

# 冷喷涂用于结构修理

## Cold Spray for Structural Repair

■ 谷平/中国航发成发

相对于传统的焊接和热喷涂金属修复工艺，冷喷涂技术因为工作温度低、可以消除应力和变形而显得更有优势，被维修企业（MRO）视为一种突破性的技术。

**冷** 喷涂是用膨胀气体将固体颗粒加速到超声速，使其有足够的能量与固体表面结合的一种技术。顾名思义，冷喷涂的应用温度要比其他的热喷涂和焊接工艺低得多，这意味着可以避免相关的变形和应力。

### 冷喷涂概念的提出

冷喷涂技术到现在已经有30多年的研究历史。20世纪80年代，苏联科学院西伯利亚分院的科学家在开展风洞试验时，根据示踪测速发现颗粒在速度超过一定临界值后发生沉积的现象，并在1990年正式提出冷喷涂技术的概念。大约在2000年，冷喷涂被当作修理技术进行研究，但它的研究和开发仅限于军用飞机的部件修理。

美国空军研究实验室(ARL)于2000年开始了冷喷涂技术的应用研究，并于2001年在马里兰州建立了冷喷涂研究与发展中心。该中心将冷喷涂技术用于B-1轰炸机、F/A-18战斗机、“黑鹰”和“海鹰”直升机的修理。据称，该中心在冷喷涂技术的实施和发展上一一直处于领先地位，并与所有使用冷喷涂修理技术的公司之间开展合作，将其在军事领域的应用转到民用领域。



比传统的焊接和热喷涂更有优势的冷喷涂修理技术

### 恢复尺寸

穆格（Moog）公司与ARL自2007年起便共同致力于冷喷涂修理技术在军民维修（MRO）领域的应用研究——用钛、不锈钢、铜和其他金属粉末进行各种部件的修复，如机轮或面板等。穆格公司称，最常见的冷喷涂应用是在镁和铝基板上修复磨损或腐蚀的材料，包括各种传动装置的外壳和齿轮箱等。该公司指出，尽管这项技术很强大但仍处于早期开发阶段。随着越来越多的修理技术的出现，会有越来越多的

冷喷涂技术用于满足维修需求。

GE航空旗下的Avio公司自2010年起便与欧洲多所大学和研究中心合作共同研发了一种冷喷涂技术。目前，Avio的研究主要集中在铝零件上，该公司现正在考虑扩展冷喷涂修复技术的应用范围，未来也有望应用于航空发动机和燃气轮机的叶片修理中。

标准航空（StandardAero）公司自2016年起，开始探索冷喷涂修理技术的各种应用，研究如何将冷喷涂技术用于发动机部件的修理。这

一工艺是新的还没有得到充分验证，因此标准航空公司需要与原始设备制造商（OEM）开展合作，以审核其修理效果。标准航空公司希望将越来越多的修理技术转化为标准的修理方法列入发动机修理手册中，供全行业使用。修理手册会随着技术的发展而更新，可以促使铝和铜等软金属以及镍基合金等更复杂材料的推广应用。

MTU 航空发动机公司在2012年开展了用冷喷涂工艺对发动机机匣的法兰进行修复的研究，并为冷喷涂用于“狂风”战机的RB199 发动机叶片的修理编制了技术文件和技术标准。MTU 航空发动机公司计划将冷喷涂工艺引入商用发动机零部件的维修，并开始进行相应的取证工作。

