

飞机刹车装置碳/碳刹车盘故障研究

刘伟超 高洪亮 张瑶光

石家庄海山实业发展有限公司 河北石家庄 050200

摘要: 碳/碳复合材料凭借优异的耐高温、高比强度与良好摩擦稳定性,成为现代高性能飞机刹车装置的核心材料。本文聚焦飞机碳/碳刹车盘在实际使用过程中的故障问题,通过分析其主要故障形式,深入探究故障产生的内在机理与外部诱因,并针对性提出故障预防与解决策略。研究表明,碳/碳刹车盘的主要故障集中于磨损异常、热裂纹、氧化损伤及界面剥离,故障成因与刹车载荷波动、热环境失控、材料结构缺陷及维护操作不当密切相关;通过优化刹车控制逻辑、改进材料抗氧化性能、强化制造质量管控及规范维护流程,可有效提升碳/碳刹车盘的使用可靠性与寿命,为飞机刹车系统安全运行提供技术支撑。

关键词: 飞机刹车装置; 碳/碳刹车盘; 故障形式; 成因分析; 解决方法

引言

在飞机起降阶段,刹车装置承担着减速制动、保障滑行安全的关键功能,其性能直接影响飞机运行安全性与经济性。碳/碳复合材料因在高温环境下仍能保持稳定的摩擦系数与结构强度,逐步取代传统金属刹车材料,成为民航客机、军用战机等高性能飞机刹车盘的主流选择。然而,在长期使用过程中,碳/碳刹车盘受复杂工况影响,易出现各类故障,不仅缩短刹车盘使用寿命,更可能引发刹车失效、跑道偏离等安全隐患。目前关于碳/碳刹车盘的研究多集中于材料制备工艺与摩擦性能优化,针对实际使用过程中故障的系统性分析与解决策略仍需深化。

一、碳/碳刹车盘使用过程中的主要故障形式

(一) 磨损异常

磨损是刹车盘的正常损耗过程,但当磨损速率远超设计预期或磨损分布不均时,即构成异常故障。正常使用中,碳/碳刹车盘的磨损由摩擦界面的机械磨损与高温下的化学磨损共同作用,磨损量随起降次数呈线性增长;而异常磨损表现为局部区域快速磨薄、摩擦面出现明显沟槽或台阶,部分情况下甚至出现刹车盘厚度提前达到报废阈值。例如,在短时间内频繁起降的航班中,刹车盘未能充分冷却即再次承受制动载荷,易导致摩擦面局部过热,加速碳基体的氧化与剥落,形成“局部高温磨损区”,使磨损速率较正常工况提升数倍。

(二) 热裂纹

热裂纹是碳/碳刹车盘最常见且危害较大的故障形

式,多产生于刹车制动过程中的高温冲击与热应力作用。碳/碳复合材料的热膨胀系数较低,但在制动瞬间,摩擦界面温度可迅速升至数千摄氏度,导致刹车盘内外层形成巨大温差;外层材料受热膨胀,内层材料温度较低、膨胀量小,由此产生的热拉应力超过材料的断裂强度时,即会在摩擦面产生裂纹。热裂纹的扩展具有明显的方向性:初始阶段多为沿圆周方向的细小环形裂纹,随着起降次数增加,裂纹逐步向径向扩展,形成“环—径向交叉裂纹”;若裂纹贯穿刹车盘厚度方向,会导致刹车盘结构完整性破坏,甚至出现碎片脱落,引发刹车系统卡滞。

(三) 氧化损伤

碳元素在高温有氧环境下易氧化,这种特点导致碳/碳刹车盘在使用过程中具有严重的氧化损伤风险。氧化损伤不是单独的故障,是通过加速磨损与促进裂纹扩展间接作用于刹车盘性能,但存在着隐蔽性和累积性。在制动高温下,刹车盘摩擦面的碳基体与空气中的氧气发生反应生成二氧化碳或一氧化碳,使表层材料逐渐流失,不仅使刹车盘厚度降低,而且使摩擦面的粗糙度降低,影响摩擦系数的稳定性;氧化若发生在已有的微裂纹内部,则将使裂纹壁的碳材料被侵蚀,扩大裂纹宽度,加速裂纹扩展。另外,在湿润的条件下,水分与高温碳材料的反应生成氢气与一氧化碳即“水煤气反应”,这种反应速度比氧化反应快得多,会加剧碳基体的损耗,使刹车盘在湿润地区使用的氧化损伤要远远高于湿润地区。

（四）界面剥离

碳/碳复合材料由碳纤维增强体与碳基体组成，二者之间界面结合强度是碳/碳复合材料整体性能的关键。界面剥离故障表现为碳纤维与碳基体间结合失效，出现分层、鼓包或纤维拔出等现象。在使用过程中，刹车盘承受的交变制动载荷会使界面产生周期性的剪切应力，若材料制造过程中存在界面结合缺陷，剪切应力会逐步累积，导致界面结合力下降；同时，高温环境会使碳纤维与碳基体的热膨胀差异进一步凸显，界面处的热应力加剧，双重作用下易引发界面剥离。界面剥离会直接导致刹车盘的承载能力下降，摩擦面出现局部凹陷，不仅影响制动效果，还可能因剥离区域的结构薄弱，在后续制动中引发更大范围的结构破坏。

