面向再制造的工业清洗现状与发展趋势

王 兴[1] 杜际雨[2] 王黎明[3,4] 李方义[3,4] 李剑峰[3,4] 韩 伟[1*]
1.军事科学院国防科技创新研究院,北京,100071
2.山东建筑大学机电工程学院,济南,250101
3.山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室,济南,250061
4.国家机械工程实验教育示范中心(山东大学),济南,250061

摘要:清洗是机械制造全生命周期的关键工序,直接决定零部件服役性能与再制造质量,当前我国机械再制造领域面临混合污垢去除困难、绿色清洗技术自主创新不足、高端装备对外依存度高等核心瓶颈问题。从污染物特性与清洗技术两个核心维度,系统剖析了工业污染物的分类、理化特征、形成与去除机理,对比分析了化学、物理、微生物等主流清洗技术的应用特点与技术短板,梳理了我国工业清洗设备的发展现状与行业挑战。明确了混合污垢是制约再制造清洗效率提高的核心难题,提出了复合化、绿色化、智能化的清洗技术发展路径。

关键词:工业清洗;再制造;污垢;去除原理;清洗技术
中图分类号:TG154
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.10.003 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Current Status and Development Trends of Industrial Cleaning for Remanufacturing

WANG Xing[1] DU Jiyu[2] WANG Liming[3,4] LI Fangyi[3,4] LI Jianfeng[3,4] HAN Wei[1*]
1.National Innovation Institute of Defense Technology, Academy of Military Science People's Liberation Army, Beijing, 100071
2.School of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, 250101
3.Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of the Ministry of Education, Shandong University, Jinan, 250061
4.National Demonstration Center for Experimental Mechanical Engineering Education, Shandong University, Jinan, 250061

Abstract: Cleaning is a critical process throughout the entire lifecycle of mechanical manufacturing, directly determining the service performance of components and the quality of remanufacturing. At present, China's mechanical remanufacturing sector faces core bottlenecks such as difficulties in removing mixed contaminants, insufficient independent innovation in green cleaning technologies, and high dependence on foreign high-end equipment. From the two core dimensions of contaminant characteristics and cleaning technologies, the classification, physicochemical properties, formation and removal mechanism of industrial contaminants were systematically analyzed, the application characteristics and technical weaknesses of mainstream cleaning technologies including chemical, physical, and biological cleaning were compared, and the development status and industry challenges of industrial cleaning equipment in China were reviewed. The study clarified that mixed contaminants are the core problem restricting the improvement of remanufacturing cleaning efficiency, and proposed a development path featuring composite, green, and intelligent cleaning technologies.

Key words: industrial cleaning; remanufacturing; contaminant; removal mechanism; cleaning technique

0 引言

工业清洗是保障工业生产高效、有序进行的重要基础环节[1-2]。在机械制造领域,清洗工序直接影响产品性能[3]。随着机械产品向高精密、长寿命方向发展,对清洗技术的绿色化与精准化提出了更为严格的要求。我国工业清洗研究起步较晚,理论基础相对薄弱,在高端清洗装备与核心工艺方面与发达国家相比存在一定差距。尤其对于复杂污垢,不仅缺乏高效可靠的清洗方法,清洗质量也难以满足生产要求,已成为严重制约我国工业生产绿色化进程的关键瓶颈之一。

收稿日期:2025-11-28

经过近40年的发展，我国工业清洗的范围已由初期的锅炉清洗扩展至整个工业领域[4]，形成了集清洗产品生产、装备制造、技术研发与工程服务于一体的完整产业体系。根据华经产业研究院发布的《2025年中国工业清洗行业发展现状分析，工业体系的不断扩大，为行业发展提供充足动力》，我国工业清洗产业规模已由2015年的约300亿元增长至2024年的约1188亿元，年均复合增长率超过15%。工业清洗正逐步成为现代服务业的重要组成部分。

我国工业清洗在部分领域已达到国际先进水平，但在高端清洗装备研发与复杂污垢清洗工艺方面，与国际先进水平相比仍有提高空间。根据中国产业调研网发布的《中国工业清洗行业现状调研及发展前景分析报告(2020-2026年)》，我国工业清洗领域在自主创新与关键技术装备研制方面能力尚显不足，大型清洗装备尤其是核心关键装备仍依赖进口，且存在较为突出的重复引进问题。受制于国外技术封锁，我国工业清洗整体技术水平仍偏低，行业发展仍以经验驱动的粗放发展模式为主，严重制约了工业清洗技术水平的进一步提高。随着可持续制造理念的深入推进，废旧零部件的回收与再利用逐渐受到重视，由此衍生的再制造清洗需求亦愈加迫切[5-6]。相较于生产制造过程中的清洗对象，废旧零部件表面污染物组分更加复杂、附着更为牢固、去除难度更大，这对工业清洗技术提出了更高的要求，使该领域面临更为严峻的挑战[7-8]。

综上所述，我国工业清洗市场需求旺盛，发展潜力巨大，但整体技术水平仍然偏低，已成为制约我国工业绿色化进程的重要因素。本文结合我国工业清洗的发展特点与实际需求，从污染物与清洗技术两个维度系统分析我国工业清洗的发展现状，并进一步剖析了其发展趋势。

1　工业清洗的分类

依据清洗需求的不同，工业清洗可分为生产清洗和维护清洗两大类。生产清洗主要面向新品的加工制造过程，通常用于对清洁度有特定要求的工序间或产品完成之后；维护清洗则主要面向在用设备的检修保养。按照不同行业对清洗精度的要求不同，还可将工业清洗进一步分为一般工业清洗、精密工业清洗和超精密工业清洗三大类。一般工业清洗仅能去除较为粗大的污垢，如汽车、船舶和飞机检修过程中遇到的污垢；精密清洗主要面向生产过程，能够去除微小尺度的污垢；超精密清洗则主要针对电子元器件、光学部件等高精密零件，可实现极微小污垢颗粒的去除。与生产清洗中的污垢相比，维护清洗所处理的污垢形成周期更长、组分更加复杂，去除难度亦相应增大，但由于维护清洗对清洗精度的要求通常低于生产清洗，故多数维护清洗的总体实施难度仍低于生产清洗。

近年来，随着可持续制造的快速发展，报废产品的回收再利用已成为制造业发展的必然趋势[9]，由此衍生的清洗需求为工业清洗带来了更多的机遇和挑战[10-11]。由于再利用零部件均来源于已服役报废产品，其表面污垢的污染周期更长、化学成分更加复杂，与基体的结合强度更高，因此去除难度显著增大[12]。同时，因再利用零部件最终仍将投入新品的生产制造环节，故对其清洗质量也提出了更高要求[13-15]。

2　污染物及其去除机理的研究现状

污染物是指物体在外界物理、化学或生物因素的作用下，于表面形成的污染层或覆盖层，是对从清洗对象表面去除杂质的统称[16]。污染物的理化性质对清洗方法的选择及清洗工艺的优化都具有直接的指导作用，因此，充分掌握污染物特性是确保清洗作业有效实施的基本前提[17]。

然而，现有研究大多数将清洗技术与污染物特性相互割裂，尤其在综述类文献中，鲜有对两者进行综合分析的[18-19]。LU等[20]分析了海洋微生物污垢的形成过程，指出船舶表面大量附着的宏观生物污垢会显著增大流体动力摩擦阻力，进而导致燃料消耗和维护成本的增加。CHENG等[21]提出了一种超临界正丁醇清洗方法，可有效解决盲孔类再制造毛坯清洗不彻底及基体损伤问题。刘继锋等[22]通过监测金属在清洗与钝化过程中的电位变化，保障了漂洗后的钝化质量。尽管我国工业清洗领域已取得长足进步，但多数研究者仍未从污染物与清洗技术相结合的视角系统研究清洗问题。黄志超等[23]从超声清洗机理、工艺参数对清洗效果的影响规律及超声设备关键部件等方面对超声波清洗技术进行了总结分析。WEI等[24]研究了换能器对称布局对超声波清洗效率的影响，结果表明换能器物理位置和相位控制的对称性均可显著优化声场分布，从而提高清洗质量与效率。TAN等[16]设计了一种高强度空蚀清洗工艺，可有效去除增材制造零部件表面部分熔融的粉末，提高清洗效率与清洁度。朱国栋等[25]从激光清洗的技术发展历程和激光器应用角度对激

