

# 航空发动机零部件清洁度控制标准

## Cleanliness Control Standard for Aero Engine Components

曹志涛 韩松 魏钱铎 / 中国航发研究院

20世纪60年代初期，清洁度控制标准首先起源于航空和汽车工业并逐渐扩展到其他工业领域，极大地推动了各行业高精尖技术发展。航空发动机作为高精尖工业产品的代表，通过推行清洁度控制，极大地提高了产品质量和可靠性。中国航发编制发布一系列航空发动机零部件清洁度控制标准，是进一步提升产品研制水平的关键。

**零**部件清洁度是用来表征零部件清洁水平的指标，是清洗工序后零部件表面残留颗粒污染物的限量值，涉及颗粒污染物种类、大小、数量和质量等。清洁度控制水平对产品的配合精度、寿命和可靠性等都有重大影响，随着技术的不断进步和认知的不断扩展，航空、汽车、半导体、电子、生物医疗等高科技领域中关键零部件的清洁度控制要求越来越受到重视。

### 零部件清洁度控制的起源

清洁度控制的前身是污染物控制，重点关注肉眼可见的大颗粒污染物对产品的影响。

在第二次世界大战时期，对于几十微米的颗粒污染物即可导致精密控制系统功能失效的发现，引发了从污染物控制向清洁度控制的转变，研究人员开始更加关注微米级尺度颗粒污染物对精密机械系统的影响。

20世纪60年代初，美国汽车工程师协会（SAE）和美国航空航天工业协会（AIA）开始采用统一的清洁度标准，从美军标（MIL）《产品清洁度等级》演化而来的环境科学

和技术标准《产品清洁度等级——应用、要求和定级》推动了半导体、数据存储、医疗设备、通信、航空和精密仪表等行业的清洁度控制水平的提升。

十几年前，航空发动机领域开始引入清洁度控制标准开展零部件全生命周期控制。GE航空集团、普惠等代表性企业都在国际标准化组织（ISO）、美军标（MIL）、协会团体（SAE、美国材料试验协会等）标准的基础上编制了更加符合行业特点和需求的企业标准，配合美军标、各行业协会标准，用于指导企业和全球供应商的发动机产品清洁度控制。

### 航空发动机清洁度控制的意义

据统计，用于汽车发动机清洁的工作量约占制造过程总量的10%~20%，不同企业在装配前的清洗工艺与清洗质量的不同，可导致零部件运转寿命相差10~100倍，因此清洁度是发动机十分重要的质量属性，与使用寿命紧密相关<sup>[1]</sup>。航空发动机更是一种要求有极致质量和可靠性

的精密机械产品。从几何尺寸角度看，其转子轴承的径向间隙范围为14~93 $\mu\text{m}$ ，接触零件的油膜厚度为10~20 $\mu\text{m}$ ，要严格控制微米级尺度的颗粒污染物的量，即开展清洁度控制。研究表明，造成航空发动机清洁度问题的主要根源是颗粒污染物，尤其是硬质颗粒。德国舍弗勒公司曾研究不同硬度污染物颗粒对轴承产品的寿命影响，试验及分析结果如图1所示，随着污染物颗粒的硬度增加，颗粒造成的压痕深度增加，轴承寿命明显降低，与无污染物试验相比最多出现了99%以上的寿命损失，这种结果对于可靠性要求极高的航空发动机来说是不可接受的。

清洁度控制是一个全生命周期概念，在航空发动机零部件设计、加工、装配、包装运输和使用维护过程中都涉及清洁度问题。易于存蓄颗粒污染物且难以清洗的零部件结构问题来源于设计过程；毛刺、金属屑等加工残余过量问题和沙粒、刚玉等外来硬质颗粒输入问题则来源于加工、装配和包装过程中的疏于管理；合格的清洁零部件的再污染/损伤等问题多