二、碳/碳刹车盘故障的成因分析

（一）刹车载荷波动与热环境失控

刹车载荷与热环境是引发故障的核心外部诱因，二者直接作用于刹车盘，决定故障的产生与发展。正常制动过程中，刹车载荷应保持平稳，使摩擦面温度均匀上升；但实际操作中，飞行员的刹车操作习惯差异、机场跑道坡度变化或刹车系统液压压力波动，会导致刹车载荷忽高忽低，形成“载荷冲击”。当瞬时刹车载荷超过设计值时，摩擦界面的局部压力骤增，不仅加速机械磨损，还会使局部温度急剧升高，超出碳/碳材料的热稳定范围，诱发热裂纹产生。另外，刹车系统的散热设计不合理，如散热通道堵塞，冷却风扇故障，会使刹车盘在制动后不及时降温，高温状态持续时间延长，一方面加剧碳基体的氧化反应，另一方面使热应力反复作用于刹车盘，促进裂纹扩展与界面剥离。

（二）材料结构缺陷与性能不足

碳/碳材料的制备工艺复杂，涉及预制体成型，CVI，高温热处理等多个环节，任一环节的控制不当都会造成材料结构缺陷，成为故障的隐患所在。在预制体成型阶段，碳纤维编织密度不均，在材料内部形成低密度区域，在制动载荷的作用下易产生应力集中，率先产生裂纹；在CVI过程中，基体渗透不充分，在材料内部形成孔隙或空洞，这些缺陷不但降低材料的承载力，而且成为氧化反应的“通道”，使氧气更加容易进入材料内部，加剧氧化损伤。另外，碳/碳材料本身抗氧化性能很差，若没有进行有效的抗氧化涂层处理，或涂层在使用过程中因摩擦、冲击而破损，会使碳基体直接暴露在有氧环境中，加速氧化失效。同时，碳纤维与碳基体的界面结合

强度低也是一大缺点，界面结合太弱，在交变载荷和热应力的作用下，极易发生界面剥离，造成材料整体性能降低。

（三）维护操作不当与检测缺失

碳/碳刹车盘维护环节操作规范性与检测有效性，直接影响碳/碳刹车盘故障早期发现与预防，维护不当会带来很大的故障发生风险。一方面，在刹车盘安装过程中，螺栓紧固力矩不均匀、刹车盘与刹车片的间隙调整不当，造成刹车盘受力失衡，偏磨或局部载荷集中，加剧磨损异常；如安装前未对刹车盘摩擦面进行清洁，残留的油污、金属碎屑在制动过程中形成“硬点”，造成摩擦面划伤，诱发裂纹。另一方面，在维护中的检测缺失，容易使早期故障得不到及时发现，错过修复期。由于目前部分维修单位仍依靠人工目视检测刹车盘表面裂纹与磨损情况，难以发现内部微裂纹或界面剥离等隐蔽性故障；没有建立完善的刹车盘使用档案，无法跟踪其磨损速率、温度变化等关键参数，致使刹车盘在接近报废阈值时仍继续使用，最终引发严重故障。

（四）环境因素的长期影响

环境因素对碳/碳刹车盘的故障影响有长期性与累积性，主要是湿度、盐雾、污染物等。如在高湿度环境中，空气中的水分会与刹车盘表面的碳材料发生化学反应，加速氧化损耗；若飞机在沿海地区使用，空气中的盐雾成分会附着在刹车盘表面，盐雾中的氯离子具有很强的腐蚀性，不但会破坏刹车盘的抗氧化涂层，还与碳材料发生腐蚀反应，形成腐蚀坑，成为裂纹的起始点。此外，机场跑道上的砂石、金属碎屑等污染物，在制动过程中会被卷入刹车盘与刹车片之间，形成“磨粒磨损”，划伤摩擦面，加剧磨损异常；若污染物嵌入刹车盘的微裂纹中，会在后续制动过程中产生“楔入效应”，扩大裂纹尺寸，加速故障发展。

三、碳/碳刹车盘故障的解决方法

（一）优化刹车控制逻辑与热管理设计

通过改进刹车系统的控制策略与散热结构，减少载荷波动与热积累，从源头降低故障诱因。在刹车控制逻辑方面，开发“智能刹车控制系统”，通过传感器实时监测刹车载荷、摩擦面温度与飞机滑行速度，自动调整液压压力，使刹车载荷保持平稳，避免瞬时载荷冲击；针对不同机场环境，预设差异化的刹车控制参数，如在高温环境下自动降低最大刹车压力，延长制动时间，减少局部高温产生。在热管理设计方面，优化刹车盘的散热