光清洗进行了分析。激光清洗技术因其绿色环保、高效精准的特点，已逐步取代传统清洗方法，在汽车制造、航空航天、文物保护、电力等行业得到了广泛应用[26]。然而，目前研究多聚焦于清洗技术的清洗效果及其应用领域，对污染物自身特性的关注相对不足。为填补污染物与清洗技术研究的空白，本文从污染物特性与清洗技术两个维度对我国工业清洗现状进行综合分析。

当前，关于污染物的研究主要从污染物分类、形成与去除机理以及理化性质分析等方面展开[8,12]，本文也从这三个方面对污染物研究现状进行归纳与分析。

2.1 污染物的类型

不同类型污染物的成分差异显著，对应的去除手段也不同，因此对污染物进行分类研究是实现有效清洗的首要前提。当前最常用的是依据污染物的化学组成进行划分，可分为有机污垢与无机污垢两大类。无机污垢主要由金属或非金属的氧化物、水化物或无机盐等无机成分组成，如锈蚀、水垢、灰尘及无机颗粒等，通常采用酸碱溶剂溶解的方法去除。有机污垢主要由碳水化合物、脂肪、蛋白质、有机高分子化合物等有机成分组成，如油污、油脂、油漆、涂料等，一般通过热分解或乳化分散的方法去除。对于常见的有机污垢或无机污垢，其化学组成类别较为单一，通常仅由有机物质或无机物质中的一类组成。例如，水垢主要由无机盐类组成，油垢则主要由烷烃类有机成分组成。此类污垢的清洗工艺相对简单，采用单一清洗方法即可实现有效去除。

随着再制造技术的不断发展，工业清洗所面临的污染物组分也越来越复杂[27]。再制造零部件表面的污染物很难沿用上述分类方法进行简单归类[28]。与生产制造和产品维护环节中的污染物相比，再制造毛坯表面的污染物种类更加多样，成分更加复杂，污染周期更长，污垢层更加致密牢固，微观结构更加复杂，去除难度也随之显著增大。此类污垢表现出有机物和无机物共混的典型特征。再制造零部件表面诸多看似单一类型的有机或无机类型污垢，实际上也具有混合型特征[29-31]。

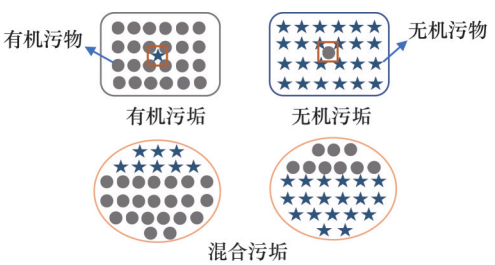
在传统清洗实践中，混合污垢常被视作单一有机污垢或无机污垢进行处理，导致清洗效果不理想。混合污垢的形成通常与复杂的服役环境密切相关，构件在服役过程中易受周边环境介质的污染，随着污染周期的延长，来源于环境的外源性污染物含量逐步累积，进而促成混合污垢的生成[32]。笔者在对再制造企业的调研中发现，矿山机械表面污垢（图1）也呈现出混合型特征，由锈蚀产物与煤粉混合而成，但在实际生产中却被当作无机污垢进行处理[33]。



图1 煤矿机械表面复杂锈蚀污垢

Fig.1 Complex rust and dirt on the surface of coal mining machinery

混合污垢与有机污垢、无机污垢之间的区分仅是一个相对概念。事实上，在有机污垢和无机污垢中亦可能存在另一类污物的少量掺杂，只是两者含量差异悬殊，如图2所示[28]。有机污垢中含有极少量的无机污物，但含量甚微，不足以对有机污垢的整体去除产生实质影响，常规有机污垢清洗方法仍可有效适用且清洗效果不受干扰。无机污垢的情况与之类似。例如，加工后残留在工件表面的油垢（主要成分为润滑油）属于有机污垢，其中虽可能会混入加工过程中产生的金属碎屑等无机杂质，但由于污染过程短暂，无机污物含量极低，对油垢的去除不构成影响，故仍可通过有机清洗方法有效清除。而在混合污垢中，无机（或有机）污物的相对含量较高（图2），就会对污物的性质及其去除行为产生影响，原有的单一类型污垢清洗方法无法达到同等清洗效果。综上，混合污垢的形成通常存在一个主要污染源，如积碳的主要污染源为燃油未充分燃烧产生的有机组分，船舶表面锈蚀的主要污染源为海水对船体的电化学腐蚀，主要污染源产生的污染物在混合污垢中占据主体地位，据此可将混合污垢划分为有机结构混合污垢和无机结构混合污垢，如积碳为有机结构混合污垢，船舶表面的锈蚀属于无机结构混合污垢。



注：图中●和★的数量代表了有机和无机污物的相对含量

图2 不同类型污垢中有机和无机污物的含量特点[28]

Fig.2 Characteristics of the content of organic and inorganic contaminants in different types of dirt[28]

目前，学界对单一有机或无机类型污垢的认识相对深入，而混合污垢尚未受到足够重视，在实

际工程中仍被当作单一类型污垢进行处理，由此导致了清洗效果不佳、清洗效率低的问题。随着污垢去除难度的逐渐增大，混合污垢需引起业界足够关注，在清洗技术的研发过程中需充分考虑混合污垢的结构与组成特点。

2.2　污染物性质分析的现状

污染物的性质是选择清洗方法和优化清洗工艺的重要依据。目前，污垢相关研究大多集中于其形成规律与危害分析，主要目的在于减缓污染进程、降低污垢对设备运行及生产过程的不利影响[33-35]。例如，RICHTER等[36]研究了积碳中芳香族化合物的形成规律，INABA等[27]和SHARMA等[37]研究了发动机燃烧特性对排放颗粒的影响规律。然而，上述研究重点关注了污垢的形成过程，对已形成污垢的认识还不够深入，对后续清洗过程的指导作用相对有限，面向清洗需求的污垢性质研究仍相对薄弱。

污染物的化学成分是选择清洗方法的主要依据。现有研究工作大多仅将污垢简单定性为有机污垢或无机污垢，进而关注有机组分或无机组分其中一类组分的含量，未从有机和无机两种组分角度进行综合考虑。例如，文献[37-38]在研究积碳性质时仅关注了芳香族、烷烃等有机组分的成分与含量，忽视了其中无机组分的作用；自20世纪初研究人员开始进行锈蚀中铁化合物种类研究以来[39-40]，含铁化合物的种类及其演变规律一直是锈蚀成分研究的核心关注点[29,41-42]，而对其中的有机组分尚未开展系统研究。上述研究思路对成分较为单一的有机污垢或无机污垢尚可适用，但对于混合污垢，仅关注单一类型组分远不能满足需求，极易忽略有机与无机污物间相互作用对污垢整体性质的影响[38,43]。大量研究表明，少量异质成分的添加对物质的稳定性和强度都能起到显著的提高作用，因此在有机材料的制备过程中常通过掺杂无机颗粒的方式来提高其热稳定性[44]。同理，对于混合污垢，需分别从有机污物和无机污物的组成角度对其化学成分进行全面解析，方能加深对其成分组成的认识。

