【光电工程 / Optoelectronic Engineering】

工业遗产钢结构的激光清洗及保护

王炎松¹, 王陈高男^{1, 2}

1) 武汉大学城市设计学院, 湖北武汉 430070; 2) 湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北武汉 430051

摘要: 工业遗产建筑钢结构的锈蚀会造成钢材能源的大量浪费及工业遗产的遗失, 其清洗与保护工作面临严峻挑战. 采用新型、环保的激光清洗方式对工业遗产建筑钢结构进行清洗及保护, 通过连续-脉冲激光的两步作用, 实现厚层钢材锈蚀物高效率及高精度的清洗, 同时还能够在钢材表面主动形成氧化物对钢材进行保护. 通过金相显微镜、扫描电子显微镜配合能谱仪及粗糙度计等测量方式, 对清洗前后的样品进行对比分析. 该研究利用新型能源进行工业遗产的清洗保护, 可为工业遗产保护开辟新道路, 并为资源节约提供新方案.

关键词: 光学工程; 工业遗产; 钢结构; 激光清洗; 连续激光; 脉冲激光

中图分类号: O439; O437

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2020.05466

Laser cleaning and protection of industrial heritage steel structure

WANG Yansong¹ and WANG Chen'gaonan^{1, 2}

1) School of Urban Design, Wuhan University, Wuhan 430070, Hubei Province, P. R. China

2) Hubei Provincial Communications Planning and Design Institute Co. Ltd., Wuhan 430051, Hubei Province, P. R. China

Abstract: The corrosion of industrial heritage steel structure causes a large amount of waste of steel and damage to the industrial heritage. The cleaning and protection of the industrial heritage steel structure are facing severe challenges. We propose an environment-friendly laser cleaning method to clean and to protect the industrial heritage steel structure. By using the two-step continuous pulse laser cleaning method, a cleaning of the thick structure steel corrosion with high-efficiency and high-precision is realized. At the same time, this method can form oxides on the steel structure surface to protect the steel structure. The metallographic microscopy (MM), scanning electron microscopy (SEM) with energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and roughness meters are used to study the steel surface before and after the laser cleaning. The experimental results show that the laser cleaning method can provide a new solution for resource conservation and open a new path for the protection of industrial heritage, which has important guiding significance.

Key words: optical engineering; industrial heritage; steel structure; laser cleaning; continuous-wave laser; pulsed laser

据统计, 中国钢材的消费主要集中在建筑、机械和汽车领域, 其中, 建筑业用钢量占我国钢材消

费总量的 59% 以上^[1]. 钢结构作为建筑业用钢量最大的一种施工方式, 具有自重轻、抗震性能好、节

Received: 2019-11-19; **Accepted:** 2020-04-27

Foundation: National Natural Science Foundation of China (51508421)

Corresponding author: Professor WANG Yansong. E-mail: 875778984@qq.com

Citation: WANG Yansong, WANG Chen'gaonan. Laser cleaning and protection of industrial heritage steel structure [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(5): 466-473. (in Chinese)

<http://journal.szu.edu.cn>

能效果好及工业化程度高等优点^[2-3]。随着钢结构行业政策从过去限制用钢到鼓励合理用钢的转变,钢结构取代钢筋混凝土或砖混结构已成为当代建筑业的发展趋势,具有广阔应用空间。金属表面易与其周围介质发生化学或电化学反应,遭到腐蚀破坏后失效,造成资源浪费。在各种金属腐蚀中钢材腐蚀最为严重,世界上每年因腐蚀造成的钢材损失约占钢材总量的20%~25%^[4]。另一方面,工业遗产作为具有历史、技术、社会、建筑及科学价值的工业文化遗存,对人类的社会活动产生巨大影响,而大量工业建筑因年代久远,钢材锈蚀极为严重,使工业建筑处于危险边缘。做好工业遗产的保护除了能节约大量资源,对于传承中国历史文脉也具有重大意义^[5]。