结构，采用“多孔道散热设计”，在刹车盘内部开设均匀分布的散热通道，提升散热面积；同时，改进刹车系统的冷却方式，引入主动冷却技术，如在刹车装置内集成小型风冷风扇，制动后自动启动风扇加速降温，缩短高温持续时间。此外，可在刹车盘摩擦面涂覆“热障涂层”，如氧化锆基涂层，减少摩擦热向刹车盘内部传递，降低内外层温差，抑制热裂纹产生。

（二）改进材料制备工艺与性能优化

从材料源头提升碳/碳刹车盘的结构完整性与抗故障能力，通过优化制备工艺与性能改进，减少内在缺陷。在制备工艺方面，优化预制体编织工艺，采用“三维立体编织技术”，提升碳纤维编织密度的均匀性，减少低密度区域；改进CVI工艺参数，如延长渗透时间、分段调控温度与压力，确保碳基体充分浸润碳纤维，降低孔隙率；在CVI后增加“树脂浸渍—碳化”工序，填充材料内部的微小孔隙，提升材料致密度。在性能优化方面，强化碳/碳材料的抗氧化性能，采用“复合抗氧化涂层”设计，底层采用硅基涂层与碳基体形成牢固结合，中层采用氧化铝涂层阻挡氧气扩散，表层采用二氧化硅涂层抵抗摩擦磨损，形成多层防护体系；同时，在碳基体中添加抗氧化剂，如硼、钛等元素，通过化学反应在材料内部形成抗氧化屏障，减缓氧化损伤。

（三）规范维护操作与升级检测技术

通过建立标准化的维护流程与高精度的检测体系，实现故障的早期发现与及时处理，避免故障扩大。在维护操作规范方面，明确安装、清洁、间隙调整等环节的操作标准，如螺栓紧固力矩需采用扭矩扳手精确控制，安装前需用专用清洁剂清除摩擦面油污与杂质；建立刹车盘使用档案，记录每次起降的刹车次数、温度数据、磨损量等参数，通过数据分析预测刹车盘剩余寿命，提前安排更换，避免超期使用。在检测技术升级方面，引入无损检测技术，如采用超声检测排查刹车盘内部的微裂纹与孔隙，采用红外热成像检测评估界面结合状态，实现隐蔽性故障的早期发现；开发“智能检测系统”，集成传感器与数据分析算法，实时监测刹车盘在使用过程中的振动、温度、磨损等参数，当参数超出正常范围时自动报警，提醒维护人员及时检查。此外，定期对维护人员进行专业培训，提升其对碳/碳刹车盘故障特征的识

别能力，确保维护操作的规范性与检测的准确性。

（四）加强环境适应性防护与使用管理

针对环境因素的影响，采取针对性的防护措施与使用管理策略，减少环境对刹车盘的损害。在环境适应性防护方面，对于在高湿度、盐雾环境使用的飞机，定期对刹车盘进行“防腐蚀处理”，如喷涂耐腐蚀涂层，或在维护时用专用防护剂擦拭摩擦面，隔绝水分与盐雾；在跑道环境较差的机场，增加刹车系统的清洁频率，定期清除散热通道与摩擦面的砂石、碎屑，避免磨粒磨损。在使用管理方面，制定差异化的刹车盘使用策略，如在高温高海拔机场起降的飞机，缩短刹车盘的更换周期，增加检测频次；针对频繁起降的航班，合理安排航班间隔，确保刹车盘有充足的冷却时间，避免热积累。此外，加强机场跑道的维护管理，及时清理跑道上的污染物，减少异物对刹车盘的损伤，从外部环境层面降低故障风险。

结论

碳/碳刹车盘作为飞机刹车装置的核心部件，其故障问题直接关系到飞机运行安全与经济性。本文通过对碳/碳刹车盘使用过程中主要故障形式的分析，明确磨损异常、热裂纹、氧化损伤与界面剥离是核心故障类型，其成因涉及刹车载荷波动、材料结构缺陷、维护操作不当与环境因素等多方面。针对这些成因，从优化刹车控制与热管理、改进材料制备工艺、规范维护检测、加强环境防护四个维度提出的解决方法，可有效降低故障发生率，提升刹车盘的可靠性与寿命。

参考文献

- [1] 邢野, 吴恒壮, 王金铎. 某型飞机刹车系统常见故障分析[J]. 航空维修与工程, 2024, (08): 53-55.
- [2] 周圣宏. 某型直升机机轮刹车不松刹故障分析[J]. 自动化应用, 2024, 65(12): 7-9.
- [3] 彭远为. E190飞机应急停留刹车故障模式分析[J]. 航空维修与工程, 2024, (03): 45-48.
- [4] 赵新宇, 何浪, 毋养民. 飞机液压系统常见故障分析及维护策略探讨[J]. 中国设备工程, 2024, (22): 192-194.