

## 表面质量控制及检测

## 基于熔盐超声复合的除漆技术研究及工艺优化

张保财<sup>1</sup>, 孙一航<sup>1</sup>, 贾秀杰<sup>1</sup>, 李方义<sup>1</sup>,杨明斌<sup>1</sup>, 辛本礼<sup>1</sup>, 王兴<sup>1</sup>, 王光存<sup>2</sup>

(1.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(山东大学), 济南 250061;

2.江苏徐工工程机械研究院有限公司, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** **目的** 针对再制造端盖表面厚重油漆的去除难题, 研究基于熔盐超声复合清洗的除漆技术。**方法** 采用 SEM 电镜和红外光谱分析仪观察分析油漆的微观形貌和组成成分, 结合熔盐、超声去除规律, 揭示复合清洗机理, 并在此基础上开展复合清洗试验。通过中心复合试验法, 以复合清洗周期作为评判指标, 拟合试验数据构建清洗周期的回归方程和响应曲面模型, 利用 Minitab 对清洗温度和超声功率两工艺参数进行最优化分析, 并设置实验验证。**结果** 油漆内部呈明显的分层结构, 其主要成分为含酯基、环氧基和芳香类化合物的有机物, 复合清洗机理为热膨胀、化学、表面张力和超声空化效应的作用。基于上述结果进行的试验表明, 随清洗温度和超声功率的提高, 清洗场内化学反应速率提高, 超声空化效果显著, 复合清洗能力增强, 复合清洗周期最短为 4.5 min。最优清洗参数为: 温度 335 ℃, 超声功率 1440 W。利用最优参数清洗后, 表面污染物残余量为 0.2 mg, 硬度和抗拉强度的变化率分别为 0.83% 和 1.68%, 符合再制造标准。**结论** 熔盐超声复合清洗处理通过选取合适的工艺参数, 可有效去除污染物, 清洗效果以及机械性能符合再制造要求。

**关键词:** 再制造; 复合清洗机理; 熔盐超声复合清洗; 中心复合试验; 最优化参数

**中图分类号:** TG663 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)08-0280-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.08.039

## De-painting Technology Based on Ultrasonic Compounding of Molten Salt and Technology Optimization

ZHANG Bao-cai<sup>1</sup>, SUN Yi-hang<sup>1</sup>, JIA Xiu-jie<sup>1</sup>, LI Fang-yi<sup>1</sup>, YANG Ming-bin<sup>1</sup>,  
XIN Ben-li<sup>1</sup>, WANG Xing<sup>1</sup>, WANG Guang-cun<sup>2</sup>

(1.a. Mechanical Engineering School, b. National Demonstration Center for Experimental Mechanical Engineering Education(Shandong University), Shandong University, Jinan 250061, China; 2.XCMG Research Institute, Xuzhou 221116, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study a de-painting technology based on ultrasonic compounding of molten salt, so as to remove thick paint on remanufactured end caps. Firstly, microstructure and composition of the paint were analyzed by SEM and FTIR. Composite cleaning mechanism was revealed by combining the laws of molten salt removal and ultrasound removal. Then, on this basis, a composite cleaning test was carried out. In the method of central composite test, with composite cleaning cycle as evaluation index, test data was fitted to establish regression equation and response surface model, and Minitab was used for optimal analysis of such process parameters as cleaning temperature and ultrasonic power, and experimental verification was

收稿日期: 2018-04-23; 修订日期: 2018-06-23

Received: 2018-04-23; Revised: 2018-06-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375278); 企事业单位委托项目(11381704)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51375278), Enterprise Commissioned Project(11381704)

作者简介: 张保财(1994—), 男, 硕士研究生, 从事熔盐清洗和熔盐超声复合清洗方向的研究。

Biography: ZHANG Bao-cai(1994—), Male, Master, Research focus: molten salt cleaning and molten salt ultrasonic cleaning.

通讯作者: 贾秀杰(1963—), 男, 博士, 副教授, 主要从事绿色制造与再制造的研究。

Corresponding author: JIA Xiu-jie(1963—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: green manufacturing and remanufacturing.

set up. A clear layered structure was obtained inside the paint, and its main ingredients were organic compounds including ester groups, epoxy groups and aromatic compounds. Besides, composite cleaning mechanism was effect of thermal expansion, chemical, surface tension and ultrasonic cavitation. With the increase of cleaning temperature and ultrasonic power, chemical reaction rate in the cleaning field was increased, ultrasonic cavitation effect was intensified, and composite cleaning capability was enhanced. The shortest cleaning cycle was 4.5 min, optimal cleaning parameters were: temperature 335 °C and ultrasonic power 1440 W. Residual volume of surface contaminant was 0.2 mg after cleaning, and changing rate of hardness and tensile strength was 0.83%, 1.68%, respectively. These all meet remanufacturing standards. Ultrasonic cleaning of molten salt can effectively remove contaminants by selecting suitable process parameters, and cleaning effect and mechanical properties meet remanufacturing standards.

