

激光表面处理技术在石油机械中的应用

黄俊媛¹, 沈泽俊^{1*}, 张立新¹, 魏松波¹, 杨盈莹², 朱世佳¹, 钱杰¹, 陈琳¹

¹ 中国石油勘探开发研究院采油采气装备研究所, 北京 100083;

² 中国科学院半导体研究所, 北京 100083

摘要 石油开采的过程中常伴随有腐蚀性气体、金属颗粒以及矿物质等的产生,使石油机械设备腐蚀、磨损严重。激光表面处理技术可以改善材料的耐磨、耐蚀、耐疲劳等性能。总结激光表面处理技术在石油机械中的应用,详细介绍了激光淬火、激光熔覆及激光合金化,并概括了其他激光表面处理技术及其应用,分析了激光表面处理技术在石油机械中的应用现状及存在的问题,并展望了发展前景。

关键词 激光技术; 表面处理; 激光淬火; 激光熔覆; 激光合金化; 石油机械

中图分类号 TG178; TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.060005

Applications of Laser Surface Treatment Technologies in Petroleum Machinery

Huang Junyuan¹, Shen Zejun^{1*}, Zhang Lixin¹, Wei Songbo¹, Yang Yingying²,
Zhu Shijia¹, Qian Jie¹, Chen Lin¹

¹ Department of Petroleum Equipment, Petro China Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;

² Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract The process of petroleum extraction is often accompanied by the production of corrosive gases, metal particles and minerals, resulting in the serious corrosion and wear of petroleum machinery and equipment. Laser surface treatment technology can improve the material properties, such as wear resistance, corrosion resistance and fatigue resistance of parts and workpieces. The applications of laser surface treatment technologies in the petroleum machinery are summarized. The laser quenching, laser cladding and laser alloying are introduced in detail. The other laser surface treatment technologies and their applications are also summarized. The application status and exiting problems of laser surface treatment technologies in the petroleum machinery are analyzed and their development prospects are also put forward.

Key words laser technique; surface treatment; laser quenching; laser cladding; laser alloying; petroleum machinery

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 240.6700; 350.3390

1 引言

石油机械设备大多暴露在氯化物、硫化物、二氧化碳、盐水、海水等恶劣的环境下,要承受拉力、压力和扭力矩等复杂交变应力,同时要经受大排量和高

流速的钻井/完井液、泥浆、砂液等冲蚀,腐蚀、磨损十分严重^[1-2]。我国平均每年发生 500 多起钻具失效事故,造成了严重的经济损失,耗费数千万美元各种规格的进口井下钻具。石油机械设备要达到具有高抗性(抵御恶劣工况的性能)、高强度、高耐磨、优

收稿日期: 2018-08-22; 修回日期: 2018-09-27; 录用日期: 2018-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(61675194)、北京市自然科学基金(4162061)、中国石油国际科技合作科学研究与技术开发项目(2015B-1706-01)

* E-mail: zjshen@petrochina.com.cn

良自润滑性、耐腐蚀和耐冲蚀等综合性能的要求,单凭优选材料是远远不够的,须配合材料表面处理工艺来提高材料的综合性能^[3-5]。

激光表面处理技术的研究始于20世纪60年代,但是直到20世纪70年代初研制出大功率激光器之后,激光表面处理技术才获得实际应用,并得到迅速发展。其可以改善材料表面的力学性能、冶金性能、物理性能,从而提高零件、工件的耐磨、耐蚀、耐疲劳等一系列性能,以满足不同的使用要求^[6-8]。俄罗斯用激光表面处理技术使钢铁产品的应用范围急剧扩大,摩擦系数降低20%~30%。我国石油机械应用激光表面处理技术始于20世纪90年代初,经过几十年的发展,已初步应用于实际生产。激光淬火、激光熔覆等激光表面处理技术已在国内几个大型油田中得到应用并逐步推广^[9]。

2 激光表面处理技术的原理、特点及分类

激光表面处理技术是利用激光的高能量对工件进行处理的一种热加工方式,激光束照射工件表面使材料进行无损加热,高温使之熔化、蒸发、气化并溅出,随后激光束被切断或移开,工件表面快速冷凝达到表面

改性的目的^[10]。激光具有高能量、高密度的特性,功率密度可达 $10^8 \sim 10^{10} \text{ W/cm}^2$,温度可达10000℃以上,可实现无接触加工^[11-12],非常适合进行材料表面处理,激光表面处理技术具有以下特点^[13-14]:

- 1) 激光束易于传输和导向,可对工件局部或复杂零件表面和内部进行处理;
- 2) 能量作用集中,加工时间短,热影响区小,工件变形小;
- 3) 极易与数控系统配合,实现自动化控制,劳动生产率高;
- 4) 加工成本低,节省能源,不造成环境污染;
- 5) 通常只能处理一些薄板金属,不适宜处理较厚的板材;
- 6) 激光对人眼的伤害性可能影响工作人员的安全,须致力于发展安全设施。

激光表面处理技术可以改善材料表面的力学性能、冶金性能、物理性能,从而提高零件、工件的耐磨、耐蚀、耐疲劳等性能。围绕激光加工的特点,相继研究开发出一系列具有工业应用价值的激光表面处理技术,大体分为激光淬火、激光熔覆、激光合金化、激光冲击硬化和激光非晶化等。Verezub等^[15]对激光表面处理技术进行了总结,分类如图1所示。