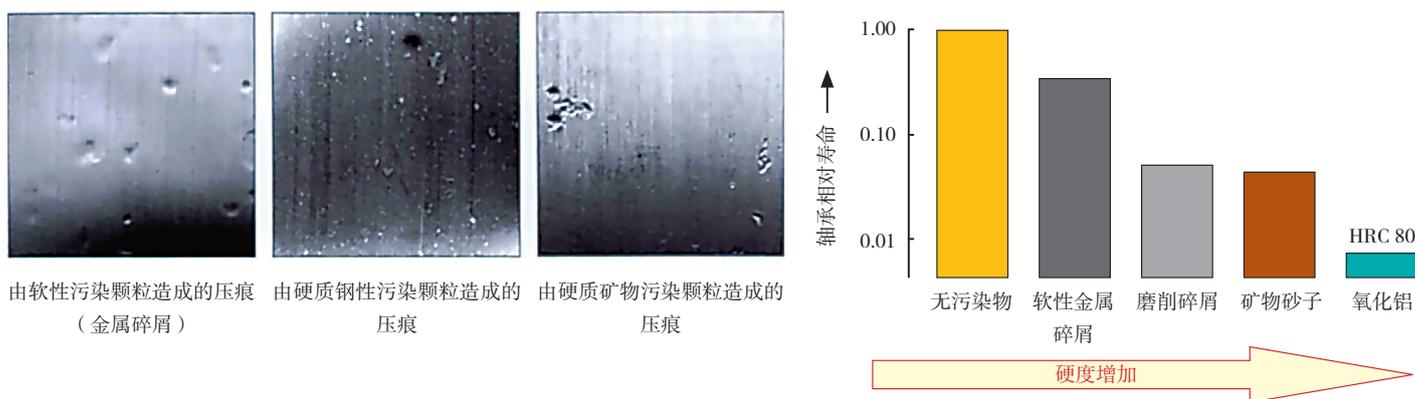


图1 颗粒污染物硬度对轴承寿命影响试验

数来源于包装运输和使用维护过程中外来输入污染物的威胁。

做好零部件清洁度控制可以全面提升行业竞争力。在产品层面，通过清洁度控制可在很大程度上避免燃滑油异常及过烧、油路系统堵塞、传动部件磨损、轴承干研、转静子刮磨等故障<sup>[2]</sup>，节省大量型号研制时间和成本。在工艺层面，清洁度控制是焊接、喷涂等附着力要求较高的工艺过程的重要工序，油液等有机污染物残留会大大降低焊接点和涂层性能，因此清洁度控制水平是决定工艺过程成败的关键要素<sup>[3]</sup>。在设备层面，冷加工过程中的清洁度控制可以有效保障设备加工精度及测量精度，热加工过程中的清洁度控制可以避免零部件残留有机挥发污染设备，提高设备的高精度稳定运行周期。因此，零部件清洁度控制对于航空发动机研制水平的提升，以及提高航空发动机产品质量、性能、可靠性和降低直接使用成本等都具有重要意义<sup>[4]</sup>。

## 清洁度控制技术

### 清洁度控制分级

清洁度分级主要面向对零部件

损害最大的颗粒污染物，其基础在于对磨损机理的深入研究。从磨损机理得知，直接危及产品寿命的是颗粒污染物的硬度、大小与数量分布情况<sup>[5]</sup>。将可定义并可检测的损害产品寿命的因素与清洁度级别相互关联的操作就是清洁度分级，分为颗粒计数法分级和称重法分级，其中颗粒计数法分级是称重法分级的基础依据。

颗粒计数法分级在于建立颗粒尺寸大小、一定尺寸范围内的颗粒数量以及颗粒硬度与清洁度级别的关联关系，其中硬度一般作为测量对象的范围界定要素来考虑，不纳入分级模型中。针对另外两类寿命相关要素，美国环境科学和技术部标准《产品清洁度等级——应用、要求和定级》中提出了颗粒尺寸分布与对应等级的数学模型，实现了清洁度的颗粒计数分级。

### 零部件清洗技术

零部件清洗过程是将吸附在基体上的污染物解析下来从而使基体表面清洁的过程，包括对基体和污染物的润湿和界面间渗透，使污染物与基体表面分离，以及防止已分离污染物再沉积于基体表面的过程。

