

# 航空密封剂快速固化技术及其在短周期维修中的应用

祝娟 姜凤倩 彭奕群

中国航发南京航空动力有限责任公司 江苏 南京 211100

**摘要:** 航空密封剂是保障飞机结构安全的关键材料,其固化效率直接影响维修周期与出勤率。本文系统解析快速固化技术原理,指出传统固化机制受温湿度限制、周期长的局限,梳理物理加速、化学改性及复合技术三大路径,明确粘接强度、密封性等核心指标。结合短周期维修需求,分析技术在民航油箱修补、军机战伤应急等场景的应用优势,通过与传统工艺对比凸显高效性。依托典型案例验证实用性,提出技术优化方向。研究表明,该技术可显著缩短维修周期,适配军民机需求,为航空维修提质增效提供支撑。

**关键词:** 航空密封剂;快速固化;短周期维修;复合材料

引言:飞机维修的时效性直接关系民航运营效益与军机作战效能,而航空密封剂固化环节常成为维修周期的瓶颈。传统航空密封剂需在特定温湿度下经数小时甚至数天固化,难以满足突发故障抢修、短停维修等短周期需求。随着复合材料在飞机结构中应用占比提升,对密封剂固化效率与适配性提出更高要求。本文聚焦该技术原理、应用场景及实际案例,深入探讨其在短周期维修中的应用价值,为推动航空维修技术升级、提升飞机出勤率提供理论与实践参考。

## 1 航空密封剂快速固化技术原理

### 1.1 传统密封剂固化机制

传统航空密封剂以聚合物为基材,固化机制核心是通过化学反应形成交联网络结构,实现从液态或膏状向固态的转变。主流类型包括室温硫化硅橡胶密封剂、聚氨酯密封剂等,其固化依赖基材与固化剂的逐步反应,受环境温湿度、混合比例等因素影响显著。例如,室温硫化硅橡胶密封剂需通过空气中的水分引发交联反应,在25℃、相对湿度50%的标准环境下,表干需2-4小时,完全固化则需24-72小时。此类固化机制存在明显局限:一是固化周期长,难以适配短周期维修需求;二是对环境敏感性强,低温低湿环境下固化效率大幅下降;三是固化过程中易出现气泡、收缩等缺陷,影响密封性能与粘接强度。

### 1.2 快速固化技术路径

#### 1.2.1 物理加速

物理加速技术通过外部能量输入或环境调控,加速密封剂固化反应进程,核心是不改变密封剂化学组分,仅优化反应条件。主流技术包括热固化加速、紫外(UV)固化、微波固化等。热固化加速通过红外加热、热风循环等方式,将密封剂固化环境温度精准控制在60-

120℃,缩短分子运动周期,加速交联反应,可使固化时间缩短至传统工艺的1/3-1/5;UV固化技术适用于透明或半透明基材表面密封,通过UV光源照射激活密封剂中的光引发剂,快速产生自由基引发聚合反应,表干时间可缩短至分钟级,完全固化仅需数十分钟,但需保障密封区域能被UV光覆盖;微波固化利用微波的热效应与非热效应,使密封剂内部分子快速振动产热,同时促进化学反应速率,具有加热均匀、固化效率高的特点,适配复杂结构密封场景<sup>[1]</sup>。物理加速技术优势在于操作简便、适配性广,可针对不同维修场景选择对应加速方式。

#### 1.2.2 化学改性

化学改性通过调整密封剂化学组分,优化固化反应机理,从根源上提升固化效率。核心路径包括引入高效固化剂、优化树脂基材结构、添加反应促进剂等。在固化剂选择上,采用高活性固化剂替代传统低活性类型,如在环氧密封剂中引入胺类固化剂,可显著降低固化反应活化能,实现室温下快速固化;树脂基材改性通过接枝、共聚等技术,在聚合物分子链上引入活性基团,增加交联反应位点,提升反应速率;添加微量促进剂(如金属盐、有机胺类化合物)可催化固化反应,在不影响密封剂长期性能的前提下,缩短固化周期。化学改性技术需精准调控组分比例,确保快速固化的同时,兼顾密封剂的粘接强度、耐高低温性及耐介质性等核心性能,避免因追求固化速度导致性能下降。

#### 1.2.3 复合技术

复合技术结合物理加速与化学改性的优势,通过“化学优化+物理辅助”的协同模式,进一步提升固化效率与性能稳定性。典型方案包括“化学改性密封剂+UV固化”“高活性密封剂+微波加速”等。例如,将光引发剂引入化学改性后的环氧密封剂,施工后先通过UV

光照射实现快速表干，避免密封剂流淌或污染，再通过室温放置或低温加热完成完全固化，既保证固化速度，又提升密封层均匀性；在军机应急维修中，采用添加促进剂的改性硅酮密封剂，配合便携式红外加热设备，可在-10℃的低温环境下，30分钟内实现初步固化，满足应急密封需求。复合技术需解决不同技术路径的兼容性问题，通过大量试验优化工艺参数，确保协同效果最大化，其适配场景更广泛，尤其适用于复杂环境下的短周期维修。

