

DOI: 10.11973/jxgccl202202010

高功率激光淬火对 35CrMo 钢表层组织与耐磨性能的影响

杨俊龙¹, 黄敏^{1,2}, 胡柳益¹, 刘永超¹, 万磊磊¹, 王宇¹

(台州学院 1. 医药化工与材料工程学院, 2. 先进涂层材料研究所, 台州 318000)

摘要: 采用高功率激光器对调质态 35CrMo 钢进行表面淬火处理, 研究了不同激光功率(1.6, 2.4, 3.2, 4.0 kW)下表层的显微组织、硬度及耐磨性能。结果表明: 当激光功率为 1.6, 2.4 kW 时, 35CrMo 钢表层组织中存在未溶铁素体, 硬度比基体低, 与 GCr15 钢对磨后的磨损质量变化率与基体几乎相同, 耐磨性较差; 当激光功率为 3.2, 4.0 kW 时, 表层组织全部为回火马氏体, 平均硬度可以达到 640 HV, 比常规水冷淬火后的硬度提高约 20%; 当激光功率为 3.2 kW 时, 磨损质量变化率最小, 表面未发现明显的磨损痕迹, 与基体相比耐磨性得到显著提高, 而当激光功率提高到 4.0 kW 时较高的马氏体自回火程度导致硬度与耐磨性比激光功率为 3.2 kW 时略有降低。

关键词: 35CrMo 钢; 高功率激光淬火; 显微组织; 硬度; 耐磨性

中图分类号: TG178

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2022)02-0063-05

Effect of High-Power Laser Quenching on Microstructure and Wear Resistance of 35CrMo Steel Surface Layer

YANG Junlong¹, HUANG Min^{1,2}, HU Liuyi¹, LIU Yongchao¹, WAN Leilei¹, WANG Yu¹

(1. School of Pharmaceutical Chemistry and Materials Engineering, 2. Institute of Advanced Coating, Taizhou University, Taizhou 318000, China)

Abstract: Surface quenching treatment of 35CrMo steel was carried out by high power laser. The microstructure, hardness and wear resistance of surface layer under different laser power (1.6, 2.4, 3.2, 4.0 kW) were studied. The results show that when the laser power was 1.6 and 2.4 kW, the undissolved ferrite existed on the surface layer of 35CrMo steel, and the surface layer hardness was lower than that of the substrate; the wear mass rate of the steel was almost the same as that of the substrate after grinding with GCr15 steel, indicating the steel had bad wear resistance. When the laser power was 3.2, 4.0 kW, the surface layer microstructure was all tempered martensite, and the average surface layer hardness reached 640 HV, which was about 20% higher than that after conventional water quenching. The wear mass rate under laser power of 3.2 kW was the lowest, no obvious wear trace could be found on the surface, and the wear resistance was significantly improved compared with the substrate. When the laser power was up to 4.0 kW, the higher self-tempering degree of martensite resulted in a slight decrease in hardness and wear resistance compared with the laser power of 3.2 kW.

Key words: 35CrMo steel; high-power laser quenching; microstructure; hardness; wear resistance

0 引言

35CrMo 钢具有强度高、韧性好、淬透性高和淬

火变形程度小等特点, 广泛应用于钻杆接头上^[1]。在钻杆使用过程中, 接头要经常拧卸, 其表面承受较大的钳咬合力, 因磨损造成的钻杆接头报废量占报废总量的 90% 以上。采用等离子喷焊^[2]、渗氮^[3]、渗硼^[4]等表面强化技术可以提高钻杆接头的使用寿命, 但存在喷焊层表面粗糙度大、化学渗氮和渗硼处理后螺纹连接处的断裂韧性差以及螺纹连接处的使

收稿日期: 2020-12-30; 修订日期: 2021-12-20

基金项目: 国家重点研发计划重点专项项目(2018YFB1107305)