钢结构的传统除锈方式有机械除锈(包括喷砂)、高压水射流除锈及化学除锈等,但机械方法强度大,固体废弃物污染严重,高压水射流方法易形成二次腐蚀,化学方法多使用的酸液会造成环境污染^[6]。激光清洗作为一种新型环境友好型清洗技术,在文物保护、汽车和模具清洗等方面已得到广泛应用^[7-14]。相比于传统的喷砂、电化学和化学处理方法,具有更高的可控性、选择性和通用性。激光清洗通过激光直接作用在污染物上,利用高能量激光的瞬间加热,使污染物直接气化、烧蚀或弹性去除,实现一种具有较高机械化程度、有效避免基底损伤、可控改变基材表面形态及较高工作效率的新型表面清洗技术。激光还能够通过高能量光束与基材的相互作用,实现对材料的表面改性,强化改善合金的耐磨性、耐疲劳性及抗腐蚀性^[15-17],在工业遗产保护方面具有较大应用潜力。

实际中的建筑钢结构因常年暴露在恶劣空气环境中,其表面会产生一层极厚的锈蚀物(厚度>100 μm),这种厚层锈蚀物对激光清洗效率提出较大挑战。短脉冲激光具有高加工精度和低加工效率,长脉冲激光具有高效率和低加工精度^[18],因此,单一脉宽激光很难同时实现高效率和高精度的清洗。在采用脉冲激光进行清洗的研究方面,邱兆颢等^[19]采用不同扫描速度混合共扫描10次的方法,不断减低锈蚀物的厚度去除厚层锈蚀物,清洗过程相对复杂,清洗效率约为0.006 4 cm^2/s ; GUO等^[20]对厚度约20 μm 的锈蚀物,通过脉冲作用8次后获得较好清洗结果,清洗效率约为0.058 9 cm^2/s ; CHOUBEY等^[21-22]对于其他材料的清洗次数也都在5次左右。可见,脉冲激光清洗效率低,激

光器使用成本高。连续光可通过自限制清洗,在油漆和橡胶等材料的清洗方面可获得较好清洗结果。而对于锈蚀物这一类与基材成分相同、锈蚀向基材渗透且锈蚀边界不规则的材料,采用连续激光清洗虽然可获得较高清洗效率,但很难控制能量损伤,易损坏基材^[23],离实际应用尚有较大差距。

“旧工业时代”的工业遗存,包括建筑、文化、技术及历史等,其价值足以作为工业遗产而被研究和保护。工业作为中国实体经济的重要组成部分,在社会发展中发挥着巨大作用^[24]。对于工业遗产建筑钢结构长期腐蚀的厚层锈蚀物,如何提高其激光清洗效率和保护效果,同时控制清洗成本,目前尚没有很好的解决方法,这也是限制激光清洗这一绿色环保清洗方式推广的主要原因。本研究基于上述思考,针对一级工业遗产中国武汉市汉阳铁厂转炉车间的钢结构厚层锈蚀物,提出连续-脉冲激光的2步清洗方式,结合连续光清洗的高效率与脉冲光清洗的高精度特点,实现厚层锈蚀物的最佳清洗保护方案。

1 研究对象与方法

本研究以武汉市汉阳铁厂电路分厂转炉车间内部钢架结构为研究对象。钢材长期暴露在空气中,钢材表面与其周围介质发生化学或电化学反应,使钢材遭到腐蚀破坏,钢桁架结构已经锈迹斑斑,如图1。

图1 转炉车间内部钢桁架结构

Fig. 1 (Color online) Steel truss structure inside converter workshop

1.1 样品制备

实验通过选取与桁架结构钢材相同的材料进行锈蚀处理,获得厚层锈蚀物后进行相应激光清洗实验。实验样品为常用的焊接结构钢材 Q235B,材料具体成分见表1。切割样品大小为15 mm×15 mm×

3 mm, 经不同目砂纸打磨去除表面氧化物, 随后抛光. 所有样品置于室外阳光直射环境, 每隔 2 d 在其表面喷洒适量水, 使其表面形成水膜. 30 d 后, 样品表面已形成较厚锈蚀, 有裂纹间隙, 如图 2.