此外，污垢的微观结构特征对清洗难度及清洗方法的选取同样具有重要的影响。然而，当前对污垢结构的分析多局限于表面形貌的观测[45-46]。例如，在积碳结构研究中，研究人员常采用扫描电子显微镜（SEM）对其表面形貌进行观察。文献[47-48]借助SEM揭示了不同工况条件下所形成积碳的形貌差异；文献[46]利用透射电子显微镜（TEM）观察了氧化铁形成过程中的形貌演化特征。总体而言，目前对污垢结构的研究仍以表面形貌观察为主，依赖SEM和TEM等分析手段。然而，污垢的形成是一个不断累积的动态过程，在其成长演化过程中，微观结构随着时间和环境条件的变化而不断演变，表面形貌只能反映污垢成长结束时的表面特征，无法揭示其内部的完整结构信息。工程实践表明，污垢与基体之间的界面结构及污垢层内部的体相结构特征才是决定清洗难易程度的关键所在。因此，仅依赖表面形貌分析远不足以全面、准确地表征污垢的真实结构特征。

2.3　污染物形成和去除机理

工业清洗的核心是破坏污染物与基体表面的稳定结合，实现污染物的剥离。无论是金属、无机非金属还是高分子材料表面，污染物的形成与去除都涉及固-液-气多相界面的物理化学过程[49]。深入理解污染物形成和去除过程的热力学机制和动力学行为，是合理选择清洗技术、优化工艺参数的理论基础。

2.3.1　污染物的形成与附着机理

污染过程是外界污染物在物体表面发生物理或化学吸附，并在结合力的作用下形成稳定污垢层的自发过程。从微观层面看，污染物与基体表面的结合力主要可分为机械结合力、物理吸附力、静电引力和化学结合力四类。

从宏观热力学角度分析，污染过程是体系吉布斯自由能降低的自发过程，涉及分子间作用力所导致的焓贡献和与颗粒或分子在表面或界面上的空间排布有关的熵贡献[50]。污染物分子由自由运动状态转变为表面固定状态，体系的混乱程度降低，熵值减小（$\Delta S_{pol}<0$）；同时污染物与表面之间通过上述作用力形成吸附键，体系内能降低，吸附过程为放热过程，故焓变也为负（$\Delta H_{pol}<0$）。根据吉布斯自由能公式：

$$\Delta G_{pol}=\Delta H_{pol}-T\Delta S_{pol} \tag{1}$$

其中，T为温度。当$\Delta G_{pol}<0$时，污染过程可自发进行。由于$\Delta H_{pol}<0$且$\Delta S_{pol}<0$时，低温条件下$T\Delta S_{pol}$项绝对值较小，ΔG_{pol}更易满足小于零的条件，故污染过程在低温下更倾向于自发进行；温度升高后，$T\Delta S_{pol}$项绝对值增大，污染过程的自发趋势相应减弱。这一理论分析与工程实际相符：许多污垢（如油泥、积碳）在低温环境下更易形成并稳定附着，而高温则有助于其分解或脱附。

污染物黏附至基体表面后，在物理与化学作用的持续影响下，它与基体的结合力逐渐增强，污垢发生老化现象。研究表明，污染物颗粒尺寸越

小，附着时间越长，其去除难度越大。因此，及时清洗对降低清洗难度具有重要意义。

2.3.2 污染物去除的热力学判据

清洗过程本质上可视作污染过程的逆过程，其核心在于向污染体系输入能量或改变界面条件，促使污染物从基体表面脱离并分散至清洗介质中[51]。从宏观热力学角度分析，若要实现污染物的自发去除，需使清洗前后体系的吉布斯自由能差值小于零，即$\Delta G_{cle}<0$。对于溶液清洗过程，单位面积污染物去除过程的自由能变化可表示为

$$\Delta G_{cle}=\gamma_{sl}+\gamma_{lw}-\gamma_{sw} \tag{2}$$

式中：γ_{sl}为污染物与基体的界面能；γ_{lw}为污物与清洗液的界面能；γ_{sw}为基体与清洗液的界面能[52]。

由式(2)可知，促进清洗过程自发进行的核心途径在于减小污染物与清洗液之间的界面张力，这正是化学清洗剂发挥作用的根本原理。清洗剂中的表面活性剂分子具有两亲结构，可显著减小污染物与清洗液间的界面张力，从而增强清洗液对污染物表面的润湿能力，促使污染物从基体表面脱离并分散至清洗介质中，达到清洗目的。

需要特别说明的是，在实际清洗过程中，界面张力始终为正值，不可能降为零，但在特定清洗体系中(如微乳液清洗)，界面张力可降至10^{-3} mN/m量级[49]，此时污垢可在无外加机械能的情况下自发分散至清洗介质中，超低界面张力对于清洗过程在热力学上高度有利。

2.3.3 污染物去除的动力学分析与影响因素

热力学判据可用于分析清洗过程发生的可能性，但实际清洗过程中的清洗速率及对污染物的去除程度则取决于动力学机制[53]。实现污染物去除途径可归为以下两类。①物理作用法：利用刮擦、刷洗、搅拌、压力冲洗、喷射、超声波、激光等机械能形式，通过机械剪切、冲击或流体能量实现对污染物的去除。②化学作用法：采用化学溶液和(或)增溶剂，通过溶解、乳化、皂化等化学反应改变污染物与基体之间的力平衡状态，促使附着粒子从表面脱附并分散和(或)溶解于流体相中。

在实际工程应用中，绝大多数清洗过程均为化学作用与物理作用协同耦合的结果。实际清洗过程受到多种因素的综合影响，主要包括但不限于以下几个方面：①污染物与基体间的界面结合强度；②清洗介质对污垢层的润湿与渗透能力；③清洗方法所能提供的有效作用力；④清洗温度、时间、浓度等工艺参数。具体到不同的清洗方法，应结合其作用原理与作用方式，具体分析各因素对清洗效果的影响规律。

3 清洗技术的特点及不足

目前，我国的工业清洗技术体系主要由物理清洗、化学清洗和微生物清洗三大类构成，该分类主要依据清洗作用原理及清洗作用力的性质，如表1所示。其中，化学清洗仍为主要清洗手段，约

表1 常用清洗技术及特点

Tab.1 Common cleaning techniques and their characteristics

清洗技术	清洗对象	优点	缺点
清洗剂清洗	油(酯)垢、油漆等有机污垢，包括水基型溶剂和有机溶剂两种	适用于复杂型面和结构零部件的清洗	无法清洗复杂成分的污垢，易对环境造成污染
化学清洗	锈蚀、水垢等无机污垢，根据污垢的化学组成选择相应的酸洗或碱洗	适用于型面和形状复杂零部件的清洗	易对环境造成污染，易腐蚀基体，常需手工打磨进行辅助
电化学清洗	水垢、锈蚀、涂层等	清洗效率高，绿色无污染	成本高，只适用于小型构件的清洗，通常用于其他清洗方法的后处理过程中
高温分解清洗	有机污垢及热稳定性差的污垢	适用于复杂成分污垢的清洗，适用于复杂型面和结构零部件的清洗	能耗大，污染严重，清洗不彻底，对基体造成热损伤
超声波清洗	油(酯)垢、油漆等结合强度较弱的污垢	适用于复杂型面和结构零部件的清洗	借助有溶解力的溶剂，易造成环境污染，清洗效率低，无法清洗尺寸较大的构件
激光清洗	油垢、油漆、模具残留层等有机污垢，金属、石器文物氧化层等无机污垢	清洗效率高，绿色无污染，对基体无损伤，操作简单	成本高，大面积清洗的时间成本高；对于深孔、盲孔等需要特殊的光路设计或设备辅助；高功率激光作业需配备严格的安全防护系统，对操作人员资质和作业环境要求较高
干冰清洗	油漆等脆性污垢或油垢等黏性有机污垢	绿色无污染，清洗效率高，支持在线清洗，对基体无损伤	成本高，大面积清洗的时间成本较高；干冰储运条件苛刻、现场制冰能耗较大；低温冲击对部分薄壁件及特定材料的基体存在损伤风险，需进行工艺验证
喷丸(砂)清洗	普遍适用于多种有机和无机污垢	清洗能力强，清洗效率高	粉尘污染严重，易损伤基体，无法清洗内腔、孔洞等内部型面，清洗不灵活
高压水射流清洗	普遍适用于多种有机和无机污垢	清洗效率高，清洗能力强，绿色无污染	水资源消耗量大，洗后易返锈，易损伤基体，无法清洗内腔、孔洞等内部型面，清洗不灵活
湿喷丸清洗	普遍适用于有机和无机污垢	清洗效率高，绿色无污染	洗后易返锈，易损伤基体，无法清洗内腔等内部型面

