艺的复杂性也带来了挑战，包括工艺控制的精度、成本和时间效率。未来的研究将继续探索这些工艺的优化，以提高碳 / 碳复合材料的性能和降低其制造成本^[3]。

1.5 石墨化过程

石墨化过程是碳 / 碳复合材料制备的至关重要的最后阶段，它的目的是通过改变材料的微观结构来提高其热导率和电导率。这一过程对于优化材料的综合性能至关重要，尤其是在应用于高性能环境，如航空刹车系统的性能表现。在石墨化阶段，经过 CVD 和 PIP 工艺处理的复合材料被放置在极高温度的环境下，通常温度超过 2500℃，这一高温热处理促进了材料内部微晶碳结构向石墨化结构的转变。这种结构转变显著提高了材料的热稳定性，使其在极端温度下能够保持物理和化学性质的稳定。同时，石墨化结构的形成也大幅度提升了材料的电导率，这对于需要电磁屏蔽或导电性能的应用场景非常重要。除了改善热稳定性和电导率，石墨化过程还对材料的耐磨性和抗氧化性产生显著影响。高温下的石墨化处理增强了材料的耐磨损能力，这对于航空刹车盘等频繁接触高摩擦力的应用至关重要。此外，石墨化结构的形成还提高了材料的抗氧化能力，使其在高温和氧化环境中更为稳定。

值得注意的是，石墨化过程中温度、时间和气氛的精确控

制对于实现理想的材料性能至关重要。温度控制确保了石墨化结构的正确形成，而时间控制则关乎整个结构转变的完整性。此外，处理过程中的气氛控制也很重要，因为不同的气氛条件可能会影响材料的微观结构和最终性能。

2 碳 / 碳复合材料的性能分析

2.1 机械性能分析

碳 / 碳复合材料的机械性能是其在航空领域应用的关键因素，尤其是在承受极端飞行条件和高负载的飞机刹车盘中。本文深入分析了这些材料的主要机械性能指标，包括强度、模量、韧性和耐疲劳性。首先，碳 / 碳复合材料展现出高强度的特性，这得益于其独特的微观结构和碳纤维的高强度特性。在航空刹车盘应用中，这种高强度保证了材料即使在极端的负载和高温条件下也不会发生断裂。其次，高模量是碳 / 碳复合材料的另一显著特点。高模量确保了在重复应力作用下，材料能够保持形状和尺寸的稳定，这对于保持飞机刹车系统的精确性和可靠性至关重要。再次，韧性是评估材料抗冲击和抗裂纹扩展能力的重要指标。碳 / 碳复合材料因其特殊的纤维结构和基体相互作用，展现出良好的韧性，使其在遭受突然冲击或高负载时更为耐用。最后，耐疲劳性是另一关键指标，尤其在飞机频繁起降和刹车过程中至关重要。研究表明，碳 / 碳复合材料在长期循环负载作用下，能够保持良好的性能，不易产生疲劳裂纹。

通过对碳 / 碳复合材料的微观结构和宏观性能的综合分析，可以得出其在航空刹车盘应用中的优异机械性能。这些性能的优化和提升，为航空安全和性能的提高作出了重要贡献。

2.2 热性能分析

碳 / 碳复合材料的热性能是其在高温环境中应用的关键指标，特别是在飞机刹车系统中，这些材料必须能够承受极端的热负荷。本文对碳 / 碳复合材料的热性能进行了全面分析，包括热稳定性、热导率、热膨胀系数和热震性能。

首先，热稳定性是评价材料在高温环境下性能是否保持稳定的重要指标。碳 / 碳复合材料能够在高达 2500℃ 的温度下保持结构和性能稳定，这得益于其独特的碳纤维和石墨化微结构，这种稳定性使其成为高温应用（如航空刹车盘）的理想选择。其次，热导率是另一个关键因素，它决定了材料在热负荷下的冷却效率。碳 / 碳复合材料具有高热导率，能够迅速导出刹车过程中产生的热量，减少热累积并提高整体性能和安全性。再次，热膨胀系数（CTE）是衡量材料在温度变化下尺寸稳定性的指标。碳 / 碳复合材料的热膨胀系数低，意味着即使在极端温度变化下，也能保持尺寸的稳定性，这对于确保飞机刹车系统的精确性非常重要。最后，热震性能是衡量材料在快速温度变化下稳定性的重要指标。碳 / 碳复合材料展现出卓越的热震