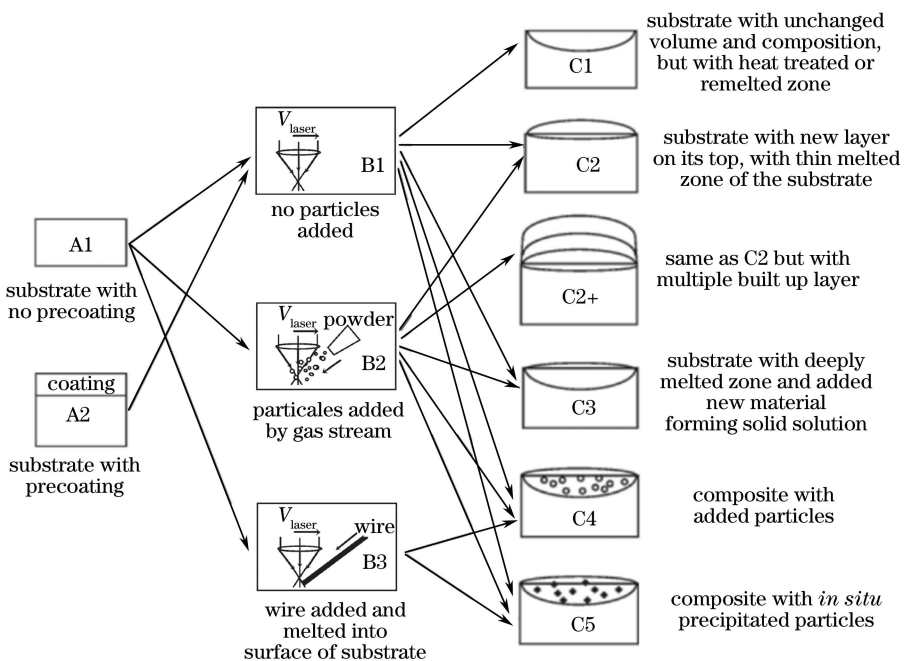


图1 激光表面处理技术的分类

Fig. 1 Classification of laser surface treatment technologies

3 激光表面处理技术在石油机械中的应用

激光表面处理技术在石油机械中主要用于发电

机转子轴承位置再制造,汽轮机叶片、转子再制造,烟机轮盘再制造,各种腐蚀性泵体表面激光耐蚀熔覆,石油输送管道激光强化,石油开采平台钻井螺杆

及扶正器、稳定器等零部件表面的激光防腐、耐磨熔覆等。表1为近几年激光表面处理在石油机械中的应用。国内许多公司、科研院所、高校等都致力于激光表面处理的研究,如武汉华工激光工程有限责任公司、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、

中国科学院半导体研究所、清华大学等。中国科学院半导体研究所全固态光源实验室致力于激光清洗、激光熔覆的研究^[16]。清华大学钟敏霖实验组长年致力于研究激光合金化、激光熔覆、激光微纳加工等激光表面处理技术^[17-18],且处于国内外领先水平。

表1 激光表面处理在石油机械中的应用

Table 1 Applications of laser surface treatment in petroleum machinery

Machine part	Technology	Material	Laser	Power / kW	Speed / (mm·s ⁻¹)	Pre-processing hardness	Post-processing hardness	Improved performance	Year
Hot rolled steel	Laser cleaning	Q235	Nd:YAG	0.05-0.60			HRC16	Oxide layer effectively removed	2017 ^[16]
	Laser cladding of Cu-Mn alloys	45	CO ₂					Nano porous coating successfully prepared	2011 ^[17]
Pipe	Laser quenching	37CrMnMo		2	1200	HRC34	HRC60	Wear resistance/ Hardening depth	2015 ^[19]
Bearing	Laser quenching	18CrNiMo	CO ₂	1.1	55	HRC11	HRC65	Hardness/ Wear resistance	2016 ^[20]
Mud pump liner	Laser quenching	high-chromium iron	CO ₂	2.5	17	HRC47-52	HRC107	Wear resistance/ Service life	2017 ^[21]
Gear	Laser quenching	20CrMnTi	CO ₂	0.15	16	HRC52	HRC62	Wear resistance/ Corrosion resistance	2017 ^[22]
Oil pump	Laser quenching/ nitriding	35CrMoA	CO ₂	2	33	HRC32	HRC67	Hardness/ Wear resistance	2010 ^[23]
	Laser fusion/ quenching	42CrMo	Fiber	1.5	3.3	HRC31	HRC59	Hardness	2011 ^[24]
Bent axle	Laser cladding of Fe base alloy	45	CO ₂	4	8.3	HRC15	HRC53	Hardness	2014 ^[25]
	Laser quenching/ nitriding	30CrMnSi	CO ₂	1		HRC30	HRC62	Hardness/ Thickness	2015 ^[26]
Blower rotor	Laser cladding of Ni base powder	40Cr	CO ₂	2			HRC25	Recovered	2011 ^[27]
Water pump plunger	Laser cladding of Ni base powder	45		1.2	5	HRC45	HRC53	Service life/ Cost	2017 ^[28]

Machine part	Technology	Material	Laser	Power / kW	Speed / (mm·s ⁻¹)	Pre-processing hardness	Post-processing hardness	Improved performance	Year
Steam turbine cylinder	Laser cladding of Co base powder	25		1.2	11.6			Repaired	2017 ^[29]
	Laser cladding of CaF ₂ /Ni powder	Q235A	Fiber	2.2	2.6	HRC13	HRC66	Hardness	2017 ^[30]
N80 tubing	Laser alloying of powder		CO ₂	2.8~3.1	11.6	HRC24	HRC55	Hardness/ Corrosion resistance	2017 ^[31]
Screw	Laser nano alloying	40Cr	CO ₂	2~2.5	3.3~6.6	HRC25	HRC62	Hardness/ Service life	2007 ^[32]
Turbine blade	Laser alloying of powder	2Cr13	CO ₂		3.3~6.6	HRC25	HRC60	Hardness	2007 ^[33]
Welded joint of X80 pipeline	Laser shock peening	X80	Nd:YAG					Fatigue strength	2014 ^[34]
Dry gas seal ring	Laser ablation	SiC/SiNi	Fiber					Flexible processing	2013 ^[35]
	Laser surface texture	45	Fiber					Hardness/ Wear resistance	2017 ^[36]

3.1 激光淬火

激光淬火与常规表面淬火相比具有加热速度极快、冷却速度很快、不需要冷却介质、表面粗糙度高、表面硬度高、一般不需回火等优点,与常规淬火相比,得到的硬度提高 15%~20%,耐磨性提高 2~4 倍,同时硬化层的耐腐蚀性也极大地提高,工件综合机械性能良好,甚至可使普通材料达到优质材料所具有的强度和硬度。但激光表面淬火技术的使用局限性也比较大,适用于需表面硬化且淬硬层较浅的零件^[37-38]。因此,激光表面淬火工艺通常应用在不需整体淬硬、工件精度要求高,或者用其他淬火方式难以处理,以及形状复杂需要进一步提高硬度、耐磨性的工件上,比较适合齿轮、曲轴、气缸、整体泵泵筒等细长管类的表面处理^[39]。表 2 为激光淬火与其他常见表面淬火方法的比较。

激光淬火已经应用于组合泵缸套、整体泵泵筒、油管螺纹和钻杆接头螺纹等零件的表面改性,有效

提高了零件的耐磨性、延长了使用寿命和更换周期。史春轩等^[40]对美国石油学会(API)油管螺纹表面进行淬火,硬化层深度控制在牙顶 0.4~0.8 mm,牙底 0.1~0.4 mm,淬硬层硬度控制在 320~400 HV,增强了螺纹的表面硬度和耐磨、耐蚀性能,有效解决了油管黏扣问题,如表 3 所示,螺纹精度并未受到影响。葛鹏飞^[19]对石油钻杆进行激光淬火,接头表面硬度比氮化表面硬度高 10%左右,硬化层深度是氮化表面厚度的 2~3 倍,极大地提高了钻杆接头螺纹的机械性能和使用寿命。郝广辉^[20]对牙轮钻头球面浮动套轴承进行激光淬火,使得球面浮动套轴承内外表面的硬化层硬度达到了 833.454 HV,而轴承芯部硬度值在 200 HV 左右,提高了轴承的耐磨性,也实现了球面浮动套轴承的外刚内韧。华希俊等^[21]对泥浆泵缸套表面进行激光淬火,淬硬区微观组织如图 2 所示,硬度显著提高,可达 1105.7 HV,表面摩擦系数也从未淬火的 0.65 下降到淬火后的

