

面向再制造的 HT250 毛坯除漆技术及工艺优化

郭琦, 李方义, 姚帅帅, 聂延艳, 贾秀杰, 李剑峰

(山东大学 机械工程学院, 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南, 250061)

摘要: 利用高压水射流对 HT250 表面涂层进行清洗, 采用 Matlab 软件统计图像像素的手段, 研究不同移动速度、清洗压力及靶距条件下对涂层去除率的影响。通过 Design Expert 软件进行方案设计, 拟合试验数据进行回归方程及建立响应面模型。研究表明: 当移动速度为 1 mm/s、清洗压力为 15 MPa、靶距为 208 mm 时涂层清洗效果最优, 在 80 mm 清洗轨迹上的清洗面积可达 15.78 cm²。

关键词: 再制造; 高压水射流; 涂层清洗; 响应面模型

中图分类号: TP69

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2016)01-0077-05

Decoating technology and process optimization of blank HT250 based on remanufacturing

GUO Qi, LI Fangyi, YAO Shuaishuai, NIE Yanyan, JIA Xiujie, LI Jianfeng

(Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, Mechanical Engineering School, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: HT250 surface coating was removed by high-pressure waterjet. The decoating rates under different traverse speeds, cleaning pressures and target distances were studied by counting image pixels with Matlab. With the experiment scheme designed by the software Design Expert, the experimental data were fitted and the response surface models were built. The results show that the traverse speed of 1 mm/s, cleaning pressure of 15 MPa and the standoff distance of 208 mm are found to be the optimum. The decoating area along 80 mm of cleaning trajectory can reach 15.78 cm².

Key words: remanufacturing; high-pressure waterjet; coating cleaning; response surface methodology

钢铁结构通常需要进行防腐蚀处理, 表面处理(如涂层)是一种重要的手段^[1-2]。当产品无法继续服役时, 需要进行再制造以恢复其性能并达到可持续发展的目的, 而再制造首先面临的重要一环是再制造清洗, 清洗质量直接影响了再制造产品的分析检测、修复加工及装配等工艺环节^[3-4]。机械零部件产品经过长期服役, 在表面会形成各种污染物, 主要有油污、锈层、表面涂层、无机垢层等^[5-6], 产品清洗不彻底, 不光影响了洁净度与美观度, 而且表面上的缺陷(破损、裂纹

等)也无法及时发现, 产品的可再制造性评价也就无法进行, 这时如果盲目地进行再制造, 可能会造成不必要的经济损失^[7]。经过对国内工程机械发动机再制造企业的调研, 发现再制造发动机清洗过程中比较重要的一个环节是缸体外部涂层的清洗清理。新发动机缸体在铸造成型后要对表面涂刷一层防锈底漆, 因而回收后的旧发动机表面除存在积累的污物外, 还存在涂层, 并且有可能在使用过程中已经被损坏, 但不管损坏与否, 都需要去除涂层, 以便检测缺陷及重新进

收稿日期: 2015-01-17; 修回日期: 2015-03-17

基金项目(Foundation item): 国家重点基础研究发展规划(973 计划)项目(2011CB013401); 国家自然科学基金资助项目(51375278) (Project(2011CB013401) supported by the National Basic Research Development Program (973 Program) of China; Project(51375278) supported by the National Natural Science Foundation of China)

通信作者: 李方义, 教授, 博士生导师, 从事绿色制造及再制造研究; E-mail: lifangyi2006@qq.com

行涂刷。目前,缸体外部涂层多采用高温焚烧或抛丸进行清理,高温焚烧会使涂层分解,产生有害物质,抛丸采用的材料(石英砂、苏打等)消耗较快,成本较高^[8]。而利用水射流进行涂层清理时,清洗过后掺杂了不溶杂质的水可以进行过滤,然后循环利用,清洗成本得以降低,相比于其他清洗方式有较大的优势,是一种高效、环保的绿色清洗技术^[9]。本文作者利用高压水射流对 HT250 表面涂层进行清洗,采用 Matlab 软件统计图像像素的手段,研究不同移动速度、清洗压力及靶距条件下对涂层去除率的影响。