作者简介: 杨俊龙(1999—), 男, 湖北武汉人, 本科生

导师: 黄敏教授

使用寿命与钻杆体相比仍较短等不足。激光淬火^[5-6]以激光作为热源,被处理工件吸收激光能量,表面温度迅速升至奥氏体温度区间,通过基体的迅速自然冷却使金属表面发生相变,获取组织细小、位错密度较高的马氏体组织,实现表面淬火强化。采用激光淬火工艺对碳钢(45 钢)、模具钢(H13 钢)、轴承钢(GCr15 钢)、铸铁等材料进行的表面处理表明,可在不改变工件尺寸和表面粗糙度的条件下极大地提高上述材料表面的强韧性、硬度和耐磨性^[7-11]。激光功率、扫描速度和作用在材料表面上的光斑尺寸是影响激光淬火质量最主要的工艺参数,其中:扫描速度和光斑尺寸通过影响奥氏体的保温时间来影响淬火转变组织的晶粒尺寸和均匀性^[12-13];激光功率会显著影响激光处理区域的温度并决定奥氏体化程度,通过影响淬火组织的类型影响表面硬度。目前,激光淬火工艺通常所采用的激光功率仅为 1 kW 左右^[14-16],且在 1 kW 可调范围内激光束瞬间产生的温度无明显变化,但是尚未有通过大范围改变激光功率来调控激光淬火组织和性能的相关报道。作者拟采用 8 kW 高功率激光器对 35CrMo 钢表面进行淬火处理,在表面不熔化的前提下,通过提高激光功率控制基体的奥氏体化程度,研究不同高激光功率下 35CrMo 钢表层的组织、硬度和耐磨性能,并与调质态 35CrMo 钢进行对比。

1 试样制备与试验方法

试验材料为调质态 35CrMo 钢板,尺寸为 40 mm×30 mm×10 mm,由江汉钻具有限公司提供;其化学成分(质量分数/%)为 0.33C, 0.2S, 0.65Mn, 1.0Cr, 0.22Mo, ≤0.035P, ≤0.035S;硬度为 40 HRC。采用最大功率为 8 kW 的 LDP 8000-60 型半导体型激光器对钢板表面进行淬火处理,激光波长为 1 020 nm,离焦量为 5 mm,激光扫描速率为 8 mm·s⁻¹,激光功率分别为 1.6, 2.4, 3.2, 4.0 kW。将经过激光淬火的钢板置于丙酮溶液中进行去酯、除锈,然后置于乙醇溶液中进行超声波清洗,烘干。

在激光淬火后的钢板上截取金相试样,经打磨、抛光,用体积分数 4% 硝酸酒精溶液腐蚀后,采用 Zeiss Axio Scope-A1 型正置光学显微镜观察截面显微组织。采用 HMV-2T 型显微硬度计对截面硬度分布进行测试,从距表面 0.1 mm 处开始,沿深度方向每隔 0.1 mm 测试一次,平行测试 3 点取平均

值,载荷为 0.98 N,保载时间为 10 s。采用 MMW-1G 型万能摩擦磨损试验机在室温下进行销-盘磨损试验,对磨材料为硬度 58 HRC 的 GCr15 钢,试栏尺寸为 $\phi 50$ mm×10 mm,载荷为 100 N,转速为 120 r·min⁻¹,试验时间为 30 min;用精度为 0.1 mg 的 FA2004 A 型电子天平称量磨损前后试样的质量,以磨损质量变化率评价耐磨性能;采用 Hitachi S4800 型场发射扫描电子显微镜(SEM)观察磨损形貌,并用其附带的能谱仪进行微区成分分析。

2 试验结果与讨论

2.1 对显微组织的影响

由图 1 可以看出:当激光功率为 1.6, 2.4 kW 时,试验钢表层组织主要为块状未溶铁素体和回火马氏体组织。35CrMo 钢中铬、钼合金元素增加了过冷奥氏体的稳定性,激光淬火过程的加热和冷却速率极快,回火索氏体组织发生不平衡转变过程,快速加热使奥氏体化温度提高了近 200 °C^[17]。当激光功率较低时,钢表面的温度较低,接近 35CrMo 钢的完全奥氏体化温度(780~800 °C),且加热时间短,无法实现表面区域内所有组织的完全奥氏体化,因此冷却后试样表面存在较多的未溶铁素体。同时,由于激光淬火过程中,相邻道次间存在热量堆积,淬火后的马氏体会产生自回火,生成了颜色较深的回火马氏体。当激光功率增加到 3.2, 4.0 kW 时,加热温度高,未溶铁素体消失,试验钢表层组织全部为回火马氏体;但在最表层出现了氧化层,这说明高激光功率产生的高温导致了试样表面发生了较严重的碳烧损。

