

# 干冰射流技术清洗航空发动机积炭

## Dry Ice Jet Technology for Aero Engine Carbon Deposition Washing

■ 郑建林 王友涛 栗娜娜 汪祥 宋金龙 / 中国航发黎阳

航空发动机在使用过程中时常会出现积炭现象，导致燃烧不充分，同时也会改变进排气流通面积，影响发动机性能。现行积炭清洗工艺存在通用性差、经济性低及损伤零件等缺点，严重影响了航空发动机修理和试验的质量。

航空发动机积炭清洗大多以清洗剂泡洗、高温烧结、超声波清洗和手工打磨技术为主。清洗剂泡洗是利用化学药剂浸泡积炭部件，通过化学反应使得积炭脱落，该方法主要针对叶片等小零件；高温烧结主要针对燃烧室喷嘴等零件，但效果不佳、耗时长、能耗高；超声波方法可去除一些体积较小的零部件，耗时长且不能以部件状态清洗。发动机修理装配现场的积炭清洗目前还停留在手工打磨与清洗剂并用的方法，通常需要2~3人耗时3天才能完成。总之，以上方法存在功能单一、设备昂贵、能耗高、清洗耗时长和清洁度不高等缺点。而在汽车、核工业及轨道交通领域广泛应用的干冰射流清洗技术去除污染物，通用性强且具有良好的经济效益。创新团队从理论、仿真与试验等方面探究了干冰清洗作用机理，开发出适用于航空发动机零部件积炭清洗的工艺方法，并将该技术应用至发动机的修理中。

### 干冰射流清洗技术机理

干冰射流清洗技术也称为干冰冷喷射清洗技术，是一种以干冰微粒的碰撞、高速气流吹扫作用为主的动

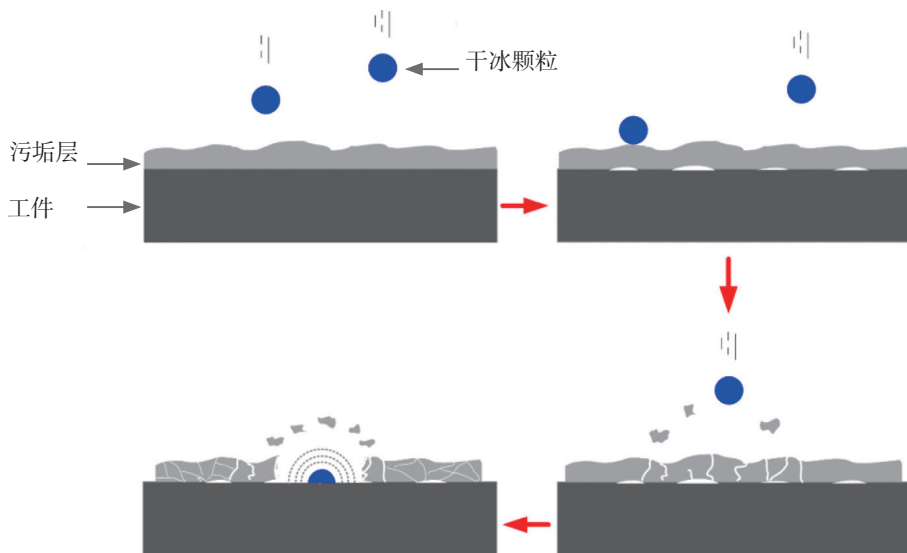


图1 干冰射流清洗积炭机理分析

力学过程，以液态二氧化碳溶解作用为主的化学过程，以热冲击作用、升华作用为主的热力学过程等共同作用的清洗方法，如图1所示。

#### 撞击、吹扫作用

干冰微粒伴随压缩空气由喷枪喷射至零件表面，撞击污染物时发生的动量转移，克服了污染物与零件表面的黏结力；过程中的热交换使得污垢层遇冷后急剧收缩、变脆及龟裂，在高速气流的吹扫下易清除。