1 试验

1.1 试验材料及设备

某发动机再制造公司所生产的发动机缸体材料为铸铁 HT250,表面涂刷的是水性防锈漆,红色,主要成分为氧化交联型水性树脂。为模拟实际状况,试验前铸造 10 块 HT250 试件,加入碳(3.20%,质量分数,下同)、硅(1.80%)、锰(1.00%)、硫(0.10%)、磷(0.15%)等合金元素,材料密度、抗拉强度、硬度分别为 $7.3 \times 10^3 \text{ kg/cm}^3$, 250 MPa 和 210;长×宽×高为 100 mm×100 mm×12 mm,表面粗糙度 R_a 为 2.5,分别对每块试件的长×宽为 100 mm×100 mm 的 2 个表面进行编号。

试验设备采用自制 RCSM-QX100 型高压水射流清洗试验机,水泵压力可调且最高可达 17 MPa,喷嘴采用定点喷射,被清洗件通过三爪卡盘进行装夹,卡盘可以通过三轴平台实现位置调节,从而实现被清洗件不同位置处的清洗。

试验采用昌源牌 JTC 2012GG1/4-SS1506FB 型喷嘴,此为实心锥形喷嘴,孔径为 2 mm,射流发散角度为 15°,由不锈钢和黄铜制成。

1.2 清洗工艺

制定被清洗件的清洗工艺如下:调漆、涂刷试样→设定压力、靶距、移动速度→自动清洗→对试样拍照→用 Photoshop 对图片进行灰度处理→用 Matlab 统计清除面积。

1) 按照企业调研情况,对防锈漆兑水,按企业用防锈漆与水质比为 1:1 进行稀释,并对试样进行均匀涂刷,干膜厚度控制在 $(70 \pm 10) \mu\text{m}$,通过数显式游标卡尺进行测量。

2) 操作压力通过设定在管路中的手柄旋转调节,并在设备上数字显示,压力为喷嘴实际入口压力;通

过旋转丝杠调节靶距,丝杠螺距为 4 mm,实际靶距利用卷尺测量。移动速度指射流相对被清洗件的横向移动速度,通过电机带动丝杠匀速旋转进行调节。

3) 对试样进行射流清洗,每个测试面上的直线清洗轨迹均为 80 mm,清洗角度为 90°。

4) 试样在清洗过后,利用 Canon EOS 600D 型数码相机正对试样被清洗表面进行拍照,光圈值(物镜焦距/入射光瞳周长)为 5.6,曝光时间为 1/60 s,拍摄距离为 240 mm。

5) 通过 Photoshop 软件截取拍摄图片中试样有效面积,即试样表面 100 mm×100 mm 的范围,而后进行黑白处理,将防锈漆的红色转换为白色,清洗掉的涂层区域则变为黑色。

6) 利用 Matlab 软件计算图片中黑色面积占总面积的比例^[10],代码如下:

```
I=imread('D:\Figures to operate\Figure 1.tif'); /*读取图片*/
```

```
i=rgb2gray(I); /*转换图像为灰度图*/
```

```
a=imhist(i);
```

```
b=sum(a);
```

```
c=0;
```

```
d=0;
```

```
for c=1:1:255;
```

```
d=d+a(c);
```

```
end; /*计算灰度图中黑色像素数*/
```

```
d=d/b; /*计算黑色像素占比即清除率*/
```

得到清除率 R 后,实际清除面积即为 $R \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} = 10\,000R \text{ mm}^2$ 。

1.3 水射流清洗工艺条件的优化

在水射流清洗涂层过程中,选取移动速度、清洗压力及靶距 3 个主要因素分别进行单因素试验,通过响应面法对各因素的协同复合作用进行探索并优化射流清洗工艺以得到最佳清洗参数组合。其中,移动速度影响射流对靶面局部的作用时间、清洗压力及靶距影响着射流对靶面作用力。