占市场份额的70%。物理清洗技术可从根源上避免化学清洗剂带来的环境污染问题，其市场份额正在逐步扩大。

3.1　化学清洗

化学清洗技术是指借助化学药品或其他化学作用，通过化学反应将物体表面污垢予以去除的方法。化学清洗过程通常使用化学清洗剂，利用其溶解与分散作用将污染物从待清洗表面剥离。随着再制造技术的发展，污垢的去除难度逐渐增大，传统化学清洗剂的去除能力已难以满足实际需求。熔盐清洗作为一种更为高效的化学清洗方法逐渐受到关注。

3.1.1　化学清洗剂清洗

化学清洗剂清洗依靠化学试剂与污染物间的化学反应或溶解作用实现污染物去除。清洗剂首先对污垢进行浸润、渗透，清洗剂分子中的亲水基定向排列于外围，亲油基吸附在油污表面，使原本疏水的油污得以被浸润；随后，吸附于油污表面的清洗剂使其逐渐膨润，最终分散于清洗液中，经水冲洗即可被带离表面，完成清洗过程(图3)。

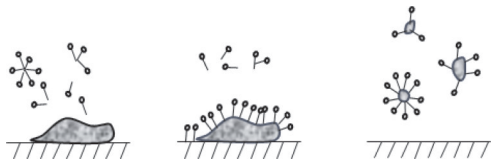


图3　化学清洗原理

Fig.3　Principle of chemical cleaning

清洗剂清洗属于浸泡清洗，需将零部件完全浸泡至清洗液中，此种润湿状态亦称浸润，如图4所示。浸润程度由固相表面能和液相表面张力共同决定，通常高表面能的固体容易被低表面张力的液体浸润，反之，则无法浸润或浸润较差。多数有机污垢(尤其是碳氢化合物类污垢)表面能较低，难以被水等液体有效浸润。清洗液对污物表面的润湿能力可用来评估两相接触的充分程度，润湿性越好，接触越充分。采用接触角θ($0°\leqslant\theta\leqslant180°$)对润湿性能进行定量描述，接触角越小，润湿能力越好，图5所示为接触角与润湿程度的对应关系。

润湿的难易程度直接取决于液-固两相间的

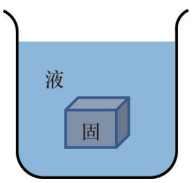


图4　固体在液体中浸润的示意图

Fig.4　Schematic diagram of solid wetting in liquid

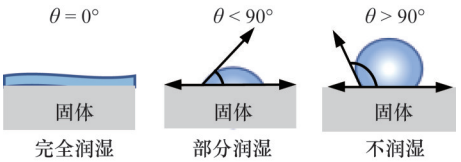


图5　润湿程度与接触角的关系

Fig.5　Relationship between wetting degree and contact angle

界面张力：界面张力越小，润湿性能越好。添加表面活性剂可改善两相间的浸润性能。这源于表面活性剂分子的两亲结构(图6)。亲油基对油脂等有机组分具有亲和力而对水呈排斥性，亲水基则易被水润湿。此种特殊结构突破了油性污垢与水难以接触的屏障。



图6　表面活性剂结构示意图

Fig.6　Schematic diagram of the surfactant structure

目前，关于固态有机污物清洗方法的研究思路比较单一，仍以清洗剂清洗为主流技术路线。由于该方法可对所有待清洗表面实施同步、均匀清洗，故仍是大型构件和复杂形状构件的主要清洗方式[54-55]。然而，清洗液的清洗能力具有较强针对性，一种清洗液只能对一种或少数几种污物有效，且面临环境污染问题突出和对混合污垢清洗效果不佳的问题。相比之下，新型熔盐清洗技术表现明显优势。

3.1.2　熔盐清洗

熔盐清洗是以熔融状态的无机盐(或无机碱)为清洗介质[56]，在专用的熔盐炉中借助物理与化学清洗力的协同作用对污垢进行清除的方法，通常也将无机碱的熔融体统称为熔盐。熔盐具有热物理性质稳定、蒸气压低、相变潜热大、工作温度区间大等优点[57]，熔盐清洗是一种快速、灵活、无损失的清洗方法[58]。经历多年发展，熔盐清洗技术已拓展至危险废物处理、医疗垃圾处理及含能材料销毁等领域。美国科林公司于20世纪70年代开拓了熔盐技术在金属清洗方面的应用，开发了清洗设备，并应用到铸造、发动机升级改造及发动机再制造等多个工业场景。这些研究发展从侧面验证了熔盐对有机污染物的高效分解能力[59-61]，表明其对有机结构污垢具有良好的去除效果。

国内熔盐清洗研究始于1985年，主要研究熔盐清洗清理金属表面积碳、水垢等难去除污垢，为国内熔盐清洗技术发展奠定了良好基础。此后，

山东大学研究团队首次将熔盐清洗引入再制造毛坯回收利用领域，发现了该技术在再制造领域的巨大潜能，并成功实现了低温、高效的熔盐清洗工艺[54]。

3.2 物理清洗

物理清洗是指借助机械、热能、声学、光学等外力或能量形式实现污垢去除的技术统称，常见的清洗方法包括高温分解清洗、超声波清洗、激光清洗、干冰清洗、喷丸(砂)清洗、高压水射流清洗、湿喷丸清洗等。我国物理清洗技术发展初期主要以手工打磨和机械打磨为主，此类方法操作简便但效率低下，且对基体材料损伤较大。随着清洗设备的发展，我国的物理清洗已进入以射流清洗、超声清洗以及激光清洗等清洁高效清洗技术为主导的新发展阶段。

3.2.1 高温分解清洗

高温分解清洗主要依靠高温作用破坏污染物分子结构，促使其热分解从而实现去除，一般用于发动机等大型复杂构件表面油污油泥等污垢的去除。对于污染层比较厚重的污垢，单纯的高温分解往往难以彻底去除，还需借助喷丸、喷砂等辅助手段将已热解松散的污垢从表面剥离。高温分解属于非接触式清洗技术，可对复杂结构内腔实施清洗，但仅适用于具有高温分解特性的污染物，且清洗过程能耗较高、处理周期较长。

3.2.2 高压射流清洗

高压射流清洗是普通水经高压泵或其他增压设备加压后，通过小口径喷嘴以较高速度喷射而出，形成高能水束冲击待清洗表面，借助强烈的冲蚀作用实现污垢去除的清洗方法。除了纯水射流外，还可以通过在水中添加固体磨料颗粒以形成磨料水射流，借助高速磨粒的冲击作用增强射流的冲蚀能力，实现高速液固两相射流清洗。根据磨料与水的混合时序，磨料水射流清洗可分为前混合磨料水射流和后混合磨料水射流两种类型。前混合磨料水射流是在高压水射流形成之前将磨料添加至水中形成磨料浆，再经过加压形成高压磨料浆由喷嘴喷射至待清洗表面。由于前混合射流中含有大量高速磨粒，喷射过程中磨粒与喷嘴内壁的剧烈摩擦将导致喷嘴严重磨损。后混合磨料水射流清洗则是在高压水射流形成之后将磨料颗粒引入水流，利用高压水射流在混合腔内产生负压将固体磨粒吸入并与之混合[62-63]。混合过程中液固两相存在显著速度差，水相处于高速状态，固体颗粒则为低速状态，一般情况下，混合过程中水射流速度有所衰减，固体颗粒则被加速，但固体颗粒通常难以进入水射流核心区并达到与水射流等速的状态。部分学者研究发现，后混合方式会一定程度降低射流清洗的整体效果。