#### 液态二氧化碳的溶解作用

干冰微粒与污染物接触后，二氧化碳微粒喷射流变成了气体、液

体、固体三相共存的体系，其中液相二氧化碳是有机污垢的最好溶剂，使得有机污垢更加容易溶解。

#### 热冲击作用

当干冰微粒射向表面时，由于干冰微粒升华使得气流温度瞬间降低，因零件基体与污染物的热膨胀系数不同，污染物的结合力降低，在低温作用下破裂成碎片，在气流的作用下被吹扫带走。

#### 干冰微粒升华

当干冰暴露在常温常压（20℃，1atm）的环境下，干冰会吸热迅速膨胀成气体。干冰微粒与污垢层发

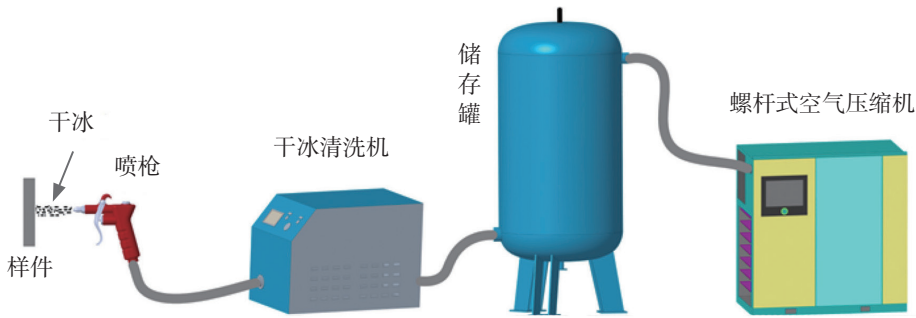


图2 试验装置

生撞击后迅速升华成二氧化碳气体，短时间内空间体积会瞬间扩大898倍，细碎的干冰微粒进入污染物间隙后，体积瞬间膨胀，在一定程度上起到去除污染物的作用。工件表面层的污染物在发生弹性撞击及由于升华作用发生“微爆炸”后，脱落的污染物在高速气流的吹扫作用下吹扫干净，从而不会在工件表面留下其他杂质。

## 干冰射流清洗试验与仿真

### 试验装置

干冰射流清洗系统主要包括干冰清洗机、空气压缩机和储气罐等，如图2所示。干冰颗粒初始尺寸为长1~3mm、直径1mm。

### 仿真模型

利用Fluent软件对喷嘴流场及

干冰颗粒运动进行仿真分析，基于计算流体动力学进行数值模拟分析，获得气体的速度场、压力场分布情况。干冰微粒喷射过程实际上是一种两相运动，包含干冰颗粒的固相和压缩空气的气流相。在连续的气流相中加入干冰颗粒，将会引起气流的流动状态产生相应影响。使用Fluent软件模拟干冰颗粒运动轨迹，可看作是气体和干冰颗粒的气固两相流仿真。由于喷嘴内部和外部压力相差较大，会产生压力波和激波，采用二维模型能够很好地捕捉到轴线附近的压力波动。

## 仿真、试验结果分析及应用

### 仿真结果分析

利用Fluent分析软件对干冰微粒的运动情况进行模拟仿真。首先

待气相流场稳定，然后设置干冰微粒的相关参数，加载可形变部件模型(DPM)，待残差收敛后，查看颗粒的运动轨迹及干冰微粒的速度分布情况。

干冰微粒经喷枪加速后，在射流空间中先呈聚集状态喷射，然后呈发散状态喷射，Fluent模拟喷嘴内部和外部气流流场速度分布云图及对称轴线速度变化曲线如图3所示，云图反映出喷嘴气体速度大小的差异。拉瓦尔喷嘴在出口外产生激波，形成了膨胀波与激波相交和反射的现象，最大速度集中在5~15cm范围内，即干冰微粒喷射清洗常用喷射的距离，此时喷嘴产生的气流依旧能保持较高的速度，喷嘴会有更高的抛光清洗效率。