1) 移动速度的单因素试验:选择 4 块试件进行清洗,工作压力设定为 13 MPa,在靶距为 200 mm 处分别进行 2, 4, 6 和 8 mm/s 的匀速移动清洗。

2) 清洗压力的单因素试验:选择 4 块试件进行清洗,工作压力分别设定为 4, 7, 10 和 13 MPa,在靶距为 200 mm 处进行 2 mm/s 的匀速移动清洗。

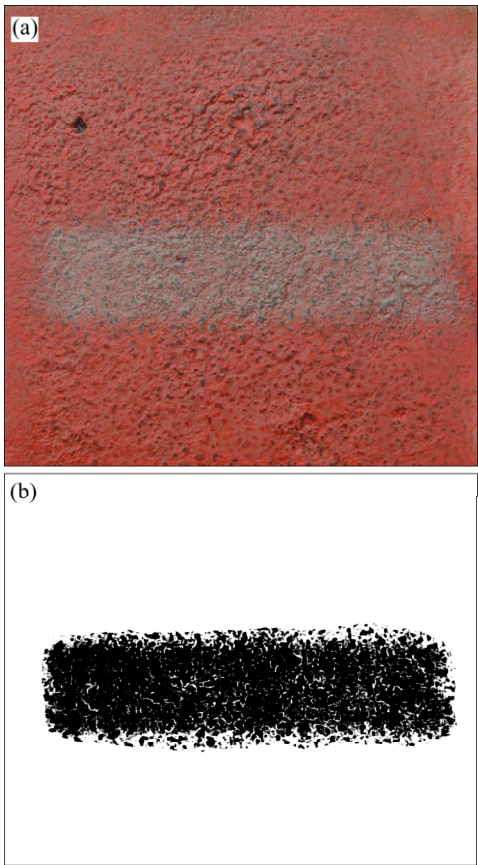
3) 靶距的单因素试验:选择 6 块试件进行清洗,工作压力设定为 13 MPa,在靶距分别为 50, 100, 150, 200, 250 和 300 mm 处进行 2 mm/s 的匀速移动清洗。

2 结果及分析

2.1 单因素试验

经过单因素试验，得出各因素对清洗效果的影响情况为：移动速度越慢，清洗效果越好；清洗压力越大，清洗效果越好；随着靶距增大，清洗效果先变好后变差，较好处位于 200 mm。

图 1 所示为当工作压力为 13 MPa 时 200 mm 靶距处以 2 mm/s 移动速度进行清洗后的试样。



(a) 原图像；(b) 通过 Photoshop 处理后的图像
图 1 清洗后的试样

Fig. 1 Workpiece after cleaning process

2.2 响应面法拟合清洗方程及优化清洗参数

2.2.1 方案安排

在单因素试验的基础上(移动速度为 2 mm/s，清洗压力为 13 MPa、靶距为 200 mm 时清洗效果最佳)，根据 BOX-Behnken 设计原理^[11]，以清除率 R 为响应值，利用 Design Expert 软件设计 3 因素 3 水平的响应面法试验方案^[12]，因素水平如表 1 所示。方案选取 17 个试验点，其中析因部分试验点 12 个，中心点重复试验次数为 5，如表 2 所示。

表 1 因素水平表

Table 1 Factors and levels

| 水平 | 移动速度 v / (mm·s ⁻¹) | 清洗压力 p / MPa | 靶距 L / mm |
|--------|-------------------------------------|-------------------|----------------|
| -1(下限) | 1 | 11 | 150 |
| 0(平均) | 2 | 13 | 200 |
| 1(上限) | 3 | 15 | 250 |

