

研究综述

## 面向再制造的油漆清洗技术综述

武爽爽<sup>a,b</sup>, 贾秀杰<sup>a,b</sup>, 熊胜<sup>a,b</sup>, 王兴<sup>a,b</sup>, 马明亮<sup>a,b</sup>, 任远<sup>a,b</sup>

(山东大学 a.机械工程学院 b.机械工程国家级实验教学示范中心, 济南 250061)

**摘 要:** 再制造清洗是再制造中极为重要的环节, 清洗的质量会直接影响再制造产品的质量。油漆是再制造清洗中必不可少的一种污垢类型, 相比于其他污垢, 具有与基体结合时间长, 结合情况复杂, 清洗难度大的特点。目前, 清洗油漆主要采用传统清洗技术, 如酸碱溶液清洗、高温热分解、干喷丸清洗等, 而对近几年出现的油漆绿色清洗技术的推广应用不够, 并且没有一个系统的整理总结用于指导实际应用。针对这一现状, 基于国内外学者对油漆绿色清洗技术的研究成果, 首先从油漆的性质方面进行整理, 如: 油漆与基体的结合情况, 油漆表面微观形貌以及主要成分等。然后总结了机械领域常用的绿色油漆清洗技术, 如熔盐清洗技术、干冰清洗技术、激光清洗技术、高压水射流清洗技术、湿喷丸清洗技术、超声波清洗技术以及超临界 CO<sub>2</sub> 清洗技术, 重点阐述了各种清洗技术的油漆清洗机理及优缺点, 并以清洗效率为衡量标准, 对各种清洗技术进行对比分析, 为使用者选择清洗技术提供参考。最后根据现有油漆清洗技术存在的局限性, 对清洗技术的发展前景进行了展望, 提出了绿色化、复合化和智能化的发展理念, 为新型油漆清洗技术的提升以及现有油漆清洗技术改进提供思路, 促进清洗技术的进一步发展。

**关键词:** 再制造; 油漆; 清洗技术; 清洗机理

**中图分类号:** TG154 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)03-0051-15

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.03.005

## Review of Paint Cleaning Technology for Remanufacturing

WU Shuang-shuang<sup>a,b</sup>, JIA Xiu-jie<sup>a,b</sup>, XIONG Sheng<sup>a,b</sup>, WANG Xing<sup>a,b</sup>, MA Ming-Liang<sup>a,b</sup>, REN Yuan<sup>a,b</sup>

(a.School of Mechanical Engineering, b.National Demonstration Center for Experimental Mechanical Engineering Education, Shandong University, Jinan 250061, China)

**ABSTRACT:** As an extremely important part of the remanufacturing, the quality of remanufacturing cleaning directly affects the quality of remanufacturing products. The paint is an essential dirt type in remanufacturing cleaning. Compared with other dirt types, the paint has the characteristics of combining with the matrix for a long time, complex bonding condition and difficult cleaning. At present, the traditional cleaning technology is mainly used in paint cleaning, such as acid and alkali solution

收稿日期: 2020-08-07; 修订日期: 2020-11-03

Received: 2020-08-07; Revised: 2020-11-03

基金项目: 国家自然科学基金 (51875324); 山东省重大科技创新工程项目 (2018CXGC0807)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51875324) and the Key Science and Technology Innovation Project of Shandong Province (2018CXGC0807)

作者简介: 武爽爽 (1997—), 女, 硕士, 主要研究方向为再制造清洗技术。

Biography: WU Shuang-shuang (1997—), Female, Master, Research focus: cleaning technology for remanufacturing.

通讯作者: 贾秀杰 (1963—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为绿色制造与再制造。邮箱: xjjia@sdu.edu.cn

Corresponding author: JIA Xiu-jie (1963—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: green manufacturing and remanufacturing. E-mail: xjjia@sdu.edu.cn

引文格式: 武爽爽, 贾秀杰, 熊胜, 等. 面向再制造的油漆清洗技术综述[J]. 表面技术, 2021, 50(3): 51-65.

WU Shuang-shuang, JIA Xiu-jie, XIONG Sheng, et al. Review of paint cleaning technology for remanufacturing[J]. Surface technology, 2021, 50(3): 51-65.

cleaning, high-temperature thermal decomposition, dry shot peening cleaning and so on. But the popularization and application of paint green cleaning technology appeared in recent years is not enough, and there is no systematic summary to guide the practical application. Aiming at the status, based on the research results of domestic and foreign scholars on paint green cleaning technology, the paper summarizes the properties of paint first, such as the combination of paint and matrix, surface micro morphology and main components of paint. Then it summarizes the commonly used paint green cleaning technology of the mechanical field, such as molten salt cleaning technology, dry ice cleaning technology, laser cleaning technology, high pressure water jet cleaning technology, wet shot peening cleaning technology, ultrasonic cleaning technology and supercritical CO<sub>2</sub> cleaning technology that focus on the paint cleaning mechanism of all kind of cleaning technologies and their respective advantages and disadvantages. And taking the cleaning efficiency as the measurement standard, this paper makes a simple comparative analysis of various cleaning technologies, which provides the reference for users to choose cleaning technologies. Finally, according to the limitations of the existing paint cleaning technology, the development prospect of the cleaning technology is prospected, and the development concept of green, compound and intelligent is proposed, which provides ideas for the promotion of new paint cleaning technology and the improvement of existing paint cleaning technology, so as to facilitate the further development of cleaning technology.

**KEY WORDS:** remanufacturing; paints; cleaning technology; cleaning mechanism; development trend

再制造工程作为新世纪发展的新方向,得到了广泛关注。再制造秉持优质、环保、节能、节材的原则<sup>[1]</sup>,对产品全生命周期的各个阶段进行全面考虑。以报废的产品和零部件为初始研究对象,运用先进的修复手段和再制造技术对废旧产品进行一系列地修复和改造,提升了废旧产品的性能和质量,并可作为新品重新投入使用<sup>[2-5]</sup>。再制造过程的实施不仅能够

降低能源、材料及其他资源的消耗,而且可以减小对环境的不利影响,有利于实现资源节约型和环境友好型社会<sup>[6-7]</sup>。

再制造过程包括对退役产品回收、拆解前产品整体外观清洗、拆解、零部件清洗、清洗后零部件的检测、再制造修复、再制造产品的装配以及包装等过程<sup>[8-13]</sup>,如图1所示。

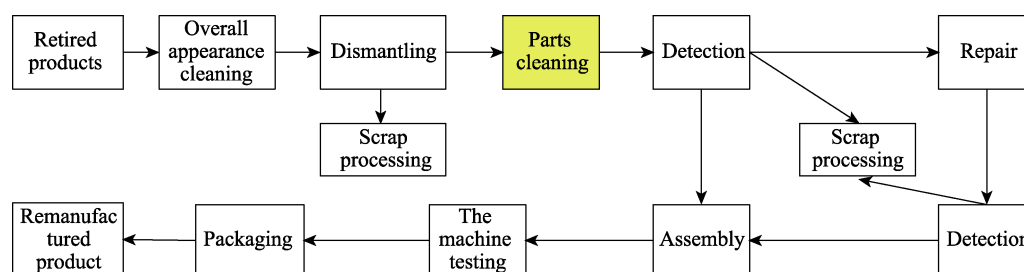


图1 再制造工艺流程图

Fig.1 Flow chart of remanufacturing process

再制造清洗是指借助清洗设备,利用机械、物理、化学、电化学等方式,去除工件表面污垢,使工件达到清洁度要求的过程<sup>[14-17]</sup>。根据图1可知,再制造清洗包括整体外观清洗和产品零部件清洗两部分。整体外观清洗主要是清除产品表面的灰尘等污物<sup>[18-19]</sup>,一般利用水射流冲洗就可以去除;零部件清洗主要是针对零件表面的油污、水垢、锈蚀、积炭及油漆等污垢进行清洗<sup>[19]</sup>,需要使用高效的清洗方法。再制造清洗是再制造的基础环节,清洗后的质量会影响最终再制造产品的质量<sup>[14,16-17]</sup>,所以必须保证高质高效地清洗。

油漆作为工业中常用的一种防锈剂,广泛应用于机械零部件中。相比于其他污垢类型,在产品使用到报废阶段,油漆与基体结合时间最长,两者因长期接触会产生分子渗透现象,使结合情况变得更复杂,清

洗难度更大<sup>[20]</sup>。因此,为满足零件清洗后的表面质量要求,需对清洗技术进一步改良优化。传统的油漆清洗技术有很大的局限性,如酸碱清洗技术利用其强酸和强碱性质,使溶液中的离子与油漆发生强烈的化学反应,达到去除油漆的目的。其清洗效率高,无噪声粉尘污染,但强酸碱性溶液对人体危害大,并且废液会对环境、水、土壤造成二次污染。高温热分解清洗利用高温加热使油漆的表层或内部结构发生改变,最终以气化分解的形式脱离基体表面<sup>[21]</sup>。其操作简单,但能量消耗大,清洗效率低,对环境有污染,不能清洗熔点低的材料。干喷丸以压缩空气为动力源<sup>[22-25]</sup>,利用高速运动磨料的磨削、摩擦、剪切等作用<sup>[24,26-29]</sup>,达到清洗目的。其清洗效率高<sup>[22]</sup>,能够提高材料的疲劳强度<sup>[30-33]</sup>,但不适用内腔污染物的清洗,且清洗后表

面粗糙度较大,清洗过程中易造成粉尘和噪音污染<sup>[34]</sup>,对人体有损害。

针对传统清洗技术的局限性,大量学者研究了油漆绿色清洗技术,并取得了一定成果。刘金聪<sup>[35]</sup>对激光脱漆技术进行了研究分析,表明激光除漆的主要作用机理为振动作用和烧蚀作用,并通过正交试验确定了最佳清洗参数。张瑄珺<sup>[36]</sup>对金属材料激光清洗技术进行研究,表明激光清洗具有对基体损伤小、清洗精度高、对环境污染小等优点。孙一航<sup>[37]</sup>对熔盐清洗油漆机理进行了分析,得出其主要清洗机理为气化作用和氧化作用,并通过实验分析出合适的油漆清洗温度。辛本礼<sup>[38]</sup>通过对 5 种不同材料的油漆进行熔盐清洗对比实验发现,熔盐清洗技术对基体材料表面性能几乎无影响。刘立秋<sup>[39]</sup>对污垢清洗机理进行研究,发现高压水射流具有的冲击动能和磨削作用对工件表面的污垢形成冲蚀、剪切、剥离,其清洗效果好,节能节水,且对环境基本无污染。郭琦<sup>[40]</sup>通过试验分析了移动速度、压力及靶距等不同参数下,高压水射流对油漆清洗率的影响,并确定了最优清洗参数。但目前对于油漆绿色清洗技术的应用相对较少,并且没有一个系统且全面的总结来指导实际应用,使清洗技术的应用和发展遭遇瓶颈。

