

油气管道激光除漆对基材组织和硬度的影响

江国业*, 雷璞, 刘宇平, 李敏, 庞铭, 胡艳娇

中国民航大学机场学院, 天津 300300

摘要 为了研究激光对油气管道外防腐层剥离的可行性,以及漆层清除对基体性能的影响,采用短脉冲激光器对 X65 管线钢上的环氧树脂防腐层进行激光除漆实验。采用三维形貌测试仪对除漆后的表面进行测试,并使用扫描电镜与能谱分析仪对试样的表面和横截面进行测试分析。两个试样经不同工艺参数的激光扫描后,漆层基本全部剥离,基体表面呈现出密集的火山口形貌,表层以下出现了带状区和裂纹区;试样 A、B 表层以下带状区的厚度分别约为 20 μm 和 10 μm ,裂纹区厚度分别约为 100 μm 和 90 μm ,表层硬度均小幅提升。本研究所采用的激光参数既满足了钢管除漆的要求,又对表层起到了强化作用。管道激光除漆技术在技术上是可行的,值得深入研究。

关键词 激光技术; 激光除漆; X65 管线钢; 宏观形貌; 显微组织; 硬度

中图分类号 TG174.461

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0302009

Laser Removal of Coating on Oil and Gas Pipelines: Effects on Microstructure and Hardness of Substrate

Jiang Guoye*, Lei Pu, Liu Yuping, Li Min, Pang Ming, Hu Yanjiao

College of Airport Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract To study the feasibility of laser exfoliation of the external coating of oil and gas pipelines and the effects of coating removal on the properties of the substrate, laser coating removal experiments were conducted on the epoxy resin coating on the X65 pipeline steel using a short-pulse laser. After coating removal, the pipe external surfaces were tested using a three-dimensional morphology tester. The surface and cross-section of each sample were tested and analyzed using scanning electron microscopy and energy spectrum analysis. After the two samples were irradiated using different laser technical parameters, the coating layers were almost completely exfoliated. At the same time, dense crater morphology was evident on the surface and strip-shaped and crack regions appeared below the surface. The strip-shaped regions beneath the surface were about 20 μm and 10 μm thick for samples A and B, respectively, while the crack regions were about 100 μm and 90 μm thick, respectively, and the hardness of both the samples' surfaces increased slightly. The laser technical parameters used in this research not only meet the requirements of laser coating removal for steel pipes but also strengthen the surface. Thus, coating removal is technologically feasible for steel pipelines and valuable for further investigation.

Key words laser technique; laser coating removal; X65 pipeline steel; macroscopic morphology; microstructure; hardness

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 160.5470; 180.5810

1 引 言

为了防止长距离输油输气管道腐蚀,通常会在管道外表面涂覆防腐层。管道长期服役,暴露在外的防腐层发生破损是不可避免的^[1],新防腐层涂覆

前的管道表面是至关重要的^[2],需要对原涂层进行除漆处理。目前,管道的除漆方法主要是人工机械法、机械清除法、水力清除法^[3-4],这些方法不可避免地会对表面造成一定的损坏^[5]。激光除漆被认为是一种能够有效替代传统方法的技术^[6-7]。

收稿日期: 2019-08-19; 修回日期: 2019-10-09; 录用日期: 2019-11-14

基金项目: 天津市研究生科研创新项目(2019YJSS070); 国家自然科学基金(U1633111); 中央高校基本科研业务费专项资金(19CX05007A)