**KEY WORDS:** remanufacturing; composite cleaning mechanism; ultrasonic cleaning of molten salt; central composite test; optimal parameters

工程装备上使用的钢铁结构通常需要使用表面喷涂等技术手段进行防腐蚀处理,防止因氧化腐蚀造成金属机械性能的破坏<sup>[1-2]</sup>。为实现退役工程装备重要零部件的绿色循环利用,通常对其进行再制造处理,而再制造处理的首要环节是通过再制造清洗技术去除零部件表面涂层。若去除不彻底,将直接影响再制造零部件的后续检测和修复等环节<sup>[3-4]</sup>。再制造端盖表面污物主要为油漆和氧化层<sup>[5]</sup>,其中油漆的去除最关键,会直接影响表面缺陷的发现,并且端盖表面油漆附着力强,去除难度大<sup>[6]</sup>。目前,油漆去除的方式主要为热能分解处理、喷丸处理和高压水射流处理<sup>[7]</sup>。热能分解处理使用高温燃烧的方式去除油漆,其耗能高,效率低,分解出的有害物质会对环境造成严重污染。喷丸处理利用小颗粒喷丸冲击零件表面,从而去除油漆,处理过程噪声大,产生大量粉尘。高压水射流清洗采用高压水冲击的方式去除油漆,用水量,并且会在水中添加防锈剂等成分,增加水处理成本<sup>[8]</sup>。而盐浴清洗具有流动性好<sup>[9]</sup>、无噪声产生、对表面质量无影响的特点,高温下熔盐与污物发生快速反应,并能吸收反应产生的有害气体。超声清洗利用超声空化效应使漆层与基体分离,具有能耗低、清洗时间短、不受产品形状限制的优势<sup>[10]</sup>。

目前在盐浴清洗和超声清洗领域已有大量研究成果。Webster、Falter 和 Shoemaker<sup>[11]</sup>发明了适用性较强的熔盐配方,其中金属氢氧化物与碱金属硝酸盐的质量分数之比为(1.5~3):1,并混入少量氯离子,该配方可去除金属表面的污染物。Long Y<sup>[12]</sup>针对涡轮增压器中心架表面污物,使用中心复合试验法,变化清洗温度和硝酸钠比例,建立了清洗周期的回归方程和响应面模型,定量描述了不同清洗温度和硝酸钠比例下清洗周期的变化规律,并研究说明了 $\omega(\text{NaNO}_3): \omega(\text{NaOH})=1:1$ 、清洗温度为 482 °C 的清洗参数未对铸铁和碳钢产生不利影响。聂延艳<sup>[13]</sup>提出了熔盐去除发动机气门杆积碳的主要机制为热冲击、表面张力和化学反应等作用,使用周期模型和 2 min 净洗力探究了不同熔盐配方的去除效果,确定了熔盐清洗积碳的最佳工艺参数:NaOH 质量分数为 30%,温度 330~360 °C,

$\text{NaNO}_2$  质量分数在 40%以上。秦顺顺<sup>[14]</sup>使用 COMSOL Multiphysics 软件建立了超声清洗的二维和三维模型,模拟不同频率下的清洗效果,并建立了声-固耦合模型,确定了适用于再制造发动机零部件的超声振子频率为 28 kHz,依据特征频率和基于三维声压级的分析结果,确定了三角形非对称分布的振子排布设计方案,进一步提高了声场分布的均匀性。周峰<sup>[15]</sup>分析了针对高压共轨泵泵体清洗的超声清洗工艺,通过对声源振动下各质点的运动方程进行求导分析,得出了超声清洗泵体的作用机理,并分析了声学参数和非声学参数对清洗效果的影响。综上所述,当前国内外学者已对盐浴清洗技术和超声清洗技术清洗机理的揭示及相关工艺参数的确定做了大量研究,形成了完备的工艺体系,但目前尚未结合两种清洗技术的优势展开相关研究,缺乏对复合清洗去除机理的研究和复合清洗工艺参数的优化。

本文结合盐浴清洗和超声清洗的优势,针对再制造端盖表面厚重油漆的去除难题,采用熔盐超声复合清洗技术进行清洗研究。首先通过分析端盖油漆的 SEM 图像和红外光谱,得到了油漆内部明显的分层结构,确定了油漆的主要成分为含酯基、环氧基和芳香类化合物的有机物,其次结合熔盐、超声去除规律,揭示了复合清洗机理,并在此基础上开展了复合清洗实验。通过中心复合试验法,以复合清洗周期作为评判指标,拟合试验数据构建复合清洗周期的回归方程和响应曲面模型,利用 Minitab 对温度和超声功率进行最优化分析,并设置实验验证清洗效果和机械性能,为熔盐超声复合清洗技术在再制造清洗领域的应用提供理论支持。

## 1 油漆理化性质及复合清洗机理

### 1.1 微观形貌分析

本试验清洗对象为徐工集团服役期满的液压端盖件,材料为 HT300,样件表面油漆采用特殊工艺喷涂,漆层紧实致密。使用 SEM 电子显微镜观察 500 倍放大倍数下的油漆剖面形貌,油漆呈现明显的分层