表 2 Box-Behnken 试验方案

Table 2 Experiment scheme of Box-Behnken

| 编号 | 移动速度 v / (mm·s ⁻¹) | 清洗压力 p / MPa | 靶距 L / mm | 清除率 R |
|----|-------------------------------------|-------------------|----------------|---------|
| 1 | 1 | 11 | 200 | 0.145 5 |
| 2 | 3 | 11 | 200 | 0.127 0 |
| 3 | 1 | 15 | 200 | 0.160 8 |
| 4 | 3 | 15 | 200 | 0.137 4 |
| 5 | 1 | 13 | 150 | 0.147 1 |
| 6 | 3 | 13 | 150 | 0.124 1 |
| 7 | 1 | 13 | 250 | 0.149 5 |
| 8 | 3 | 13 | 250 | 0.129 2 |
| 9 | 2 | 11 | 150 | 0.136 0 |
| 10 | 2 | 15 | 150 | 0.145 2 |
| 11 | 2 | 11 | 250 | 0.140 5 |
| 12 | 2 | 15 | 250 | 0.147 1 |
| 13 | 2 | 13 | 200 | 0.149 2 |
| 14 | 2 | 13 | 200 | 0.147 0 |
| 15 | 2 | 13 | 200 | 0.147 7 |
| 16 | 2 | 13 | 200 | 0.148 5 |
| 17 | 2 | 13 | 200 | 0.148 1 |

2.2.2 模型分析与结果

根据软件的分析建议，采取二次(Quadratic)拟合的形式具有最优效果，进而对研究的因素进行方程拟合。方差分析如表 3 所示。

表 3 中， $P < 0.05$ 的项对 R 影响显著， $P < 0.01$ 的项对 R 影响极显著， $P > 0.05$ 的项对 R 影响不显著，将该项剔除后重新计算。失拟项对应的 P 越大越好， $P > 0.05$ 说明所得方程与实际拟合中非正常误差所占比例小，方程表示的 R 与 v 和 P 等项的回归方程的关系是好的。

去掉方程不显著项 vp ， vL ， pL 及 p^2 ，得到其他项的显著性未改变，失拟项 P 由 0.055 8 变为 0.076 0，新的拟合方程仍然满足响应面分析要求。

表 3 Box-Behnken 设计回归方程方差分析表

Table 3 ANOVA table of Box-Behnken regression equation

| 变异来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | <i>F</i> | <i>P</i> | 显著性 |
|-----------------------|------------------------|-----|------------------------|----------|-----------|-----|
| 模型 | 1.411×10^{-3} | 9 | 1.568×10^{-4} | 71.34 | < 0.000 1 | 极显著 |
| 移动速度 <i>v</i> | 9.074×10^{-4} | 1 | 9.074×10^{-4} | 412.78 | < 0.000 1 | 极显著 |
| 压力 <i>p</i> | 2.153×10^{-4} | 1 | 2.153×10^{-4} | 97.93 | < 0.000 1 | 极显著 |
| 靶距 <i>L</i> | 2.415×10^{-5} | 1 | 2.415×10^{-5} | 10.99 | 0.012 9 | 显著 |
| <i>vp</i> | 6.003×10^{-6} | 1 | 6.003×10^{-6} | 2.73 | 0.142 4 | 不显著 |
| <i>vL</i> | 1.823×10^{-6} | 1 | 1.823×10^{-6} | 0.83 | 0.392 8 | 不显著 |
| <i>pL</i> | 1.690×10^{-6} | 1 | 1.690×10^{-6} | 0.77 | 0.409 7 | 不显著 |
| <i>v</i> ² | 1.084×10^{-4} | 1 | 1.084×10^{-4} | 49.33 | 0.000 2 | 显著 |
| <i>p</i> ² | 5.158×10^{-7} | 1 | 5.158×10^{-7} | 0.23 | 0.642 9 | 不显著 |
| <i>L</i> ² | 1.297×10^{-4} | 1 | 1.297×10^{-4} | 59.00 | 0.000 1 | 极显著 |
| 残差 | 1.539×10^{-5} | 7 | 2.198×10^{-6} | | | |
| 失拟项 | 1.265×10^{-5} | 3 | 4.216×10^{-6} | 6.15 | 0.055 8 | 不显著 |
| 纯误差 | 2.740×10^{-6} | 4 | 6.850×10^{-7} | | | |