0.3, 磨损率也显著减小。计算机数值模拟为激光淬火过程提供了良好的理论基础, 对实验研究及应用均具有重要的参考价值^[41-42]。青岛理工大学惠英龙等^[43]模拟了 18CrNi8 齿轮钢在激光淬火时的温度场, 比较真实地模拟了齿面的激光淬火过程, 模拟结果和实际情况极为相近。将激光淬火与其他常用的

热处理方法、热-化学处理等技术相结合也是极具潜力的一个发展方向, 如激光淬火-离子渗硫复合技术、激光淬火-渗氮复合技术等, 实现优势互补。王伟雪^[26]对 38CrMoAl 钢采用离子渗氮与激光淬火复合处理, 发现复合工艺改性层的硬度及厚度相比于单一的激光淬火处理显著提高。

表 2 激光淬火与其他常见表面淬火方法的比较

Table 2 Comparison between laser quenching and other common surface quenching methods

Quenching method	Hardened layer hardness	Hardened layer wear resistance	Hardened layer fatigue resistance	Production efficiency	Controllability	Processing cost	Deformation
Laser quenching	Higher	Better	Better	High	Higher	High	Smaller
Induction hardening	High	Good	Good	Higher	High	Moderate	Small
Flame hardening	Lower	Good	Good	Low	Lower	Lower	Large
Plasma quenching	Higher	Better	Good	High	Lower	Moderate	Smaller
Carburizing and quenching	High	Good	Good	High	Higher	Moderate	Smaller
Nitriding and quenching	Higher	General	General	Lower	Higher	High	Smaller
Carbonitriding	Higher	Better	Better	Lower	High	High	Smaller

表 3 直径为 73.02 mm 的 N80 油管螺纹在激光淬火前后的尺寸极限偏差的检测对比^[40]

Table 3 Detection and comparison of dimensional limit deviations of $\phi 73.02$ mm N80 tubing before and after laser quenching^[40]

Sample No.	Name of artifact	Test item	API standard tolerance	Laser pre-quenching tolerance	Appearance	Laser hardening tolerance	Appearance
2RY	internal thread	Tightness /mm	4.85±3.81	5.68	Qualified	5.72	Qualified
		Pitch deviation / (mm/25.4 mm)	±0.076	-0.02	Qualified	-0.02	Qualified
		Taper / (mm·mm ⁻¹)	62.5+5.208 or 62.5-2.6	63.0	Qualified	63.0	Qualified
		Depth deviation /mm	+0.050 or -0.102	-0.02	Qualified	-0.02	Qualified
2RYA	outside thread	Tightness /mm	±3.81	0.80	Qualified	0.84	Qualified
		Pitch deviation / (mm/25.4 mm)	±0.076	-0.013	Qualified	-0.013	Qualified
		Taper / (mm·mm ⁻¹)	62.5+5.208 or 62.5-2.6	63.5	Qualified	63.5	Qualified
		Depth deviation /mm	+0.050 or -0.102	-0.02	Qualified	-0.02	Qualified

国内激光淬火经过几十年的发展, 在研发及应用方面取得了极大的进步, 然而相比国际领先水平仍存在较大的差距, 但是其相较于传统淬火方法具

有很大的优越性, 因此越来越受重视。激光淬火作为石油机械激光表面处理技术最常用的加工方式, 目前依然是研究的热点, 对各种金属材料表面激光

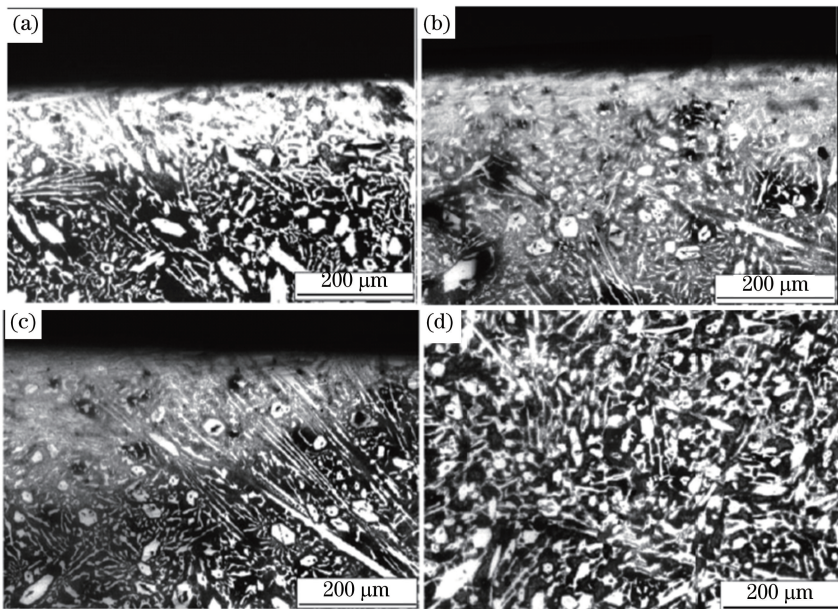


图2 微观组织。(a)激光淬硬区微观组织;(b)激光淬硬区金相微观组织;
(c)激光淬硬区边界微观组织;(d)基金相微观组织

Fig. 2 Microstructures. (a) Laser hardened microstructure; (b) metallographic microstructure in laser hardened region;
(c) boundary microstructure in laser hardened region; (d) metallographic phase in matrix microstructure

淬火的研究一直没有停止,如20CrMnTi 齿轮钢^[22]、35CrMoA^[23]、42CrMo^[24]、45 钢^[25]等石油机械设备常用钢的激光淬火技术等。

3.2 激光熔覆

激光熔覆通过在基材表面添加熔覆材料,利用高能量密度激光束将不同成分和性能的合金与基材表层快速熔化,在基材表面形成与基材具有完全不同成分和性能的合金层,具体工艺示意图

如图3所示。熔覆材料主要分为金属粉末、陶瓷粉末和复合粉末。激光熔覆层因具有良好的结合强度和硬度,同其他涂层技术相比,具有以下特点:1)冷却速度快;2)热输入和畸变较小,涂层稀释率低(一般小于5%),与基体呈冶金结合;3)能进行选区熔覆,材料消耗少,具有卓越的性能价格比;4)光束瞄准可以使难以接近的区域熔覆,绿色无污染^[17,44-45]。