2.2 对硬度的影响

由图 2 可以看出,当激光功率为 1.6, 2.4 kW 时,试验钢表层的硬度在一定范围内低于基体,这主要是因为低激光功率作用下,表层组织中存在的大量未溶铁素体显著降低了其硬度。当激光功率提高到 3.2, 4.0 kW 时,激光淬火后表层的平均硬度为 640 HV,比调质态 35CrMo 钢基体的硬度提高了近 45%,比常规水冷淬火硬度(520 HV^[18])提高了约 20%。在激光功率为 3.2, 4.0 kW 时,硬度在距离表面 0.3 mm 后才开始出现显著增加,这主要是因为此时表面发生了严重的烧损,形成了较低碳含量的马氏体;当距表面距离超过 0.3 mm 后,所得马氏体碳含量没有损失,因此硬度显著提高;随着距表面距离的增加,温度降低,组织中又开始出现了未溶铁素

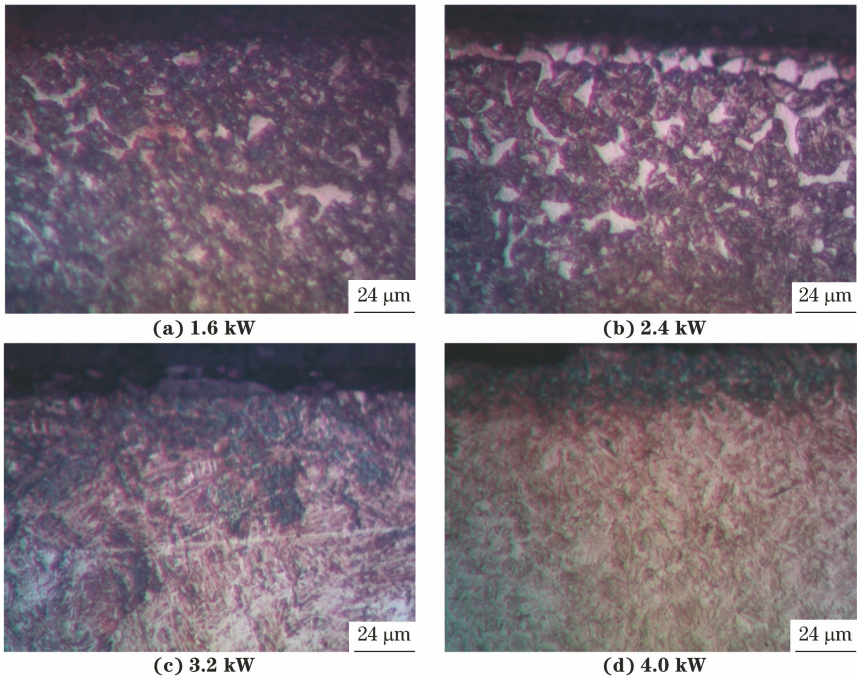


图 1 不同功率激光淬火后 35CrMo 钢的截面显微组织

Fig.1 Section microstructures of 35CrMo steel after laser quenching at different power

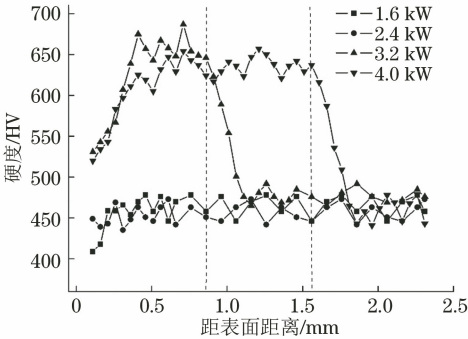


图 2 不同功率激光淬火后 35CrMo 钢的截面硬度分布曲线

Fig.2 Section hardness distribution curves of 35CrMo steel after laser quenching at different powers

体,所以硬度开始下降。在激光功率为 3.2,4.0 kW 时,硬度提高的最大深度分别为 0.9 mm 和 1.6 mm,这说明激光功率越大,硬度提高的深度也越大;同时还可以看出,当激光功率增加到 4.0 kW 时,淬火硬度比 3.2 kW 时的硬度低,这主要是因为激光功率越高,淬火过程中相邻道次组织受温度影响越显著,随之产生的马氏体自回火程度也越高。

2.3 对耐磨性能的影响

由图 3 可以看出:与调质态 35CrMo 钢相比,当激光功率为 1.6,2.4 kW 时,激光淬火处理 35CrMo 钢摩擦因数的波动幅度较大,这主要是由于该功率处理后钢表面出现了较高含量的铁素体,表面硬度较低导致的;当激光功率增加到 3.2 kW 时,在摩擦磨损初期,摩擦因数出现了小幅波动,随摩擦过程的