* E-mail: guoyejiang@foxmail.com

激光除漆技术具有清洁效率高、可控性强、精度高且无污染环境等优点^[8-10]。目前,激光除漆技术在很多行业都有研究,并取得了一定成果^[11]。谭荣清等^[12]以自制试样来代替真实飞机蒙皮,采用高频 TEA CO₂激光器对漆层进行激光处理,结果发现,激光处理对试样基体材料的强度没有影响,这说明激光清洗能达到清洗的目的且不影响材料的继续使用。蒋一岚等^[13]采用高重复频率 CO₂激光器,通过选择合适的扫描间距、激光功率密度及扫描次数,对自制飞机蒙皮表面的两层油漆层实现了精准去除。靳森等^[14]通过实验研究发现,飞机金属蒙皮激光除漆和复合材料部件表面激光除漆的主要作用机制视激光参数而定,在清洗阈值到损伤阈值之间大多仍以振动效应为主。激光除漆除了在飞机蒙皮外漆层上的应用,在其他领域也有应用。刘峻亦等^[15]对高速列车集电环进行激光清洗后发现,清洗表面的显微硬度较基材略有提高,表面粗糙度有所降低,耐腐蚀性能得以提升,能满足应用要求。陈浩^[16]将红色丙烯酸树脂漆喷于 Q235 钢表面,喷涂厚度为 40 μm,之后再行除漆实验,得到了扫描速度、扫描次数、激光功率等对清洗质量的影响规律。此外,还有人针对激光去除特定材料、特定油漆的可行性进行了研究。郭为席等^[17]利用高功率脉冲 TEA CO₂激光器对喷涂有不同颜色、不同种类油漆的超低碳钢进行清洗实验后发现:对于不同颜色的相同漆种,激光清洗颜色较深的漆层时,完全清洗阈值及损伤阈值均较小;清洗颜色较浅的漆层时,完全清洗阈值及损伤阈值均较大。陈康喜等^[18]先在铝基板上喷涂白色油漆,然后采用激光清洗基板表面的漆层,结果发现,更高的人射激光能量将带来更剧烈的烧蚀效果和更好的除漆效果。胡太友等^[19]对均匀喷涂有厚度为 50 μm 丙烯酸树脂哑光黑色油漆的钛合金进行激光处理后发现,激光清洗可以实现表面材料的改性,在一定程度上能够改善基材的表面质量。

目前,激光除漆清洗研究主要集中在飞机、高铁、汽车等领域,对于高压油气输送管道的激光除漆研究还鲜见报道,其技术可行性有待明确。高压油气管道的工作压力动辄为几兆帕,管道承压能力对基体表面损伤非常敏感;同时,管道外防腐层通常以环氧树脂作为底漆,外部覆盖其他材料的漆层,与现有研究中的漆层差异较大。为此,本研究放弃自制漆层的研究方案,选择油气管道工

程中工厂预制涂层的 X65 管线钢开展激光全面除漆研究,分析除漆效果和激光除漆对基体的影响,评估激光对管道外防腐层除漆的可行性,为以后输油管道防腐层的修复提供新的工艺选择。

2 试样制备与实验方法

2.1 试样成分

试样材料为 X65 高强度管线钢,其外表面为工厂预制的环氧树脂涂层。环氧树脂粉末涂层的热导率为 0.14 W/(m·K),热膨胀系数为 $62.4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,密度为 $1.21 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,比热容为 1884 J/(kg·K)。试样涂层的化学组成主要包括碳、氢、氧元素。带漆层管线钢实物如图 1 所示,管线钢的化学成分如表 1 所示。



图 1 带漆层的管线钢

Fig. 1 Pipeline steel with coating

表 1 X65 管线钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of X65 pipeline steel

Element	C	Si	Mn	P	S	Fe
Mass fraction / %	0.059	0.26	1.52	0.01	0.0013	Bal.

2.2 实验方法

本次实验采用中国科学院半导体所研制的半导体泵浦激光器,其脉宽为 100 ns,重复频率为 100 kHz。设定激光除漆实验的基本工作参数如下:工作电压为 380 V,脉宽为 100 ns,重复频率为 13 kHz,光斑直径为 200 μm。本研究组参照其他材料的除漆经验进行探索性研究,对两个试件进行激光除漆时每个试件均叠加了三个激光功率/扫描速度组合,扫描方式为从起始端扫到末端,每扫完一次,激光器回到起始端准备下一次扫描(扫描方向及起始端在图 5 中给出)。实际除漆工艺参数如表 2 所示。其中, A 试样在 250 W、10 mm/s 条件下扫描一遍后漆层无明显脱落,直到在该组激光处理参数下连续扫描 5 次之后, A 试样的漆层才有变化。待两个试样外防腐层目视基本除净后,停止实验。

表 2 试样除漆工艺参数

Table 2 Coating removal process parameters of samples

Sample piece number	Number of scan	Power /W	Speed / (mm·s ⁻¹)
A	1	150	10
	5	250	10
	1	250	20
B	1	150	20
	1	250	5
	1	250	5

采用 SX-5 三目连续变倍体视显微镜观察除漆实验结束后的试样表面是否有残留漆, 并采用 NANOVEA 三维形貌仪非接触式测量试样的表面形貌特征。对试样 A、B 的横截面进行打磨抛光及腐蚀处理后, 采用 AFT-DC130 光学显微镜观察试样的宏观形貌, 然后采用 Quanta 450 扫描电镜进行微观组织分析和能谱分析, 最后采用 HVS-1000Z 维氏硬度仪测试试样横截面的硬度。