普遍采用的清洗方法分为干式清洗和湿式清洗两大类，根据具体的清洗方式、清洗介质、辅助手段和清洗阶段又有更加详细的方法划分，具体如图2所示。

紫外线臭氧、激光、干冰等干式清洗属于残留较小的新式清洗方法，分别利用紫外线和臭氧的激发氧化效应、高能量密度激光激发的热能、干冰颗粒冲击冷却效应来去除污染物。湿式清洗主要依靠水基或油基清洗液对污染物的浸润和剥离来达到去除的目的。相对于干式清洗存在液态清洗剂的残留问题，湿式清洗中的机械、压力、喷射和超声清洗方法主要依靠接触、高压、冲击和高频振动等辅助手段增强清洗液对污染物的浸润和剥离效果，完成较难去除污染物的清洗；酸碱、有机溶剂和电化学抛磨清洗依靠氧化还原反应和有机溶剂与油料污染物的互溶性来增强清洗效果；去离子水、旋转清洗和干燥主要用于最终清洗，用于去除前述几种湿式清洗方法的液体残留。

### 颗粒污染物检测技术

清洁度检测方法根据使用场景不同可分为在线检测和取样检测两

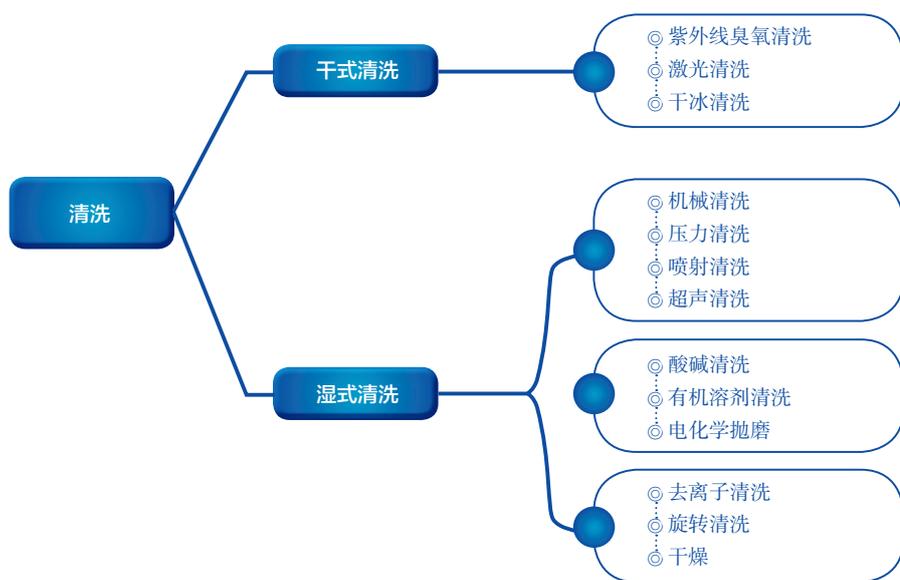


图2 清洗方法分类

种。取样检测根据目的不同又可以分为颗粒元素种类检测和普通取样检测等类别。在线监测方法主要用于发动机工作过程中的燃油、滑油污染物监测，常见方法为油液磁塞监测法；颗粒元素种类检测多用于故障分析中的颗粒物来源研究，常见方法为铁谱分析法和光谱分析法等<sup>[6]</sup>。普通取样检测主要用于清洗后零部件的清洁度等级确认，常见方法为质量检测法和颗粒计数检测法，两种方法都需要先完成颗粒污染物的提取。颗粒物提取与清洗操作近似，是将已清洗过零部件的残留颗粒污染物萃取到提取液中的过程，常见的提取方式包括晃动法、压力冲洗法和超声波清洗法等。颗粒污染物提取所选择的提取液和提取方式与零部件材料、结构等诸多因素相关，为了保证检测结果的重复性和再现性，同一种零件的颗粒物提取操作应该保持一致。