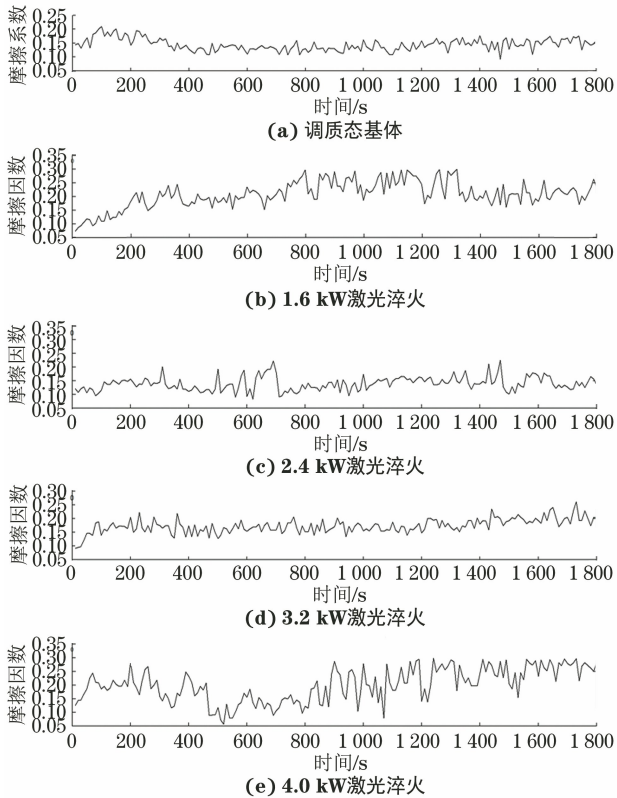


图 3 调质态 35CrMo 钢基体与经不同功率激光淬火后的摩擦因数随时间的变化曲线

Fig.3 Friction coefficient vs time curves of quenched and tempered 35CrMo steel substrate before (a) and after laser quenching at different power (b-e)

进行,摩擦因数趋于稳定,这是因为该功率处理后钢

表面出现了碳烧损层,待烧损层磨损后,表面的硬度较高,摩擦因数稳定在一个相对较低的值;当激光功率进一步提高到 4.0 kW 时,更高的温度导致了更严重的烧损,因而烧损层导致的摩擦因数波动经历了更长的时间,待烧损层磨损后,摩擦因数才逐渐稳定;同时由于 4.0 kW 淬火后的 35CrMo 钢淬火硬度低于 3.2 kW 淬火后的淬火硬度,稳定后的摩擦因数比 3.2 kW 时的大。

与硬度为 58 HRC 的 GCr15 钢在大气室温环境中摩擦 30 min 后,调质态 35CrMo 钢与经 1.6, 2.4, 3.2, 4.0 kW 功率激光淬火后的磨损质量变化率分别为 0.042%, 0.046%, 0.043%, 0.017%, 0.020%。经 1.6, 2.4 kW 激光淬火后 35CrMo 钢的磨损质量变化率与调质态 35CrMo 钢差别不大。激光功率为 3.2 kW 时, 35CrMo 钢的磨损质量变化率

最小。当激光功率较低时,表面淬火效果不明显,且表面硬度比调质态基体的略低,因此耐磨性较差;随激光功率的增加,表层硬化作用明显,耐磨性提高显著;同时由于激光功率为 4.0 kW 时,表面热量堆积更明显,马氏体自回火程度高,耐磨性比激光功率为 3.2 kW 时略有降低。

由图 4 可以看出:调质态 35CrMo 钢和 1.6, 2.4 kW 激光淬火后的磨损表面均出现了明显的磨痕,且存在明显的犁沟,说明经 1.6, 2.4 kW 激光淬火的 35CrMo 钢耐磨性几乎没有提高;经 3.2, 4.0 kW 激光淬火后磨损表面平整,未发现明显的磨损痕迹,但表面出现了一些磨屑。经能谱分析发现,磨屑主要成分为铁,未发现铬和钼,说明磨屑主要来自对磨盘,可见经激光淬火后 35CrMo 的耐磨性优于 GCr15 钢。