表 1 Q235B 钢材成分

元素	质量分数
C	0.120 ~ 0.200
Si	≤0.300
Mn	0.300 ~ 0.700
S	≤0.045
P	≤0.045
Cr	≤0.300
Ni	≤0.300
Cu	≤0.300

图 2 锈蚀物原始表面

Fig. 2 (Color online) Original rust surface

1.2 激光清洗

采用连续-脉冲激光 2 步输出方式, 配合二维振镜系统 (扫描速度 10 ~ 3 000 mm/s) 进行样品清洗, 实验装置如图 3. 当连续光输出时, 自动偏转反射镜偏离, 不阻挡光束; 当脉冲激光输出时, 反射镜将旋转到指定位置, 反射脉冲激光通过系统光轴. 反射镜 1 至 3 均为 1 064 nm 及 1 070 nm 平面全反镜, 聚焦镜为常用 f - θ 透镜, 保护镜为 1 064 nm 及 1 070 nm 的平面高透镜. 光束经聚焦镜作用在样品表面, 通过二维振镜扫描实现锈蚀样品的清洗. 振镜的扫描方式如图 4, 其中, v_x 为 x 方向的扫描速度; Δy 为 y 方向的单步移动距离, 默认为 50 μm ; x 方向的光斑搭接率根据扫描速度不同为 0 ~ 40%, v_x 设定为 1 000 ~ 3 000 mm/s. 为减轻飞溅物对实验人

员的影响并保护透镜, 利用吸尘器在样品上方进行飞溅物收集. 2 台激光器的参数为: ① 连续光纤激光器, 输出波长为 1 070 nm, 最大输出功率为 800 W, 光纤数值孔径为 0.22, 光纤纤芯直径 50 μm , 聚焦后的光斑半径为 100 μm ; ② 脉冲激光器为端面泵浦固体激光器, 光束质量 $M^2 = 1.3$, 输出波长为 1 064 nm, 最大输出功率为 15 W, 重复频率为 15 kHz, 脉宽为 38 ns, 聚焦后的光斑半径为 75 μm .

图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Diagram of experimental setup

图 4 振镜扫描方式示意图

Fig. 4 Schematic of the scanning mode of galvanometer

采用金相显微镜 (metallurgical microscope, MM) 和扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 观察激光清洗前后样品的表面形貌, 通过 SEM 配合能谱仪 (energy dispersive spectrometer, EDS) 分析样品成分, 粗糙度 R_a 通过手持式粗糙度仪 (量程为 $\pm 80 \mu\text{m}$) 测量. 其中, 清洗效果通过测量每个样品在清洗区域内的铁锈面积及厚度去除率 (面积百分比和厚度百分比) 进行定量分析^[25]; 清洗效率通过计算单位时间内铁锈的清洗速度 (单位: cm^2/s) 进行定量分析.

2 结果与分析

2.1 初始锈蚀样品分析

切割、研磨和抛光后的初始锈蚀样, 其横截面结构如图 5 (a). 可见, 锈蚀物与基材间无明显边界, 锈蚀物厚度为 100 ~ 200 μm 随机分布. 表层锈

蚀物中还存在较大孔隙,整体锈蚀物具有明显的局部特性.通过选取锈蚀物颗粒制样,得到锈蚀物微观结构的SEM图如图5(b).可见,其表面为极不平滑的颗粒状,颗粒直径约 $1\text{ }\mu\text{m}$.测量粗糙度时发现初始样品的 R_a 超出量程($>80\text{ }\mu\text{m}$).

