



图1 冷喷涂修复的花栗鼠飞机(由加拿大历史飞机协会提供)

考虑复飞的原因

以加拿大小松鼠名字命名的花栗鼠飞机(图1),是由 Havilland Canada 于 1946 年开发和制造的战后老式飞机。Havilland 现在是庞巴迪的一部分。DHC-1 花栗鼠是一种双座单引擎初级教练机。在 1940 年代末和 1950 年代,这架飞机被加拿大皇家空军(RCAF)、皇家空军(RAF)和其他几个国家的空军等军事航空服务机构大量采购,用作他们的主要标准教练机。

许多以前在军队中服役的花栗鼠飞机最终被转售给私或公司,由于其出色的飞行特性和特技表演能力,它们通常用于各种不同的场景。在首次服役 70 多年后,数百架花栗鼠飞机在世界各地仍然适航。这类飞机的零部件要么稀缺,要么价格过高,要么没有合适的维修技术来维护各种部件。



图2a Gipsy DH Major 10MK1-3A 引擎



图2b 引擎顶盖的液体渗漏检测



图2c 下曲轴箱法兰的液体渗漏检测



图3 SST-PX便携式冷喷涂系

复飞的挑战

在本案例中,机械撕裂和磨损对花栗鼠 DHC-1 飞机发动机外壳的完整性造成了损害。在大修吉普赛 DH Major 10MK1-3A 发动机期间,根据加拿大运输部批准的加拿大历史飞机协会维修手册,通过液体渗透无损检测方法(参考文献1)(图2)发现了下曲轴箱和上盖的法兰区域和螺栓孔出现不可接受的裂纹。这些裂缝会导致发动机机油泄漏出去,危及发动机的机械完整性。其中一个缺陷是法兰根部的全厚度裂纹,导致法兰在此处剥落,从而无法固定一个连接下曲轴箱的紧固柱。顶盖和下曲轴箱的材料分别是镁和铸铝合金,这类材料均不能承受如焊接等高温修复方案。

技术路线

冷喷涂是一种固态金属固结工艺,它使用高速气体射流将金属和其他粉末颗粒射向基材,其中颗粒在撞击时发生塑性变形和固结。术语“冷喷涂”是指该工艺中涉及的温度相对较低,通常远低于喷涂材料和基材的熔点。SST 冷喷涂系统可采用空气作为工作气体,喷涂温度足够低,不会对基材材料产生热冲击。该区域经过低温尺寸恢复后,使用标准的加工技术可以有效地将涂层加工回公差。SST 冷喷涂系统提供了采用手动或自动喷枪喷涂不同金属进行尺寸修复的技术能力(图3)。

解决方案

我们对采用冷喷涂对顶盖和下曲轴箱进行修复进行了评估。对这两种缺陷，由于原材料已经脆弱，建议将盖上的破损法兰和曲轴箱下部的裂纹区完全去除。根据 MIL-STD-3021 标准（参考2）的非结构修复建议，将使用 SST 冷喷涂工艺重建所缺失的功能。SST与加拿大运输部合作开发了一个特定的修复程序，其中包括冷喷涂自由成形重建的模拟试验，以确保修复的可行性（图4）推荐用于此修复的预认证喷涂材料是 99.5% 铝颗粒和 99.0% 氧化铝颗粒的混合物（参考3），当使用表 1 中的参数喷涂时，可形成结合力超过6000psi (ASTM C633)，致密的大于 99.5%的涂层。



图4 模拟维修试样(a) 喷涂前; (b) 喷涂后; (c) 机加工后

在实际维修过程中，下曲轴箱需要特别屏蔽，以在喷涂和后加工过程中保护发动机部件，从而避免后续需要任何形式的发动机拆卸清理(图 5)。



图5 冷喷涂前对下曲轴箱进行屏蔽处理

最终维修程序根据加拿大运输部（TC）“飞机设备和维护标准 - 加拿大航空法规”获得批准，并记录为 TC Process Design Repair Doc #1701 Rev 1, Dated 29/11/17 和 TC Maintenance Manual Supp #1701M Rev 1, Dated 5/12/17。新的交通部维修流程指定了可以对以下发动机罩法兰进行维修的流程，该类法兰用于将发动机盖固定在配备 Gypsy Major 活塞发动机的 DeHallivand DHC-1 飞机上。”该程序包括 (a) 去除破损区域，(b) 使用 SST-G0002（参考4）进行表面处理，(c) 使用表1中描述的喷涂参数进行自由成形喷涂，(d) 按照尺寸公差进行常规加工，(e) 使用坐标测量机 (CMM) 进行尺寸检查，以及(f) 批准和发布。顶盖和下曲轴箱的维修程序如图6。发动机最终组装完毕并准备交付（图7）。

图6 Gipsy DH Major 10MK1-3A 发动机顶盖和下曲轴箱法兰冷喷涂维修



A) 顶盖: 喷涂前

A) 下曲轴箱: 喷涂前



B) 顶盖: 喷涂后

B) 下曲轴箱: 喷涂后



C) 顶盖: 加工到公差内

C) 下曲轴箱: 加工到公差内

表 1. 喷涂参数

机器: SST-P手持喷枪 / 2.0毫米喉径/ UltiLife™ 喷管
粉末: SST-A0082
基材: 铸铝合金
表面准备: 清除破损部分 - 采用SST-G0002喷砂
气体: 氮气
气体温度: 425 °C
气体压强: 180 psi (13 bar)



客户收益

由于金属粉末对基材和已形成涂层的结合是在固态下实现的，冷喷涂工艺具有独特的性能，可形成结合强度高、孔隙率低、无氧化物的涂层产品。其特性使冷喷涂技术特别适合于沉积对工艺温度敏感的材料。



图 7. Gipsy DH Major 10MK1-3A引擎修复后组装完毕待交付

参考文献

1. ASME PT-1. 5200 2015 -Rev 1
2. MIL-STD-3021 (W/ CHANGE-2), DEPARTMENT OF DEFENSE MANUFACTURING PROCESS STANDARD: MATERIALS DEPOSITION, COLD SPRAY (04-MAR-2015)
3. https://www.supersonicspray.com/uploads/documents/SST-TDS-A0082-PR-2_0-0120.pdf
4. https://www.supersonicspray.com/uploads/documents/SST-TDS-G0002-PR-2_0-0120.pdf

更多信息，请联系我们：

<https://www.supersonicspray.com/contact-us/contact-us>

Practical cold spray coatings.

HEAD OFFICE:

CenterLine (Windsor) Ltd.
415 Morton Drive
Windsor, Ontario, Canada
N9J 3T8

Head Office
Sales
Service

TELEPHONE TOLL-FREE

519-734-8464	800-820-6977
519-734-6560	800-771-6172
519-734-0080	800-268-8184

EMAIL

info@cntrline.com
sales@cntrline.com
service@cntrline.com



Visit our website to obtain detailed contact information for each of CenterLine's operations.

www.cntrline.com

© 2020 CenterLine Holdings Inc. All Rights Reserved.

SST-CS-009-PR-1.0-082020