除调整混合方式外，还可通过调控射流状态进一步优化清洗能力。当前应用最广的射流形式为连续水射流，此外还有脉冲水射流与空化水射流。连续水射流是指具有稳定压力输出的射流，通过持续冲击表面实现除污效果。该类射流压力较高，由此产生较大反冲力，通常需借助清洗机器人进行操作[64]。例如，针对船舶除锈机器人的功能需求，研究人员从结构设计与运动控制等方面研发了一款爬壁式清洗机器人[65]。脉冲水射流通过对喷出水流实施周期性增压形成间断脉冲射流，与连续射流相比，脉冲射流具有“水锤效应”，可在相同功率下获得更大的瞬时冲击力，同时有效降低清洗过程的水耗[66]，但关于脉冲射流的研究与报道目前仍相对有限。空化水射流通过调节压力使射流局部压力低于饱和蒸气压而发生气化，从而在射流中形成空化气泡。通过合理控制靶距，使空化气泡在喷射过程中经历生长、压缩阶段，当抵达待清洗表面时气泡溃灭，产生的局部高压冲击与应力对污垢实施破坏，达到除污目的。研究发现淹没条件下更容易诱发空化射流，目前的空化射流也主要应用于淹没环境，非淹没环境的应用尚处于探索阶段。陈松平等[67]提出采用伴随低压射流实现人工淹没的方法，利用高低速射流间的剪切作用诱导空化产生，从而拓展了空化射流的应用范围。研究还发现，喷嘴几何形状对空化效果具有显著影响，因此大量学者致力于空化喷嘴的结构设计与优化。目前常用的喷嘴类型包括绕流型空化喷嘴、自激振荡式空化喷嘴及角形空化喷嘴等。图7所示为具有风琴管结构的振荡式空化喷嘴，该结构可利用风琴管的谐振特性诱发空化效应。相关研究表明，空化射流在锈蚀清洗方面的效果明显优于普通水射流。

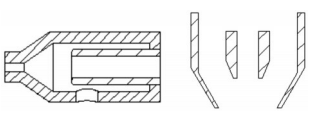


图7 风琴管结构空化喷嘴

Fig.7 Cavitation nozzle of organ pipe structure

3.2.3 超声清洗

超声清洗技术是指利用超声波在清洗介质中引发的空化效应与机械振动作用，对污染物实施分散、乳化及剥离的清洗方法[23]。超声清洗可处理复杂结构表面及内腔区域，弥补接触式清洗技术在狭小空间对内表面清洗的不足。目前，超声

清洗主要用于油污、油渍等浅表层污垢的去除，在生产清洗和维护清洗中发挥着重要作用[24,68]。

3.2.4　激光清洗

激光清洗是利用特定形状的激光束辐照污染层，借助燃烧、振动、融化以及气化等作用实现污染物的去除，其主要清洗机制包括热烧蚀、应力振动、热膨胀、蒸发、相爆炸、蒸发压力和等离子体冲击等[69]，去除原理如图8所示。激光清洗通过光辐照作用对污垢进行去除，当污垢脱离基材表面后，大部分入射激光会被基材表面反射，通常不会对基体造成显著损伤，因此被认为是一种无污染、低损伤的清洗技术[70]。常见的激光清洗方法有激光干洗法、激光湿洗法和惰性气体法三种[71-72]。

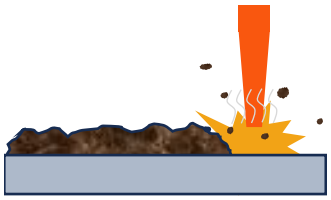


图8　激光清洗原理

Fig.8　Principle of laser cleaning

综上可见，与化学清洗相比，物理清洗过程不会产生二次化学污染，主要消耗能源，属于绿色清洗技术范畴。物理清洗的作用方式主要分为两类：一是通过冲击力将污物粉碎去除，清洗力来源于清洗介质的快速运动或光学、声学冲击作用；二是借助加热或骤冷效应使污物分解或分离，如高温热分解即通过高温下有机物的气化与分解实现除污。除了超声清洗外，多数物理清洗技术均为喷射式清洗，此类方法对内表面的清洗较为困难，且清洗能力受射流强度的限制较为明显。为清洗顽固污垢往往需提高射流压力，但过高的射流冲击力易对基体造成损伤，因此难以满足对表面质量和完整性要求较高的零部件清洗需求。喷射清洗面临的另一个问题就是大面积清洗效率低，与浸泡清洗的均匀同步作用不同，喷射清洗需通过喷嘴在待清洗表面逐点扫描完成，清洗时间随扫描面积的增大而显著延长。

在实际工程应用中，部分物理清洗技术还面临若干技术约束。例如，激光清洗作业中需要按照激光产品的使用要求配备专用安全防护系统，对操作人员资质与作业环境提出了较高要求，相应的安全防护成本不容忽视。

3.3　微生物清洗

微生物清洗技术是指利用微生物将附着于设备表面的污染物分解为小分子无毒可溶性物质的清洗方法。该方法通过释放微生物到清洗剂中并让其存活下来，微生物分泌的生物酶可破坏污垢中烃类化合物的分子键，使污垢大分子分解并随着清洗剂一同排出。微生物清洗技术成本低，安全环保，对设备无腐蚀性，可有效提高清洗剂的综合清洁性能，广泛应用于石油化工厂、食品加工厂、机械零部件清洗及地下水处理等领域。微生物清洗过程绿色无污染，能耗极低，但技术研发壁垒较高，国内相关研究进展相对缓慢。

鉴于现有单一清洗技术的清洗能力较为有限，难以充分满足混合污垢的清洗需求，目前工程实践中多采用多种技术组合的方式对混合污垢实施清洗[28]。然而，该方式工序繁琐、流程复杂，且清洗成本与能源消耗均处于较高水平，因此，当前仍亟待开发一种既适用于混合组分污垢高效清洗，又能满足大面积及复杂构件快速清洗需求的新型清洗技术。

4　工业清洗设备

工业清洗设备是实现清洗技术工程化应用的核心载体，经过近四十年的发展，我国已建立起较为完整的工业清洗设备产业链，在通用设备领域实现了较高的国产化替代，但在高端装备和核心部件领域仍与国际先进水平存在一定差距[4]。

4.1　工业清洗设备市场概况

按照工作原理划分，主流工业清洗设备如表2所示。据华经产业研究院统计，2019年全球工业清洗市场规模为468亿美元，至2024年增长至约582亿美元，年均复合增长率约为4.5%。当前，欧洲、美国、日本的企业在高端市场占据主导地位，我国工业清洗行业虽然起步较晚，但随着制造业转型升级的持续推进，行业规模正在不断扩大。

表2　主流工业清洗设备类型及特点

Tab.2　Type and characteristics of mainstream industrial cleaning equipment

设备类型	主要原理	典型应用领域
超声波清洗机	空化效应	电子、医疗、光学精密零部件
高压水射流清洗机	高速流体冲击	管道、储罐、工程机械
蒸汽清洗机	高温蒸汽溶解剥离	食品加工和餐饮设备
干冰清洗机	低温脆化＋机械冲击	模具、电力设备、汽车制造
激光清洗机	激光烧蚀＋应力振动	航空航天、船舶、文物修复