(a) 锈蚀横截面MM图

(b) 锈蚀表面SEM图

图5 锈蚀横截面MM图及表面SEM图

Fig. 5 (Color online) The MM figure of corrosion cross-section and SEM figure of the corrosion surface

初始锈蚀物的能谱图如图6.可见, $w(\text{C}) = 43.25\%$ 、 $w(\text{O}) = 22\%$ 及 $w(\text{Fe}) = 34.75\%$.因此,可以推断金属长期处于空气腐蚀作用下,形成Fe氧化物同时还会附着大量有机物(C质量分数较高),在清洗结果测试中,可将C质量分数作为清洗效果的评判依据,将O质量分数作为清洗过程基材是否氧化的评判依据.

图6 原始表面能谱图

Fig. 6 (Color online) The EDS result of the corrosion

LI等^[17, 26]对铁锈蚀过程涉及的物相变化给出详细解释.铁在大气环境中通过吸氧腐蚀形成FeOOH,有黄棕色的 $\alpha\text{-FeOOH}$ 和橙色的 $\gamma\text{-FeOOH}$ 两种,最初形成的主要为 $\gamma\text{-FeOOH}$,但是 $\gamma\text{-FeOOH}$ 逐渐会转换成 $\alpha\text{-FeOOH}$. $\alpha\text{-FeOOH}$ 具有致密的结构,在初始腐蚀阶段,它会阻止腐蚀的进一步进行,但是 $\alpha\text{-FeOOH}$ 会脱水形成 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$,同时原来的保护层上形成缝隙或孔,成为接触外界空气和水的通道,导致新一轮锈蚀的继续发生.铁的腐蚀过程如图7.其中,锈蚀厚度变化为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $20\text{ }\mu\text{m}$ 、 $50\text{ }\mu\text{m}$ 及更厚.铁基材表面长期腐蚀易形成厚度大于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的锈蚀物,这种锈蚀不断向基材表面渗透,形成不规则的锈蚀边界,锈蚀整体呈层状结构,具有明显的局部特性.

图7 金属铁锈蚀过程示意图

Fig. 7 (Color online) Schematic diagram of metal corrosion process

2.2 单独连续激光清洗

采用连续激光单次扫描清洗,能够去除的锈蚀物深度与激光器的输出功率和振镜扫描速度相关,激光输出功率高、扫描速度慢则单次清洗去除的厚度大.经多次清洗测试发现,当连续激光的输出功率为 230 W ,扫描速度为 2000 mm/s 时,单次扫描厚度去除率约为 $85\% \sim 90\%$,面积去除率低于 30% .清洗结果如图8(a),左上角银白部分为重新凝固的锈蚀物;浅色部分为单次清洗之后残留的浅层锈蚀物,黑色部位为残留略厚的锈蚀物,部分基材露出的同时并没有被融化和氧化.当进一步提高输出功率或降低扫描速度时,可以观察到明显的氧化现象,如图8(b),裸漏出的基材重新被氧化.

通过连续激光不断气化锈蚀物,可以将厚层锈蚀物去除.锈蚀物具有明显的局部特性,并与钢材基材性质较为接近,使得厚层锈蚀物清洗对连续激光的功率非常敏感.由于连续激光能量较高、难以控制,导致对基材损伤的控制难度加大.清洗过程中需要合理控制连续激光功率,方可明显降低锈蚀厚度.虽然仍有块状结构的残余锈蚀物(图8

(a) 230 W 连续激光清洗结果MM图

(b) 260 W 连续激光清洗结果MM图

图 8 连续激光清洗结果

Fig. 8 (Color online) CW laser cleaning results

(a)), 但其厚度与周围露出的浅色区域厚度差别很小, 也不会造成任何基材的氧化.