本文基于各位学者的研究成果,对机械领域常用的油漆绿色清洗技术进行分析总结,进一步丰富油漆清洗技术类型,并对这些技术的油漆清洗机理以及各自的优缺点进行重点研究,在全面概括油漆清洗技术的同时,用于指导后续再制造流程。

## 1 油漆的性质分析

在再制造零部件的清洗阶段,拆解后的零部件上的原保护漆层需全部去除,清洗干净后的零部件用于后续的检测、修复等再制造加工过程,最后对最终的产品进行再次喷漆,作为再制造产品重新投入使用<sup>[41]</sup>。笔者以机械零部件常用油漆类型聚氨酯面漆和环氧

树脂底漆为例,整理了国内外学者对油漆与基体的结合情况、表面微观形貌以及主要成分等性质的分析,进一步理解清洗技术的油漆清洗机理,从而对清洗技术做出更合理的选择。

### 1.1 油漆与基体的结合情况

使用油漆作为防锈剂时,需要三层油漆,按照不同喷涂层的功能,可将其分为底漆、中间漆和面漆,面漆和中间漆使用同一类油漆基本就可以满足防护要求<sup>[42]</sup>,因此也可将油漆分为底漆和面漆两大类。吴贤官等人<sup>[43]</sup>通过对化学键键能的研究分析发现,聚氨酯树脂类油漆涂料含有的氨酯键、酯键和油脂的不饱和双键等化学键,使油漆与基体之间有较强的结合力,并且在这些化学键作用下,油漆的弹性较好,能够减小温度对基体的影响。环氧树脂类油漆的结构中具有极性较强的羟基、醚基,使环氧树脂对基体的附着力更强,并且具有韧性好、稳定性高、耐腐蚀性好、常温状态下为固态等优点<sup>[42]</sup>,因此也更适合作为底漆来使用。使用底漆加面漆的形式,不仅给基体材料添加两层防护漆的保护,而且能够在一定程度上降低基体因腐蚀、磨损等因素而造成的疲劳损伤,提高材料的使用寿命。图 2 为油漆与基体结合的界面示意图。



图 2 油漆结构界面示意图

Fig.2 Schematic diagram of paint structure interface

### 1.2 油漆的表面微观形貌

张健<sup>[44]</sup>通过扫描电子显微镜 (SEM) 对油漆在不同倍数下的微观形貌进行了观察分析,如图 3 所示。

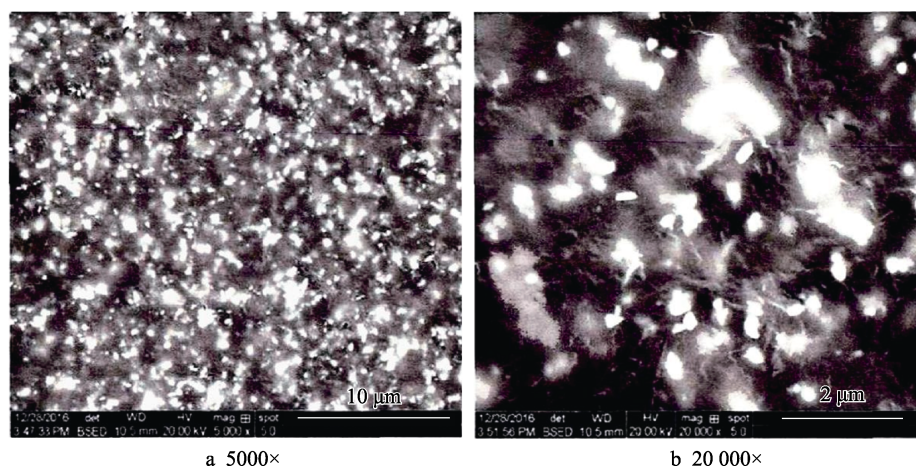


图 3 不同倍数下的油漆形貌<sup>[44]</sup>

Fig.3 Paint morphologies under different magnification<sup>[44]</sup>

从图中可以看出,油漆表面相对比较光滑,没有明显的裂纹痕迹,白点呈现随机分布的状态且密度较大,形状大小各异。在 20 000 倍下进一步观察,白点的尺寸在 200~600 nm 之间。根据 SEM 的成像原理推测,白点是油漆中掺杂的金属颗粒。

1.3 油漆的组成成分

张健<sup>[44]</sup>和孙一航<sup>[37]</sup>等人利用能谱仪(EDS)分别对环氧树脂底漆和聚氨酯面漆进行扫描分析,获得面漆与底漆的元素分布,如表 1 及表 2 所示。根据两种油漆的元素分布情况可以发现,两种油漆的主要元素及占比相差不大。以质量分数为依据,在各元素中,

表 1 聚氨酯面漆中的元素含量<sup>[37,44]</sup>

Tab.1 Content of elements in polyurethane topcoat<sup>[37,44]</sup> %

Element	C	O	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Pb
Mass fraction	57.86	23.15	0.37	0.62	4.75	2.77	0.51	9.97
Atom fraction	74.00	22.22	0.21	0.34	1.52	0.82	0.14	0.74

表 2 环氧树脂底漆中的元素含量<sup>[37,44]</sup>

Tab.2 Content of elements in epoxy primer<sup>[37,44]</sup> %

Element	C	O	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Pb
Mass fraction	45.57	28.30	0.47	0.47	3.86	4.79	0.68	15.87
Atom fraction	64.77	30.19	0.30	0.29	1.37	1.57	0.21	1.31

C、O 元素的总质量分数占 70% 以上。除此之外,油漆中防腐性的添加剂产生的 Al、Ti、Cr、Fe 等金属元素所占比例在 10% 左右。Pb 元素由油漆中的着色剂产生,而存在的少量 Si 元素则是由油漆中掺杂的少量灰尘颗粒产生。

2 再制造清洗技术的清洗机理及优缺点

目前,关于油漆的绿色清洗技术有很多,表 3 为机械领域常用的几种绿色油漆清洗技术,并主要对这些清洗技术的油漆清洗机理及各自的优缺点进行论述。

表 3 各种清洗技术的清洗机理及优缺点

Tab.3 Cleaning mechanism and advantages and disadvantages of various cleaning technologies

Cleaning technology	Cleaning mechanism	Advantages	Disadvantages
Molten salt cleaning	The paint reacts with ions or molecules in the solution	High efficiency, good quality, no noise pollution, wide application range	The waste liquid pollutes the environment, the surface needs to be cleaned
Dry ice cleaning	The high-speed impact of dry ice particles and heat exchange cools the paint to embrittlement	No pollution to the environment, almost no damage to the matrix, no secondary cleaning is required	The nozzle is easy to break, the noise is big, the equipment is expensive
Laser cleaning	The paint is expanded, vaporized and broken by acoustic wave	Almost no damage to the matrix, easy operation, wide application range	High cost, inconvenient to carry, easy to produce cleaning blind area
High pressure water jet cleaning	Kinetic energy impact, water wedge and shear of water jet	Energy saving and environmental protection, high efficiency, wide application range, easy to realize automation	The workpiece is easy to rust after cleaning, the high pressure is dangerous
Wet shot peening	The shearing and grinding of abrasive, the impact of water jet and the action of water wedge	High efficiency, the abrasives can be recycled, almost no pollution to the environment	Not suitable for inner cavity and hole cleaning, the surface roughness is large
Ultrasonic cleaning	Instantaneous high pressure impact produced by cavitation of ultrasonic wave	High efficiency, good quality, thorough cleaning, safe and reliable, easy to realize automation	The transducer is easy to break, the noise is big, the waste liquid needs to be cleaned up
Supercritical CO <sub>2</sub> cleaning	Using the permeability and solubility of the fluid, the paint cracks in the process of pressure relief	Can achieve non-destructive cleaning, almost no pollution to the environment, wide range of applications	The equipment is expensive, the paint cleaning is not complete and needs secondary cleaning

2.1 熔盐清洗技术

熔盐清洗技术是以熔融态的无机盐作为清洗介质,使溶液中的离子或分子与工件表面污垢充分接触并发生一系列化学反应,从而实现污垢去除的一种清洗方式<sup>[45]</sup>。

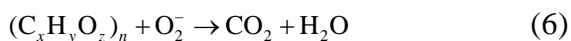
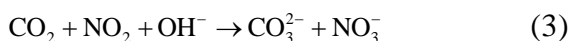
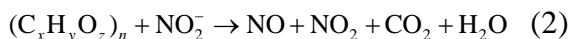
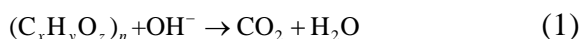
2.1.1 熔盐清洗机理

经过大量研究,对熔盐溶液无机盐配方进行不断调整优化,确定了熔盐溶液为 KNO<sub>3</sub>、NaNO<sub>2</sub>、NaNO<sub>3</sub>、NaOH 等物质的混合溶液时<sup>[46]</sup>,清洗效果较好。其中,NaNO<sub>3</sub> 作为缓蚀剂使用<sup>[47]</sup>。在熔盐清洗过程中,高温使液体获得更小的表面张力,使溶液中离子与油漆



的结合更紧密、分子交换速率更快,促进溶液中的离子与油漆中的有机物化学反应的进行<sup>[48]</sup>。

具体化学反应如下:由于 NaOH 的存在使溶液中有大量的  $\text{OH}^-$ ,在高温环境下, $\text{OH}^-$ 容易和油漆中的有机物成分发生化学反应<sup>[49]</sup>,并产生  $\text{CO}_2$  气体。熔盐溶液中的  $\text{NO}_2^-$ 与油漆中的有机物成分在高温下能够发生氧化还原反应<sup>[20,50]</sup>,产生  $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$  和  $\text{CO}_2$  等气体。产生的  $\text{NO}_2$  和  $\text{CO}_2$  气体一部分继续与  $\text{OH}^-$  发生反应,并生成  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ ,其余气体释放到大气中。在高温环境下, $\text{CO}_3^{2-}$ 具有强催化作用,可将空气中的  $\text{O}_2$  转变为超氧根离子  $\text{O}_2^-$ ,具有强氧化性的  $\text{O}_2^-$ 可进一步与有机物发生剧烈的氧化反应,改变油漆内部结构,使其与基体的附着力降低,表层疏松,脱离基体更容易。由于反应过程中有大量的气体产生,在高温下,气体体积会迅速膨胀,对周围油漆造成一定冲击<sup>[50]</sup>,此过程反应剧烈,因此常能看到有明显的火花产生<sup>[48]</sup>,整个化学作用的反应方程式如式(1)~(6)所示<sup>[20,44,48]</sup>。