通过仿真可以看出，喷射压力为0.7MPa时，干冰粒子的速度与喷射距离有较大关系，距离喷嘴出口在5~15cm的距离时，干冰微粒速度会在400~550m/s范围内变化。由于干冰粒子的运动轨迹可知拉瓦尔喷嘴射流发散，当工作距离在10cm附近时清洗效率较高，因此在实际工艺中对喷射距离的掌握尤为重要。

### 试验结果分析

根据仿真计算的结果，干冰射流清洗积炭试验过程中的喷射压力设为0.7MPa，喷射角度为60°，喷射距离为10cm。结果显示，积炭在干冰射流的撞击下极易脱落，仅需约11s的时间就可以把面积为62cm<sup>2</sup>的积炭清除干净，清洗效率达95%以上，对比清洗进程图，清洗前后效果明显，如图4所示。

### 材料属性分析

创新团队对常见的航空发动机材料，如不锈钢、钛合金和高温合金，

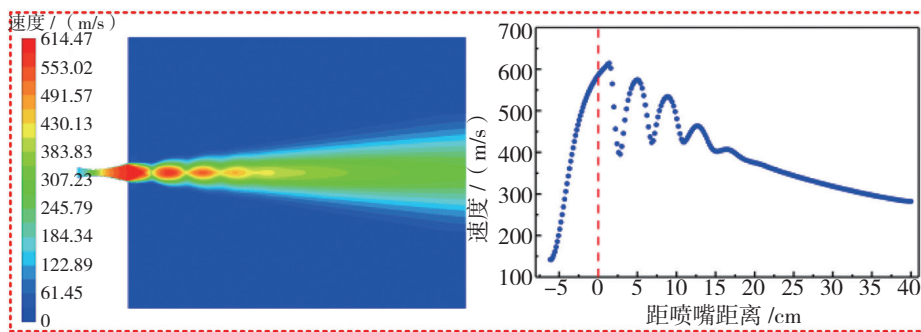


图3 喷嘴速度与压力分布情况



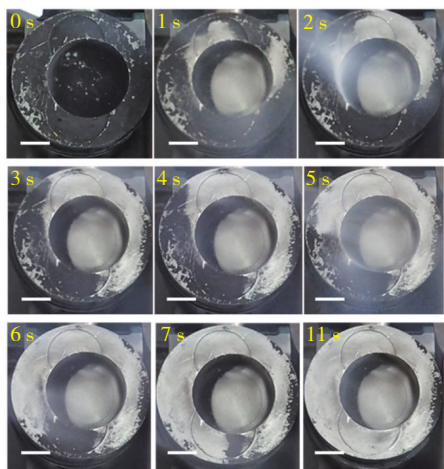


图4 干冰射流清洗积碳过程

在干冰清洗前后的材料属性进行了分析，以验证该技术的适用性。

从干冰射流清洗技术对样件表面形貌的影响来看，经过干冰射流清洗后，表面的加工痕迹和纹理明显减轻，表面质量得到改善；从粗糙度分析结果来看，干冰清洗技术

在去除积碳的同时，还可降低表面粗糙度，起到光整作用。值得注意的是，起到光整作用所需的时间远大于清洗积碳所需的时间，故在干冰射流清洗积碳过程中几乎不会影响表面粗糙度；同时，创新团队对样件进行金相检查，清洗前后试样形貌一致，均未见氧化、腐蚀特征，也未见晶间氧化现象。

#### 应用验证

根据仿真、试验及材料属性分析可知，干冰射流清洗技术积碳清除效果好，且对材料无影响。创新团队随后对发动机零部件进行了干冰清洗积碳实际应用验证，清洗前后对比效果明显，同时对各零部件目视检查，表面均无明显损伤，如图5所示。