2.3 单独脉冲激光清洗

脉冲激光清洗锈蚀物的机理主要为烧蚀及相爆炸^[27]. 实验使用脉冲激光的脉宽为 38 ns, 峰值功率为 26 kW, 峰值功率密度为 $1.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$. 脉冲激光作用可以瞬间将温度加热到锈蚀物的气化温度, 或瞬间将锈蚀物击穿, 通过烧蚀去除. 锈蚀物孔隙中的空气在纳秒激光作用下会瞬间爆炸. 实验中振镜的扫描速度为 1 000 mm/s.

图 9 (a) 为采用脉冲激光的腐蚀物清洗结果. 可见, 脉冲激光使锈蚀物孔隙位置的空气瞬间爆炸, 同时去除部分锈蚀物, 单次扫描面积去除率约 5%, 样品依然被锈蚀物覆盖. 由于脉宽较短, 单次扫描厚度去除率约 5% ~ 10%; 5 次清洗后的烧蚀厚度逐渐累加, 露出了更深层的锈蚀物, 面积去除率约为 40%. 清洗过程同时伴随着锈蚀物孔隙的相爆炸, 局部锈蚀物厚度去除率瞬间提升至 100%; 10 次清洗后, 前期露出的基材被再次烧蚀, 更加明亮, 如图 9 (b) 右下图所示, 此时厚度去除率已高于 100%. 10 次清洗后面积去除率约 60%, 仍然有块状残留物存在, 呈疏松多孔形状, 其 SEM 图如

图 9 (c).

脉冲激光因具有较短脉宽及较高峰值功率, 在清洗过程中, 锈蚀物的孔隙位置能够通过瞬间加热产生相爆炸, 可以瞬间使局部锈蚀物的厚度去除率高达 100%. 但是对于没有孔隙的锈蚀物, 脉冲激光只能通过烧蚀去除厚度约 5% ~ 10% 的锈蚀物. 因此, 对于厚层锈蚀物, 纳秒激光在重复清洗下也只能获得面积去除率约 60% 的清洗结果, 对应清洗效率为 $0.018 \text{ cm}^2/\text{s}$.

(a) 单次清洗结果MM图

(b) 10次清洗结果MM图

(c) 块状结构SEM图

图 9 脉冲激光清洗结果

Fig. 9 (Color online) Pulsed laser cleaning results

2.4 连续-脉冲两步激光清洗

图 10 为激光器脉宽与清洗效率和效果的关系图. 可见, 连续激光具有最高的清洗效率, 但清洗效果最低; 纳秒激光具有最高的清洗效果, 但清洗效率最低. 因此, 在厚层锈蚀物的清洗中可以结合二者, 先通过高能量连续激光单次清洗获得高达

图 10 不同脉宽激光作用下清洗效率和效果关系图

Fig. 10 The diagram of the cleaning efficiency and quality of lasers with different pulse widths

85% ~ 90% 的厚度去除率；再通过高峰值纳秒脉冲单次清洗剩余锈蚀物，保证最终清洗结果。

实验中先采用功率为 230 W 的连续激光，以 2 000 mm/s 的扫描速度进行第 1 步清洗，再采用纳秒激光以 $\Delta y = 100 \mu\text{m}$ 、 $v_x = 3\,000 \text{ mm/s}$ 进行第 2 步清洗，最终可获得洁净的样品表面。由于扫描间隔和扫描速度较大，纳秒激光脉冲与脉冲间的搭接率为 0，清洗结果如图 11。清洗样品表面呈银白色，清洗的面积去除率和厚度去除率均高达 100%，相应的清洗效率为 $0.75 \text{ cm}^2/\text{s}$ ，该清洗效率是单独纳秒激光清洗效率的 42 倍，也远高于文献[19-20]中的清洗效率。

清洗后样品的 EDS 测试结果如图 12。对比图 6 可见，清洗后 C 和 O 的能谱峰值均明显下降。由元素含量可见， $w(\text{Fe}) = 91.23\%$ ，Fe 基材已裸露； $w(\text{C}) = 5.16\%$ ，与初始样品的 43.25% 相比得到明显降低，清洗效果良好； $w(\text{O}) = 3.61\%$ ，样品表面无明显氧化。