### 1.3 关键性能指标

航空密封剂快速固化技术的核心要求是“快速固化”与“性能达标”兼顾，关键性能指标需符合航空行业相关标准（如SAE、GB/T标准）。核心指标包括：一是固化效率，以初步固化时间（可进行后续操作的时间）和完全固化时间为核心，短周期维修场景下初步固化需 $\leq 1$ 小时，完全固化 $\leq 6$ 小时；二是粘接强度，对铝合金、复合材料等飞机常用基材的拉伸剪切强度 $\geq 2.5\text{MPa}$ ，满足飞机结构承载需求；三是密封性，在0.3MPa压力下，密封部位无渗漏，且长期浸泡燃油、液压油后密封性无下降；四是环境适应性，可在-55℃-120℃的温度范围稳定工作，耐湿热、盐雾腐蚀性能达标；五是施工性，具备良好的流淌性与填充性，可适配复杂结构缝隙密封，施工后无明显气泡、收缩缺陷。这些指标需通过系统试验验证，确保快速固化密封剂在满足维修时效的同时，保障飞机结构安全。

## 2 快速固化密封剂在短周期维修中的应用场景

### 2.1 典型维修场景

快速固化密封剂在短周期维修中适配多个核心场景，覆盖民航与军用飞机维修需求。民航领域核心场景包括：飞机油箱渗漏应急修补，油箱因腐蚀、撞击出现微小渗漏时，需在短停（2-4小时）内完成密封修复，保障航班正常起降；发动机短舱密封件更换，短舱密封件长期受高温、气流冲击易老化失效，需快速完成拆卸、密封、固化流程，缩短飞机停场时间；复合材料机身蒙皮缝隙密封，复合材料蒙皮对密封剂固化温度敏感，需在低温快速固化的同时，避免损伤基材。军用领域核心场景包括：军机战伤应急密封，作战过程中机身、油箱等部位受弹击出现破损时，需在战场环境下快速密封，保障飞机持续作战或安全返航；装备封存与快速启封，通过快速固化密封剂对军机关键部位进行临时密封，启封时可快速拆除，提升装备响应速度；训练机日常维修，缩短维修周期，保障训练任务正常开展<sup>[2]</sup>。

### 2.2 技术优势

快速固化密封剂在短周期维修中展现出显著技术优势，核心体现在效率、性能、适配性三大维度。效率层面，大幅缩短维修周期，较传统密封剂固化时间缩短60%-80%，如民航飞机油箱渗漏维修，传统工艺需停场24小时以上，采用快速固化技术仅需3-6小时即可完成，保障航班正常运营；军用应急维修中，可实现“小时级”密封修复，提升装备出勤率。性能层面，通过技术优化，快速固化密封剂的核心性能不低于传统产品，部分指标更优，如耐燃油腐蚀性、低温韧性等，可满足飞机长期安全运行需求。适配性层面，适配多种基材（铝合金、钛合金、复合材料等）与复杂环境，可在低温、高湿度、野外等非标准环境下稳定固化，解决传统密封剂对环境敏感的问题；同时具备良好的施工性，可通过涂抹、灌注等多种方式施工，适配不同维修场景的操作需求。

### 2.3 与传统工艺对比

快速固化密封剂维修工艺与传统工艺相比，在多个核心维度存在显著优势。从维修周期看，传统工艺完全固化需24-72小时，快速固化工艺仅需1-6小时，效率提升4-20倍，尤其适配短停维修、应急抢修等场景；从环境依赖性看，传统工艺需严格控制温湿度（如25℃±5℃、相对湿度40%-60%），快速固化工艺可在-10℃-40℃、相对湿度20%-80%的宽范围环境下施工，降低对维修场地的要求；从维修成本看，传统工艺需长时间占用维修机位、设备，人工成本高，快速固化工艺缩短停场时间，减少机位占用成本，同时降低因维修延误导致的经济损失（如民航航班延误赔偿）；从施工难度看，传统工艺对施工人员技术要求高，需精准控制混合比例与环境参数，快速固化工艺操作更简便，部分方案可实现“涂抹即固化”，降低人为误差。但快速固化工艺初期材料成本略高，不过整体综合效益更优。

## 3 实际案例分析

### 3.1 案例1：一架民航飞机油箱快速修补

一航空公司A320飞机执行航班任务后，检修发现右翼油箱出现直径约5mm的渗漏点，需在次日航班起飞前完成修复（维修窗口期仅4小时）。采用快速固化环氧密封剂进行修补，具体流程：首先对渗漏点周边进行打磨、清洁、脱脂处理，去除油污与氧化层；选用添加促进剂的改性环氧密封剂，配合便携式红外加热设备，涂抹厚度控制在2mm；通过红外加热设备将密封区域温度控制在50℃，加热30分钟后完成初步固化，此时密封层已具备基本密封性能；后续室温放置2小时完成完全固化，经压力测试（0.3MPa）无渗漏，符合