#### 结束语

干冰射流清洗技术具有干冰微粒

冲击力高等优点，能够实现单件或装配状态下组件复杂空间的积碳清洗，通用性强，在清洗航空发动机零组件积碳具有良好的应用前景。相对于高温烧结与清洗剂，该技术大大降低了生产耗能，同时极大地缩短了零部件积碳清洗周期，节省了排故周转时间，提升了生产效率。

**航空动力**

(郑建林，中国航发黎阳，工程师，从事航空发动机整机装配试车技术研究)

#### 参考文献

- [1] 黄艳斐,朱岳麟,熊常健,等.航空发动机喷嘴结焦积碳的性质[J].北京航空航天大学学报,2011(06):126-129.
- [2] 王旭全.积碳对发动机性能的影响[J].黑龙江交通科技,2008,31(5).
- [3] 李晓东,刘传绍.超声波清洗技术的研究与应用现状[J].清洗世界,2009,25(1).
- [4] 黄艳松.某发动机导向叶片表面积碳去除工艺研究[J].机械工程师,2015(11):77-79.
- [5] 武爽爽,贾秀杰,熊胜.面向再制造的油漆清洗技术综述[J].表面技术,2021(3):51-65.
- [6] 吕平.干冰微粒喷射技术综述[J].真空科学与技术学报,2016(8):112-118.
- [7] 段学明.干冰清洗技术在汽车行业的应用[J].清洗世界,2006(11):9-11.
- [8] 李焯,谭昭怡,张东,等.干冰喷射去除表面放射性污染技术研究[J].辐射防护,2018(2):57-62.
- [9] 许娟红,火巧英,王国平.干冰清洗技术在轨道车辆中的可行性分析[J].中国设备工程,2020(12):173-174.

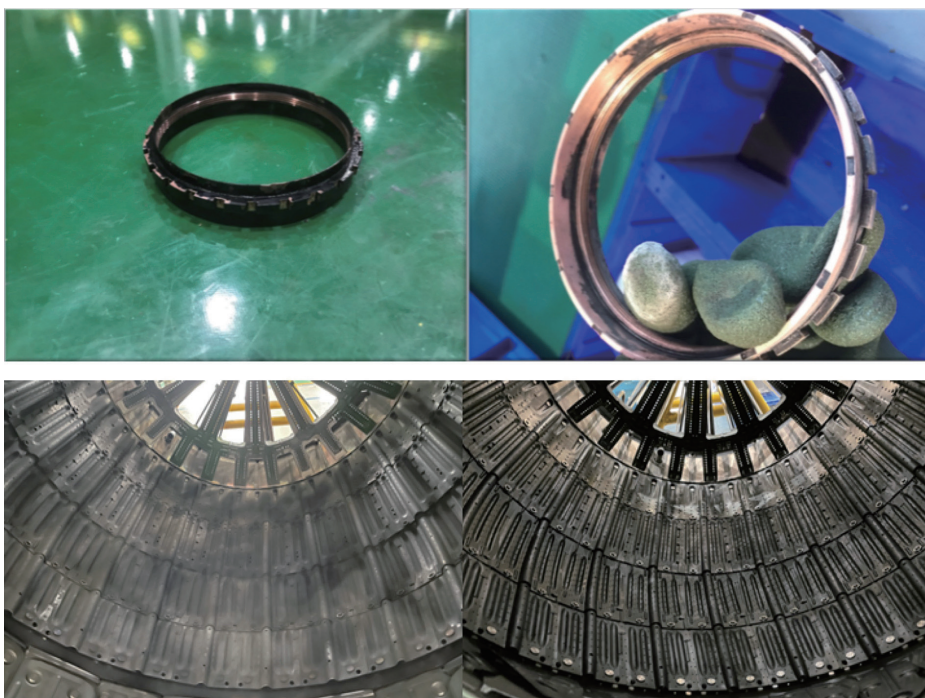


图5 干冰射流清洗加力筒体对比