4.2　我国工业清洗设备发展现状及挑战

近年来，我国工业清洗设备行业在技术创新和产业化方面取得了显著进展。多家企业已实现

中高功率激光清洗设备的批量生产；山东大学团队开发的熔盐清洗设备在再制造领域获得应用；在半导体清洗设备和工业清洗系统领域也形成了较强的市场竞争力。在核心部件方面，我国自主研发的高压柱塞泵实现了工业清洗核心部件关键技术突破。

然而，我国工业清洗设备行业仍面临以下挑战：①高端核心部件对外依存度较高，大功率激光光源、高精度超声换能器、超临界CO_2清洗系统的高压密封阀门等关键部件仍以进口为主，国产替代能力有待提高；②专用设备研发能力不足，针对航空发动机叶片、风电齿轮箱、盾构机刀具等高端再制造领域的专用清洗设备品种较少，部分复杂结构、高精度要求的清洗需求尚缺乏成熟的国产设备解决方案；③智能化水平有待提高，当前多数国产清洗设备仍以人工操作或简单程序控制为主，具备污垢智能识别、自适应参数调节和在线清洁度检测功能的智能化设备占比相对较低，与国际先进水平相比存在一定差距。

4.3 行业标准与政策环境

在标准建设方面，2020年11月，国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会发布了GB/T 26135—2020《高压清洗机》，对高压清洗机的型式与参数、技术要求、试验方法等作出详细规定。2024年，GB 44703—2024《光辐射安全通用要求》与GB/T 7247.1—2024《高功率激光制造设备安全和使用指南》等标准的发布，填补了激光清洗设备安全领域的标准空白。2025年，GB/T 26148—2025《高压水射流清洗作业安全规范》正式实施，为高压水射流清洗作业提供了规范依据。此外，中国工业清洗协会标准化工作委员会积极推进团体标准试点工作，持续提高工业清洗领域的标准化与规范化水平。

在政策层面，国家有关部门相继出台了《关于加快推动制造业绿色化发展的指导意见》《推动工业领域设备更新实施方案》等政策文件，引导清洗设备产业向智能化、绿色化方向转型升级。2025年，工业和信息化部、生态环境部联合开展重大环保技术装备推荐工作，将先进适用环保装备在重点领域的推广应用作为重要方向。

4.4 工业清洗设备发展趋势

未来，工业清洗设备将加速向智能化、绿色化、定制化方向演进。

1）智能化。融合机器视觉、人工智能和机器人技术，开发能够自动识别污垢类型、规划清洗路径、调节工艺参数的智能清洗设备，实现无人化、精准化清洗，是行业的重要发展方向。

2）绿色化。以激光清洗、干冰清洗、纯物理高压水射流清洗为代表的绿色清洗技术正逐步得到推广应用，可有效减少或避免清洗剂带来的环境污染问题。

3）针对航空航天、风电、核电等高端制造领域的特殊需求，开发专用化、集成化的清洗系统，满足复杂结构、高清洁度、无损清洗的要求。超声＋激光复合清洗、激光＋熔盐复合清洗等多技术融合设备有望成为新的增长点。

5 发展趋势

1）深化对污物性质的认知。应充分利用傅里叶变换红外光谱分析技术（FT-IR）、X射线衍射技术（XRD）、扫描电子显微镜技术（SEM）及能谱分析等现代分析技术，对污物（尤其是组分复杂的混合污垢）的化学成分与微观结构特点进行系统分析，以获取污垢全结构信息为目标，重点关注污垢层在纵向上的结构演化规律及界面结合特征，并借助线扫描与面扫描技术解析污垢各层级的成分分布，进而揭示污垢去除困难的根本原因。

2）发展具有复合作用的清洗技术。结合混合污垢及顽固污垢的理化特性，充分考虑清洗工件的结构特点，发展具有多种作用机制的复合清洗技术，或通过优势互补的方式将多种清洗技术进行结合，开发清洗效率高、清洗能力强的组合式清洗工艺。当前研究较为活跃的典型复合清洗工艺包括激光＋熔盐复合清洗、超声＋激光复合清洗、干冰＋激光复合清洗等。初步理论和试验研究已证实复合清洗技术的可行性与性能优势，但想要推动其从实验室走向工业应用，还需开展覆盖机理、工艺、设备的全链条研究，阐明多场耦合作用下的清洗机制，并实现工艺与设备的一体化集成。

3）大力发展绿色清洗技术。随着可持续制造理念的深入推进，绿色制造已成为制造业发展的主流方向之一。大力发展绿色高效的清洗技术已成为工业清洗领域亟待解决的关键课题。

6 结论

1）污垢作为清洗过程的直接作用对象，其理化特性是清洗方法开发与工艺优化的根本依据，当前专门面向清洗需求的污垢性质研究工作仍显不足，亟待对混合污垢的组成与结构进行深入分析，阐明其去除困难的内在原因，为高效清洗方法的开发提供理论指导。

2)随着再制造技术的兴起和发展,混合污垢清洗需求持续增加,现有清洗技术普遍面临环境污染、基体损伤及清洗效率不高等问题,难以满足再制造过程混合污垢的清洗要求,因此,亟需针对混合污垢的结构特征,开发兼具绿色属性与高效性能的新型清洗方法。

3)我国工业清洗的现有能力尚无法完全满足高端制造领域的需求,发展绿色高效清洗技术刻不容缓。未来应着力推动清洗技术与机器人自动化技术的深度融合(如智能清洗机器人研发),以促进机械制造全产业链的可持续发展。

参 考 文 献:

[1] 傅恩,刘明灿,富雅慧. 工业清洗技术[J]. 机械制造,1987(12):31-34.
FU En, LIU Mingcan, FU Yahui. Technology of Industrial Cleaning[J]. Mechanical Manufacture, 1987(12): 31-34.

[2] OKORIE O, RUSSELL J D, SALONITIS K. Embodied Energy Assessment of the Remanufacturing Cleaning Process: a Proposed MRIO-methodology Framework[C]// Sustainable Design and Manufacturing. Singapore, 2023: 398-402.

[3] LIU W, ZHANG B, LI M, et al. Study on Remanufacturing Cleaning Technology in Mechanical Equipment Remanufacturing Process[C]//Re-engineering Manufacturing for Sustainability. Singapore, 2013: 643-648.

[4] 赵智科. 奋斗的年代:中国工业清洗30年的足迹[M]. 北京:化学工业出版社,2015.
ZHAO Zhike. The Era of Struggle: 30 Years of Footprints in China's Industrial Cleaning[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.

[5] KE C, DENG Y, LIU S, et al. An Intelligent Design Method for Product Remanufacturing Based on Remanufacturing Information Reuse[J]. Processes, 2025, 13(9): 2899.

[6] XUE Y, LV H, GAO J, et al. Decontamination of Uranium-containing Radioactive Waste from Stainless Steel Surfaces Using NaOH-based Molten Salts[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(23): 64771-64777.

[7] GEIST H, BALLE F. Remanufactured Products, Components, and Their Materials: a Circularity Engineering Focused Empirical Status Quo Analysis[J]. Sustainable Production and Consumption, 2024, 45: 525-537.

[8] GUO S, SI R, DAI Q, et al. A Critical Review of Corrosion Development and Rust Removal Techniques on the Structural/Environmental Performance of Corroded Steel Bridges[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 126-146.

[9] ESMAEILPOUR MOGHADAM H, KARAMI A. Recycling, Natural Resource Rents, and Climate Policy Uncertainty: Impacts on Material Sustainability in the U. S[J]. Energy Strategy Reviews, 2025, 60: 101793.

[10] LV H, GAO J, CHEN J, et al. Molten Salts for Efficient Removal of Radioactive Contaminants from Stainless Steel Surface: Mechanisms and Applications[J]. Environmental Research, 2023, 239: 117358.