3 结果分析与讨论

为了评估高压油气管道激光除漆的可行性, 从漆层所在表面和横截面两个方面, 分析漆层残留及金属损伤情况。

3.1 表面除漆效果分析

图 2 是除漆后的试样, 可以看出: 试样 A 表面的绿漆基本去除, 但在下部稍有残留; 试样 B 表面

能明显看到残留的绿漆(如椭圆框区域), 下部为切割机切割管道时的烧蚀痕迹。

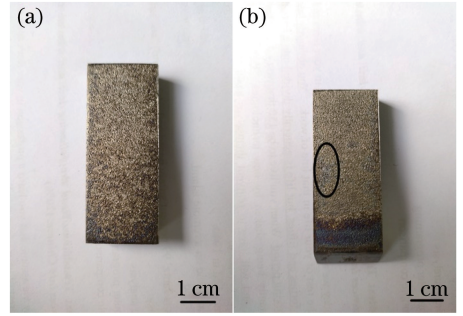


图 2 激光除漆后的试样。(a)试样 A;(b)试样 B

Fig. 2 Samples after coating removal.

(a) Sample A; (b) sample B

对试样 A 表面进行分区域显微观察, 区域分布与原试样空间位置关系一致, 结果如图 3 所示。方框区域是残留漆集中的区域, 按照颜色从深到浅对残留情况分成三个等级(I、II和III), 如圆框区域。由图 3 可知: 1、2 两个区域的漆层几乎完全去除, 只留有极个别漆点; 上部最右端(3 区)的残漆比较多, 约占 8%; 中部 4~6 区的规律与上部 1~3 区基本相同, 4、5 区的残漆很少, 6 区的残余漆约占 3%; 下部 7 区的残漆约占 5%, 8 区基本没有残漆, 9 区的残漆约占 9%。对上中下三部分来说, 各部分的中间区域(2、5、8 区)几乎没有残漆。试样 B 表面残漆的分布及含量与试样 A 基本一致, 残漆主要分布在试样中部的左

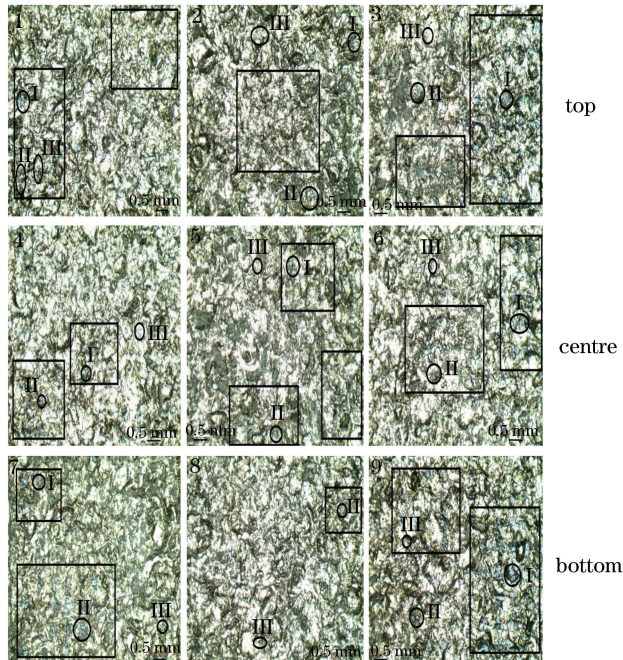


图 3 试样 A 除漆表面的显微组织

Fig. 3 Optical micrographs of cleaned surface of sample A

侧位置、中部右侧位置、下部的左右两侧。

综合起来看,由于激光的加热作用,激光扫描路径前方接收的热量少于激光扫描路径后方的,所以试样上部的漆层残留少于下部的漆层残留;由于试样中部散热慢,温度高,容易达到漆层的熔点,所以左右两侧的漆层残留多于中间部位的;在热量输入较小的情况下,不能在接触面和基底之间形成足够的热应力,导致这些残漆不能剥离。