第 1 步清洗过程通过高能量注入直接气化锈蚀物，使锈蚀物有明显的局部特性，实现较为均匀的

图 12 清洗表面能谱图

Fig. 12 (Color online) The EDS result of the sample after laser cleaning

清洗。通过控制实验参数，连续激光清洗厚度去除率约 85% ~ 90%，同时不氧化基材。在连续光清洗后，锈蚀物表面得到改性，增加对激光的吸收系数^[28]。因此，在第 2 步清洗过程中，脉冲激光的单次烧蚀可以高精度去除底层锈蚀物，使样品的基材露出。可见，通过这种连续-纳秒激光的两步清洗方式，可以实现高效率、高精度的厚层锈蚀物清洗。

在实际的工业遗产钢结构清洗中，还需考虑对工业遗产的保护。因此，在第二步清洗中，通过改变脉冲激光参数，使样品表面形成氧化层对样品进行保护^[17]。实验中通过降低脉冲激光的扫描速度，当 $\Delta y = 50 \mu\text{m}$ 、 $v_x = 1\,000 \text{ mm/s}$ 时，可以获得图 13 的清洗结果。纳秒脉冲彼此间的搭接率约 40%，使多个脉冲在同一个位置的作用累积，样品表面最终被氧化，对应清洗氧化效率为 $0.33 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

清洗后样品的 EDS 测量结果如图 14。可见， $w(\text{C}) = 3.16\%$ ，说明清洗效果较好； $w(\text{O}) = 31.38\%$ ，说明表面被重新氧化。该方式作用下样品表面形成新的氧化物 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ，这层主动氧化形成

图 11 连续-脉冲激光两步清洗结果 SEM 图

Fig. 11 (Color online) CW-ns two-step laser cleaning results

图 13 连续-脉冲两步激光清洗钝化结果 SEM 图

Fig. 13 (Color online) Results of the passivation of the CW-ns two-step laser cleaning

图 14 清洗钝化表面能谱图

Fig. 14 (Color online) The EDS result of the sample after laser cleaning

的钝化层能够对碳钢基材提供保护。

两步清洗后样品表面 $R_a = 2.476 \mu\text{m}$, 样品表面粗糙度极大减低, R_a 的测试结果见补充材料图 S1 (请扫描论文末页右下角二维码查看)。实验还将初始抛光样品 (样品 A)、连续-脉冲两步清洗样品 (样品 B) 及连续-脉冲两步清洗钝化样品 (样品 C) 同时置于室外阳光直照环境中, 并每隔 2 d 在其表面喷洒适量水, 使其表面能够形成水膜加速腐蚀。样品 A 和 B 在 1 h 左右就出现锈蚀物, 且锈蚀物厚度随时间不断增加, 抗腐蚀性较差; 样品 C 经 7 d 后才出现锈蚀物, 具有较强抗腐蚀性。实验结果表明, 通过主动在样品表面形成保护性氧化物, 可以增强样品的抗腐蚀性。实验得到完整的工业遗产钢清洗步骤见补充材料图 S2 (请扫描论文末页右下角二维码查看)。

结 语

针对一级工业遗产武汉市汉阳铁厂转炉车间钢结构的厚层锈蚀物, 采用新型绿色环保激光清洗方式进行清洗保护研究, 对比单独连续激光清洗、单独脉冲激光清洗及连续-脉冲 2 步清洗方式的清洗效率和效果。结果表明, 连续激光功率为 230 W 时, 单次扫描可达到 85% ~ 90% 的厚度去除率; 单独纳秒激光扫描 10 次后仅达 60% 的面积去除率, 部分区域厚度去除率达 100%, 清洗效率为 $0.018 \text{ cm}^2/\text{s}$; 连续-纳秒清洗方式单次扫描即可获得 100% 的厚度去除率和面积去除率, 清洗效率为 $0.75 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。在连续-纳秒清洗中, 通过调整脉冲激光参数, 可以在基材表面形成一层钝化物, 对钢材进行保护。连续-纳秒激光清洗方式, 可同时利用连

续激光高能量、高效率以及脉冲激光高精度的特点, 获得厚层钢材锈蚀物的高效率和高效果的清洗结果。

致谢: 感谢华中科技大学贾贤石博士在清洗实验及样品测试方面给予的技术支持!