使用熔盐清洗油漆时,关键在于清洗时的温度、熔融熔盐中的有机物成分及其各成分的含量,这些参数在不断的研究中,也在持续优化,使熔盐清洗能够广泛地应用于清洗的各个领域。

### 2.1.2 优缺点

熔盐清洗的优点在于,清洗介质为熔融状态,流动性好,适用范围广,可清洗一些形状复杂的零部件,尤其适用于清洗具有多孔道、多沟槽的零部件。在清洗完成后,废弃的熔盐溶液在常温下呈现固态,容易进行处理<sup>[50]</sup>。在高温环境下,熔盐溶液与工件表面的油漆全面接触,清洗效率高,整个清洗过程基本上没有噪声产生。

熔盐清洗的缺点在于,清洗过程中产生的  $\text{NO}$  和  $\text{NO}_2$  等气体为有毒气体,对环境有污染。熔盐清洗主要清洗机理为化学作用,对基体有一定的腐蚀伤害<sup>[51]</sup>,清洗后工件表面会残留熔盐的结晶物,需进一步清理<sup>[52]</sup>。

## 2.2 干冰清洗技术

$\text{CO}_2$  在常温常压条件下以气体的形式存在,干冰则是  $\text{CO}_2$  在  $-78\text{ }^\circ\text{C}$  左右的低温固态形式<sup>[53,54]</sup>。

### 2.2.1 干冰清洗机理

干冰清洗是以压缩空气为动力源和载体,干冰颗粒为清洗介质,利用空气压缩机产生的高压气体将干冰制备机产生的干冰颗粒高速喷射到工件表面,从而去除油漆<sup>[21,54,55]</sup>。

在油漆表面发生的主要反应如下:被加速的干冰颗粒自身具有动能,在冲击表面油漆时,对油漆有剪切、磨削等作用<sup>[56-58]</sup>。由于干冰颗粒独特的低温产生方式,使其与油漆表面存在较大温差,两者在接触瞬间发生强烈的热交换,油漆受冷收缩、脆化并破碎<sup>[59]</sup>,因热膨胀系数的差别,在受冷吸热过程中,油漆与基体之间的结合力降低,使油漆更易剥离基体表面<sup>[56,59]</sup>。干冰在常温条件下会迅速升华变成气体,其体积在极短时间内(微秒内)膨胀近千倍,在油漆表面形成“微区爆炸”,冲击表面油漆<sup>[60,61]</sup>,达到清洗的目的。

### 2.2.2 优缺点

干冰清洗的优点在于,清洗过程中,只有挥发的  $\text{CO}_2$  气体,没有新的有害物质产生<sup>[62]</sup>,只需清理被清洗的油漆废弃物,对人和环境无不利影响<sup>[21]</sup>,是一种环保的清洗方式。由于干冰颗粒自身的硬度适中和干冰升华作用,在清洗时,对基体基本无损伤,适合于精密仪器零部件的清洗<sup>[61]</sup>,基体表面无残留,不需二次处理<sup>[20]</sup>。

干冰清洗的缺点在于,喷嘴在干冰磨粒的不断冲击下易破损,需定期更换。干冰制备机和空气压缩机在工作时产生噪声。干冰磨料在清洗时以气体形式挥发,不可回收。此外,干冰生产和清洗设备成本高,干冰消耗大,经济性差<sup>[21,63]</sup>。

## 2.3 激光清洗技术

激光清洗是通过特定光学元器件将连续或脉冲激光聚焦,产生高能量激光束,照射到工件表面污垢,使污垢因高温而瞬间分解气化或因冲击振动而破碎,最终从零件表面剥离<sup>[63-64]</sup>。

### 2.3.1 激光清洗机理

激光清洗一般有气化和振动两个过程。图 4a 为气化过程<sup>[65]</sup>,在高能激光束照射到工件表面的油漆时,由于基体和油漆的激光吸收率不同,激光产生的绝大多数能量被表面油漆吸收<sup>[66]</sup>,使油漆表面能量聚集,温度迅速升高,油漆表面受热膨胀<sup>[67-69]</sup>,当温度达到甚至超过油漆的熔点或气化点时<sup>[70]</sup>,油漆会瞬间蒸发、气化挥发,从而脱离工件表面,达到去除油漆的目的<sup>[71-72]</sup>。此过程中,在油漆的表面能够看到明显的烟雾以及火花产生<sup>[71]</sup>。蒸发过程多发生在基体和油漆对一定波长激光能量的吸收系数有较大差别的情况下<sup>[73]</sup>,控制好激光波长和能量,能够实现高效除漆。图 4b 为振动过程<sup>[65]</sup>,高功率和重复频率高的脉冲激光照射工件表面油漆时,激光的大部分能量被油漆吸

收,以蒸发气化的形式使油漆剥离工件表面。另外一部分能量的激光束会以声波的形式进行传播,当声波传播到基体与油漆结合处时,声波接触到硬度相对比较高的基体材料,会发生反射,入射与反射的声波发生碰撞,撞击的瞬间产生高能波,形成微区爆炸,其能量冲击油漆表面,油漆在强大的冲击力下被炸碎,形成细小的粉末,脱离基体表面<sup>[65,73]</sup>,此时基体几乎不会受到损伤。同时激光束内包含的大量光子会不断轰击油漆内部,冲击力使其附着力降低,协同气化作用使污垢剥离<sup>[74]</sup>。根据振动过程原理,发现该过程多伴随着连续不断的轻微爆炸声。

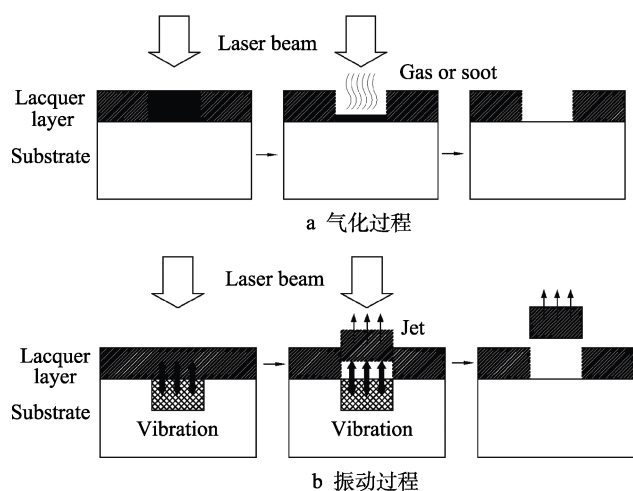


图4 激光清洗机理示意图<sup>[65]</sup>

Fig.4 Schematic diagram of laser cleaning mechanism<sup>[65]</sup>: a) gasification process; b) vibration process

### 2.3.2 优缺点

激光清洗的优点在于,由于油漆和基体之间存在不同的能量吸收度,激光清洗时选择合适的波长和激光能量,就能在基本不损害零件及材料内部组织和结构的前提下,实现去除表面油漆的目的<sup>[75]</sup>。该方法适用于各种材质的物体,操作简单方便,灵活性高,便于实现自动化操作<sup>[76]</sup>。此外,激光清洗为非接触式清洗,不会对人造成伤害。

激光清洗的缺点在于,激光器成本较高,大型激光清洗机设备庞大,不便携带,在某些复杂的清洗环境下,易产生清洗盲区。

## 2.4 高压水射流清洗技术

高压水射流清洗技术是将高能量的水射流以高速的形式冲击工件表面的污垢,利用射流的冲击、水楔等作用,使污垢脱离基体表面<sup>[77-79]</sup>。

### 2.4.1 高压水射流清洗机理

高压水射流以水为清洗介质,通过高压泵对水进行加压,产生的水压可以达到 100 MPa 以上<sup>[73,80]</sup>。通过具有细小孔径的喷射装置(如喷嘴)将高压水转换

为能量集中、高速运动的细小“水射流”<sup>[81-84]</sup>,这种“水射流”的速度可达 300~400 m/s 以上,具有强大的冲击动能<sup>[85-86]</sup>。高能量、高速度的水射流冲击表面油漆时,动能转化,在油漆表面发生冲击、磨削和剪切等复合作用<sup>[87]</sup>,使油漆内部结构遭到破坏,表面产生细小裂纹<sup>[32]</sup>,经过后续水射流在裂纹内部产生的水楔作用,降低裂纹尖端与基体的粘着力<sup>[74,88]</sup>,使裂纹不断扩张,油漆最终破碎脱离基体表面<sup>[89-91]</sup>。由于高压水射流的压力没有达到基体材料(如金属)的抗压强度,因此基本不会对基体造成损伤。在实际使用过程中,确定合适的喷嘴孔径与靶距等参数,能够使高压水射流达到最佳的清洗效果<sup>[92]</sup>。

### 2.4.2 优缺点

高压水射流清洗的优点在于,水作为高压水射流的清洗介质,在自然界普遍存在,高压水射流使用的喷嘴直径通常只有几毫米,耗水量较少<sup>[77]</sup>,并且清洗时无需向水中加入任何填充物和洗涤剂就有较好的清洗效果,清洗的水经过过滤等过程,可以回收利用,属节能环保型清洗技术<sup>[79,93]</sup>。调节好射流压力和射流量等参数,可以对工件表面的油漆进行高效清洗,清洗时间短,清洗效果好,对基体几乎无损伤<sup>[83,94-96]</sup>。高压水射流清洗技术的使用范围广泛,能够清洗形状复杂的工件<sup>[97]</sup>,只要是水能够接触到的地方均可进行清洗,易于实现清洗工作的自动化<sup>[98]</sup>。

高压水射流清洗的缺点在于,工件经高压水射流清洗后,其表面会留下残余水溶液,不及时清理会造成工件返锈。此外,由于水射流的压力较高,对设备要求较高<sup>[87]</sup>,在操作过程中存在一定的危险。