为进一步验证表面是否有漆残留,并找到残余漆的微观呈现形式,对两种试样进行能谱扫描,结果发现二者的规律相似。试样 A 的面扫描图如图 4 所示,可以看出:试样 A 扫描区域内的铁元素为主要元素,其原子数分数为 66.81%;其次是碳元素和氧元素,其原子数分数分别为 18.02% 和 10.95%,这与管线钢原本极低的碳含量和无氧元素相矛盾;碳元素和氧元素主要分布在聚集了较多小尺寸球状物的凹坑内,凹坑面积占比较小。因为本研究采用的管道外覆盖层为环氧树脂粉末,其主要成分为碳、氢和氧元素,因此可以判定凹坑内分布较多的是环氧树脂残留物。此外,在实验中适当地通入了压缩空气,所以氧元素含量的增多也有一部分原因是经过了多次激光扫描,温度升高,铁元素与氧气发生反应生成的氧化物没有被压缩空气及时吹走,而是与熔融的基底结合了。

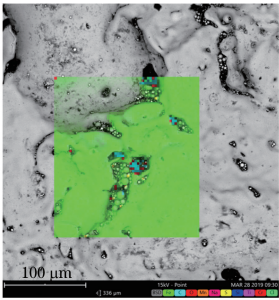


图 4 试样 A 表面的元素分布

Fig. 4 Element profile on the surface of sample A

3.2 除漆后漆层下方的金属表面形貌

为了确定激光扫描对金属的影响,将除漆后的试样放在电镜下观察,其表面形貌如图 5 所示。

由图 5 可以看出,整个试样表面存在网格栅栏,四周边缘处较为明显,其实这些网格是烧蚀留下的小坑。经激光除漆后,试样表面出现了密集的坑洼,这些小坑直径约为 200 μm。为了能更明显地看出除漆后试样的表面形貌,分别测量试样 A、B 除漆后的三维形貌特征,结果如图 6 所示。对比图 6(a)、(b)可以看出:试样 A 的凹坑更深,但是火山口状的

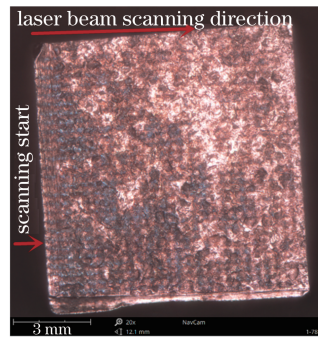


图 5 试样 A 表面的宏观形貌

Fig. 5 Surface macroscopic morphology of sample A

边壁更厚且更圆滑;试样 B 的凹坑深度较试样 A 浅,且火山口状的边壁薄很多,凹坑边缘更加尖锐,这一情况也间接导致试样 B 的凹坑数量比试样 A 多。在两试样上均能直观地看到凹坑的存在,且凹坑尺寸基本与光斑大小相匹配,不同之处是:试样 A 三维形貌图中最高点与最低点的差值更大,为 103.903 μm;试样 A 偏斜度 sku 数值为 3.363,试样 B 的 sku 数值为 2.89,与试样 A 凹坑更深更陡峭、试样 B 凹坑深度较小的结论相对应。

这些凹坑是管道壁面外部原有的网格栅栏与激光能量注入共同作用的结果。试样表面坑洼形成的具体原因是:每个光斑光强为高斯分布,光斑中心注入能量比周围大得多,脉冲辐照带来的冲击力和温升更大,温度达到管材基底的熔点后,管道外壁面的局部发生熔融,再加上激光对中心部位的冲击效应,导致中部塌陷,部分熔融态基底向周围堆集,整个过程是快速升温而后迅速冷却,从而最终凝固形成火山口形貌。

在试样 A、B 的除漆实验中发现,低功率扫描对覆盖层的外观没有直观影响,采用高速度和高功率多次扫描,虽然输入的能量较高,但还未达到覆盖层剥离的临界值,故而不及低速度和高功率下的除漆效果。但在高速度场景下,由于试样 A 多次扫描的热输入和热累积比试样 B 多,所以试样 A 在形成凹陷之后,经过多次熔化、凝固,熔融基底向周围边壁堆积,试样 A 的表面就较试样 B 更平滑,火山口壁较试样 B 更厚。

由图 5 可以看出,越靠近扫描起始端,烧损越严重。这是因为起始端能量的多次聚集以及积累导致局部温度逐渐升高,达到损伤阈值,并且相邻处激光扫描所获得的能量也会通过热传导使热量继续累加。随着除漆参数的变化,烧蚀影响程度有所不同,但两试样在表面均可见密集的火山口形貌。