颗粒物质量检测法又名称重法，通常将萃取颗粒污染物的全部提取

液完全通过已知质量的洁净滤膜，干燥后称量携带颗粒污染物滤膜的总质量，减掉滤膜质量就可以得到颗粒污染物的质量，一般需要使用

真空泵来加速过滤。颗粒计数法需要统计多个尺寸范围的颗粒污染物数量，常用的方法包括显微分析法和自动颗粒计数仪法两种，相对于传统的目视手动计数法来说具有更高的准确度和效率。其中显微分析法是用图像处理的方法对滤膜上不同尺寸范围的颗粒进行自动计数，自动颗粒计数仪法是通过遮光、电阻、电子成像原理直接测定待测液样并进行颗粒计数。

## 中国航发清洁度控制标准及其应用

中国航发编制发布了一系列航空发动机零部件清洁度控制标准，主要包括清洁度等级、清洁度控制要求、控制工艺、颗粒物提取和检测方法等。如图3所示，系列零部件清洁度控制标准建立在清洁度等级规定

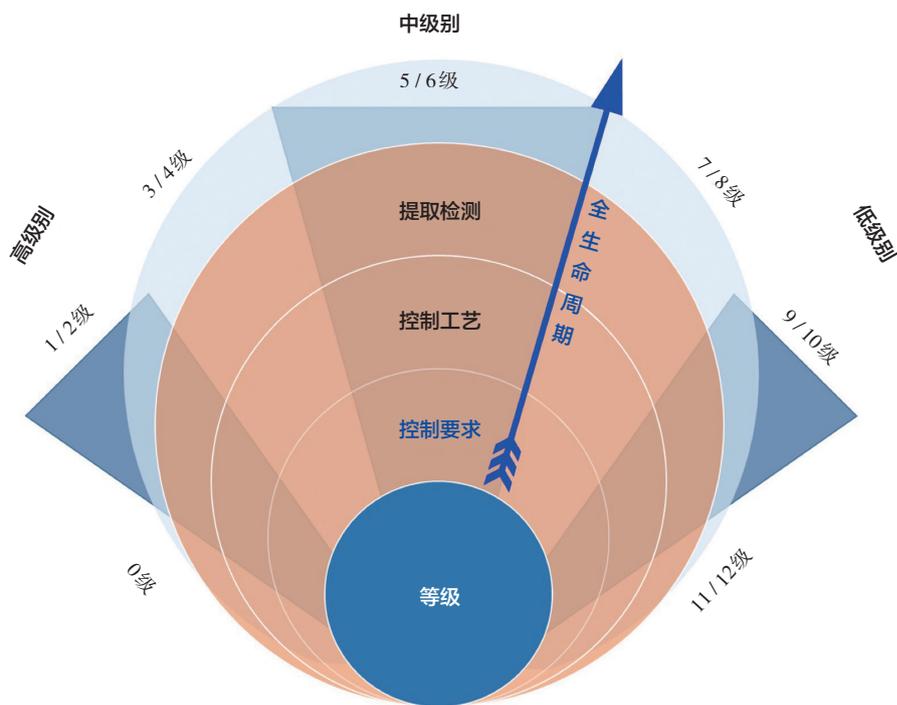


图3 系列清洁度控制标准的分工协作关系

的基础上，由清洁度控制标准提出零部件全生命周期的基本控制要求，控制工艺和提取检测标准则从具体操作的角度提供指导，标准的具体分工如下。

清洁度等级类标准规定了等级划分方法和相应指标；清洁度控制要求类标准主要从产品全生命周期的角度提出为达到相应清洁度等级要求需要考虑的通用基础要求，包括设计、工艺、检测、装配和包装等；清洁度控制工艺要求类标准承接控制要求标准，主要从工艺的角度对人、机、料、法、环、测等生产要素给出详细限制规定，实现等级标准要求指标；颗粒物提取和检测方法类标准规定了多种可选的提取和检测方法，以相对稳定和准确的检测结果确定清洗过的零部件所达到的清洁度等级。