## 2.5 湿喷丸清洗技术

湿喷丸清洗是将磨料和水一起喷射到工件表面去除污垢的一种清洗方法。根据喷丸磨料和水混合的先后顺序,可以将其分为前混合模式和后混合模式,前后混合模式是一个相对的概念<sup>[99]</sup>。前混合模式是指,在磨液箱内,将磨粒和水进行充分均匀地混合,通过喷嘴将混合后的磨液高速喷射到工件表面的污垢上<sup>[87,91]</sup>。后混合模式有两种混合方法:一种是在磨粒以气动的方式喷射出来的过程中,向喷射的磨粒中添加水,达到混合的目的;另一种是以水为动力源,磨料以自重和负压吸附的作用进入水射流,混合后一起喷射到工件表面<sup>[85,91,100]</sup>。两类混合模式均有弊端。前混合模式易造成磨粒和水混合不均匀、磨粒粒子沉降和喷嘴损伤严重的问题;而后混合模式会造成磨料和水的混合效果差,影响冲蚀效果<sup>[101-102]</sup>,或者磨料颗粒碰撞变细,以及增加水可能会影响喷射原始轨迹。比较两种混合模式,后混合模式是以水为动力源的清洗,清洗后基体表面质量和清洗率相对较好,因此在实际中较为常用。

2.5.1 湿喷丸清洗机理

以水动后混合模式清洗为例,通过高压泵赋予水射流一定的初始动能,经过特制形状的喷嘴进行高速喷射,而磨料以负压吸附的方式与水射流混合,水射流的一部分动能传递给磨料,使其获得一定速度<sup>[103-105]</sup>,两者一起喷射到工件表面的油漆处<sup>[106-107]</sup>,磨粒的切削、冲击作用是实现油漆去除的主要形式。当高速运动的磨料冲击到工件表面的油漆时,磨粒在其表面产生剪切力、冲击力、摩擦力和成穴力<sup>[108-110]</sup>,其作用力大于漆层与基体之间的结合力,使油漆产生破碎断裂,从而脱离基体表面<sup>[111]</sup>。

在清洗过程中,水射流主要起到以下作用:为磨料提供加速动力,使磨料高速冲击到污垢表面;在裂纹内部产生水楔作用以及持续的冲击,可对破碎油漆进行剥离,从而加速油漆去除。基于水射流的流动特性,水离开工件表面时,会携带已去除的油漆微粒,防止微粒对基体材料的二次污染。由于水的参与,工件表面会产生水膜,缓解磨粒对基体的冲击,降低其对基体表面质量的影响。

2.5.2 优缺点

湿喷丸清洗的优点在于,湿喷丸的清洗压力只有几兆帕,对基体损伤小,一定程度上提高了材料的疲劳强度<sup>[112]</sup>。湿喷丸中,水的参与能够有效避免干喷丸清洗时产生粉尘的情况,对环境几乎无影响。此外,其清洗效率高,所用磨料属于固体颗粒,使用后可通过过滤和干燥等工艺,对磨料进行回收利用<sup>[113]</sup>。

湿喷丸清洗的缺点在于,由于射流的线性特点,湿喷丸能够有效清洗工件外部的油漆污垢,但不适用内腔油漆的清理<sup>[114]</sup>。清洗后,工件表面粗糙度会有所增加,不适合清洗对表面质量要求高的零部件。在清洗过程中有水的参与,清洗后的工件易产生返锈现象,需在溶液中加入防锈液或安装吹干装置,增加成本。

2.6 几种清洗技术的异同

高压水射流清洗、干喷丸清洗与湿喷丸清洗技术在动力源、清洗压力和对环境污染等方面的异同如表 4 所示。

表 4 高压水射流、干喷丸和湿喷丸清洗技术的异同

Tab.4 Similarities and differences of cleaning technologies of high pressure water jet, dry shot peening and wet shot peening

Cleaning technology	Power source	Pressure/MPa	Impact on the environment	Range of application
High pressure water jet cleaning	Water	Hundreds	Almost no impact	It can be cleaned wherever water can reach
Dry shot peening cleaning	Air	Less than 1	Dust pollution is serious	Not suitable for cavity and hole cleaning
Wet shot peening cleaning	Water or air	A few <sup>[96]</sup>	Almost no impact	Not suitable for cavity and hole cleaning

2.7 超声波清洗技术

超声波清洗技术指利用超声波在液体中产生的作用力以及清洗介质的渗透溶解作用,促使表面污垢发生物理与化学作用相结合的一种清洗方式<sup>[115-116]</sup>。

2.7.1 超声波清洗机理

换能器将电磁振荡器产出的超高频声波转换成同频率的机械振动,由于液体和固体之间存在的表面张力作用,高频机械振动在清洗液中运动时<sup>[117-118]</sup>,清洗液会受拉压作用力形成负压区和正压区,液体受拉破碎,在负压区产生无数个压力超过 1000 MPa 的微小气泡<sup>[41,119]</sup>,即真空腔。由于真空腔内外的压力相差巨大,当声压或声强达到一定值时,这些气泡会在正压区破裂而释放出瞬时高压<sup>[120]</sup>,破坏油漆与基体之间的结合强度。工件表面油漆受到连续不断的气泡破裂所产生的瞬时高压的持续冲击<sup>[121-123]</sup>,结合清洗剂的溶解和分离结构疏松的作用,使附着在工件表面的油漆破碎<sup>[124-125]</sup>,并迅速剥落,从而达到清洗油漆的目的。

2.7.2 优缺点

超声波清洗的优点在于,由于液体的流动性,可清洗表面形状复杂、精密而又难以清洗的零件,清洗不受清洗件表面形状的限制<sup>[124]</sup>,在空化作用处均可清洗,对带有孔、细缝等形状和结构复杂的工件尤为适用。此外,其清洗效率高,对工件表面几乎无损伤,工艺参数易控,易于实现遥控和自动化清洗,清洗效果彻底,清洁度高<sup>[126]</sup>。

超声波清洗的缺点在于,换能器易坏<sup>[15]</sup>,工作噪声大,设备造价昂贵,对清洗剂的要求较高。清洗后会产生废旧清洗液,易造成环境污染,增加后续废液处理成本。对质地较软、声吸收强的材料,清洗效果比较差。

2.8 超临界 CO<sub>2</sub> 清洗技术

超临界 CO<sub>2</sub> (SCCO<sub>2</sub>) 是指压力和温度均大于临界值的 CO<sub>2</sub> 流体,其同时具有液体较大溶解度和气体扩散的性质<sup>[127-131]</sup>,利用其特有的物化性质可清洗污垢。其中 CO<sub>2</sub> 转换的临界值为:临界压力  $P_c=7.38$  MPa,

临界温度  $t_c=31.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  [114,127]。

### 2.8.1 超临界 $\text{CO}_2$ 清洗机理

利用高压泵和加热器等设备将  $\text{CO}_2$  变成流体状态 [132]，由于超临界  $\text{CO}_2$  具有强扩散性和较小表面张力的特点，使其能够渗透到油漆内部 [34,133-134]，与油漆实现全面接触 [132]。在快速泄压的过程中，超临界  $\text{CO}_2$  流体处于过饱和状态，其内部会因压力变化而产生微小气泡，经过不断地加压和泄压过程，气泡会逐渐增大，最终破裂并与相邻气泡合并 [131]。不断增大的气泡在油漆和基体界面、油漆内部及表面形成，产生界面裂纹、油漆内部裂纹和表面隆起等现象，造成油漆内部疏松以及油漆与基体之间附着力降低的情况，最终使油漆破碎或剥离基体，以达到清洗的目的。并且在加压和泄压的过程中，会存在较大温差，由于热膨胀系数的差别，油漆与基体两者会产生不同的内部拉应力，当拉应力大于油漆的抗拉强度时，油漆内部以及油漆和基体界面处会产生不同形式的裂纹 [9,114]，加速油漆去除。

### 2.8.2 优缺点

超临界  $\text{CO}_2$  清洗的优点在于，它主要是利用强渗透和溶解特性达到去除油漆的目的 [34,135]，对基体几乎无影响。选择合适的清洗参数，甚至可以实现无损伤清洗，适合于精密仪器的清洗。同时适用范围广，可清洗具有多孔洞、沟槽、细缝等形状复杂的零部件 [127]。此外， $\text{CO}_2$  无毒，对环境无污染，方便易得 [136]，并可进行回收，实现循环利用。

超临界  $\text{CO}_2$  清洗的缺点在于，由于需要高压系统，故其设备投资费用较高 [132]，且清洗不彻底，有少量油漆污垢残留，需二次清洗。

## 2.9 各技术清洗效率的对比

以发动机缸体、缸盖、变速箱箱体等再制造零部件为清洗对象，以清洗效率为衡量标准，结合上述对清洗技术油漆去除机理的分析整理，对各种清洗技术在清洗效率方面进行了简单的对比分析，旨在为使用者选择合适的清洗技术时提供参考，其效率排序如表 5。

表 5 各种清洗技术的清洗效率排序  
Tab.5 Cleaning efficiency ranking of various cleaning technologies

Cleaning technology	Molten salt cleaning	Dry ice cleaning	Laser cleaning	High pressure water jet cleaning	Wet shot peening	Ultrasonic cleaning	Supercritical $\text{CO}_2$ cleaning
Efficiency ranking	1	7	5	4	3	2	6

发动机缸体、缸盖、变速箱箱体等零部件的尺寸一般较大，根据这一情况，优先选择浸泡式的清洗技术，如熔盐清洗技术和超声波清洗技术。基于液体的流动特性，清洗液能够对污垢实现全覆盖，即清洗反应可以在零部件表面油漆污垢部位同时进行，使单位时间的清洗效率大大提升。熔盐清洗利用高温环境和化学反应去除油漆，超声波清洗则利用超声波的空化作用，属物理清洗，其清洗效率低于高温环境下的化学清洗。其次应选择移动式的清洗技术，如湿喷丸清洗、高压水射流清洗和激光清洗技术，该类技术需要实现喷射装置和待清洗件之间的相对移动，以对零部件进行全面清洗，单位时间的清洗效率会低于浸泡式的清洗技术。在相同的清洗压力下，湿喷丸相比于高压水射流清洗来说，由于磨料的参与，磨料对油漆的冲击、切削等能力远高于水射流的水楔作用，清洗效率远高于高压水射流。高压水射流由于喷嘴尺寸的不同而有不同的清洗宽度，常用直径为 6 mm 的喷嘴，其清洗宽度能够保持在 30~40 mm 左右，而激光清洗时的扫描宽度有一定的限制，其宽度一般在 20 mm 以内，两者以相同的移动速度进行清洗作业时，清洗宽度的差别使高压水射流的效率明显高于激光清洗。最后是以  $\text{CO}_2$  为清洗介质的超临界  $\text{CO}_2$  清洗和干冰清洗技术，两者均适用于精密仪器表面污垢的清洗，其清洗强度远小于其他几种清洗技术，在清洗大型零