结构,漆层总厚度约为 102  $\mu\text{m}$ ,如图 1a 所示。进一步放大到 1000 倍,如图 1b 所示,发现面漆与底漆显示出明显的结构差异,面漆结构紧实、平整;底漆以长条状颗粒居多,尺寸明显大于面漆中的颗粒,并有大量孔洞,表面凹凸不平。

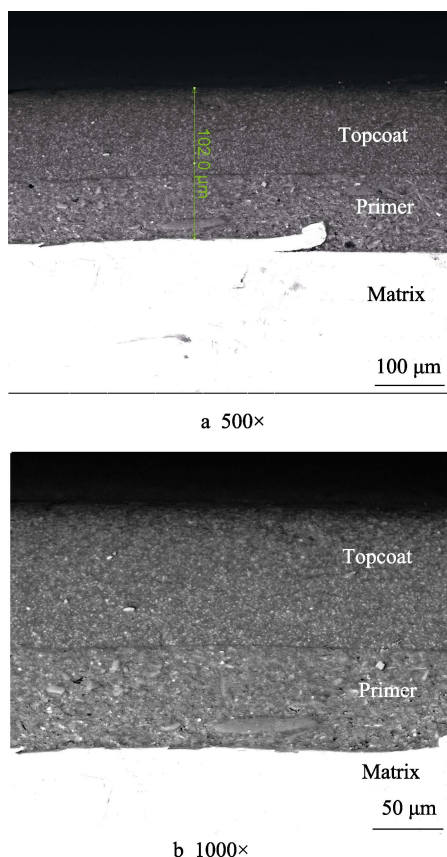


图 1 油漆剖面微观形貌图  
Fig.1 Microstructure of paint profile

## 1.2 油漆元素分析

通过表 1 可知,油漆中的元素种类较多,但含量不均匀。C、O 元素在油漆组分中所占的比重最大,高达 81.01%,这说明油漆的主要成分为有机物。除了 C、O 元素外,油漆中还含有 10%左右的 Al、Ti、Cr、Fe 等金属元素,这主要来源于油漆中的防腐抗蚀等添加剂;Pb 元素则来源于油漆中的着色剂,而少量的 Si 元素是由于油漆中掺杂了灰尘颗粒。

表 1 油漆所含元素及含量

Tab.1 Elements and mass percent of the paint

Elements	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
Atomic fraction/%	74.00	22.22	0.21	0.34	1.52	0.82	0.14	0.74

## 1.3 光谱分析

使用傅里叶红外光谱分析仪分别对底漆与面漆进行测量,测量结果如图 2 所示。由图 2a 可知,1725  $\text{cm}^{-1}$  和 1687  $\text{cm}^{-1}$  的波峰表明面漆含有酯基 ( $-\text{COO}-$ ),

可利用碱性清洗环境促使 C—O 单键断裂,实现面漆分解剥落。1074  $\text{cm}^{-1}$  处的波峰说明面漆中含有 C—N 单键,763  $\text{cm}^{-1}$  和 700  $\text{cm}^{-1}$  处的波峰表明面漆中含有芳香族化合物。

由图 2b 可知,底漆在 912  $\text{cm}^{-1}$  和 828  $\text{cm}^{-1}$  附近出现吸收峰,表明底漆中含有环氧基结构,可能为环氧树脂类漆。1447  $\text{cm}^{-1}$  和 1508  $\text{cm}^{-1}$  表明底漆可能含有苯环,而 1040  $\text{cm}^{-1}$ 、1017  $\text{cm}^{-1}$  处的波峰是芳香族醚类和酯类化合物的特征峰,从而证明了底漆中含有苯环结构。

综上所述,油漆的主要组分为有机物,含酯基、环氧基和芳香类化合物,以机械结合的方式附着于基体表面,面漆结构紧实平整,底漆颗粒大,附着力强,去除油漆的关键在于油漆内有机物的分解、剥离。

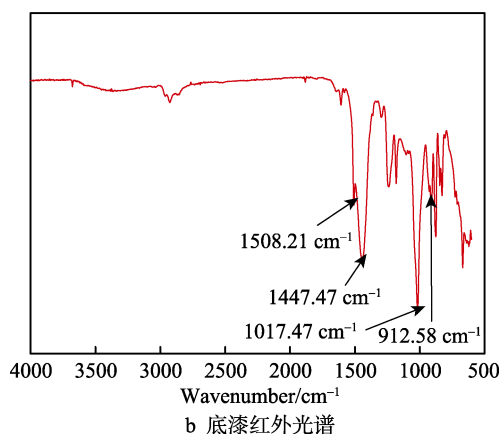
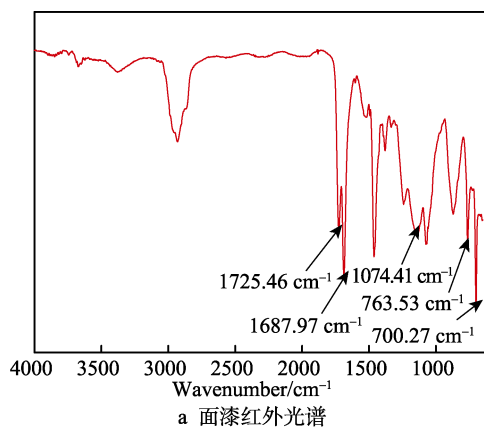