抗性,能够承受由于急剧温度变化所引发的内部应力,有效避免破裂或损伤,这一特性对于飞机刹车盘在频繁起降和紧急制动等严苛条件下至关重要。

2.3 摩擦性能分析

摩擦性能是评估碳/碳复合材料在飞机刹车盘应用中的关键指标,包括摩擦系数、磨损率和抗磨损性能。这些性能直接影响刹车系统的效率和寿命,对航空安全至关重要。首先,摩擦系数是衡量材料摩擦效能的主要指标。碳/碳复合材料具有适中且稳定的摩擦系数,这对于确保刹车系统的可靠性和有效性非常重要。一个理想的摩擦系数不仅保证了良好的刹车性能,还能减少能量损耗和热生成,提高整体刹车效率。碳/碳复合材料的摩擦系数在不同的操作条件下(如不同温度和加载速率)表现出良好的稳定性,这使得飞机刹车系统在各种飞行和天气条件下都能保持一致的性能。其次,磨损率是另一个重要指标,它决定了材料的耐用性和维护周期。碳/碳复合材料在长期使用过程中展示出较低的磨损率,这一特性归功于其高强度和耐高温的微结构。低磨损率意味着更长的维护间隔和更低的维护成本,对于商业航空来说尤为重要。最后,抗磨损性能是评估材料在重复摩擦和磨损下的耐久性。碳/碳复合材料因其优异的抗磨损性能而被广泛应用于飞机刹车盘,这种性能主要归因于其独特的纤维增强结构,能够在重载和高速条件下抵抗磨损,保持刹车盘的完整性和性能。

3 碳/碳复合材料在飞机刹车盘中应用的优势和挑战

碳/碳复合材料在飞机刹车盘中的应用展现了其独特的优势,同时也带来了一些挑战。这些材料因其卓越的性能特性在航空领域中获得了广泛应用,但在制造和实际使用过程中也面临着多方面的考验。

3.1 优势方面

碳/碳复合材料的最大优势在于其卓越的高温性能和热稳定性。这种材料能够在高达 2500℃ 的温度下保持性能不变,使其成为理想的高温应用材料,特别是在飞机刹车系统中。在极端的起降和紧急制动过程中,刹车盘会产生大量热能,而碳/碳复合材料能够有效地承受这种热负荷,且不会像传统金属材料那样在高温下变形或失去强度。此外,碳/碳复合材料的轻质特性对于降低飞机的整体重量和提高燃油效率具有重要意义。这种材料的密度远低于传统的金属材料,但提供了更高的强度和刚性,从而减轻了飞机的重量,提高了

其性能和效率。碳/碳复合材料在摩擦性能方面也表现出色。它们具有适中的摩擦系数和低磨损率,这意味着刹车系统可以实现更长的使用寿命和更低的维护成本。同时,这种材料的自润滑特性减少了在刹车过程中的磨损,保持了刹车盘的性能和效率。

3.2 挑战方面

碳/碳复合材料的高成本是其主要的挑战之一。从原材料的采购到复杂的制备工艺,这些因素都显著提高了最终产品的成本。因此,虽然它们在性能上具有明显优势,但成本因素限制了其在更广泛领域的应用。制造过程的复杂性也是一个重要挑战,碳/碳复合材料的制备涉及多个精细的工艺步骤,包括高温热处理、化学气相沉积和复合化等,这些过程需要精确地控制和高技术水平。此外,这种材料的制造过程时间较长,增加了生产的复杂性和成本。

除此之外,碳/碳复合材料的回收和再利用也是一大挑战。由于该材料具有复杂的化学和物理结构,其回收过程既复杂又成本高昂,这在一定程度上影响了其环境可持续性^[4]。

4 结语

综合分析表明,碳/碳复合材料因其优异的机械性能、热稳定性和摩擦特性,在航空领域尤其是飞机刹车盘应用中展现显著优势。尽管面临成本和制造复杂性挑战,但持续的技术创新和优化预示着其在航空航天领域的重要性将日益增长,对未来航空技术发展将产生深远影响。

参考文献:

- [1] 张万顺, 颀龙, 乔勇, 等. 国外飞机刹车技术最新进展[J]. 飞机设计, 2022, (03): 21-23.
- [2] 雷晓霖, 高光辉, 李兵强, 等. 飞机刹车系统先进技术研究与发展[J]. 空军工程大学学报, 2022, (04): 32-34.
- [3] 曲道武. 奖状 560XLS 飞机刹车系统故障分析处理[J]. 航空维修与工程, 2022, (02): 44-46.
- [4] 张健伟, 王自知. 奖状 560 飞机刹车力度不一致故障分析及排除[J]. 航空维修与工程, 2022, (05): 50-52.

作者简介: 范丽君(1988-),女,山东烟台人,硕士研究生,工程师,主要从事碳/碳复合材料,碳/陶瓷基复合材料制备工艺等研究。