部件方面的应用较少，两者相比，浸泡式的超临界  $\text{CO}_2$  清洗技术在单位时间内的清洗效率略高于移动式的干冰清洗技术。

## 3 总结与展望

油漆是进行再制造清洗时必需清洗的污垢类型，本文基于油漆的物化性质，对现有油漆清洗技术的清洗机理及优缺点进行分析、总结，并从效率方面对各种清洗技术进行了简单的对比分析，旨在为使用者在进行清洗技术的选择时提供便利，并为新型清洗技术的开发和创造提供思路和参考，进一步发展油漆清洗技术。

目前，再制造清洗领域的主要清洗对象可大致分为以下三类：结构复杂的零部件、中大型零部件以及精密仪器零部件。对于结构复杂的零部件，常用的清洗技术主要有熔盐清洗、高压水射流清洗和超声波清洗，其主要特点是利用液体的流动性，能够实现沟槽、孔洞等的清洗。对于中大型零部件，常用的清洗技术主要有熔盐清洗、激光清洗、高压水射流清洗、湿喷丸清洗以及超声波清洗，其特点主要是清洗时不受空间限制，熔盐和超声波具有足够容纳中大型零部件的清洗仪器，而其他三种技术能够在清洗过程中实现空间的移动，对零部件进行全方位的清洗。对于精密仪器零部件（如硅片），常用的清洗技术主要有干冰清



洗和超临界  $\text{CO}_2$  清洗, 其特点是对基体损伤小, 甚至可实现无损伤。干冰颗粒硬度低, 主要是利用其极大温差的特点使污垢脆化破碎, 而超临界  $\text{CO}_2$  则是利用流体独特的渗透和溶解性去除污垢, 且两者的清洗设备昂贵, 耗能高, 用于其他场合会增加再制造成本。各种清洗技术在进行清洗作业时有各自的局限性, 需进一步改进。

针对现有油漆清洗技术存在的问题, 对于清洗技术的未来发展和技术改进可以从绿色化、复合化和智能化方面来考虑:

1) 绿色化。对各种清洗技术的参数进行优化改进, 在保证清洗质量和效率的前提下, 使各清洗技术在高效清洗污垢过程中, 能源消耗最小, 对环境污染最小, 甚至不污染环境。例如在熔盐清洗时, 通过对熔盐配方中成分的改进优化, 使用绿色无污染的熔盐成分, 减小污染性物质的产生, 甚至不产生污染物。对清洗过程中不可避免产生的废气、废渣等物质, 按照国家相关规定对其进行无害化处理, 降低对环境的污染。在清洗完成后, 可对部分可回收物质进行回收处理, 达到节约资源的目的, 如湿喷丸清洗后的磨料颗粒, 经过过滤、筛选、干燥等工序, 实现磨料的循环利用, 降低经济成本。

2) 复合化。分析各清洗技术的优缺点, 考虑两种及以上清洗技术复合的可能性, 使复合后的清洗技术能够最大程度地发挥各种清洗技术的优势, 或者能够规避某一清洗技术的劣势, 从不同的角度达到优化清洗环境、提高清洗效果的目的。如将熔盐清洗和超声清洗技术进行复合, 利用超声振子产生的高频震荡波, 使熔盐在清洗场内流动, 提高反应离子的交换速率, 从而提高清洗速率。超临界  $\text{CO}_2$  与湿喷丸清洗技术进行复合<sup>[9]</sup>, 通过超临界  $\text{CO}_2$  的预处理, 使污垢表面疏松而更容易去除, 从而较小的湿喷丸清洗压力就可实现对污垢的清洗, 提高效率的同时, 避免了高压对基体的损伤。分析清洗介质的成分, 基于该技术清洗时的优缺点, 开发新型清洗技术, 如超临界  $\text{CO}_2$  的清洗强度偏低, 在保证相似清洗机理的条件下, 向超临界  $\text{CO}_2$  中增加某些成分, 起到类似于活化剂、催化剂的作用, 提高超临界  $\text{CO}_2$  反应速率, 从而提高清洗效率。

3) 智能化。搭建多自由度、高自动化的智能清洗平台, 实现自动化清洗过程, 减少人为因素对清洗效果的影响, 同时也能降低有害物质对人的健康和安全造成的威胁, 并可对整个清洗过程实时监控, 获得全面的清洗数据。通过大数据和人工智能系统, 实现清洗参数的自动调整, 达到最优清洗效果。

#### 参考文献:

[1] 徐滨士, 马世宁, 刘世参, 等. 表面工程的进展与再制

造工程[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001(9): 1085-1091.

XU Bin-shi, MA Shi-ning, LIU Shi-can, et al. Progress of surface engineering and remanufacture engineering[J]. Journal of Tongji University, 2001(9): 1085-1091.

[2] 徐滨士, 董世运, 史佩京. 中国特色的再制造零件质量保证技术体系现状及展望[J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 84-90.

XU Bin-shi, DONG Shi-yun, SHI Pei-jing. States and prospects of China characterised quality guarantee technology system for remanufactured parts[J]. Journal of mechanical engineering, 2013, 49(20): 84-90.

[3] 徐滨士, 马世宁, 朱绍华, 等. 表面工程与再制造工程的进展[J]. 中国表面工程, 2001(1): 8-14.

XU Bin-shi, MA Shi-ning, ZHU Shao-hua, et al. Progress in surface engineering and remanufacturing engineering[J]. China surface engineering, 2001(1): 8-14.

[4] 刘俊英, 张国胜, 蒋伯平. 工程机械轴类零件的再制造概述[J]. 工程机械, 2008(1): 58-61.

LIU Jun-ying, ZHANG Guo-sheng, JIANG Bo-ping. Summarized discussion on remanufacturing of shaft components of construction machinery[J]. Construction machinery and equipment, 2008(1): 58-61.

[5] YOUNGWOON C, DOHYUN J. A study on repair technique of vehicle injector parts[J]. Key engineering materials, 2016, 713: 258-261.

[6] GONG Q S, ZHANG H, JIANG Z G, et al. Methodology for steel plate remanufacturing cleaning with flexible cable impact contact and friction[M]. Amsterdam: Elsevier, 2018.

[7] LJOMAH W L, MCMAHON C A, HAMMOND G P, et al. Development of design for remanufacturing guidelines to support sustainable manufacturing[J]. Robotics and computer integrated manufacturing, 2007, 23(6): 712-719.

[8] 苏斌. 工程机械再制造工艺的清洁生产研究——以柳工机械为例[D]. 桂林: 广西大学, 2016.

SU Bin. Research on clean production for engineering machinery remanufacturing processes—A case of LiuGong machinery[D]. Guilin: Guangxi University, 2016.

[9] 董亚洲. 超临界  $\text{CO}_2$  预处理复合清洗方法及其应用[J]. 科技创新导报, 2017, 14(22): 24-25.

DONG Ya-zhou. Combined cleaning method of supercritical  $\text{CO}_2$  pretreatment and its application[J]. Science and technology innovation herald, 2017, 14(22): 24-25.

[10] PENG S T, LI T, TANG Z J, et al. Comparative life cycle assessment of remanufacturing cleaning technologies[J]. Journal of cleaner production, 2016, 137: 475-489.

[11] LEE C M, WOO W S, ROH Y H. Remanufacturing: Trends and issues[J]. International journal of precision engineering and manufacturing-green technology, 2017, 4(1): 113-125.

[12] JOHNSON A F, LESLIE M, CELESTINE A. The integration of core cleaning and product serviceability into product modularization for the creation of an improved

- remufacturing-product service system[J]. Journal of cleaner production, 2017, 159: 446-455.
- [13] MITSUTAKA M, YANG S S, KRISTIAN M, et al. Trends and research challenges in remanufacturing[J]. International journal of precision engineering and manufacturing-green technology, 2016, 3(1): 129-142.
- [14] 徐永尚. 发动机再制造清洗技术生命周期成本分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- XU Yong-shang. Life cycle cost analysis of engine remanufacturing cleaning technology[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [15] 任工昌, 于峰海, 陈红柳. 绿色再制造清洗技术的现状及发展趋势研究[J]. 机床与液压, 2014(3): 158-161.
- REN Gong-chang, YU Feng-hai, CHEN Hong-liu. Present situation and development trend of green remanufacturing cleaning technology[J]. Machine tool & hydraulics, 2014(3): 158-161.
- [16] 崔培枝, 姚巨坤. 再制造清洗工艺与技术[J]. 新技术新工艺, 2009(3): 25-28.
- CUI Pei-zhi, YAO Ju-kun. Process and technologies of remanufacturing cleaning[J]. New technology & new process, 2009(3): 25-28.
- [17] 张昕, 高晓燕, 彭家安. 清洗技术在产品再制造过程中的应用研究[J]. 科技风, 2009(11): 121-122.
- ZHANG Xin, GAO Xiao-yan, PENG Jia-an. Research on application of cleaning technology in remanufacturing process [J]. Technology wind, 2009(11): 121-122.
- [18] 崔培枝, 杨俊娥, 朱胜. 产品再制造过程中的清洗技术研究[J]. 中国表面工程, 2006, 19(S1): 123-125.
- CUI Pei-zhi, YANG Jun-e, ZHU Sheng. Cleaning technology study in product remanufacturing processs[J]. China surface engineering, 2006, 19(S1): 123-125.
- [19] 刘军壮. 高压水射流在再制造清洗中的应用[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- LIU Jun-zhuang. Research on high pressure waterjet in remanufacture cleaning[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [20] 聂延艳. 再制造发动机典型污垢的熔盐清洗工艺研究 [D]. 济南: 山东大学, 2015.
- NIE Yan-yan. Molten salt cleaning process research of remanufacturing engine typical fouling[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [21] 刘诗巍. 再制造坯料清洁技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- LIU Shi-wei. Investigation on remanufacturing blank cleaning technology[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [22] 沈国良. 喷丸清理技术在航空工业和汽车工业等领域的应用[J]. 上海涂料, 2003(2): 22-25.
- SHEN Guo-liang. Application of shot peening technology in aviation industry and automobile industry[J]. Shanghai coatings, 2003(2): 22-25.
- [23] 宋广全. 悬链式抛丸清理机性能分析和结构优化[D]. 济南: 济南大学, 2013.
- SONG Guang-quan. The research of catenary shot-blasting machine and structural optimization[D]. Jinan: Jinan University, 2013.
- [24] 李浩. 核桃喷砂清洗机的研制[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- LI Hao. The development of sand blasting machine for walnut[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.
- [25] HALDAR B, GHARA T, ANSARI R, et al. Abrasive jet system and its various applications in abrasive jet machining, erosion testing, shot-peening, and fast cleaning[J]. Materials today: Proceedings, 2018, 5(5): 13061-13068.
- [26] 程彬彬. 助航灯具清洗关键技术研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2019.
- CHENG Bin-bin. Research on the key technology of navigation lights cleaning[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2019.
- [27] KENNEDY D M, VAHEY J, HANNEY D. Micro shot blasting of machine tools for improving surface finish and reducing cutting forces in manufacturing[J]. Materials & design, 2005, 26(3): 203-208.
- [28] 杨舰波, 张伟, 赵红涛, 等. 磨料水射流技术在特殊管道的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 33(11): 79-85.
- YANG Jian-bo, ZHANG Wei, ZHAO Hong-tao, et al. Application of abrasive water jet technology in special pipeline[J]. China petroleum and chemical standard and quality, 2012, 33(11): 79-85.
- [29] 吉小超, 张伟, 于鹤龙, 等. 面向机电产品再制造的绿色清洗技术研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(1): 113-117.
- JI Xiao-chao, ZHANG Wei, YU He-long, et al. Research progress of the green cleaning technologies in the remanufacturing of mechanical and electrical products[J]. Materials review, 2012, 26(1): 113-117.
- [30] 郭胜华. Ti-10V-2Fe-3Al 合金表层湿喷丸强化机理及其工艺优化研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
- GUO Sheng-hua. Study on strengthening mechanism and process optimization of Ti-10V-2Fe-3Al alloy surface by wet shot peening[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2018.
- [31] 张炜, 曹亮, 高国强, 等. 国内外航空喷丸技术与装备发展[J]. 航空制造技术, 2013(17): 32-35.
- ZHANG Wei, CAO Liang, GAO Guo-qiang, et.al. Development of shot peening technology and equipment in aviation industry[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2013(17): 32-35.
- [32] GAO Dao-ming, CHEN Jie. Anfs for high-pressure waterjet cleaning prediction[J]. Surface & coatings technology, 2006, 201(3): 1629-1634.