图 2 漆膜红外光谱

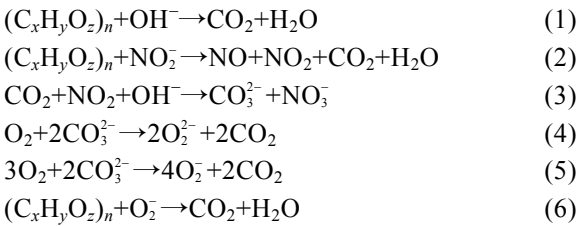
Fig.2 Infrared spectrum of finish paint (a) infrared spectrum of topcoat (b) infrared spectrum of primer

## 1.4 复合清洗机理

针对油漆污染物的理化性质,结合熔盐清洗和超声清洗的机理研究,该复合清洗技术的清洗机理如下:

1) 热膨胀作用。熔盐清洗场内的温度很高,金属基体与油漆污物的热膨胀系数不同,在 20~400  $^{\circ}\text{C}$  时,钢的膨胀系数为  $(12.9\sim13.9)\times10^{-6}$ ,油漆主要组分为有机物,其膨胀系数远大于钢<sup>[16]</sup>,两者受热膨胀程度的差异造成油漆在工作温度下隆起和剥离。

2) 化学作用。熔盐系统内部存在大量  $\text{OH}^-$ ，易与有机物发生分解反应，且  $\text{NaNO}_2$  中的  $\text{NO}_2^-$  兼备氧化性与还原性，与有机物发生氧化还原反应，产生  $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$  和  $\text{CO}_2$  等气体，部分气体与  $\text{OH}^-$  反应生成  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ ，部分气体逸出。同时  $\text{O}_2$  在  $\text{CO}_3^{2-}$  的催化作用下产生具有超强氧化性的超氧根离子  $\text{O}_2^-$ ，与漆层内部的有机污染物发生剧烈氧化反应，进一步分解油漆污染物，造成油漆内部疏松，降低油漆附着力，易于油漆与基体剥离，其反应方程式如下所示<sup>[17-19]</sup>。



3) 表面张力作用。清洗场内的高温环境使熔盐获得更小的表面张力，易与油漆表面结合、浸润，并且化学反应发生在油漆-熔盐界面，更小的表面张力

会加快分子交换速率<sup>[20]</sup>，加速  $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{O}_2^-$ 、 $\text{OH}^-$  与油漆的化学反应，反应产生的  $\text{CO}_2$  等气体逸出，在漆层内部产生膨胀力，增加微裂纹数量。由于熔盐表面张力小，渗透作用显著，在油漆内部发生反应，加速漆层的剥离、脱落。

4) 超声空化效应。超声设备在熔盐场中产生超声空化效应，通过稳态空化产生的微冲流和瞬态空化产生的局部高压以及强冲击波，造成油漆表面裂纹向内部扩展，促使化学反应过程向漆层内部推进，增强反应效果，加速漆层与基体剥离、脱落<sup>[21]</sup>。另一方面超声空化效应加快熔盐流动，使熔盐场内各部分温度、离子浓度趋于一致，熔盐-油漆界面消耗的  $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{O}_2^-$  和  $\text{OH}^-$  得到补充，维持化学反应高速进行，并且空化产生的振荡作用使脱落的污染物向四周运动，阻止污染物落入清洗表面而降低反应速率。

综合热膨胀、化学、表面张力和超声空化作用，结合油漆典型分层结构和组成成分，建立油漆去除模型，如图 3 所示。

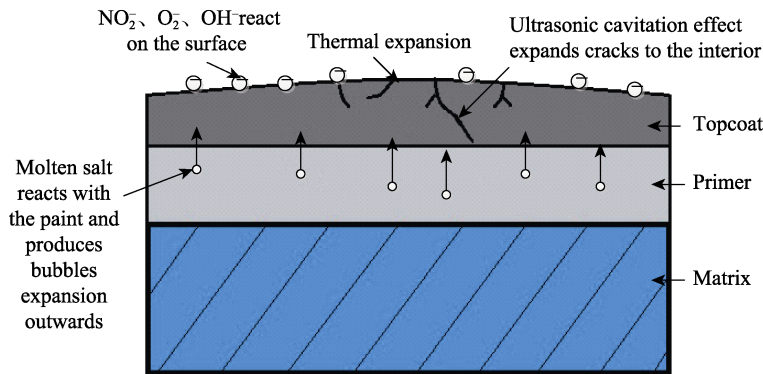


图 3 油漆去除模型  
Fig.3 Paint removal model

## 2 熔盐超声复合清洗试验

通过对油漆微观形貌、理化性质以及复合清洗机理的分析，得到端盖表面油漆去除的关键工艺参数为清洗温度和超声功率。依据前期针对熔盐配方的优化研究，综合熔盐融化温度、清洗效果以及黏度，确定除漆熔盐配方为： $\text{NaOH}$  的质量分数为 30%， $\text{NaNO}_3 : \text{KNO}_3 : \text{NaNO}_2 = 5 : 4 : 1$ <sup>[22-23]</sup>（质量分数之比，所用熔盐均为分析纯，国药集团化学试剂有限公司生产）。