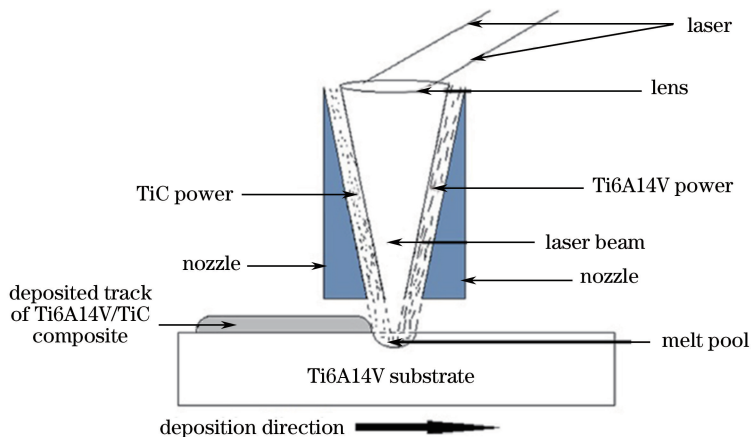


图3 激光熔覆工艺示意图^[44]

Fig. 3 Schematic of laser cladding process^[44]

作为一种高效的增材制造工艺,激光熔覆在石油机械设备中常用于石油管道阀门、注水泵柱塞、抽油光杆和压裂泵阀座等高附加值零件的表面强化和修复。孙全^[27]研究了激光熔覆技术对炼油厂火炬

气螺杆压缩机壳体及阴阳转子的修复情况,采用多层熔覆工艺,熔覆层数达到了5层,最厚熔覆层总厚度达到4 mm,大面积熔覆取得成功,修复后设备功能恢复良好,压缩量基本满足生产工艺要求。张再

良等^[46]以抽油机光杆常用的 20CrMo 钢为基体材料,选择 Co 基、Ni 基和 Fe 基合金粉末为熔覆材料,测得合金涂层硬度 Co 基为 520 HV_{0.2},Ni 基为 408 HV_{0.2},Fe 基为 370 HV_{0.2},而基体硬度为 265 HV_{0.2},试件的硬度比基体显著提高,且其耐磨性均有所提高,如图 4 所示。程颖等^[28]对油田中使用的注水泵柱塞激光熔覆修复技术进行了研究,选取镍基粉末作为涂层材料,对比不同激光参数下的涂层硬度,可使注水泵柱塞使用寿命延长 50%,成本降低 38%以上。肖真^[29]以普光分公司天然气净化厂汽轮机汽缸结合面的变形故障作为研究对象,以激光熔覆技术对汽缸变形位置进行现场修复,对熔覆层进行渗透检测和超声波检测发现,熔覆层完好无缺陷,汽缸回装后引汽试机,汽缸漏气现象消除。孙建波等^[47]在石油钻杆接头表面激光熔覆一层耐磨的铁基合金涂层,具有成型好、组织致密、部件均匀、无裂纹等优点,并且激光熔覆耐磨和耐腐蚀铁基合金涂层的厚度可精确控制在 0.3~1.5 mm,解决了油田钻杆接头失效过快的问题,且钻杆接头的制造和加工过程的自动化很容易实现。

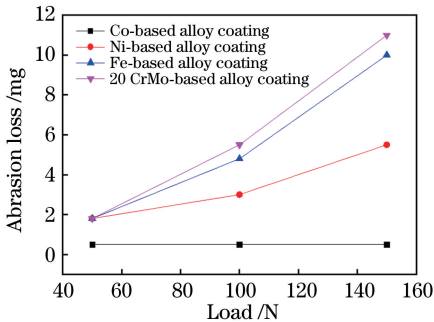


图 4 激光熔覆层及 20CrMo 基体的磨损失重图

Fig. 4 Abrasion loss of laser cladding layer and 20CrMo matrix

激光熔覆在石油机械表面处理中尚未完全实现产业化,主要原因是熔覆层质量不稳定,涂层易产生裂纹这一难题还没有很好的解决办法,对黏结剂和预置膜的选用也没有形成统一的标准,大面积熔覆难以控制材料表面的显微硬度。许多关键技术还有待进一步探索,众多科研人员也致力于解决这些问题。于承雪等^[48]对激光熔覆裂纹的形成机理进行了研究,并阐述了裂纹的影响因素和控制方法。张津超等^[30]在 Q235A 钢表面制备了 CaF₂/Ni60 复合涂层,探讨了激光扫描速度对裂纹敏感性的影响。鉴于激光熔覆技术具有许多传统涂层技术不可比拟的优势,未来一定会在石油机械设备表面处理中发

挥出巨大作用。

3.3 激光合金化

激光合金化是利用高能激光束将基体金属表面熔化,同时加入合金化元素,在以基体为溶剂,合金化元素为溶质的基础上形成一层浓度高且均匀的合金层。能够在一些价格便宜、表面性能不够优越的基体材料表面上制备出耐磨损、耐腐蚀、耐高温、抗氧化的表面合金层,用以取代昂贵的整体合金,节约贵重金属材料 and 战略材料,使生产成本大幅下降。与常规热处理相比,激光合金化具有敷层稀释率低,合金化层不易剥落,粉末和基体材料使用面广,基体熔化量少,工件变形小、清洁无污染、易于实现自动化等优点^[49-50]。相对于激光熔覆,激光合金化的合金元素完全溶解于表层内,所获得的薄层成分很均匀,对开裂和剥落等倾向不敏感,适合制造高硬度、高耐磨性的重载传动零件,如轴类件、连杆、螺栓、螺杆、套筒、进气阀和重要齿轮等。

在石油机械设备中,激光合金化主要用于油管、螺杆和汽轮机叶片的表面处理。孙小磊等^[31]在 N80 油管表面预置 Ni-Cr-Ti-B₄C-La₂O₃ 合金粉末,通过激光处理后合金化层的硬度最高可达 580 HV_{0.2},比基体高 30 HV_{0.2}左右,腐蚀电流密度由 0.302 μA/cm²降低到 0.125 μA/cm²,耐蚀性得到改善。刘通等^[51]在 45# 钢表面激光合金化不同比例的 NiCr 与 Al₂O₃ 混合粉末后,合金化层的平均耐磨性能是基材的 6 倍以上,且 Al₂O₃ 含量越高,耐磨性能越好。王珏等^[32]对 40Cr 材质的螺杆进行激光纳米合金强化后,其硬度相对基体提高 3 倍,硬化层厚度大于 0.25 mm,平均寿命提高了 2~3 倍。姚建华等^[33]对调质态 2Cr13 低碳马氏体不锈钢汽轮机叶片进行激光合金化处理,硬化层表面平均硬度提高了 180%左右,残余压应力转变为残余拉应力。