### 清洁度等级类标准

清洁度等级类标准属于基础标准，分级方法分为颗粒计数法分级和称重法分级。相较而言，称重法分级使用简单方便，颗粒计数法分级可与产品可靠性挂钩，在航空发动机领域有广泛应用。颗粒计数法分级针对 $5\mu\text{m}$ 以上的颗粒进行了各个尺寸范围的颗粒数量限制，规定所有零部件表面不允许出现 $200\mu\text{m}$ 以上的颗粒污染物，并给出了其他尺寸范围的粒度分级代号和不同清洁度等级下允许出现的固定受控表面上最多颗粒污染物数量，参照国际通用的等级划分规则，颗粒计数法分级共划分14个等级。称重法分级给出了固定受控表面允许颗粒污染物的最大质量，共分为8个等级。

除了给出颗粒计数法和称重法的级别划分以及每个级别的数量和

质量指标值之外，清洁度等级类标准还给出了检测结果与清洁度等级的换算方式，以及不同等级要求的表达标识方式。

### 清洁度控制要求类标准

清洁度控制要求类标准规定了包括设计、工艺、检验、装配、包装防护运输等零部件全生命周期的通用一般要求。其中设计方面要求占主体地位，提出了清洁度等级选择应考虑污染物对相关系统的影响、多种工作介质需要考虑最高等级要求等原则，给出了不同典型零部件推荐的清洁度等级以及等级标识方法示例，提出有利于清洁度控制的结构设计要求。从全方位控制角度出发，标准中还规定了液体（包括工作液和清洗液）的清洁度要求，以及零部件剩磁、退磁要求等。

### 清洁度控制工艺要求类标准

清洁度控制工艺要求类标准规定了人员准入要求，设备工具维护要求，清洗液使用/禁用规则，以及环境的清洁和照度要求。操作过程要求覆盖了清洗前后、干燥、检测和防护的工艺要求，并扩展说明了对成附件产品和装配试车过程的清洁度控制要求等。

### 颗粒污染物提取和检测方法类标准

颗粒污染物提取及检测方法类标准具备一定的通用性，行业间的差异不大。颗粒污染物提取标准按照晃动、压力冲洗、超声波清洗以及模拟功能试验4种方法介绍了提取液、仪器、环境和试验程序。颗粒污染物检测标准按照称重法、显微分析法和自动颗粒计数仪法3种方法介绍了检测仪器装置、环境、程序、结果及报告等方面的内容。

## 结束语

航空发动机零部件清洁度控制是进一步提升产品研制水平的关键之一。清洁度控制系列标准的编制发布，可推动中国航空发动机研制从液体清洁度控制开始进入零部件清洁度控制的全新阶段，也对从业人员意识、清洁度控制技术攻关、关键参数验证、自动化设备设施以及经验数据积累等方面提出了需求。为尽快实现零部件清洁度可控，保障军民航空发动机产品性能和可靠性，需要大力支持相关软硬件条件建设和技术研究，全面提升清洗、检测、验收和包装运输等零部件清洁度控制技术能力，解决标准实施的瓶颈问题。标准应用过程中建议强调设计输入和管控，由专业人员对标准动态维护更新以及标准实施过程中的审核批准负责，在分阶段试点实施和经验总结基础上尽快推进标准的大范围贯彻实施。

**航空动力**

（曹志涛，中国航发研究院，工程师，主要从事设计制造协同研究工作）

参考文献：

- [1] 康新龙. 发动机制造过程中的清洁度管理[J]. 汽车实用技术, 2017(6): 162-164.
- [2] 张霄. 航空发动机装配清洁度控制技术[J]. 机械工程师, 2019(3): 122-124.
- [3] Bewlay B P. TiAl alloys in commercial aircraft engines [J]. Materials at high temperatures, 2016(33): 4-5.
- [4] 焦凤菊. 清洁度对机械产品质量的影响及控制[J]. 清洗世界, 2011(4): 24-29.
- [5] 马亚良. 机械产品清洁度概论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [6] 刘锦秋. 航空发动机燃油附件修理清洁度控制研究[J]. 价值工程, 2018(5): 96-98.