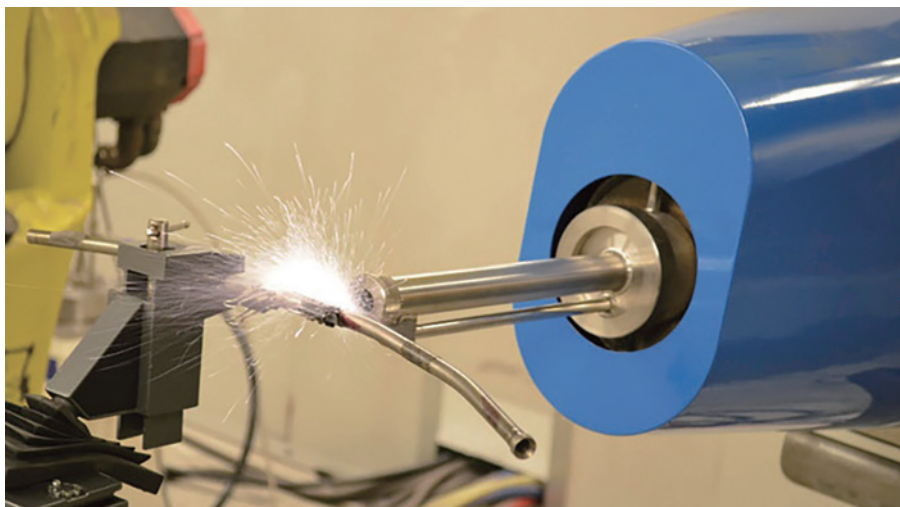
霍尼韦尔(Honeywell)公司早在2004年就开始了冷喷涂修理技术的研究和开发，其大部分的开发工作都是与拥有最现代化的冷喷涂设备的供应商合作完成的。

2009年，霍尼韦尔公司进行了首次冷喷涂修复，现在有近70个零部件通过这种方式进行修复，其中包括铝和镁的结构件，如齿轮箱、泵壳和涡轮发动机的阀门。

Praxair 表面技术公司采用冷喷涂技术对 C-160 飞机的铝合金螺旋桨叶进行了修复，Windsor 公司还采用冷喷涂技术对飞机发动机辅助动力系统内的铝合金部件进行了尺寸修复。

## 结构修理

阿克伦大学国家腐蚀和材料性能教育研究中心正在开展将冷喷涂技术应用于结构修理的研究。通过俄亥



冷喷涂修理

俄州的资助，该大学与机载维修和工程服务(AMES)公司、安全公司(SAFE Inc.)开展合作，以获得美国联邦航空局(FAA)对商用飞机上腐蚀和磨损部件进行冷喷涂修复的批准。

目前，已获得批准的冷喷涂修复飞机部件仅限于变速箱或外壳等部附件，接下来是要证明冷喷涂同样适用于机体结构件的修理，使之恢复到适航状态，满足或超过其原始设计强度。”

第一阶段，选择了对适航性影响较低的二级结构件，其中包括面板、空气载荷翼肋和波音767的机轮等。在项目进行中，AMES和SAFE公司还申请用氮气替代氦气进行冷喷涂修复，这样可以使成本更低且更环保。在完成所有的研究和测试后，研究团队已向FAA提交了修理规范并等待FAA的最终审核，通过后便可以将冷喷涂添加到AMES的能力清单中。下一阶段，会研究如何将冷喷涂技术应用到主结构件的修理中。一旦冷喷涂技术用于主结构件修理，它可能会在业内变得更

为普及，尤其适用于那些服役时间较长的老龄飞机。

## 结束语

虽然起步早，冷喷涂技术在航空维修领域，特别是民用航空维修领域的应用仍处于初步发展阶段，在飞机发动机主结构件的修理的应用仍有待开发。

我国一些高校和研究机构正在对冷喷涂开展基础研究，如中科院金属研究所、北京航空材料研究院、西安交通大学、大连理工大学、北京理工大学等多家研究机构 and 高校在涂层修复、尺寸修复等方面进行了探索，已取得了一定成果。例如，北京航空材料研究院将冷喷涂用于修复发动机中央传动机匣涂层，涂层性能远远超过普通火焰喷涂、电弧喷涂和等离子喷涂。但与国外相比，我国对冷喷涂技术的理论研究和手段仍有差距，需建立起系统的指导体系，以便更深入地开展产业化应用研究和推广。 **航空动力**

(谷平，中国航发成发，工程师，主要从事涂覆技术研究。)