### 2.1 试验设备

试验设备采用徐工集团自制的熔盐超声复合清洗试验机，复合清洗机设置双清洗槽，包括超声熔盐复合清洗槽和超声水洗槽。复合清洗机由电子控制柜控制超声功率和清洗温度，超声频率固定为 28 kHz，超声阵子数量 24 个，功率调节范围为 0~1440 W，清洗温度范围为 0~500 ℃，超声阵子对称排列在清洗槽前后表面。

### 2.2 试验方法

本次复合清洗试验采用中心复合试验方法，拟对清洗温度和超声功率两工艺参数进行优化分析。根据试验设备参数及文献，确定清洗温度范围为 270~340 ℃，超声功率范围为 1000~1440 W，试验的因素及水平如表 2 所示。根据 Minitab 所设置的 13 组试验参数，将端盖均分成 13 份，并对样件分别进行编号。将按配方配制的熔盐放入超声熔盐复合清洗槽中，加热使熔盐充分融化。根据试验要求设置清洗参数，将各组样件分别放入清洗槽中进行清洗，从样件放入时开始计时，观察到清洗过程中有气泡产生及漆层碎片脱落的现象，当反应现象停止时，清洗结束，记录结束时间。各实验组样件空冷后，进行超声水洗 1.5 min，干燥，观察样件表面情况。

表 2 试验因子水平表  
Tab.2 Test factors and levels

Element	Low	High
Temperature $\theta/^\circ\text{C}$	270	340
Ultrasonic power $P/\text{W}$	1000	1440



## 2.3 试验结果

根据上述试验过程得到各清洗参数下的复合清洗周期  $t$ ，如表 3 所示。

表 3 各清洗参数下清洗周期

Tab.3 Cleaning cycle under different cleaning parameters

Number	Temperature $\theta/^\circ\text{C}$	Ultrasonic power $P/\text{W}$	Cleaning cycle $t/\text{min}$
1	329.749	1375.56	5
2	305.000	1220.00	8
3	280.251	1375.56	16.25
4	305.000	1220.00	8.5
5	340.000	1220.00	5
6	305.000	1220.00	8.5
7	280.251	1064.44	25.5
8	305.000	1220.00	8.5
9	270.000	1220.00	26
10	305.000	1440.00	7.75
11	305.000	1220.00	8.5
12	305.000	1000.00	9.5
13	329.749	1064.44	5.5

### 2.3.1 回归分析

创建预测清洗周期的二次回归模型，描述不同清洗温度和超声功率下的完全清洗时间。对相应的清洗周期、清洗温度和超声功率进行编码分析，列出使用已编码单位估计的回归系数，如表 4 所示。

由表 4 可知，清洗温度、超声功率、清洗温度 $\times$ 清洗温度主效应对应的  $P$  值均小于 0.05，影响显著；超声功率 $\times$ 超声功率和清洗温度 $\times$ 超声功率的  $P$  值均大于 0.05，影响不显著，应在二次回归模型中去除该项。

经方差分析，两个决定系数  $R-S_q$ 、 $R-S_q$ （调整）分别为 99.35%和 99.08%，二者差距较小且均接近于 1，回归性很高，表明清洗周期模型良好；决定系数  $R-S_q$ 、 $R-S_q$ （预测）分别为 99.08%和 95.59%，相差不大，说明大部分点都符合回归模型，失拟项  $P$  值为 0.181，大于 0.05，表明回归方程并未因去除其中两项而发生失拟。

图 4 残差图表明，清洗周期残差符合正态分布，保持等方差性，样件清洗周期残差无异常。经过模型调整、方差分析以及残差诊断，可得样件清洗周期回归方程，见公式（7）。

表 4 各清洗参数下清洗周期的估计回归系数

Tab.4 Estimated regression coefficients for cleaning cycles under different cleaning parameters

Item	Coefficient	Standard error	$\theta$	$P$
Constant	8.600	0.114	75.13	0.000
Temperature	-6.006	0.221	-27.12	0.000
Ultrasonic power	-0.589	0.126	-4.67	0.005
Temperature $\times$ Temperature	2.547	0.195	13.04	0.000
Ultrasonic power $\times$ Ultrasonic power	0.063	0.101	0.62	0.562
Temperature $\times$ Ultrasonic power	0.435	0.218	2.00	0.102