- [33] JAMES M N, NEWBY M, HATTINGH D G, et al. Shot-peening of steam turbine blades: Residual stresses and their modification by fatigue cycling[J]. *Procedia engineering*, 2010, 2(1): 441-451.
- [34] 贺岩明. 超临界 CO<sub>2</sub> 在再制造清洗中的应用基础研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.  
HE Yan-ming. Basic research for application of the supercritical carbon dioxide in the process of remanufacturing cleaning[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [35] 刘金聪, 王明娣, 潘煜, 等. 基于激光清洗技术的桥梁防护漆层的脱漆试验研究[J]. *应用激光*, 2019, 39(2): 263-268.  
LIU Jin-cong, WANG Ming-di, PAN Yu, et al. Paint removal of bridge protective coatings based on laser cleaning technology[J]. *Applied laser*, 2019, 39(2): 263-268.
- [36] 张瑄珩, 王健超, 张伟, 等. 金属材料激光清洗技术发展现状[C]//激光学会会议论文集. 上海: 上海市激光学会, 2015: 27-30.  
ZHANG Xuan-jun, WANG Jian-chao, ZHANG Wei, et al. Development status of laser cleaning technology for metal materials[C]// *Proceedings of Shanghai Laser Society Conference*. Shanghai: Shanghai Laser Society, 2015: 27-30.
- [37] 孙一航, 张保财, 贾秀杰, 等. 再制造零件表面油漆的熔盐清洗去除作用[J]. *表面技术*, 2018, 47(9): 279-286.  
SUN Yi-hang, ZHANG Bao-cai, JIA Xiu-jie, et al. Removal effect of molten salt cleaning for paint coatings on remanufactured parts[J]. *Surface technology*, 2018, 47(9): 279-286.
- [38] 辛本礼, 贾秀杰, 孙一航, 等. 熔盐清洗对再制造零部件基体性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(18): 49-53.  
XIN Ben-li, JIA Xiu-jie, SUN Yi-hang, et al. Effect of molten salt cleaning on properties of remanufactured parts matrix[J]. *Hot working technology*, 2018, 47(18): 49-53.
- [39] 刘立秋. 高压水射流清洗技术在柴油机清洗的应用前景[J]. *铁道机车与动车*, 2017(3): 36-37.  
LIU Li-qiu. Application prospect of high pressure water jet cleaning technology in diesel engine cleaning[J]. *Railway locomotive and motor car*, 2017(3): 36-37.
- [40] 郭琦, 李方义, 姚帅帅, 等. 面向再制造的 HT250 毛坯除漆技术及工艺优化[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(1): 77-81.  
GUO Qi, LI Fang-yi, YAO Shuai-shuai, et al. Decoating technology and process optimization of blank HT250 based on remanufacturing[J]. *Journal of Central South University (science and technology)*, 2016, 47(1): 77-81.
- [41] 张振洲, 韩龙. 再制造零部件清洗技术[J]. *清洗世界*, 2014, 30(2): 42-45.  
ZHANG Zhen-zhou, HAN Long. Application of component-remanufactured cleaning technology[J]. *Cleaning world*, 2014, 30(2): 42-45.
- [42] 忻刚明. 钢结构建筑的涂层防蚀技术应用[J]. *浙江水利科技*, 2002(6): 17-19.  
XIN Gang-ming. Application of coating anti-corrosion technology in steel structure building[J]. *Zhejiang hydrotechnics*, 2002(6): 17-19.
- [43] 吴贤官, 沈志聪, 王塘. 涂层的热膨胀系数与附着力[J]. *上海涂料*, 2006, 44(1): 39-42.  
WU Xian-guan, SHEN Zhi-cong, WANG Tang. Coatings expansion coefficient and adhesion[J]. *Shanghai coatings*, 2006, 44(1): 39-42.
- [44] 张健. 零件表面漆层的熔盐清洗研究及后处理设计[D]. 济南: 山东大学, 2018.  
ZHANG Jian. Experiment study and post-treatment design of molten salt cleaning aiming at paint layer[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [45] SHOEMAKER R H, WOOD W G. Production cleaning systems involving molten salt baths[J]. *Metals engineering quarterly*, 1971, 11(2): 38.
- [46] 孙一航, 贾秀杰, 李方义, 等. 缸筒表面油漆的超声熔盐复合清洗参数优化[J]. *机械设计与制造*, 2019(2): 121-126.  
SUN Yi-hang, JIA Xiu-jie, LI Fang-yi, et al. Optimization of ultrasonic molten salt compound cleaning parameters for the surface paint of cylinder[J]. *Machinery design & manufacture*, 2019(2): 121-126.
- [47] 宋继堂. 浅谈清洗剂和清洗方法[J]. *内燃机车*, 1991(9): 38-42.  
SONG Ji-tang. Discussion on cleaning agent and cleaning method[J]. *Diesel locomotives*, 1991(9): 38-42.
- [48] 张保财, 孙一航, 贾秀杰, 等. 基于熔盐超声复合的除漆技术研究及工艺优化[J]. *表面技术*, 2018, 47(8): 280-287.  
ZHANG Bao-cai, SUN Yi-hang, JIA Xiu-jie, et al. Depainting technology based on ultrasonic compounding of molten salt and technology optimization[J]. *Surface technology*, 2018, 47(8): 280-287.
- [49] 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 Shun-xin. Analysis and application of salt bath cleaning in remanufacturing[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [50] 姚帅帅. 再制造零件表面积碳的熔盐清洗研究及工艺优化[D]. 济南: 山东大学, 2016.  
YAO Shuai-shuai. Carbon cleaning research and process optimization for remanufactured parts with molten salt[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [51] GROSU Y, NITHIYANANTHAM U, ZAKI A, et al. A simple method for the inhibition of the corrosion of carbon steel by molten nitrate salt for thermal storage in concentrating solar power applications[J]. *npj materials degradation*, 2018, 2(1): 1-8.
- [52] LONG Yang-yang, LI Jian-zhi, TIMMER D H, et al. Modeling and optimization of the molten salt cleaning process[J]. *Journal of cleaner production*, 2014(68): 243-251.