尽管激光合金化已在石油机械设备表面处理中得到了广泛关注与研究,但其工艺及理论的研究都尚未成熟,在实际应用中仍有很多问题,比如合金化层存在裂纹、表面不平以及孔洞等缺陷,激光处理配套设备未达到大规模工业应用的水平^[52]。因为其表面处理的优越性,对于激光合金化的研究工作依然是研究热点。郭浩霖等^[53]在 N80 油管表面预置 Ni-Cr-Ti-B₄C-Mo 合金粉末,结果显示,Mo 添加量为 5%~10%(质量分数)时,随着 Mo 含量的增加,α-Fe 固溶体晶粒细化效果越明显,增强相 TiB₂、TiC 含量增多,体积增大,分布更为均匀;当 Mo 的

加入量为 5% 时,激光合金化层中 TiB₂、TiC 增强相含量最多,硬度最高,Mo 含量与合金化层硬度的关系曲线如图 5 所示。随着人们对处理工艺和材料强化理论的探索,坚信激光表合金化技术将会从理论研究很快过渡到实际应用中,并在实际中发挥巨大作用。

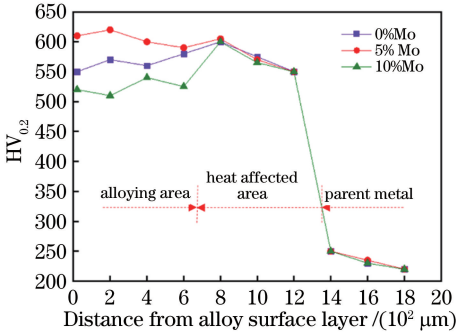


图 5 Mo 含量与合金化层硬度的关系曲线
Fig. 5 Relationship between Mo content and hardness of alloyed layer

3.4 其他激光表面处理技术

自激光器问世以来,形成了 20 多种激光表面处理技术,除了以上 3 种以外,还有激光冲击强化、激光清洗、激光非晶化、激光上釉、激光打标、激光毛化、激光形变等,虽然在石油机械设备的表面处理中也有应用,但相对较少。以下为部分激光表面处理技术应用于石油机械设备的简要介绍。

激光冲击强化是一种利用激光诱导等离子体冲击波来提高材料疲劳寿命的新型表面改性技术,具有强化效果显著、可控性强、适应性好等优点,对提高结构可靠性和部件疲劳强度、延长材料使用寿命具有重要作用,其原理图如图 6 所示。目前在航空航天和军工领域应用比较普遍,在石油化工领域具有巨大的潜在应用市场^[54]。孔德军等^[34]对 X80 管线钢焊接接头进行激光冲击强化处理,使焊接接头疲劳极限强度提高了 11.2%。

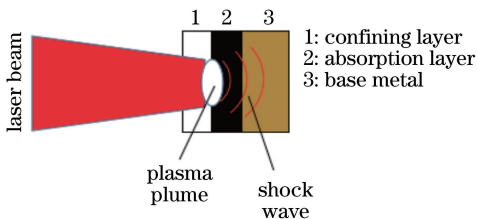


图 6 激光冲击原理图^[54]
Fig. 6 Schematic of laser shock^[54]

激光清洗是基于激光与物质相互作用发展而来的一种新型绿色清洗技术,与机械摩擦清洗、化学腐

蚀清洗、液体固体强力冲击清洗和超声清洗等传统清洗方法相比,具有对基材损伤小、质量好、效率高、清洁无污染等优点^[16,55-56],可应用于石油钻杆、管道、储罐、螺杆等的表面除锈、除氧化皮、除油污、除油漆和焊前预处理等方面。

激光打标是将需要加工的工件放在高功率密度的聚焦激光束下进行局部照射,使被加工表面材料留下永久性刻痕的一种表面处理方法。戴伟^[35]利用光纤激光打标机加工出了任意槽数、任意槽形、外径 40~300 mm、槽深 0.002~0.01 mm、精度在 ±0.002 mm 的干气密封环。常秋英等^[36]利用 LM-YLP-20F-II 型激光打标机在 45# 钢试件表面加工出具有规则排列的圆形微坑阵列,一定条件下可以改善干摩擦的磨损性能,如图 7 所示。

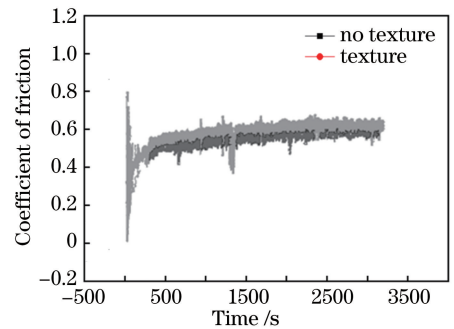


图 7 45# 钢表面织构对摩擦因数的影响(52HRC)^[36]
Fig. 7 Influence of 45# steel surface texture on friction factor (52HRC)^[36]

4 柱塞激光表面织构化研究

针对抽油机井能耗高和磨损严重等问题,开展表面织构技术的国际合作研究,形成一套抽油机井减磨降阻专有技术,减轻抽油泵泵筒与柱塞的摩擦磨损,降低光杆与盘根的摩擦阻力,延长盘根的使用寿命,提高抽油机井的运行时率,达到节能降耗和降低成本的目的。在 35CrMo 表面实验形成织构,使用 YLP-SD20L 光纤激光打标机,平均功率为 20 W,中心波长 λ 为 1064 nm,脉宽 τ 为 100 ns,重复频率 f 为 20 kHz,通过配有 80 mm 焦距透镜的扫描振镜控制激光在平面内的运动。研究激光参数对织构直径和深度的影响,从而加工出各种规格的凹坑,以满足不同载荷的使用情况,规律如图 8 所示,激光参数的改变对凹坑直径的影响不大,凹坑深度随加工数目的增大而增加,随速度的增加而减小,随功率的增加而增加,但随频率的增加并不呈线性变化,在其他参数为定值时存在最优的频率参数。