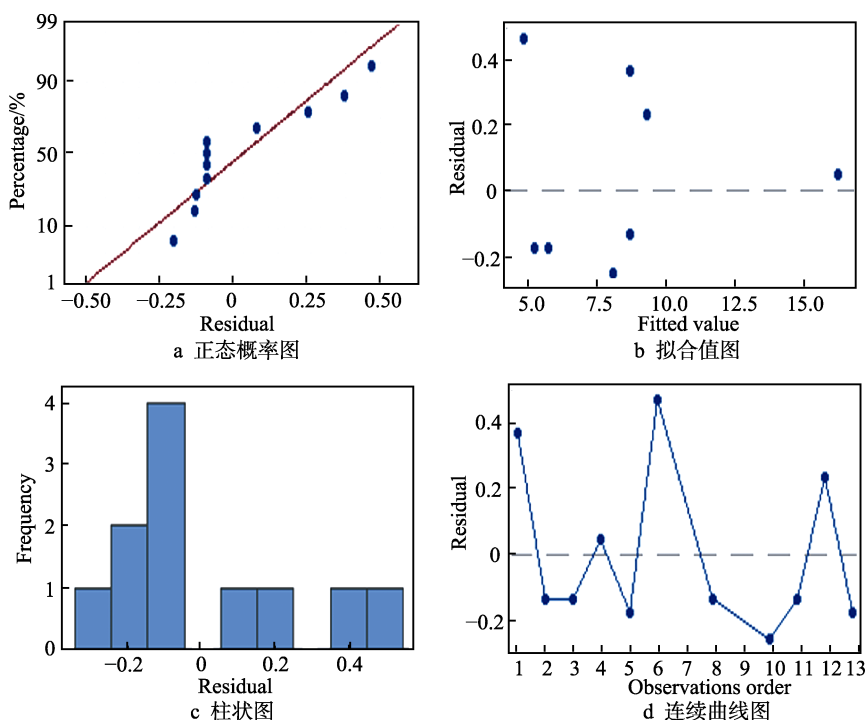


图 4 样件清洗周期残差图

Fig.4 Residual plots of cleansing cycle: (a) normal probability plot, (b) fitted value, (c) histogram, (d) sequence

$$CT=432.7-2.527x-0.002866y+0.003765x^2+\xi \quad (7)$$

式中：CT 为清洗周期； $x$  为清洗温度； $y$  为超声功率； $\xi$  代表误差。

2.3.2 响应面及等值线图分析

使用 Minitab 软件生成响应曲面图和等值线图，如图 5—6 所示。图 5 表明，随清洗温度和超声功率的提高，复合清洗周期缩短，复合清洗效率加快。图 6 中右上角深蓝色区域显示良好的清洗能力，清洗周期小于 5 min。综合图 5 和图 6 可明显看出，清洗温度越高，超声功率越大，清洗周期越短，复合清洗越快，与试验结果一致。

利用 Minitab 中的响应变量优化器得到清洗周期

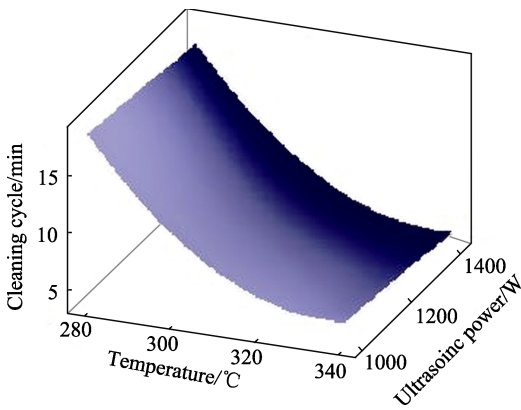


图 5 清洗温度与超声功率对复合清洗周期的影响曲面图  
Fig.5 3D graphs indicating effects of cleaning temperature and ultrasound power on composite cleaning cycle

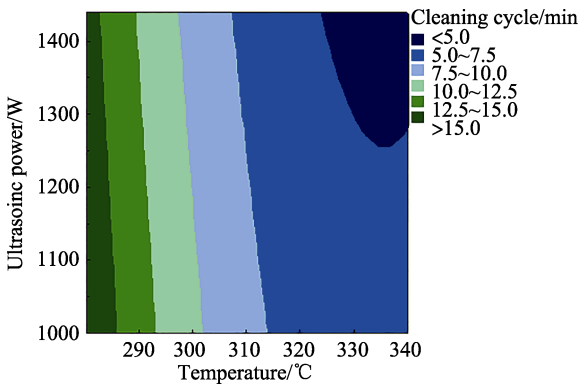


图 6 清洗温度和超声功率对清洗周期的影响等值线图  
Fig.6 Contour plot indicating effects of cleaning temperature and ultrasound power on cleaning cycle

的最优化参数：清洗温度 335 ℃，超声功率 1440 W。此时，最优值可达到 4.4685 min，合意度  $d$  为 1.0000。

2.4 最优参数验证

根据最优参数，设置复合试验对验证组端盖样件进行清洗，设置清洗温度 335 ℃，超声功率 1440 W，结果显示 4.5 min 时，试验样件被清洗干净，表面油漆被完全去除，如图 7 所示。经过企业标准检测设备检测，清洗后污染物残余量为 0.2 mg，低于再制造生产要求的 0.5 mg，符合生产标准。