根据统计分析结果，可以得到响应面分析拟合方程为

$$R=0.019\ 115+9.723\ 68\times10^{-3}v+2.593\ 75\times10^{-3}p+0.256\ 9\times10^{-3}L-5.093\ 42\times10^{-3}v^2-2.227\ 37\times10^{-6}L^2$$

在试验的因素水平范围内，利用软件求解方程得到涂层去除的最佳条件：移动速度为 1 mm/s；工作压力为 15 MPa；靶距为 208 mm，此时涂层去除率为 0.158 8。按照这种组合进行 5 次试验来验证结果，得到的结果分别为 0.156 8，0.157 2，0.157 8，0.158 1 和 0.159 3，平均值为 0.157 8，相对误差为 0.63%，得到的拟合方程对涂层去除率的预测可信度高。

2.2.3 响应面图形分析

对回归方程中的 *v* 与 *p*，*v* 与 *L*，*p* 与 *L* 所作的响应面图分别如图 2~4 所示。从图 2 可知：当靶距固定时，涂层去除率随着压力的减小及移动速度的增大而均减小，响应面呈斜坡形，极值点间落差较大，说明压力及移动速度变化对涂层去除率的影响较大，这与表 4 中结果表现一致(*v* 和 *p* 的 *P* 较小)。从图 3 可知：当压力一定时，涂层去除率随着移动速度的增大而减小，随着靶距的增大而先增大后减小，响应面呈斜拱形，在靶距为 208 mm 左右清洗效果最好。从图 4 可知：当移动速度一定时，涂层去除率随着压力的减小而减小，随着靶距的增大而先增大后减小，响应面呈斜拱形。

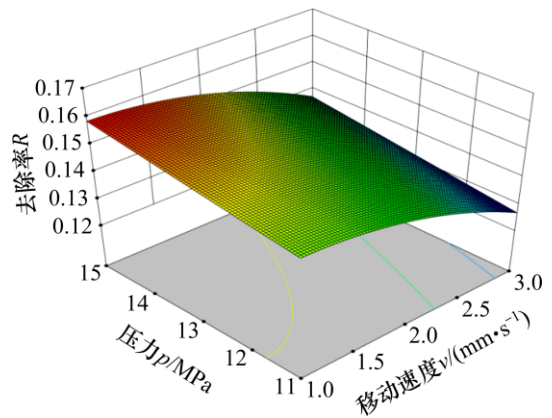


图 2 移动速度 *v* 与压力 *p* 对涂层去除率的影响

Fig. 2 Effect of traverse speed *v* and pressure *p* on decouating rate *R*

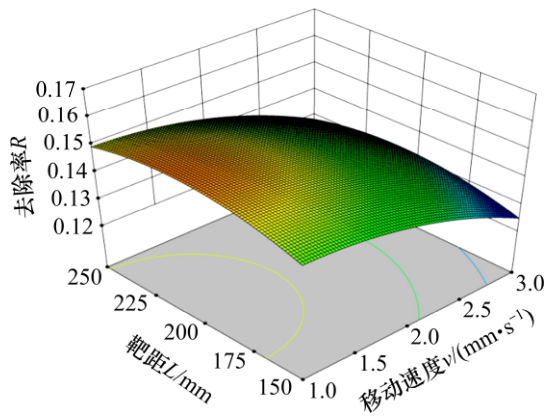


图 3 移动速度 *v* 与靶距 *L* 对涂层去除率的影响

Fig. 3 Effect of traverse speed *v* and standoff distance *L* on decouating rate *R*