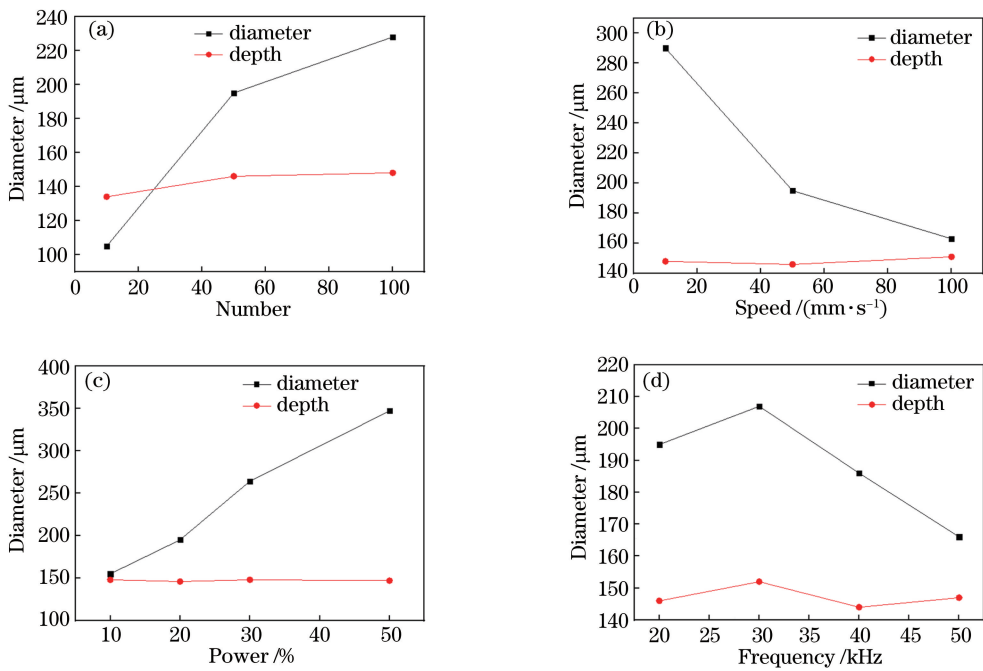


图8 激光参数对凹坑直径和深度的影响。(a)加工数目;(b)速度;(c)功率;(d)频率

Fig. 8 Influences of laser parameters on pit diameter and depth. (a) Number; (b) speed; (c) power; (d) frequency

柱塞表面激光织构化后,在实验室条件下与抽油机泵筒耐磨损性能提高50%,抽油机井口盘根平均更换周期延长至100 d,抽油机单井平均功率降低0.6 kW。柱塞表面织构化技术可减轻抽油泵泵筒与柱塞间的偏磨,提高泵筒和柱塞的耐磨损性能,从而延长抽油泵的使用寿命,提高抽油机井的运行效率,节约了成本,在国内油井尤其是高含水率油井具有广阔的应用前景。

5 结束语

相对于传统的表面处理方式,激光表面处理技术精度高、工件变形小、清洁无污染,适合高端石油装备的制造,但激光表面处理技术在我国石油机械中的应用并未受到足够重视,许多问题还未得到解决,需要从以下几个方向努力。

1) 研制出新的激光器,提高激光功率,同时发展辅助设备,如光束成形和制导系统,以满足处理面积更大、形状更复杂的工件的需要。

2) 加强激光表面处理技术改性机理的理论研究,并从理论上对产生残余拉应力和裂纹等缺陷的机理进行深入研究,提出具体解决方案。

3) 与计算机模拟仿真技术相结合,加强对激光表面处理工艺参数、材料性能以及表面状况等处理后表面性能影响的研究,探索最优工艺参数组合,发展成形成工艺。

4) 加强激光与新材料、新工艺的复合技术,比如激光熔覆/微弧氧化、激光淬火/离子注入等复合表面处理技术,激光表面纳米化技术、激光3D打印、激光电镀等新工艺,激光熔覆非晶涂层、高熵涂层等新材料复合处理技术。复合多种技术可以综合多种处理技术的优点,处理效果远远高于单纯的激光表面处理技术。

相较于其他表面处理技术,激光表面处理技术具有的巨大优越性决定其依然有很大发展潜力,在石油机械设备的表面处理上,激光表面处理技术依然具有广阔的应用和发展前景。

1) 随着经营管理体制改革的进一步深化,各油田追求油气产量和总体经济效益并举,要求降低开采成本,提高开采效率,而激光表面处理技术的特点决定了该技术是降低采油机械设备成本的最有效途径之一。

2) 各油田油气开采条件不断恶化,高温高压、深井、超深井的数量也逐渐增多,对石油机械设备的材料性能提出了更高要求,激光表面处理技术在石油机械中所涉及的应用范围不断扩大。

3) 中国制造2025的核心是智能制造,智能制造的核心之一是光电技术,而光电技术的核心之一正是激光技术。激光行业本身的市场规模虽小,但却是驱动制造业发展的核心力量之一,其重要性不言而喻,激光表面处理技术势必会因势发展,成为石