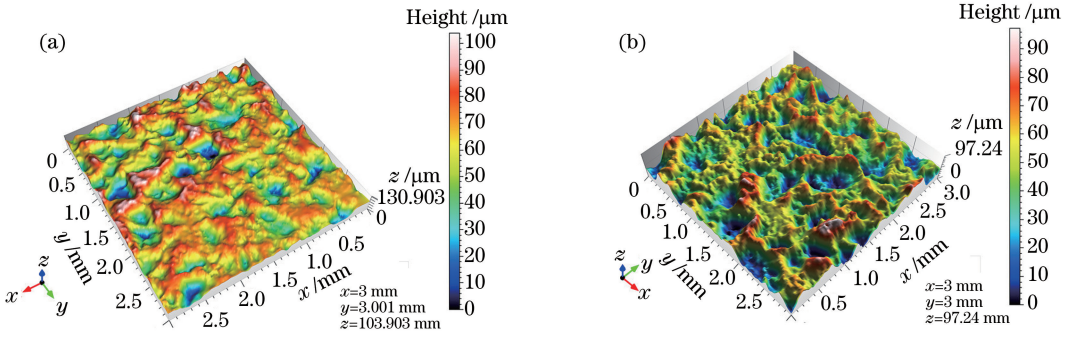


图 6 除漆后试样表面的三维形貌。(a)试样 A;(b)试样 B

Fig. 6 Three-dimensional surface morphology of samples after coating removal. (a) Sample A; (b) sample B

3.3 横截面微观组织

采用扫描电镜在不同倍数下观察两试样的横截面形貌,结果如图 7、8 所示,可以看出:两试样除漆后的表面沿 y 轴方向有一定深度的影响区,分别为紧贴表面的黑色带状区和黑色带状区下边密集分布的灰色阴影裂纹分布区,这里分别称之为带状区和裂纹区;在顶部的带状区域并不是完全连续的,而且宽度在不断变化,个别区域与下部裂纹区之间有间隙。两试样在横截面方向上的影响区深度从左到右不断变化,其中试样 A 带状区的平均深度约为 $20\ \mu\text{m}$,试样 B 带状区的平均深度约为 $10\ \mu\text{m}$ 。在裂纹区,对图 7(a)和图 8(a)圆框 2 处放大分别得到图 7(b)和图 8(b),可以观察到密集分布的灰色阴影;对图 7(b)和图 8(b)中红色圆框处继续放大可以看到裂纹,并且裂纹起始于阴影边界,也终止于阴影边界,而且每个阴影都是相互独立的。试样 A 裂纹区的平均深度为 $100\ \mu\text{m}$,试样 B 影响区深度的平均值为 $90\ \mu\text{m}$ 。试样 A 的影响范围比试样 B 更大,这是因为试样 A 的扫描次数比试样 B 多,且第一次扫描速度相对更小,对试样 A 输入的总能量更多,且作用时间更长,从而导致影响区深度有所差异。激光辐照到漆层表面后,随着一定厚度的表面漆层气化之后,激光能穿透漆层到达基底表面。漆层的热膨胀系数为 $62.4 \times 10^{-6}\ \text{K}^{-1}$,基底材料的热膨胀系数为 $15\ \text{K}^{-1}$ (两者相差 6 个数量级)。辐照对扫描区域带来的温度骤升和骤降,使得漆层与基底在极短的时间内均发生膨胀,但基底的膨胀更为明显。漆层膨胀引起的形变与基底材料膨胀之后冷却产生的位移共同导致了漆层的剥离。同时,基底表面及以下一定厚度范围内出现较大的热振动,基底表层在熔融状态下发生变形,进而引起晶体结构发生变化,从而在表层形成了一定厚度的新相,即黑色带状区。带状区形成的另一个原因是基底表面在激光快

速注入大量能量的条件下温度迅速升高而后又急速冷却,以及激光所带来的光机械效应导致基底形成的新的表层组织^[19],在经历了多次扫描以及光斑纵向纵向重叠的不断变化之后,最终形成了厚度不一且不连续的带状区域。通过本实验工艺参数计算得出的峰值功率密度为 $16.33 \times 10^7\ \text{W}/\text{cm}^2$,它小于等离子体所需的 $10 \times 10^{10}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 的峰值功率密度^[20],因此排除了等离子体产生带状区的可能。对比图 7 与图 8 可以看出:试样 A 裂纹区的灰色裂纹密集程度高于试样 B,但是两试样裂纹区的裂纹宽度基本都为 $0.2\ \mu\text{m}$ 。两试样裂纹区裂纹的成因如下:随着激光辐照的持续,漆层厚度不断变薄,慢慢达到了激光可以穿透的厚度,漆层和基底两种材料的热导率及其他热物性参数不同,其中 X65 管线钢的热导率为 $50.5 \sim 29\ \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,而环氧树脂的为 $0.14\ \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,环氧树脂热导率随温度升高而逐渐增大(但变化量很小^[21]),两种材料的热导率相差两个数量级之多,导致在漆层与基底接触面处两种材料的温度差异显著,温度梯度也非常大^[6],接触面产生的巨大热应力一方面会造成漆层破裂,另一方面会使得基底产生裂纹。由横截面影响区的厚度可知,温度急剧升高只是存在于接近表层以下的一定深度内,且热量传递的方向性,使得影响区范围内每个位置处的温度也是不同的,在裂纹存在的这些地方,温度能够达到基底本身所含锰、硅、磷、硫元素的熔点,锰、硅、磷元素一部分发生氧化生成氧化物到达基底表层,而硫元素则形成气体,造成这些元素原来存在的位置处的组织结构发生变化,产生额外的力^[20],最终导致裂纹生成。由于试样 A 在整体除漆过程中注入的能量过多,试样经历了更多的快速升温以及急剧冷却的过程,因此较试样 B 有更多的裂纹区域,且影响区深度更大。