飞行安全标准。此次维修仅耗时3.5小时,较传统密封剂维修(需停场24小时)大幅缩短周期,避免航班延误,直接减少经济损失约15万元,验证了技术在民航短停维修中的实用性<sup>[3]</sup>。

### 3.2 案例2:一架军用飞机战伤应急密封

一款军用战斗机在训练中,机身腹部受异物撞击出现长约15cm的线性破损,导致燃油渗漏,需在野外场地(环境温度-5℃、风力3级)完成应急密封。采用“化学改性+物理加速”的复合技术方案:选用耐燃油的快速固化硅酮密封剂(添加低温促进剂),搭配柔性密封补丁与便携式微波加热设备;先对破损区域进行简单清理,去除杂质与油污,将密封剂均匀涂抹在破损处及补丁表面,贴合后用微波设备加热15分钟,实现初步固化,此时渗漏完全停止;后续通过机身自带加热系统辅助保温,30分钟后完成完全固化,密封层可承受飞行过程中的气压与振动。修复后飞机顺利返航,经后续检测,密封层在多次飞行后仍保持良好性能,该案例证明技术可适配复杂战场环境下的应急维修需求。

### 3.3 案例3:一台发动机短舱密封优化

一家航空维修厂对一款民航发动机短舱进行定期维修,需更换老化的密封胶条,传统工艺采用室温硫化密封剂,固化需24小时,影响发动机维修周转效率。采用快速固化聚氨酯密封剂优化工艺:选择适配发动机短舱高温环境的改性聚氨酯密封剂,其添加高效固化剂,可在室温下快速固化;施工时严格控制密封剂涂抹厚度(1.5mm),确保覆盖密封面;涂抹后通过便携式热风枪低温加热(40℃)辅助固化,2小时后完成初步固化,可进行短舱组装;组装完成后室温放置4小时,密封剂完全固化,经气密性测试与高温耐久性测试,均符合发动机运行标准。此次维修周期从24小时缩短至6小时,单台发动机维修周转效率提升75%,大幅降低维修厂机位占用压力,提升维修产能。

## 4 技术发展挑战与未来展望

### 4.1 技术发展挑战

尽管航空密封剂快速固化技术取得显著进展,但在实际应用中仍面临诸多挑战。其一,材料成本较高,快速固化密封剂中添加的高活性固化剂、促进剂等特殊成分,

导致其原材料成本高于传统密封剂,限制了大规模应用。其二,工艺稳定性有待提升,不同环境条件下(如极端温度、高湿度)固化效果存在差异,需进一步优化工艺参数以确保性能一致性。其三,长期性能评估不足,快速固化密封剂长期使用后的耐老化性、耐介质性等性能缺乏系统研究,影响其在关键部位的应用信心。

### 4.2 未来展望

未来,航空密封剂快速固化技术将朝着“高性能、低成本、绿色化”方向发展。一方面,通过分子设计与合成技术,开发新型低成本、高性能的固化剂与树脂基材,降低材料成本;另一方面,借助人工智能与大数据技术,建立固化工艺参数智能优化模型,提升工艺稳定性与固化效率<sup>[4]</sup>。另外,绿色环保理念将深入技术发展,研发无溶剂、低挥发性有机化合物(VOC)排放的快速固化密封剂,减少对环境的污染。同时,加强长期性能评估与标准制定,推动快速固化密封剂在航空领域的广泛应用,为航空维修行业的高质量发展提供更强有力的技术支撑。

### 结束语

航空密封剂快速固化技术通过物理加速、化学改性及复合技术等路径,突破传统工艺固化周期长的瓶颈,在短周期维修中展现出显著优势。其不仅大幅缩短维修时间,还能兼顾密封性能与环境适配性,适配民航短停维修、军机应急抢修等核心场景,三个实际案例充分验证了技术的实用性与经济性。未来,需持续深耕化学改性与复合技术研发,完善工艺标准,推动技术朝着“更快速、更稳定、更通用”的方向迈进,为航空维修行业高质量发展筑牢技术根基。

### 参考文献

- [1]李孟思,赵连红.航空聚硫型密封剂异质材料胶接结构的综合性能[J].腐蚀与防护,2023,44(2):53-58,63.
- [2]刘宗奇,王茹,庄淼.两种航空用密封剂的相容性研究[J].环境技术,2024,42(12):184-188.
- [3]陈浩,雷海军,张骥忠,等.高导电硅橡胶与航空密封剂的适配性研究[J].有机硅材料,2023,37(2):13-16.
- [4]张新全,邢祎琳,刘刚,等.长寿命高可靠性新一代航空密封剂体系设计及应用[J].中国科技成果,2024,25(21):70-71.