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51508421)

作者简介: 王炎松 (1969—), 武汉大学教授、博士生导师。研究方向: 乡土建筑。E-mail: 875778984@qq.com

引 文: 王炎松, 王陈高男. 工业遗产钢结构的激光清洗及保护 [J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(5): 466-473.

参考文献 / References:

- [1] 张启富, 郝晓东. 钢结构腐蚀防护现状和发展 [J]. 中国建筑金属结构, 2006(9): 22-26.
ZHANG Qifu, HAO Xiaodong. Present situation and development of corrosion protection of steel structure [J]. China Construction Metal Structure, 2006(9): 22-26. (in Chinese)
- [2] 沈祖炎. 钢结构制作安装手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
SHEN Zuyan. Steel structure production and installation manual [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [3] 中国钢结构协会. 建筑钢结构施工手册 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
China Steel Structure Association. Construction manual of building steel structure [M]. Beijing: China Planning Press, 2004. (in Chinese)
- [4] 黄淑菊. 金属腐蚀与防护 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988: 97-98.
HUANG Shuju. Metal corrosion and protection [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988: 97-98. (in Chinese)
- [5] 任云兰, 郭力君. 天津工业遗产保护和利用的探索与实践 [J]. 城市发展研究, 2018, 25(10): C16-C19, C31.
REN Yunlan, GUO Lijun. Exploration and practice of protection and utilization of industrial heritage in Tianjin [J]. Urban Development Studies, 2018, 25(10): C16-C19, C31. (in Chinese)
- [6] 侯 玫, 张传俊. 现代工业中几种先进除锈方法的对比研究 [J]. 机械研究与应用, 2007, 20(4): 19-20.
HOU Mei, ZHANG Chuanjun. A comparative research on several advanced way of removing rust in modern industry [J]. Mechanical Research & Application, 2007, 20(4): 19-20. (in Chinese)
- [7] BUCCOLIERI G, NASSISI V, BUCCOLIERI A, et al. Laser cleaning of a bronze bell [J]. Applied Surface Science, 2013, 272: 55-58.
- [8] 雷正龙, 田 泽, 陈彦宾. 工业领域的激光清洗技术