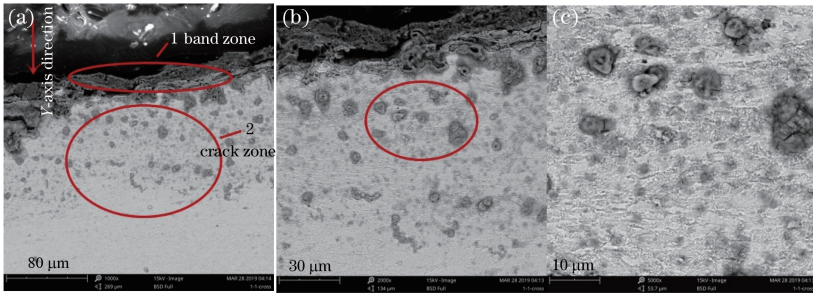


图 7 试样 A 的表层显微组织。(a) $\times 1000$;(b) $\times 2000$;(c) $\times 5000$

Fig. 7 Surface microstructures of sample A. (a) $\times 1000$; (b) $\times 2000$; (c) $\times 5000$

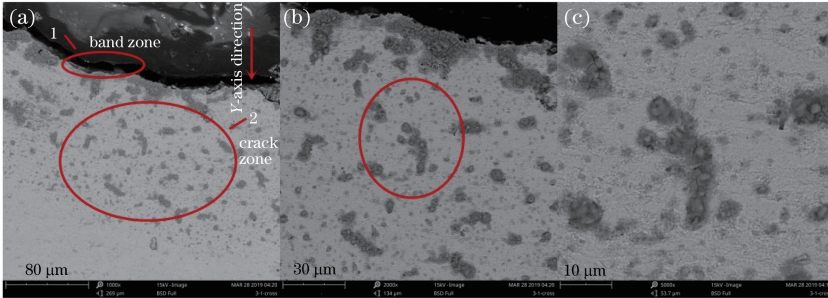


图 8 试样 B 表层的显微组织。(a) $\times 1000$;(b) $\times 2000$;(c) $\times 5000$

Fig. 8 Surface microstructures of sample B. (a) $\times 1000$; (b) $\times 2000$; (c) $\times 5000$

3.4 横截面硬度分布

在试样 A、B 的横截面上,靠近覆盖层垂直向下测量硬度,测量结果如图 9 所示。结果表明:试样 A、B 的硬度分别在距表面 1.5 mm 和 4.2 mm 以内比基体硬度大(实验用 X65 管线钢的硬度约为 320 HV,施加载荷为 2.94 N,保载时间为 15 s),试样 A 的峰值硬度在表层,也就是带状区,硬度为 389 HV;试样 B 的峰值硬度也在带状区,硬度为 388.8 HV。从图 9 中可以看到:与第一个测试点相比,两试样第二个测试点的硬度都大幅度下降,之后硬度存在波动,但总体趋势是缓慢下降的,试样 A 的硬度下降到 320 HV 后又有小幅度上升,但紧接着又下降到 310 HV,与基体硬度值 320 HV 相比有明显的起伏;与试样 A 相比,试样 B 的硬度在达到