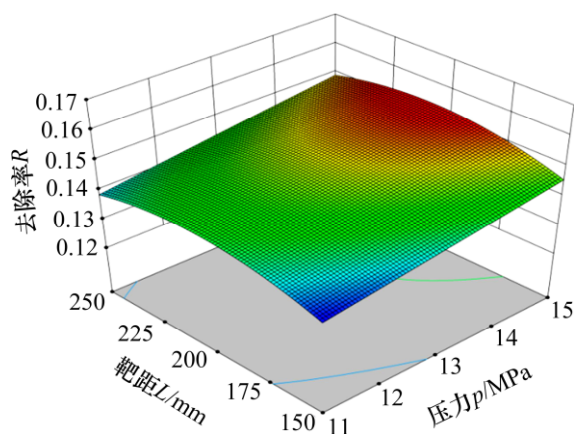


图4 压力 p 与靶距 L 对涂层去除率的影响

Fig. 4 Effect of pressure p and standoff distance L on decoupling rate R

3 结论

1) 当移动速度 1 mm/s, 工作压力 15 MPa, 靶距为 208 mm 时, 此时涂层去除率为 0.158 8(面积 S 为 15.88 cm²), 这与实际试验结果 0.157 8(S 为 15.78 cm²) 相对误差为 0.63%, 预测性较好。

2) 移动速度越慢, 清洗效果越好; 清洗压力越大, 清洗效果越好; 随着靶距增大, 清洗效果先变好后变差。

3) 本文所得优化工艺参数仅仅针对 HT250 试样材料的除漆过程。在实际应用中, 有些极端工况下的材料涂层表面可能会附着多种污物, 会增加清洗难度, 材料涂层部分脱落, 则降低了清洗难度, 因此针对不同情况需要进一步研究。

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] 杨祖彬, 曾莉红. 金属包装材料涂层防腐技术[J]. 表面技术, 2009, 38(4): 66-69.
YANG Zubin, ZENG Lihong. Corrosion prevention techniques of metal package coating materials[J]. Surface Technology, 2009, 38(4): 66-69.
- [3] 郭琦, 李方义, 李硕, 等. 高压水射流清洗对基体去污效果及

损伤的研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(6): 817-820.

GUO Qi, LI Fangyi, LI Shuo, et al. Research on decontamination effect and damage of high-pressure waterjet cleaning to matrix[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(6): 817-820.

- [4] 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 Binshi. Remanufacturing of construction machinery and its key technologies[J]. Construction Machinery and Equipment, 2009, 40(8): 1-7.
- [5] 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(S2): 114-117, 123.
JI Xiaochao, ZHANG Wei, YU Helong, et al. Research progress of the green cleaning technologies in the remanufacturing of mechanical and electrical products[J]. Materials Review, 2012(S2): 114-117, 123.
- [6] 刘师巍. 再制造坯料清洁技术研究[D]. 上海交通大学机械与动力工程学院, 2010: 6-11.
LIU Shiwei. Investigation on remanufacturing blank cleaning technology[D]. Shanghai Jiao Tong University. School of Mechanical Engineering, 2010: 6-11.
- [7] 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 Binshi, LIU Shican, SHI Peijing, et al. Study on the contribution of engine remanufacturing to the recycle economy[J]. China Surface Engineering, 2005, 70(1): 1-7.
- [8] MOMBER A W. Hydroblasting and coating of steel structures[M]. London: Elsevier, 2003: 17-44.
- [9] KUBIAK K J, WILSON M C T, MATHIA T G. Wettability versus roughness of engineering surfaces[J]. Wear, 2011, 271(3/4): 523-528.
- [10] 王薇. MATLAB 从基础到精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 30-150.
WANG Wei. MATLAB from basic to proficient[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012: 30-150.
- [11] 徐向宏, 何明珠. 试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 146-160.
XU Xianghong, HE Mingzhu. Experiment design and application of Design-Expert, SPSS[M]. Beijing: Science Press, 2010: 146-160.
- [12] 刘佳, 张宏, 石岩. 基于 Design-Expert V7 设计的不锈钢激光非熔透搭接焊工艺优化研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(16): 52-60.
LIU Jia, ZHANG Hong, SHI Yan. Technology optimizing research on laser nonpenetration lap welding of stainless steel based on Design-Expert V7[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(16): 52-60.

(编辑 罗金花)