- [53] 魏育才, 顾媛媛, 魏留芳. 二氧化碳清洗技术原理分析[J]. 清洗世界, 2014, 30(8): 35-38.  
WEI Yu-cai, GU Yuan-yuan, WEI Liu-fang. Principle analysis of carbon dioxide cleaning technology[J]. Cleaning world, 2014, 30(8): 35-38.
- [54] 王鸿晓. 干冰清洗技术[J]. 清洗世界, 2004(8): 36-38.  
WANG Hong-xiao. Cleaning technology by dry ice[J]. Cleaning world, 2004(8): 36-38.
- [55] 王翹楚, 孙杰, 覃科人. 聚氨酯弹性体灌注机的干冰清洗技术[J]. 清洗世界, 2008(6): 6-9.  
WANG Qiao-chu, SUN Jie, QIN Ke-ren. Dry ice cleaning method in polyurethane elastomer bottler[J]. Cleaning world, 2008(6): 6-9.
- [56] 孙洪孟. 干冰清洗技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.  
SUN Hong-meng. Research on dry ice blasting technology[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [57] 戴维康. 干冰清洗技术应用于陶瓷文物清洗的探索研究[J]. 文物保护与考古科学, 2015, 27(1): 116-120.  
DAI Wei-kang. Using dry ice to clean ceramic cultural relics[J]. Sciences of conservation and archaeology, 2015, 27(1): 116-120.
- [58] 锡洪鹏, 李志良, 曹繁云, 等. 浅谈干冰清洗技术在汽车制造中的应用[J]. 现代涂料与涂装, 2017, 20(11): 50-51.  
XI Hong-peng, LI Zhi-liang, CAO Fan-yun, et al. Brief discussion on application of dry ice cleaning technology in automobile manufacturing[J]. Modern paint & finishing, 2017, 20(11): 50-51.
- [59] 郑莉, 李梦佳. 干冰清洗机清洗原理及使用注意事项[J]. 清洗世界, 2015, 31(2): 15-18.  
ZHENG Li, LI Meng-jia. Cleaning principle of dry ice cleaning machine and using cautions[J]. Cleaning world, 2015, 31(2): 15-18.
- [60] 卢洪坤, 许宏伟, 李晨, 等. 干冰清洗技术在发电机铁芯锈蚀处理中的应用[J]. 浙江电力, 2013, 32(4): 45-47.  
LU Hong-kun, XU Hong-wei, LI Chen, et al. Application of carbon dioxide ice cleaning in removing iron core corrosion of the generator[J]. Zhejiang electric power, 2013, 32(4): 45-47.
- [61] 左华. 二氧化碳干冰清洗技术综述[J]. 低温与特气, 2005(2): 12-14.  
ZUO Hua. Summarization of dry ice purge technology[J]. Low temperature and specialty gases, 2005(2): 12-14.
- [62] 樊一蒙, 刘玉玲, 樊三新. 干冰清洗技术在清洗旧储油罐中的应用[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2011, 28(2): 47-48.  
FAN Yi-meng, LIU Yu-ling, FAN San-xin. Application of dry ice cleaning technology in cleaning old oil tank[J]. Corrosion & protection in petrochemical industry, 2011, 28(2): 47-48.
- [63] 秦顺顺. 面向再制造的超声清洗研究及应用[D]. 济南: 山东大学, 2012.  
QIN Shun-shun. Study and application of ultrasonic cleaning in remanufacturing[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [64] 王泽敏, 曾晓雁, 黄维玲. 激光清洗工艺的发展现状与展望[J]. 激光技术, 2000(2): 68-73.  
WANG Ze-min, ZENG Xiao-yan, HUANG Wei-ling. Status and prospect of laser cleaning procedure[J]. Laser technology, 2000(2): 68-73.
- [65] 陈浩. 车体表面油漆激光清洗工艺基础研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.  
CHEN Hao. Process of basic research on laser cleaning technology of car body surface paint[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [66] ORTIZ P, ANTUNEZ V, ORTIZ R, et al. Comparative study of pulsed laser cleaning applied to weathered marble surfaces[J]. Applied surface science, 2013, 283: 193-201.
- [67] 万壮, 杨学锋, 夏国峰, 等. 激光清洗技术的应用及展望[J]. 机床与液压, 2020, 48(7): 172-178.  
WAN Zhuang, YANG Xue-feng, XIA Guo-feng, et al. Application and prospect of laser cleaning technology[J]. Machine tool & hydraulics, 2020, 48(7): 172-178.
- [68] MANDOLFINO C, LERTORA E, GENNA S, et al. Effect of laser and plasma surface cleaning on mechanical properties of adhesive bonded joints[J]. Procedia CIRP, 2015, 33: 458-463.
- [69] ALLCOCK D T C, GUIDONI L, HARTY T P, et al. Reduction of heating rate in a microfabricated ion trap by pulsed-laser cleaning[J]. New journal of physics, 2011, 13(12): 1-11.
- [70] 张光星, 华学明, 李芳, 等. 激光除锈、除漆的研究与应用现状[J]. 热加工工艺, 2019, 48(18): 1-4.  
ZHANG Guang-xing, HUA Xue-ming, LI Fang, et al. Research and application status of laser de-rusting and de-painting[J]. Hot working technology, 2019, 48(18): 1-4.
- [71] 宋峰, 刘淑静, 邹万芳. 激光清洗——脱漆除锈[J]. 清洗世界, 2005(11): 42-45.  
SONG Feng, LIU Shu-jing, ZOU Wan-fang. Typical application of laser cleaning——removal of rust and paint[J]. Cleaning world, 2005(11): 42-45.
- [72] 章恒, 刘伟崑, 董亚洲, 等. 低频YAG脉冲激光除漆机理和实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(12): 118-124.  
ZHANG Heng, LIU Wei-wei, DONG Ya-zhou, et al. Experimental and mechanism research on paint removal with low frequency yag pulsed laser[J]. Laser & optoelectronics progress, 2013, 50(12): 118-124.
- [73] 帅刚, 邱骥, 蔡嘉辉. 新型除漆技术的应用现状[C]//2015 第二届海洋材料与腐蚀防护大会论文集. 北京: 腐蚀与防护, 2015.  
SHUAI Gang, QIU Ji, CAI Jia-hui. Application status of new technology of paint removal[C]//the second conference



- on marine materials and corrosion protection 2015. Beijing: Corrosion & protection, 2015.
- [74] 孙一航. 再制造零件表面漆层的熔盐清洗研究及工艺参数优化[D]. 济南: 山东大学, 2019.  
SUN Yi-hang. Molten salt cleaning research and process parameters optimization for paint layer of remanufacturing parts[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [75] 吴晨炜. 铝合金表面环氧树脂漆激光清洗的工艺研究[D]. 杭州: 苏州大学, 2019.  
WU Chen-wei. Technical study on laser cleaning process of epoxy resin paint on aluminum alloy surface[D]. Hangzhou: Soochow University, 2019.
- [76] 邢宏楠, 冉合利, 赵慧峰, 等. 激光清洗技术发展及应用[J]. 清洗世界, 2018, 34(5): 23-31.  
XING Hong-nan, RAN He-li, ZHAO Hui-feng, et al. Development and application of laser cleaning technology[J]. Cleaning world, 2018, 34(5): 23-31.
- [77] 王洪仁. 有关高压水射流清洗技术现状及发展前景[J]. 商, 2016(20): 295.  
WANG Hong-ren. Present situation and development prospect of high pressure water jet cleaning technology[J]. Business, 2016(20): 295.
- [78] 任君. 高压水射流清洗技术应用及未来发展趋势[J]. 清洗世界, 2019, 35(10): 56-57.  
REN Jun. Application and future development trend of high pressure water jet cleaning technology[J]. Cleaning world, 2019, 35(10): 56-57.
- [79] 韩杰, 杨士敏, 蔡顶春. 工程机械零部件再制造清洗技术研究[J]. 机械工程与自动化, 2013(2): 222-224.  
HAN Jie, YANG Shi-min, CAI Ding-chun. Part cleaning technologies in engineering machinery remanufacturing[J]. Mechanical engineering & automation, 2013(2): 222-224.
- [80] CHO K T, SONG K, OH S H, et al. Surface hardening of aluminum alloy by shot peening treatment with Zn based ball[J]. Materials science and engineering A—Structural materials properties microstructure and processing, 2012, 543: 44-49.
- [81] 宋加会, 刘昌林, 许胜涛, 等. 高压水射流清洗技术及其在管道除垢中的应用[J]. 化工设备与管道, 2014, 51(5): 79-82.  
SONG Jia-hui, LIU Chang-lin, XU Sheng-tao, et al. Cleaning technique with high pressure water jet and its application in removing scale in piping[J]. Process equipment & piping, 2014, 51(5): 79-82.
- [82] 陈明. 水射流清洗喷嘴内清洗液流动特性分析[D]. 大庆: 东北石油大学, 2016.  
CHEN Ming. Analysis of waterjet cleaning nozzle cleaning fluid flow characteristics[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2016.
- [83] 张佳福, 高善兵, 畅通, 等. 基于高压水射流清洗技术的研究[J]. 机电产品开发与创新, 2011, 24(5): 24-26.  
ZHANG Jia-fu, GAO Shan-bing, CHANG Tong, et al. Study of high-pressure water-jets cleaning technology[J]. Development & innovation of machinery & electrical products, 2011, 24(5): 24-26.
- [84] 陈玉凡. 高压水射流清洗技术现状及发展前景[J]. 中国设备工程, 2013(2): 6-8.  
CHEN Yu-fan. Present situation and development prospect of high pressure water jet cleaning technology[J]. China plant engineering, 2013(2): 6-8.
- [85] 孙亮. 高压水射流清洗及喷砂设备的研究分析[J]. 清洗世界, 2014, 30(2): 23-26.  
SUN Liang. Analysis of high pressure water jet cleaning and sand-blasting equipment[J]. Cleaning world, 2014, 30(2): 23-26.
- [86] 周文会. 高压水射流喷嘴内外流场的数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008.  
ZHOU Wen-hui. Numerical and simulation research on the high pressure water jet nozzle in inside and outside efflux flow field[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2008.
- [87] 王圣磊. 前混合式磨料射流清洗试验及系统参数匹配研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2009.  
WANG Sheng-lei. Experimental study and parameters matching analyses on surface cleaning with premixed abrasive water jet[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2009.
- [88] 张保财. 柴油发动机缸盖孔道污物熔盐清洗研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.  
ZHANG Bao-cai. Research on molten salt cleaning for channel contaminants in cylinder cover of diesel engine[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [89] 孙强. 高压水射流技术在水冲洗中的应用[J]. 设备管理与维修, 2015(S2): 267-269.  
SUN Qiang. Application of high pressure water jet technology in water washing[J]. Plant maintenance engineering, 2015(S2): 267-269.
- [90] HUANG L, FOLKES J, KINNELL P, et al. Mechanisms of damage initiation in a titanium alloy subjected to water droplet impact during ultra-high pressure plain waterjet erosion[J]. Journal of materials processing technology, 2012, 212(9): 1906-1915.
- [91] 苗思忠. 前混合磨料射流清洗喷嘴内外流场的仿真研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.  
MIAO Si-zhong. The simulation of pre-mixed abrasive water jet cleaning nozzle of internal and external flow field[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2017.
- [92] 叶贤华. 高压磨料水射流清洗技术在内燃机车检修作业中的应用[J]. 内燃机车, 2002(8): 16-18.  
YE Xian-hua. Application of high pressure abrasive water jet cleaning technology in diesel locomotive maintenance[J]. Diesel locomotives, 2002(8): 16-18.
- [93] 陈玉凡. 工业管道的高压水射流清洗[J]. 化学清洗,