[11] PU X, YANG D, LIU Y, et al. Waste Oil Derived Bio-based Surfactant with High Cleaning Efficiency and Low Foaming Ability in Heavy Hard Water for Green Detergents[J]. Green Chemical Engineering, 2026: 284620343.

[12] TANG Y, WANG R, ZHAN L, et al. Research on Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Based on the Remanufacturing Process of Automobile Gearbox[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 384: 135548.

[13] ZHU S, GAO L, JIANG Z, et al. A Knowledge Graph-based Intelligent Planning Method for Remanufacturing Processes of Used Parts[J]. Journal of Engineering Design, 2025, 36(10): 1824-1851.

[14] WU Z, LIANG C, SHEN Z, et al. Quality Control in Remanufacturing Process: Theoretical Framework, Control Strategy and Application Review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 140(1): 517-543.

[15] NAKAMURA N, MORI K I, KOMATSU T, et al. Dual-frequency Ultrasonic Cleaning with Diluted Phosphoric Acid Solution for Removing Oxide Scale of Uncoated Steel Sheets in Hot Stamping[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118(3): 1227-1238.

[16] TAN W X, TAN K W, TAN K L. Developing High Intensity Ultrasonic Cleaning (HIUC) for Post-processing Additively Manufactured Metal Components[J]. Ultrasonics, 2022, 126: 106829.

[17] WANG X, LI J, JIA X, et al. Characterization of Carbonaceous Deposits on an End-of-life Engines for Effective Cleaning for Remanufacturing[J]. Sustainability, 2021, 13(2): 950.

[18] ZHANG R, LI B. Analysis of the Application Progress and Development Trend of Laser Cleaning Technology in the Industrial Field[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025, 62(13): 1300017.

[19] RAZAB M K A A, MOHAMED NOOR A, SUHAIMI JAAFAR M, et al. A Review of Incorporating Nd: YAG Laser Cleaning Principal in Automotive Industry[J]. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 2018, 11(4): 393-402.

[20] LU Y, JIN T, XU J, et al. An Advanced Ultraviolet Nanosecond Pulsed Laser Cleaning Oceanic Microbiofouling from Steel Surface[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 185: 112618.

[21] CHENG H, GUO L, LIU W, et al. A Green Cleaning Technology for Blind Hole Remanufacturing Blanks with Supercritical N-butanol[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2023, 237(5): 703-714.

[22] 刘继锋,顿小宝,宦宣州,等. 国外燃气-蒸汽联合循环机组锅炉化学清洗及氧化还原电位的测定[J]. 工业加热,2023,52(11):61-65.
LIU Jifeng, XiaobaoDUN, HUAN Xuanzhou, et al. Boiler Chemical Cleaning and Oxidation-reduction Potential Measurement of Foreign Gas-steam Combined Cycle Units[J]. Industrial Heating, 2023, 52(11): 61-65.

[23] 黄志超,涂林鹏,刘举平,等. 超声波清洗技术及设备研究进展[J]. 华东交通大学学报,2020,37(3):1-9.
HUANG Zhichao, TU Linpeng, LIU Juping, et al. Research Progress of Ultrasonic Cleaning Technology and Equipment[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020,37(3): 1-9.

[24] WEI L, LIU S, DONG F. Investigation into Enhancing Ultrasonic Cleaning Efficiency through Symmetrical Transducer Configuration[J]. Symmetry, 2025, 17(3): 348.

[25] 朱国栋，张东赫，李志超，等. 激光清洗技术研究进展及挑战[J]. 中国激光，2024，51(4)：97-120.
ZHU Guodong，ZHANG Donghe，LI Zhichao，et al. Research Progress and Challenges of Laser Cleaning Technology[J]. Chinese Journal of Lasers，2024，51(4)：97-120.

[26] LI R，FENG A，LI X，et al. Study on Nanosecond Pulsed Laser Cleaning of FEP Coatings on 6061-T6 Aluminum Alloy Surface[J]. Optics & Laser Technology，2025，187：112798.

[27] INABA K，YAMAKURA Y，OBARA M，et al. Effect of Combustion Period on Carbon Crystallite Size of Soot Particles Emitted from a Diesel Engine with Diesel and Hydrogenated Vegetable Oil Fuels[J]. Fuel，2026，407：137194.

[28] 王兴. 再制造毛坯表面混合污垢的碱系熔盐清洗机制及配方开发[D]. 济南：山东大学，2021.
WANG Xing. Development of Alkaline Molten Salt Cleaning Mechanism and Formula for Mixed Dirt on Remanufactured Blanks[D]. Jinan：Shandong University，2021.

[29] YE X，YANG J，YANG W，et al. Theoretical and Experimental Study on the Effect of Magnetic Field on the Amount of Steel Bars Corrosion[J]. Corrosion Science，2025，255：113082.

[30] CAMPANELLA L，CARDELLICCHIO F，Dell'AGLIO E，et al. A Green Approach to Clean Iron Stains from Marble Surfaces[J]. Heritage Science，2022，10(1)：79.

[31] REALE R，ANDREOZZI G B，SAMMARTINO M P，et al. Analytical Investigation of Iron-based Stains on Carbonate Stones：Rust Formation，Diffusion Mechanisms，and Speciation[J]. Molecules，2023，28(4)：1582.

[32] LU Y，DING Y，WANG M，et al. An Environmentally Friendly Laser Cleaning Method to Remove Oceanic Microbiofoulings from AH36 Steel Substrate and Corrosion Protection[J]. Journal of Cleaner Production，2021，314：127961.

[33] XU Y，HUANG Y，CAI F，et al. Study on Corrosion Behavior and Mechanism of AISI 4135 Steel in Marine Environments Based on Field Exposure Experiment[J]. Science of the Total Environment，2022，830：154864.

[34] ZHOU Z，WANG Z，NIU R，et al. Enhancing Maritime Corrosion Resistance of Epoxy Coating on Steels by Using Rust Conversion and Graphene-based Composites[J]. Composites Part A：Applied Science and Manufacturing，2025，192：108793.

[35] ALTARAWNEH M，ALI L. Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Thermal Systems：a Comprehensive Mechanistic Review[J]. Energy & Fuels，2024，38(22)：21735-21792.

[36] RICHTER H，HOWARD J B. Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Growth to Soot—a Review of Chemical Reaction Pathways[J]. Progress in Energy and Combustion Science，2000，26(4/5/6)：565-608.

[37] SHARMA N，PREUSS J，SJÖBLOM J. Morphological Characterization of Soot from a Compression Ignition Engine Fueled with Diesel and an Oxygenated Fuel[J]. International Journal of Engine Research，2023，24(3)：1063-1076.

[38] WANG S，LIU T，ZHU E，et al. Potential Retention of Dissolved Organic Matter by Soil Minerals during Wetland Water-table Fluctuations[J]. Water Research，2024，254：121412.

[39] NASRAZADANI S. The Application of Infrared Spectroscopy to a Study of Phosphoric and Tannic Acids Interactions with Magnetite (Fe_3O_4)，Goethite (α-FEOOH) and Lepidocrocite (γ-FeOOH)[J]. Corrosion Science，1997，39(10/11)：1845-1859.

[40] NOVAKOVA A A，GENDLER T S，MANYUROVA N D，et al. A Mössbauer Spectroscopy Study of the Corrosion Products Formed at an Iron Surface in Soil[J]. Corrosion Science，1997，39(9)：1585-1594.

[41] SALEM Y，OUDBASHI O，EID D. Characterization of the Microstructural Features and the Rust Layers of an Archaeological Iron Sword in the Egyptian Museum in Cairo (380－500 A.D.)[J]. Heritage Science，2019，7：19.

[42] DILLMANN P，BALASUBRAMANIAM R，BERANGER G. Characterization of Protective Rust on Ancient Indian Iron Using Microprobe Analyses[J]. Corrosion Science，2002，44(10)：2231-2242.