图 7 最优参数清洗前后的工件  
Fig.7 Specimens before and after cleaning under optimal parameters: (a) before cleaning, (b) after cleaning

综上所述，本次熔盐超声复合清洗油漆试验的最优工艺参数为：温度 335 ℃，超声功率 1440 W（清洗机最大值）。

2.5 基体机械性能验证

由于端盖在清洗过程中会受到高温热冲击以及熔盐腐蚀的影响，故需验证样件清洗后的机械性能是否满足再制造使用要求。性能试验样件的材料选用与端盖材料一致的 HT300，并使用最优参数对试验组清洗 4 min，清洗后，使用数显洛氏硬度计和 WDW-50E 型电子式万能试验机分别测量对照组和试验组的硬度和抗拉强度。表 5 中试样测试结果显示，清洗前后硬度和抗拉强度的变化率在 5%以内，满足再制造使用要求。

表 5 试验样件硬度和抗拉强度  
Tab.5 Hardness and tensile strength of each specimen

Items	Test group	Control group	Change percentage
Hardness (Five readings' mean)	35.7HRB	36.1HRB	0.83%
Tensile strength	305.425 MPa	310.648 MPa	1.68%

### 3 试验分析

#### 3.1 温度

复合清洗温度为 330 ℃左右, 由于高温环境下端盖与油漆的热膨胀系数不同, 在 20~400 ℃时, 端盖的膨胀系数与钢相近, 约为 $(12.9\sim13.9)\times10^{-6}$ , 主要原因是有机油漆的膨胀系数远远大于端盖, 两者热膨胀程度的差异, 造成油漆在工作温度下隆起、剥离。油漆-熔盐界面处的反应剧烈, 可明显观察到界面处油漆脱落的情况, 这是由于 330 ℃左右的高温使熔盐表面张力变小, 黏度低, 易与油漆表面结合、浸润, 加速油漆-熔盐界面处化学反应的进行。

由于油漆的主要成分为有机物, 极易与  $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{OH}^-$  在高温下发生化学反应, 而 330 ℃左右的高温提供了化学反应所需的活化能, 并且使无机盐分子电离出大量  $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{OH}^-$ , 油漆被迅速分解去除, 同时熔盐系统内的  $\text{O}_2$  在 330 ℃的高温环境和  $\text{CO}_3^{2-}$  的催化作用下, 产生具有超强氧化性的  $\text{O}_2^-$ , 与油漆发生剧烈氧化反应, 清洗过程中可明显观察到火花产生。因此复合清洗的温度越高, 导致熔盐清洗的热膨胀作用越强, 熔盐表面张力越小, 同时使熔盐中的化学反应越易进行, 最终缩短复合清洗周期。

#### 3.2 超声

超声振子高频振荡产生超声波, 使熔盐内部发生超声空化效应, 通过稳态空化在清洗场内产生的微冲流和瞬态空化产生的局部高压以及强冲击波, 造成油漆表面裂纹向内部扩展, 加速漆层与基体剥离、脱落。

随着声场中超声功率的提高, 声压值迅速增强。一方面, 导致清洗场内强冲击波和微冲流所致的裂纹扩展效果增强, 熔盐渗透效果增强, 油漆剥离效果显著; 另一方面, 由于微冲流和局部高压的作用, 清洗场内熔盐快速流动, 出现明显声波状流动现象, 熔盐-油漆界面消耗的  $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{O}_2^-$ 、 $\text{OH}^-$  得到迅速补充, 维持化学反应高速进行。因此复合清洗的超声功率越高, 裂纹扩展效果越强, 越易使熔盐渗透其中, 同时熔盐-油漆界面的离子补充速率增强, 化学反应高速进行, 最终缩短复合清洗周期。

### 4 结论

1) 熔盐超声复合清洗技术作为除漆技术的一种, 具有清洗周期短、无噪声、除漆效果好的优点。通过研究油漆的理化性质和表面形貌, 确定了油漆的主要成分为含酯基、环氧基和芳香烃类化合物的有机物, 并从热膨胀作用、氧化分解作用、表面张力作用、超声空化效应, 揭示了复合清洗机理, 建立了油漆去除模型。

2) 针对熔盐超声复合清洗的关键工艺参数——

清洗温度和超声功率进行优化研究, 建立了复合清洗周期的回归方程和响应曲面模型, 得出了清洗温度和超声功率的变化对复合清洗周期的影响, 确定了熔盐超声复合清洗技术在最优工艺参数(清洗温度 335 ℃, 超声功率 1440 W)下, 复合清洗周期最短, 为 4.5 min。

3) 本次复合试验的最优参数仅针对再制造端盖表面油漆的去除过程。针对不同材料以及污染物类型的再制造产品, 需根据实际情况确定适合该产品的熔盐配方和最佳工艺参数, 以保证清洗效果和清洗后的机械性能符合再制造清洗标准。