- 1999(2): 3-5.
- CHEN Yu-fan. High pressure water jet cleaning of industrial pipeline[J]. Chemical cleaning, 1999(2): 3-5.
- [94] 薛胜雄, 王乐勤, 王永强, 等. 高压水射流技术在石化设备清洗、除锈中的应用[J]. 流体机械, 2004(8): 28-30.
- XUE Sheng-xiong, WANG Le-qin, WANG Yong-qiang, et al. Application of high pressure water jet technology on cleaning and de-rusting for petroleum and chemical engineering equipment[J]. Fluid machinery, 2004(8): 28-30.
- [95] LINDAHL M, SVENSSON N, SVENSSON B H, et al. Industrial cleaning with clean water—A case study of printed circuit boards[J]. Journal of cleaner production, 2013, 47: 19-25.
- [96] KIKUCHI E, KIKUCHI Y, HIRAO M. Analysis of risk trade-off relationships between organic solvents and aqueous agents: case study of metal cleaning processes[J]. Journal of cleaner production, 2011, 19(5): 414-423.
- [97] 郭琦. 面向再制造的高压水射流清洗研究与应用[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- GUO Qi. The research and application of high-pressure waterjet cleaning based on remanufacturing[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [98] ZHANG Jian, JIA Xiu-jie, WANG Xing, et al. Research on matrix damage of high-pressure water jet cleaning[M]. Lancaster: Destech publications inc, 2016: 120-123.
- [99] 张成光, 张勇, 张飞虎, 等. 新型后混合式磨料水射流系统的研制[J]. 机械工程学报, 2015, 51(5): 205-212.
- ZHANG Cheng-guang, ZHANG Yong, ZHANG Fei-hu, et al. Development of new entrainment abrasive waterjet system[J]. Journal of mechanical engineering, 2015, 51(5): 205-212.
- [100] 戴敏, 张风友, 任喈. 高压水射流喷砂技术的除漆应用[J]. 清洗世界, 2006(12): 15-17.
- DAI Min, ZHANG Feng-you, REN Hao. The application of high-pressure water jetting with grit in sandblast lacquer removes[J]. Cleaning world, 2006(12): 15-17.
- [101] 贾卫. 某战斗机中某些零部件再制造的清洗工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- JIA Wei. The study of the remanufacturing cleaning technology for a fighter's parts[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [102] 张长鹏, 魏世丞, 王玉江, 等. 高压水射流清洗除锈技术的发展现状[J]. 材料保护, 2018, 51(10): 119-123.
- ZHANG Chang-peng, WEI Shi-cheng, WANG Yu-jiang, et al. Development and status of high-pressure water jet rust removal technology[J]. Materials protection, 2018, 51(10): 119-123.
- [103] AHMED Dewan Hasan, NASER Jamal, DEAM Rowan Thomas. Particles impact characteristics on cutting surface during the abrasive water jet machining: Numerical study[J]. Journal of materials processing technology, 2016, 232: 116-130.
- [104] DERIS A M, ZAIN A M, SALLEHUDDIN R. Hybrid GR-SVM for prediction of surface roughness in abrasive water jet machining[J]. Meccanica, 2013, 48(8): 1937-1945.
- [105] OSMAN A H, MABROUKI T, THERY B, et al. Experimental analysis of high-speed air-water jet flow in an abrasive water jet mixing tube[J]. Flow measurement and instrumentation, 2004, 15(1): 37-48.
- [106] 赵永赞, 高凤阳, 王春雷, 等. 基于后混合式磨料水射流切割机理的探讨[J]. 常熟高专学报, 2004(2): 50-53.
- ZHAO Yong-zan, GAO Feng-yang, WANG Chun-lei, et al. Experimental research on the mechanism of cutting materials with rear fixed abrasive efflux[J]. Journal of changshu college, 2004(2): 50-53.
- [107] 潘峥正, 万庆丰, 雷玉勇, 等. 基于后混合式磨料水射流磨料颗粒运动研究[J]. 机床与液压, 2014, 42(9): 109-112.
- PAN Zheng-zheng, WAN Qing-feng, LEI Yu-yong, et al. Research on motion of abrasive in post-mixed abrasive water jet[J]. Machine tool & hydraulics, 2014, 42(9): 109-112.
- [108] 刘增文, 黄传真, 朱洪涛. 高压磨料水射流加工中材料去除机理研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2010, 30(4): 21-24.
- LIU Zeng-wen, HUANG Chuan-zhen, ZHU Hong-tao. Mechanism of material removal by high pressure abrasive water-jet[J]. Diamond & abrasives engineering, 2010, 30(4): 21-24.
- [109] PAPINI M, SPELT J K. The plowing erosion of organic coatings by spherical particles[J]. Wear, 1998, 222(1): 38-48.
- [110] PAPINI M, SPELT J K. Organic coating removal by particle impact[J]. Wear, 1997, 213(1): 185-199.
- [111] 左继红, 刘丽丽. 货车车体磨料水射流除锈的研究[J]. 机械管理开发, 2014(4): 59-61.
- ZUO Ji-hong, LIU Li-li. Analysis on rust removal by abrasive water jet for trucks[J]. Mechanical management and development, 2014(4): 59-61.
- [112] ZHOU P F, ZHENG H Z, GUO S H, et al. Microstructure evolution and residual stress changes of the GH4169 alloy by wet shot peening[J]. Iop conference series: Materials science and engineering, 2019, 563: 22040.
- [113] DONG Ya-zhou, LIU Wei-wei, ZHANG Heng, et al. On-line recycling of abrasives in abrasive water jet cleaning[J]. Procedia cirp, 2014, 15: 278-282.
- [114] 董亚洲. 基于湿喷丸技术的漆层清洗机理及实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- DONG Ya-zhou. Mechanism and experiment study of paint layer cleaning based on abrasive water jet technology[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [115] ROOZE J, REBROV E V, SCHOUTEN J C, et al. Dissolved gas and ultrasonic cavitation—A review[J]. Ultrasonics sonochemistry, 2013, 20(1): 1-11.

- [116] MASON T J. Ultrasonic cleaning: An historical perspective[J]. *Ultrasonics sonochemistry*, 2016, 29: 519-523.
- [117] 宋明俐, 刘龙全, 王东. 工程机械再制造的绿色清洗技术[J]. *工程机械与维修*, 2015(2): 68-71.  
SONG Ming-li, LIU Long-quan, WANG Dong. Green cleaning technology of construction machinery remanufacturing[J]. *Construction machinery & maintenance*, 2015(2): 68-71.
- [118] 杨涛涛. 汽车发电机再制造清洗与修复关键技术研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.  
YANG Tao-tao. Study on the key technology of remanufacturing and cleaning of automobile generator[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2018.
- [119] 王照辉. 工程机械零件的清洗[J]. *工程机械与维修*, 2015(4): 96-97.  
WANG Zhao-hui. Cleaning of construction machinery parts[J]. *Construction machinery & maintenance*, 2015(4): 96-97.
- [120] YUSOF N S M, BABGI B, ALGHAMDI Y, et al. Physical and chemical effects of acoustic cavitation in selected ultrasonic cleaning applications[J]. *Ultrasonics sonochemistry*, 2016, 29: 568-576.
- [121] 程思拓. 超声波清洗的原理与实际应用[J]. *黑龙江科学*, 2015, 6(13): 104-105.  
CHENG Si-tuo. Principle and practical application of ultrasonic cleaning[J]. *Heilongjiang science*, 2015, 6(13): 104-105.
- [122] 康永, 郑莉, 邵世权. 超声波清洗技术研究进展[J]. *清洗世界*, 2012, 28(4): 12-16.  
KANG Yong, ZHENG Li, SHAO Shi-quan. Research progress of the ultrasonic cleaning technology[J]. *Cleaning world*, 2012, 28(4): 12-16.
- [123] 胡柏林, 宋守许, 王玉琳. 面向再制造的超声波清洗技术研究[J]. *机械科学与技术*, 2014, 33(1): 88-92.  
HU Bo-lin, SONG Shou-xu, WANG Yu-lin. Study on the ultrasonic cleaning technology for remanufacturing[J]. *Mechanical science and technology for aerospace engineering*, 2014, 33(1): 88-92.
- [124] 张倩, 于瑞东, 鲁彦志, 等. 盾构机再制造清洗技术概述[J]. *现代制造技术与装备*, 2019(10): 153-154.  
ZHANG Qian, YU Rui-dong, LU Yan-zhi, et al. Summary of the cleaning technology in shield machine remanufacturing[J]. *Modern manufacturing technology and equipment*, 2019(10): 153-154.
- [125] NIEMCZEWSKI B. Cavitation intensity of water under practical ultrasonic cleaning conditions[J]. *Ultrasonics sonochemistry*, 2014, 21(1): 354-359.
- [126] 李雅莉. 超声波清洗的原理和实际应用[J]. *清洗世界*, 2006, 22(7): 31-35.  
LI Ya-li. Ultrasonic cleaning principle and application [J]. *Cleaning world*, 2006, 22(7): 31-35.
- [127] 王磊, 惠瑜, 高超群, 等. 超临界二氧化碳(SCCO<sub>2</sub>)无损清洗[J]. *微纳电子技术*, 2010, 47(2): 65-70.  
WANG Lei, HUI Yu, GAO Chao-qun, et al. Damage-free cleaning technology with supercritical CO<sub>2</sub>[J]. *Micronano-electronic technology*, 2010, 47(2): 65-70.
- [128] 钟宏, 梁瑾. 超临界流体技术的应用[J]. *精细化工中间体*, 2006(1): 11-13.  
ZHONG Hong, LIANG Cui. Supercritical fluid technology and its applications[J]. *Fine chemical intermediates*, 2006(1): 11-13.
- [129] GUAN Y C, NG G K L, ZHENG H Y, et al. Laser surface cleaning of carbonaceous deposits on diesel engine piston[J]. *Applied surface science*, 2013, 270: 526-530.
- [130] 杨俊兰, 马一太, 曾宪阳, 等. 超临界压力下 CO<sub>2</sub> 流体的性质研究[J]. *流体机械*, 2008(1): 53-57.  
YANG Jun-lan, MA Yi-tai, ZENG Xian-yang, et al. Study on the properties of CO<sub>2</sub> fluid at supercritical pressure[J]. *Fluid machinery*, 2008(1): 53-57.
- [131] LIU Wei-wei, ZHANG Bin, LI Yan-zeng, et al. An environmentally friendly approach for contaminants removal using supercritical CO<sub>2</sub> for remanufacturing industry[J]. *Applied surface science*, 2014, 292: 142-148.
- [132] 李志义, 刘学武, 张晓冬, 等. 超临界流体精密清洗[J]. *机械制造*, 2004(3): 53-54.  
LI Zhi-yi, LIU Xue-wu, ZHANG Xiao-dong, et al. Supercritical fluid precision cleaning [J]. *Machinery*, 2004(3): 53-54.
- [133] 李冬旭. 超临界二氧化碳辅助清漆喷涂过程基础研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.  
LI Dong-xu. Basic research of supercritical carbon dioxide assisted varnish spraying process[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [134] LIU Wei-wei, LI Ming-zheng, SHORT Tim, et al. Supercritical carbon dioxide cleaning of metal parts for remanufacturing industry[J]. *Journal of cleaner production*, 2015, 93: 339-346.
- [135] 余跃, 刘伟崑, 王新, 等. 基于 FLUENT 的超临界二氧化碳清洗釜流场模拟及试验验证[J]. *内燃机与配件*, 2018(3): 131-133.  
YU Yue, LIU Wei-wei, WANG Xin, et al. Flow field simulation of supercritical carbon dioxide extractor based on fluent and experimental verification[J]. *Internal combustion engine & parts*, 2018(3): 131-133.
- [136] 程友良, 蒋衍, 薛占璞, 等. 超临界二氧化碳清洗民用化设计[J]. *清洗世界*, 2017, 33(2): 39-44.  
CHENG You-liang, JIANG Yan, XUE Zhan-pu, et al. Research on the design of the civil use of supercritical carbon dioxide cleaning technology[J]. *Cleaning world*, 2017, 33(2): 39-44.