油机械表面处理技术中不可或缺的中坚力量。

参 考 文 献

- [1] Mao L J, Cai M J, Wang G R. Effect of rotation speed on the abrasive-erosive-corrosive wear of steel pipes against steel casings used in drilling for petroleum[J]. *Wear*, 2018, 410/411: 1-10.
- [2] Yang X Q, Wang H F, Fan J C. Study on erosion wear property and mechanism of 35CrMo steel[J]. *China Petroleum Machinery*, 2017, 45(7): 72-77.
杨向前, 王虹富, 樊建春. 35CrMo 钢冲蚀磨损性能和机制的研究[J]. *石油机械*, 2017, 45(7): 72-77.
- [3] Yang X M, Tu Y F, Li L, *et al.* Well-dispersed Chitosan/Graphene oxide nanocomposites [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2010, 2(6): 1707-1713.
- [4] Kong X Y, Yan M K, Zhang L, *et al.* QPQ surface treatment technology and test research for improving erosion resistance property of tools [J]. *Oil Field Equipment*, 2017, 46(3): 41-45.
孔学云, 严孟凯, 张亮, 等. QPQ 表面处理技术及提高工具耐冲蚀性能试验研究 [J]. *石油矿场机械*, 2017, 46(3): 41-45.
- [5] Shi Y H, Ye Q S, Liang P, *et al.* Naphthenic acid corrosion and protection of petrochemical industry process equipment [J]. *Materials Protection*, 2017, 50(3): 68-73, 78.
史艳华, 叶青松, 梁平, 等. 石油化工过程装备的环烷酸腐蚀与防护 [J]. *材料保护*, 2017, 50(3): 68-73, 78.
- [6] Koscher B A, Swabeck J K, Bronstein N D, *et al.* Essentially trap-free CsPbBr₃ colloidal nanocrystals by postsynthetic thiocyanate surface treatment [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2017, 139(19): 6566-6569.
- [7] Gao B, Zhang R L, He M S, *et al.* Effect of a multiscale reinforcement by carbon fiber surface treatment with graphene oxide/carbon nanotubes on the mechanical properties of reinforced carbon/carbon composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 90: 433-440.
- [8] Zang C F, Liu C S, Zhang X B, *et al.* Research progress of laser modification techniques used on roller surface[J]. *Materials Review*, 2010, 24(3): 6-10.
臧辰峰, 刘常升, 张小彬, 等. 轧辊表面激光处理技术的研究进展[J]. *材料导报*, 2010, 24(3): 6-10.
- [9] He B L, Liu J, Wan D Q. Application of laser in processing of magnesium alloy [J]. *Hot Working Technology*, 2010, 39(22): 113-116.
何柏林, 刘菁, 万迪庆. 激光在镁合金表面处理中的应用 [J]. *热加工工艺*, 2010, 39(22): 113-116.
- [10] Yilbas B S, Karatas C, Karakoc H, *et al.* Laser surface treatment of aluminum based composite mixed with B₄C particles [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 66: 129-137.
- [11] Malinauskas M, Žukauskas A, Hasegawa S, *et al.* Ultrafast laser processing of materials: From science to industry [J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5(8): e16133.
- [12] Song L P. Laser surface modification and application [J]. *Physics and Engineering*, 2010, 20(4): 42-44.
宋立平. 激光表面改性及其应用 [J]. *物理与工程*, 2010, 20(4): 42-44.
- [13] Taylor L L, Scott R E, Qiao J. Integrating two-temperature and classical heat accumulation models to predict femtosecond laser processing of silicon [J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(3): 648-658.
- [14] Gupta R K, Sundar R, Kumar B S, *et al.* A hybrid laser surface treatment for refurbishment of stress corrosion cracking damaged 304L stainless steel [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, 24(6): 2569-2576.
- [15] Verezub O, Kálazi Z, Buza G, *et al.* Classification of laser beam induced surface engineering technologies and in situ synthesis of steel matrix surface nanocomposites [J]. *Surface Engineering*, 2011, 27(6): 428-435.
- [16] Zhang Z Y, Zhang J Y, Wang Y B, *et al.* Surface cleaning of hot-rolled sheet steel by laser ablation of oxide layer using a 100-ns high-repetition frequency pulsed laser [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(11): 116114.
- [17] Gu Y, Zhong M L, Ma M X, *et al.* Fabrication of nanoporous Manganese coatings by selective electrochemical De-alloying of the nobler copper component from laser cladding Cu-Mn alloys [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(6): 0603027.
谷雨, 钟敏霖, 马明星, 等. 多孔锰涂层的研究 [J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 0603027.
- [18] Fan P X, Bai B F, Zhong M L, *et al.* General strategy toward dual-scale-controlled metallic Micro-Nano hybrid structures with ultralow reflectance [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(7): 7401-7408.
- [19] Ge P F. Application of laser quenching technology in surface hardening of drill pipe joint threads [J]. *Inner*

- Mongolia Petrochemical Industry, 2015, 41(1): 119-120.
- 葛鹏飞. 激光淬火技术在钻杆接头螺纹表面硬化处理的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2015, 41(1): 119-120.
- [20] Hao G H. Research and application of laser quenching technology for spherical floating bearings of cone bit [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- 郝广辉. 牙轮钻头球面浮动套轴承激光淬火技术研究与应用[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
- [21] Hua X J, Hao J W, Wang R, *et al.* Laser quenching technology and friction & wear properties of mud pump high chromium iron material [J]. Surface Technology, 2017, 46(6): 215-220.
- 华希俊, 郝静文, 王蓉, 等. 泥浆泵高铬铸铁材料激光淬火技术及其摩擦磨损性能研究[J]. 表面技术, 2017, 46(6): 215-220.
- [22] Sang J X, Shen J, Zhang X K. A study on the laser quenching of 20CrMnTi gear steel [J]. China's Manganese Industry, 2017, 35(4): 117-121.
- 桑嘉新, 沈骏, 张贤坤. 20CrMnTi 齿轮钢激光淬火的研究[J]. 中国锰业, 2017, 35(4): 117-121.
- [23] Cheng Y Y, Wang Y, Han B, *et al.* Microstructure and properties of 35CrMoA steel in laser quenching-nitriding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1): 250-255.
- 程义远, 王勇, 韩彬, 等. 35CrMoA 钢激光淬火-渗氮复合处理微观组织与性能[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 250-255.
- [24] Su H, Ma B, Yi Y H, *et al.* Microstructure and properties of 42CrMo after laser surface melting and quenching [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2011, 34(2): 84-86.
- 苏辉, 马冰, 依颖辉, 等. 42CrMo 钢激光淬火组织和硬度的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 34(2): 84-86.
- [25] Feng H, Li J F, Sun J. Study on remanufacturing repair of damaged crank shaft journal surface by laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 0803003.
- 封慧, 李剑峰, 孙杰. 曲轴轴颈损伤表面的激光熔覆再制造修复[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0803003.
- [26] Wang Y X. Microstructure and properties of medium carbon low-alloy steels treated by plasma nitriding and laser quenching[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- 王祎雪. 中碳低合金钢渗氮与激光淬火复合改性层组织与性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [27] Sun Q. Laser cladding mechanical maintenance in petrochemical applications [J]. Technological Development of Enterprise, 2011, 30(11): 94-95.
- 孙全. 激光熔覆技术在石化机械维修上的应用[J]. 企业技术开发, 2011, 30(11): 94-95.
- [28] Cheng H, Zheng G, Qin C, *et al.* Exploration on laser cladding repair technology for plunger in water injection pump[J]. Machinery, 2017, 55(8): 47-49.
- 程颢, 郑刚, 覃川, 等. 注水泵柱塞激光熔覆修复技术的探索[J]. 机械制造, 2017, 55(8): 47-49.
- [29] Xiao Z. Analysis of steam turbine cylinder joint surface deformation and laser cladding repairing [J]. Petro-Chemical Equipment, 2017, 46(3): 51-56.
- 肖真. 汽轮机汽缸结合面变形分析及激光熔覆修复[J]. 石油化工设备, 2017, 46(3): 51-56.
- [30] Zhang J C, Feng A X, Xue W, *et al.* Research on crack susceptibility and mechanical properties of CaF₂/Ni composite coating by laser cladding [J]. Applied Laser, 2017, 37(1): 22-26.
- 张津超, 冯爱新, 薛伟, 等. 激光熔覆 CaF₂/Ni 基金合金复合涂层的裂纹敏感性及其力学性能研究[J]. 应用激光, 2017, 37(1): 22-26.
- [31] Sun X L, Han B. Effect of rare earth elements on microstructure and properties of laser alloying layers on N₈₀ oil tube [J]. Welding & Joining, 2017(4): 64-66.
- 孙小磊, 韩彬. 稀土元素对油管激光合金化层组织及性能影响[J]. 焊接, 2017(4): 64-66.
- [32] Wang Y, Du J S, Yao J H. The research of laser alloying on the surface of 40cr steel screw [J]. Applied Laser, 2007, 27(6): 470-472.
- 王珏, 杜鑑时, 姚建华. 激光纳米合金化表面强化螺杆的研究[J]. 应用激光, 2007, 27(6): 470-472.
- [33] Yao J H, Yu C Y, Kong F Z, *et al.* Laser alloying and quenching of steam turbine blades [J]. Journal of Power Engineering, 2007, 27(4): 652-656.
- 姚建华, 于春艳, 孔凡志, 等. 汽轮机叶片的激光合金化与激光淬火[J]. 动力工程, 2007, 27(4): 652-656.
- [34] Kong D J, Long D, Ye C D, *et al.* Effects of laser shock wave on fatigue properties of X80 pipeline steel welded joints [J]. Transaction of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(1): 103-108.
- 孔德军, 龙丹, 叶存冬, 等. 激光冲击波对 X80 管线钢焊接接头疲劳性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(1): 103-108.
- [35] Dai W. A split lip seal method by high energy laser