#### 参考文献:

- [1] TEIMOURIAN H, SHABGARD M R, MOMBER A W. De-painting with high-speed water jets: paint removal process and substrate surface roughness[J]. Progress in organic coatings, 2010, 69(4): 455-462.
- [2] 张鑫. 耐高温防腐涂料的研究进展[J]. 上海涂料, 2006, 44(8): 13-16.  
ZHANG Xin. Research progress of high temperature resistant anti-corrosive coatings on metal surface[J]. Shanghai coatings, 2006, 44(8): 13-16.
- [3] 徐滨士. 工程机械再制造及其关键技术[J]. 工程机械, 2009, 40(8): 1-7.  
XU Bin-shi. Remanufacturing of construction machinery and its key technologies[J]. Construction machinery and equipment, 2009, 40(8): 1-7.
- [4] 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.
- [5] 刘师巍. 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.
- [6] 徐滨士, 刘世参, 史佩京, 等. 汽车发动机再制造效益分析及对循环经济贡献研究[J]. 中国表面工程, 2005, 70(1): 1-7.  
XU Bin-shi, LIU Shi-can, SHI Pei-jing, et al. Study on the contribution of engine remanufacturing to the recycle economy[J]. China surface engineering, 2005, 70(1): 1-7.
- [7] HE B, TIAN X J, CHENG X, et al. Effect of weld repair on microstructure and mechanical properties of laser additive manufactured Ti-55511 alloy[J]. Materials & design, 2017, 119: 437-445.
- [8] 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): 77-78.  
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): 77-78.
- [9] 郭琦, 李方义, 葛顺鑫, 等.  $\text{KNO}_3\text{-NaNO}_2$  二元熔盐体系的表面张力及黏度研究[J]. 功能材料, 2014, 45(13): 13036-13039.
- GUO Qi, LI Fang-yi, GE Shun-xin, et al. The study of surface tension and viscosity on mixed molten salt of  $\text{KNO}_3\text{-NaNO}_2$ [J]. Function materials, 2014, 45(13): 13036-13039.
- [10] 陈思忠. 超声波清洗技术与进展[J]. 洗净技术, 2004(2): 7-12.
- CHEN Si-zhong. Ultrasonic cleaning technology and it's development[J]. Cleaning technology, 2004(2): 7-12.
- [11] WEBSTER H G, FALTER C L. Process of cleaning metal surfaces and compositions: United States, US 2458661 A [P]. 1949-01-11.
- [12] LONG Y, LI J, TIMMER D H, et al. Modeling and optimization of the molten salt cleaning process[J]. Journal of cleaner production, 2014, 68: 243-251.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 周峰, 吴欲龙, 张宝田, 等. 转子泵体超声波清洗质量的理论研究[J]. 汽车工艺与材料, 2018(1): 12-16.
- ZHOU Feng, WU Yu-long, ZHANG Bao-tian, et al. Theoretical study on ultrasonic cleaning quality of rotor pump[J]. Automobile technology & material, 2018(1): 12-16.
- [16] 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. Coating thermal expansion coefficient and adhesion[J]. Shanghai coatings, 2006, 44(1): 39-42.
- [17] 姚帅帅, 贾秀杰, 王兴, 等. 面向再制造熔盐清洗积碳机理研究及工艺优化[J]. 功能材料, 2015(18): 18121-18128.
- YAO Shai-shuai, JIA Xiu-jie, WANG Xing, et al. Mechanism research and process optimization about molten salt cleaning carbon deposition of remanufacturing parts[J]. Function materials, 2015(18): 18121-18128.
- [18] 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.
- [19] VOLKOVICH V A, GRIFFITHS T R, FRAY D J, et al. A new method for determining oxygen solubility in molten carbonates and carbonate-chloride mixtures using the oxidation of  $\text{UO}_2$  to uranate reaction[J]. Journal of nuclear materials, 2000, 282(2-3): 152-158.
- [20] 姚帅帅, 贾秀杰, 王兴, 等. 发动机气门积碳的熔盐清洗工艺[J]. 中国表面工程, 2015, 28(4): 121-126.
- YAO Shuai-shuai, JIA Xiu-jie, WANG Xing, et al. Molten salt cleaning process of carbon deposition on engine valve[J]. China surface engineering, 2015, 28(4): 121-126.
- [21] MASON T J. Ultrasonic cleaning: An historical perspective[J]. Ultrasonics sonochemistry, 2016, 29: 519-523.
- [22] 王兴, 贾秀杰, 李方义, 等. 再制造发动机积碳形成机理研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(5): 69-75.
- WANG Xing, JIA Xiu-jie, LI Fang-yi, et al. The research on formation mechanism of carbon deposition in remanufacturing engines[J]. Journal of mechanical engineering, 2017, 53(5): 69-75.
- [23] XING W, JIE J X, SHUAI Y S. The research on remanufacturing cleaning mechanism[J]. Applied mechanics & materials, 2015, 778: 187-192.