- [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 030005.
LEI Zhenglong, TIAN Ze, CHEN Yanbin. Laser cleaning technology in industrial fields [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 030005. (in Chinese)
- [9] JIA Xianshi, ZHANG Yudong, CHEN Yongqian, et al. Laser cleaning of slots of chrome-plated die [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 119: 105659.
- [10] PINI R, SIANO S, SALIMBENI R, et al. Tests of laser cleaning on archeological metal artefacts [J]. Journal of Cultural Heritage, 2000, 1(Suppl.1): S129-S137.
- [11] POZO-ANTONIO J S, RIVAS T, LÓPEZ A J, et al. Effectiveness of granite cleaning procedures in cultural heritage: a review [J]. Science of the Total Environment, 2016, 571: 1017-1028.
- [12] ORTIZ P, ANTÚNEZ V, ORTIZ R, et al. Comparative study of pulsed laser cleaning applied to weathered marble surfaces [J]. Applied Surface Science, 2013, 283: 193-201.
- [13] SALIMBENI R, PINI R, SIANO S. Achievement of optimum laser cleaning in the restoration of artworks: expected improvements by on-line optical diagnostics [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2001, 56(6): 877-885.
- [14] LING Xiulan, WANG Gao, ZHANG Chen. Investigation of laser cleaning on bronze cultural relics [J]. Laser Physics, 2016, 26(5): 055603.
- [15] 颜红, 花银群, 陈瑞芳, 等. 激光冲击强化铁镍合金摩擦磨损性能的研究 [J]. 中国激光, 2010, 37(增刊1): 364-367.
YAN Hong, HUA Yinqun, CHEN Ruifang, et al. Study on the tribological and wear behavior of FeNi alloy treated by laser shock processing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(Suppl.1): 364-367. (in Chinese)
- [16] 任旭东, 张田, 张永康, 等. 激光冲击处理提高00Cr12合金的疲劳性能[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2111-2115.
REN Xudong, ZHANG Tian, ZHANG Yongkang, et al. Improving fatigue properties of 00Cr12 alloy by laser shock processing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 2111-2115. (in Chinese)
- [17] LI Wei, DU Peng, ZHANG Jun, et al. Passivation process in quasi-continuous laser derusting with intermediate pulse width and line-scanning method [J]. Applied Optics, 2014, 53(6): 1103-1109.
- [18] LEITZ K H, KOCH H, OTTO A, et al. Numerical simulation of process dynamics during laser beam drilling with short pulses [J]. Applied Physics A, 2012, 106(4): 885-891.
- [19] 邱兆飏, 朱海红. 脉冲激光除锈工艺研究[J]. 应用激光, 2013, 33(4): 416-420.
QIU Zhaobiao, ZHU Haihong. Process parameter study on the removing rust using pulsed laser [J]. Applied Laser, 2013, 33(4): 416-420. (in Chinese)
- [20] GUO H, MARTUKANITZ R, DEBROY T. Laser assisted cleaning of oxide films on SUS409 stainless steel [J]. Journal of Laser Applications, 2004, 16(4): 236-244.
- [21] CHOUBEY A, SINGH A, MODI M H, et al. Study on effective cleaning of gold layer from fused silica mirrors using nanosecond-pulsed Nd: YAG laser [J]. Applied Optics, 2013, 52(31): 7540-7548.
- [22] 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.
- [23] KE L, ZHU Haihong, LEI Wenjuan, et al. Laser cleaning of rust on ship steel using TEA CO₂ pulsed laser [C]// Photonics and Optoelectronics Meetings (POEM) 2009. Wuhan, China: SPIE, 2009, 7515: 75150G.
- [24] 韩强, 安幸, 邓金花. 中国工业遗产保护发展历程[J]. 工业建筑, 2018, 48(8): 8-12.
HAN Qiang, AN Xing, DENG Jinhua. The development process of Chinese industrial heritage protection [J]. Industrial Construction, 2018, 48(8): 8-12. (in Chinese)
- [25] WANG Zemin, ZENG Xiaoyan, HUANG Weiling. Mechanism research of laser cleaning rubber layer on tire mold [C]// International Conference on Industrial Lasers. Wuhan, China: SPIE, 1999, 3862: 514-518.
- [26] OSTICIOLI I, SIANO S. Dependence of Nd: YAG laser derusting and passivation of iron artifacts on pulse duration [C]// International Conference on Fundamentals of Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies. St Petersburg, Russian: SPIE, 2013, 9065: 906513.
- [27] 李伟. 激光清洗锈蚀的机制研究和设备开发[D]. 天津: 南开大学, 2014.
LI Wei. Research on mechanisms of laser rust removal and manufacture of laser cleaning devices [D]. Tianjin: Nankai University, 2014. (in Chinese)
- [28] LV Xueming, PAN Yunxiang, JIA Zhichao, et al. Laser-induced damage threshold of silicon under combined millisecond and nanosecond laser irradiation [J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(11): 113102.

【中文责编: 方圆; 英文责编: 溯心】

补充材料

<http://journal.szu.edu.cn>