基体硬度后,硬度的波动总体在 320 HV 以上,仅有一个值在 320 HV 以下。这是因为激光能量在使漆层气化的同时也使表面及表面以下一定深度形成新的组织结构与缺陷,即上文提到的带状区和裂纹区。带状区是激光多次辐照基体使其熔化、凝固后形成的新组织,表层相比深度更深区域的冷速和升温速度更快,这一过程类似于表面淬火,多次扫描处理使得硬度提升很多。下方裂纹区灰色阴影裂纹的平均直径仅为 $5\ \mu\text{m}$,其周围没有裂纹的地方经过了多次极速升温和极速冷却,也相当于进行了淬火处理,但与表面相比,该区域的温升、温升速度以及散热速度都要小,故硬度低于表层。由于这些灰色阴影裂纹在这一区域密集分布,导致该区域内硬度发生波动。由于试样 A 注入的能量较试样 B 多,灰色阴影裂纹

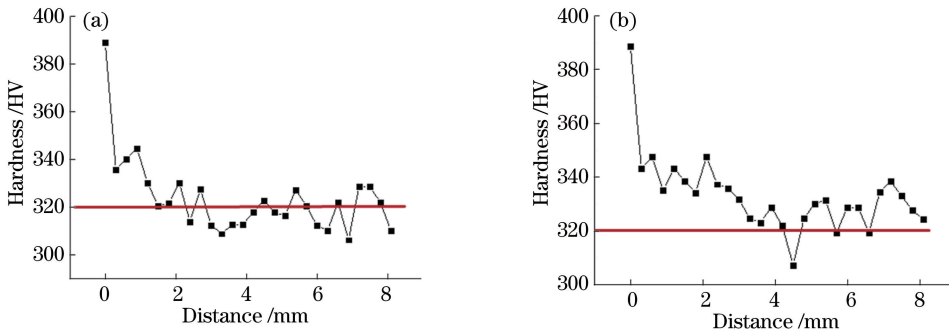


图 9 试样的横截面硬度。(a) 试样 A;(b) 试样 B

Fig. 9 Cross-sectional hardness of samples. (a) Sample A; (b) sample B

处的元素氧化以及蒸发都较试样 B 多,裂纹宽度也大,因此这些地方的硬度就会低于基体。试样 B 中也存在比基体硬度低的点,这是因为在试样 B 中也有元素蒸发及氧化过多的位置,但是相比试样 A 少很多。总体来说,两试样的硬度均较基体试样提高了。

4 结 论

对输油管道外壁面进行激光除漆实验,在激光扫描的起始端和非边缘部位,能量输入强度大,散热相对慢,管壁表面的大面积漆层均已去除,仅在少量凹坑内有漆层残留,除漆效果好。

在激光辐照作用下,漆层被清除后,漆层以下的试样表面呈现不规则的凹坑,凹坑大小与光斑直径吻合。试样表面具有火山口特征。在中等能量的多次输入下,火山口较为圆润。

两试样均形成了带状区和裂纹区,试样 A、B 带状区的厚度分别约为 $20\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$,裂纹区厚度分别约为 $100\ \mu\text{m}$ 和 $90\ \mu\text{m}$ 。裂纹形成与热应力、元素氧化有关。激光处理对 $100\ \mu\text{m}$ 左右深度处的表层金属有不同程度的影响,表层金属硬化(硬度最大可达到 389 HV),浅层金属的硬度小幅波动。

激光除漆对能量输入比较敏感,较高的能量输入能使漆层清除得更彻底,但需要在除漆效果和表层金属性能两方面进行权衡,找到在技术上可行且经济的方案。

参 考 文 献

- [1] Ren Z J. Statistical analysis of test results of external coating for Rizhao-Dongming oil pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(10): 1105-1107.
任增珺. 日东输油管道外防腐层检测结果统计分析[J]. 油气储运, 2014, 33(10): 1105-1107.
- [2] Chen G X, Kwee T J, Tan K P, et al. Laser cleaning of steel for paint removal[J]. Applied Physics A, 2010, 101(2): 249-253.
- [3] Wang P, Yu Q H. Technology and application of coating repair technology in buried pipelines[J]. Total Corrosion Control, 2015, 29(6): 79-82.
王朋, 于庆华. 埋地管道防腐层修复技术及应用[J]. 全面腐蚀控制, 2015, 29(6): 79-82.
- [4] Zhao X. Detection and repairing techniques for oil and gas pipeline corrosion[J]. Refining and Chemical Industry, 2015(1): 32-34, 35.
赵鑫. 油气管道腐蚀的检测与修复技术[J]. 炼油与