- [J]. Petro-Chemical Equipment, 2013, 42(4): 45-48.
- 戴伟. 一种用高能激光加工干气密封螺旋槽的方法[J]. 石油化工设备, 2013, 42(4): 45-48.
- [36] Chang Q Y, Qi Y, Wang B, *et al.* Tribological influence of laser surface textures on 45 steel under dry sliding [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(3): 148-154.
- 常秋英, 齐焯, 王斌, 等. 激光表面织构对 45 钢干摩擦性能的影响 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(3): 148-154.
- [37] Chen Z Y, Zhou G J, Chen Z H. Microstructure and hardness investigation of 17-4PH stainless steel by laser quenching [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 534: 536-541.
- [38] Zheng Y L, Hu Q W, Li C Y, *et al.* A novel laser surface compositing by selective laser quenching to enhance railway service life [J]. Tribology International, 2017, 106: 46-54.
- [39] Yan M F, Wang Y X, Chen X T, *et al.* Laser quenching of plasma nitrided 30CrMnSiA steel [J]. Materials & Design, 2014, 58: 154-160.
- [40] Shi C X, Jiang Y L, Mei Z H, *et al.* Application of laser surface hardening technology for API tubing threads [J]. Oil Field Equipment, 2010, 39(10): 75-78.
- 史春轩, 蒋永亮, 梅振红, 等. API 油管螺纹激光淬火技术应用 [J]. 石油矿场机械, 2010, 39(10): 75-78.
- [41] Wang Y L, Xu S R, Hui Y L. Research on laser quenching process of 20CrMnMo gears by finite element method and experiment [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(1/2/3/4): 1013-1021.
- [42] Lusquinos F, Conde J C, Bonss S, *et al.* Theoretical and experimental analysis of high power diode laser (HPDL) hardening of AISI 1045 steel [J]. Applied Surface Science, 2007, 254(4): 948-954.
- [43] Hui Y L, Wang Y L, Yao C C. Temperature field analysis of laser hardening of 18CrNi₈ gear based on ANSYS [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015, 39(1): 102-105, 134.
- 惠英龙, 王玉玲, 姚翠琴. 基于 ANSYS 的 18CrNi₈ 齿轮激光淬火温度场分析 [J]. 机械传动, 2015, 39(1): 102-105, 134.
- [44] Paydas H, Mertens A, Carrus R, *et al.* Laser cladding as repair technology for Ti-6Al-4V alloy: Influence of building strategy on microstructure and hardness [J]. Materials & Design, 2015, 85: 497-510.
- [45] Weng F, Chen C Z, Yu H J. Research status of laser cladding on titanium and its alloys: A review [J]. Materials & Design, 2014, 58: 412-425.
- [46] Zhang Z L, Qin K M, Li F, *et al.* Surface abrasion resistance performance of laser cladding coating on oil pumping polished rod [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(16): 3978-3981.
- 张再良, 秦开明, 李芳, 等. 抽油机光杆激光熔覆表面耐磨损性能研究 [J]. 科学技术与工程, 2010, 10(16): 3978-3981.
- [47] Sun J B, Li M Y, Wang Y, *et al.* Wear and corrosion resistant iron-based alloy laser-cladding petroleum drill stem joint: CN102619477A [P]. 2012-08-01.
- 孙建波, 李美艳, 王勇, 等. 一种耐磨耐蚀铁基合金激光熔覆石油钻杆接头: CN102619477A [P]. 2012-08-01.
- [48] Yu C X, Jing C N, Li H X. Forming mechanism and controlling method of laser cladding crack [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(4): 75-79.
- 于承雪, 景财年, 李怀学. 激光熔覆裂纹的形成机理及控制方法 [J]. 航空制造技术, 2012(4): 75-79.
- [49] Makuch N, Kulka M, Dziarski P, *et al.* Laser surface alloying of commercially pure titanium with boron and carbon [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 57: 64-81.
- [50] Kulka M, Mikolajczak D, Makuch N, *et al.* Wear resistance improvement of austenitic 316L steel by laser alloying with boron [J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 291: 292-313.
- [51] Liu T, Sun G F, Zhang Y K. Microstructure and wear resistance of NiCr-Al₂O₃ coating alloyed with 45# steel laser [J]. Surface Technology, 2016, 45(10): 64-69.
- 刘通, 孙桂芳, 张永康. 45# 钢表面激光合金化 NiCr-Al₂O₃ 涂层的组织及耐磨性能研究 [J]. 表面技术, 2016, 45(10): 64-69.
- [52] Adebisi D I, Popoola A P I. Mitigation of abrasive wear damage of Ti-6Al-4V by laser surface alloying [J]. Materials & Design, 2015, 74: 67-75.
- [53] Guo H L, Han B. Effect of molybdenum element on microstructure and properties of laser alloying layers on N₈₀ oil tube [J]. Welded Pipe and Tube, 2016, 39(11): 5-8.
- 郭浩霖, 韩彬. Mo 对 N₈₀ 油管激光合金化层组织及

- 性能的影响[J]. 焊管, 2016, 39(11): 5-8.
- [54] Wang F, Zuo H, Zhao L, *et al.* Surface quality and property of copper treated by laser shock peening[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 041410.
王峰, 左慧, 赵雳, 等. 激光冲击强化铜的表面质量和性能[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 041410.
- [55] 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.
- [56] Chen Y M, Zhou L Z, Yan F, *et al.* Mechanism and quality evaluation of laser cleaning of aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1202005.
陈一鸣, 周龙早, 闫飞, 等. 铝合金激光清洗机理与质量评估[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1202005.