[43] 梁宇飞，赵丽红，陈樑彬，等. 生物炭制备和改性及其对水中污染物吸附的研究进展[J]. 应用化工，2026，55(3)：797-803.
LIANG Yufei，ZHAO Lihong，CHEN Liangbin，et al. Research Progress on the Preparation and Modification of Biochar and Its Adsorption of Pollutants in Water[J]. Applied Chemical Industry，2026，55(3)：797-803.

[44] DING Y，SHI Z. The Molecular Composition of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Reactive Mineral-associated Organic Matter under a Broad Range of Climates[J]. Applied Geochemistry，2025，179：106261.

[45] CUI C，WANG T，MAO H，et al. Surface Morphology and Properties of Structural Steel via Laser Cleaning with Saline Solution Pretreatment[J]. Optics & Laser Technology，2025，192：113435.

[46] WANG Y，LI J，WANG Q，et al. Some New Discoveries on the Structure of the Rust Layer of Weathering Steel in a Simulated Industrial Atmosphere by STEM-EDS and HRTEM[J]. Corrosion Science，2021，183：109322.

[47] SMITH G C，HOPWOOD A B，TITCHENER K J. Microcharacterization of Heavy-duty Diesel Engine Piston Deposits[J]. Surface and Interface Analysis，2002，33(3)：259-268.

[48] CHEN C，HSU S M. A Chemical Kinetics Model to Predict Lubricant Performance in a Diesel Engine. Part I：Simulation Methodology[J]. Tribology Letters，2003，14(2)：83-90.

[49] 崔正刚，宋冰蕾，裴晓梅. 表面清洗新技术[M]. 化学工业出版社.
CUI Zhenggang，SONG Binglei，PEI Xiaomei. New Surface Cleaning Technology[M]. Chemical Industry Press.

[50] 胡荣祖，高胜利，赵凤起，等. 热分析动力学[M]. 2版. 北京：科学出版社，2008.
HU Rongzu，GAO Shengli，ZHAO Fengqi，et al. Thermal Analysis Kinetics[M]. 2nd ed. Beijing：Science Press，2008.

[51] VAN OSS C J. Interfacial Forces in Aqueous Media[M]. 2nd ed. Boca Raton，Fla.：CRC/Taylor & Francis，2006.

[52] GOTOH K. Experimental Analysis of Detergency Phenomena and Investigation of a Next-generation Detergency System[J]. Journal of Oleo Science，2017，66(1)：1-11.

[53] BARRON R M，BALACHANDAR R. An Experimental and Numerical Study of Water Jet Cleaning Process[J]. Journal of Materials Processing Technology，2011，211(4)：610-618.

[54] WANG X. The Research on Formation Mechanism of Carbon Deposition in Remanufacturing Engines[J]. Journal of Mechanical Engineering，2017，53(5)：69.

[55] WANG X，JIA X，YAO S. The Research on Remanufacturing Cleaning Machenism[J]. Applied Mechanics and

Materials，2015，778：187-192.
[56] 葛顺鑫. 再制造盐浴清洗技术分析与应用[D]. 济南：山东大学，2014.
GE Shunxin. Analysis and Application of Remanufacturing Salt Bath Cleaning Technology[D]. Jinan：Shandong University，2014.
[57] ZHANG R，KJELLQVIST L，MAO H，et al. Thermophysical Properties of Molten Salts：Insights from the TCSALT Database[J]. International Journal of Thermophysics，2025，47(2)：23.
[58] ZHANG S，ZHANG S，LI J，et al. Carbon Deposition Mechanism of Molten Salt Cleaning and Optimization of Multicomponent Molten Salt Formula for Remanufacturing [J]. Science Progress，2021，104 (3)：00368504211031078.
[59] LI X，YUAN G，BROWN A，et al. The Removal of Encapsulated Catalyst Particles from Carbon Nanotubes Using Molten Salts[J]. Carbon，2006，44(9)：1699-1705.
[60] YAO Z，LI J，ZHAO X. Molten Salt Oxidation：a Versatile and Promising Technology for the Destruction of Organic-containing Wastes[J]. Chemosphere，2011，84(9)：1167-1174.
[61] ZHANG Q，HU G，YAN Y，et al. Adsorption and Purification in the Molten Salt Oxidation of Waste Cation Exchange Resins：Kinetic Analysis and Mechanisms [J]. Separation and Purification Technology，2025，366：132709.
[62] 李斌. 后混合磨料水射流全局模拟及冲蚀性能提高研究[D]. 包头：内蒙古科技大学，2025.
LI Bin. Research on Global Simulation and Erosion Performance Improvement of Post-mixed Abrasive Water Jet [D]. Baotou：Inner Mongolia University of Science & Technology，2025.
[63] 王益. 后混合式磨料水射流冲击破岩特性及切深预测研究[D]. 重庆：重庆大学，2023.
WANG Yi. Research on Rock Breaking Characteristics and Cut Depth Prediction of Post-mixed Abrasive Water Jet Impact[D]. Chongqing：Chongqing University，2023.
[64] LI Q，ZHAO Y，LI Y，et al. A Kansei-oriented Morphological Design Method for Industrial Cleaning Robots Integrating Extenics-based Semantic Quantification and Eye-tracking Analysis[J]. Applied Sciences，2025，15(15)：8459.
[65] 刘冰杰. 船体爬壁机器人设计与研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2024.
LIU Bingjie. Design and Research of Hull Wall-climbing Robot[D]. Qinhuangdao：Yanshan University，2024.
[66] SZADA-BORZYSZKOWSKA M，KACALAK W，BANASZEK K，et al. Assessment of the Effectiveness of High-pressure Water Jet Machining Generated Using Self-excited Pulsating Heads[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2024，133(9)：5029-5051.
[67] 陈松平. 人工淹没空化射流特性及性能研究[D]. 镇江：江苏大学，2021.
CHEN Songping. Research on the Characteristics and Performance of Artificial Submerged Cavitation Jet[D]. Zhenjiang：Jiangsu University，2021.
[68] LIU F，TAN Y，JIANG Y，et al. Study on Microscopic Characteristics and Wear Testing of Steel Surface after Ultrasonic Impact Treatment[J]. Journal of Friction and Wear，2025，46(4)：268-277.
[69] SZADA-BORZYSZKOWSKA M，KACALAK W，BANASZEK K，et al. Analysis of the Pulsating Properties of a High-pressure Water Jet Generated in a Self-excited Head for Erosion Processing[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering，2023，23(4)：236.
[70] ZHU G，XU Z，JIN Y，et al. Mechanism and Application of Laser Cleaning：a Review[J]. Optics and Lasers in Engineering，2022，157：107130.
[71] CUI K，LUO J，XU K，et al. The Study of Patterns and Mechanisms of Continuous Laser Ablation of Carbon Steel Rust Layers in Multi-medium Environments[J]. Applied Sciences，2024，14(12)：5052.
[72] LIU J，SUN Y，FANG Y，et al. Mechanism Research and Equipment Development of Laser Cleaning Rust[J]. Journal of Physics：Conference Series，2020，1453(1)：012041.

（编辑　袁兴玲）

作者简介：王　兴，女，1992年生，助理研究员。研究方向为智能机器人控制及机器人轨迹规划算法。发表论文10余篇。E-mail：wx1262812261@163.com。**韩　伟**（通信作者），男，1984年生，研究员。研究方向为智能操控技术。E-mail：hanwei1984@hotmail.com。

本文引用格式：
王兴，杜际雨，王黎明，等. 面向再制造的工业清洗现状与发展趋势[J]. 中国机械工程，2026，37(10)：2406-2417.
WANG Xing，DU Jiyu，WANG Liming，et al. Current Status and Development Trends of Industrial Cleaning for Remanufacturing [J]. China Mechanical Engineering，2026，37(10)：2406-2417.