- 化工, 2015(1): 32-34, 35.
- [5] Drakaki E, Karydas A G, Klinkenberg B, et al. Laser cleaning on Roman coins[J]. Applied Physics A, 2004, 79(4/5/6): 1111-1115.
- [6] Daurelio G, Chita G, Cinquepalmi M. Laser surface cleaning, de-rusting, de-painting and de-oxidizing[J]. Applied Physics A, 1999, 69(S1): S543-S546.
- [7] Lei Z L, Tian Z, Chen Y B. Laser cleaning technology in industrial fields [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 030005.
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.
- [8] Li P, Shi H X, Fu C, et al. High power nanosecond pulsed ytterbium-doped fiber laser for laser cleaning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(12): 121406.
李磐, 师红星, 符聪, 等. 激光清洗用高功率纳秒脉冲掺镱光纤激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 121406.
- [9] Guo Z H, Zhou J Z, Meng X K, et al. Nanosecond-pulsed-laser paint stripping of HT250 gray cast iron[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1002012.
郭召恒, 周建忠, 孟宪凯, 等. HT250 灰铸铁纳秒脉冲激光除漆工艺研究[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1002012.
- [10] Wang D L, Feng G Y, Deng G L, et al. Study of mechanism on laser paint removal based on the morphology and element composition of ejected particle[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(10): 1003007.
王德良, 冯国英, 邓国亮, 等. 基于颗粒形貌及成分分析的激光除漆去除机理研究[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1003007.
- [11] Shi S D, Du P, Li W, et al. Research on paint removal with 1064 nm quasi-continuous-wave laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(9): 0903001.
施曙东, 杜鹏, 李伟, 等. 1064 nm 准连续激光除漆研究[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0903001.
- [12] Tan R Q, Zheng G, Zheng Y J, et al. The effect of laser paint stripping on the mechanical properties of the substrate[J]. Laser Journal, 2005, 26(6): 83-84.
谭荣清, 郑光, 郑义军, 等. 激光除漆对基材力学性能的影响[J]. 激光杂志, 2005, 26(6): 83-84.
- [13] Jiang Y L, Ye Y Y, Zhou G R, et al. Research on laser paint removing of aircraft surface[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12): 1206003.
蒋一岚, 叶亚云, 周国瑞, 等. 飞机蒙皮的激光除漆技术研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12):

- 1206003.
- [14] Jin S, Wang J X, Yuan X D, et al. Laser paint removal technology for aircraft metal skin and composite materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(17): 63-70.
靳森, 王静轩, 袁晓东, 等. 飞机金属蒙皮以及复合材料表面激光除漆技术[J]. 航空制造技术, 2018, 61(17): 63-70.
- [15] Liu J Y, Qi X S, Han X H, et al. Surface performance evaluation of laser cleaning for high-speed train slip ring[J]. Applied Laser, 2019, 39(2): 250-255.
刘峻亦, 齐先胜, 韩晓辉, 等. 激光清洗高速列车集电环表面性能评估[J]. 应用激光, 2019, 39(2): 250-255.
- [16] Chen H. Process of basic research on laser cleaning technology of car body surface paint[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
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.
- [17] Guo W X, Hu Q W, Wang Z M, et al. Paint removal research on high power pulse TEA CO₂ laser[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2006, 4(3): 32-35.
郭为席, 胡乾午, 王泽敏, 等. 高功率脉冲 TEA CO₂ 激光除漆的研究[J]. 光学与光电技术, 2006, 4(3): 32-35.
- [18] Chen K X, Feng G Y, Deng G L, et al. Study on the mechanism of laser paint removal based on emission spectrum and composition analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(9): 2956-2960.
陈康喜, 冯国英, 邓国亮, 等. 基于发射光谱及成分分析的激光除漆机理研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(9): 2956-2960.
- [19] Hu T Y, Qiao H C, Lu Y, et al. Effects of laser de-painting on microstructure and properties of Ti17 alloy[J]. Surface Technology, 2018, 47(3): 7-12.
胡太友, 乔红超, 陆莹, 等. 激光除漆对 Ti17 合金表面组织性能的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 7-12.
- [20] See T L, Chantzis D, Royer R, et al. Ultraviolet-diode pump solid state laser removal of titanium aluminium nitride coating from tungsten carbide substrate[J]. Lasers in Manufacturing and Materials Processing, 2017, 4(3): 93-107.
- [21] Zhu F, Gao X N. Influences of temperature on thermophysical properties of epoxy resin [J]. Guangdong Chemical Industry, 2015, 42(9): 4-5.
朱峰, 高学农. 温度对环氧树脂热物性影响的研究[J]. 广东化工, 2015, 42(9): 4-5.