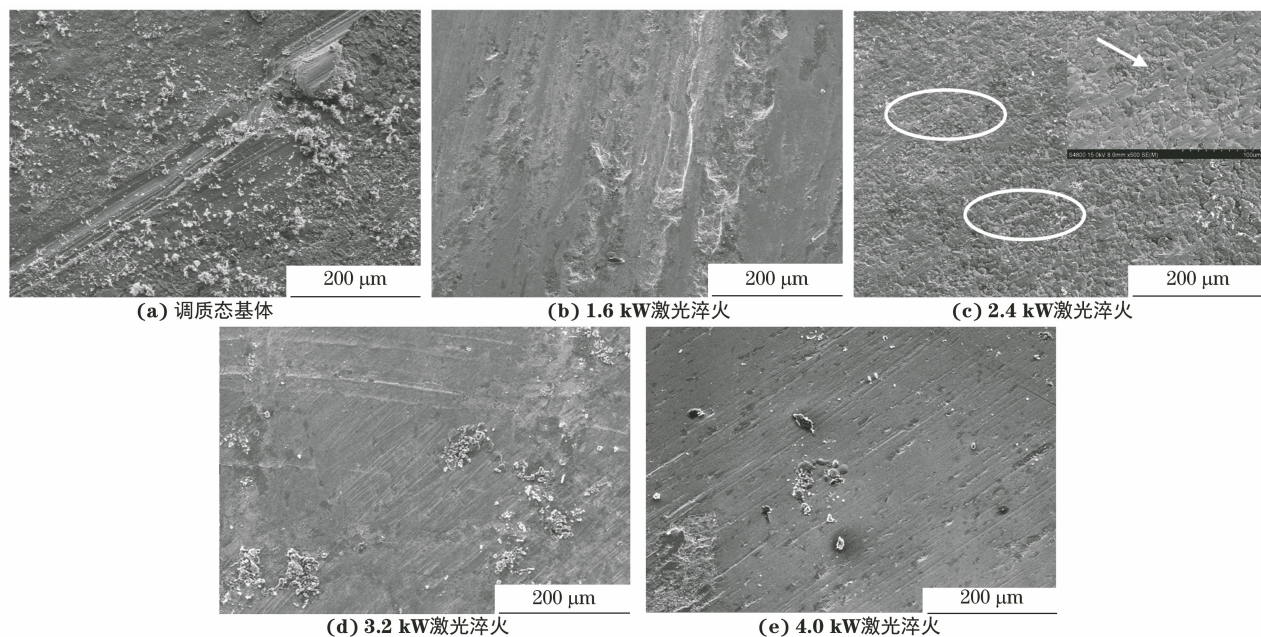


图 4 调质态 35CrMo 钢基体与经不同功率激光淬火后的磨损形貌

Fig.4 Wear morphology of quenched and tempered 35CrMo steel substrate before (a) and after laser quenching by different power (b-e)

3 结 论

(1) 采用高功率激光器对 35CrMo 钢表面进行淬火处理,当激光功率为 1.6, 2.4 kW 时,表层组织为块状未溶铁素体+回火马氏体;当激光功率提高到 3.2, 4.0 kW 时,未溶铁素体消失, 35CrMo 钢表层组织全部为回火马氏体,同时表面存在碳烧损层。

(2) 当激光功率为 1.6, 2.4 kW 时, 35CrMo 钢表层硬度略低于基体,当激光功率提高到 3.2, 4.0 kW 时,表层硬度均显著高于基体,平均硬度达

到 640 HV,比常规水冷淬火后的硬度提高约 20%;硬度提高的深度随激光功率的提高而增加,当激光功率为 4.0 kW 时,硬度提高的最大深度可达 1.6 mm。

(3) 与 GCr15 钢对磨后, 1.6, 2.4 kW 激光淬火 35CrMo 钢的磨损质量变化率与调质态基体的相差不大,磨损表面存在明显磨痕,耐磨性较差;当激光功率增加到 3.2 kW 时,磨损质量变化率最小,表面未发现明显的磨损痕迹,耐磨性最好,但当激光功率为 4.0 kW 时,马氏体自回火程度高,硬度略微降低,耐磨性比激光功率为 3.2 kW 时略有降低。

参考文献:

- [1] 王洪礼,王凌,刘立新. 工程用 35CrMo 钢钻杆螺纹断裂失效分析[J]. 中国重型装备, 2015(1):32-33.
WANG H L, WANG L, LIU L X. Invalid analysis of 35CrMo steel drill pipe thread fracture used in engineering[J]. China Heavy Equipment, 2015(1):32-33.
- [2] 李明枢,白云高. 等离子喷焊技术在钻杆接头修复中的应用[J]. 石油机械, 1997, 25(1):22-25.
LI M S, BAI Y G. Application of plasma arc welding on drill pipe joint reconditioning [J]. China Petroleum Machinery, 1997, 25(1):22-25.
- [3] 杨强云,赵辉,杨川,等. 两段式气体渗氮对 35CrMo 钢疲劳和腐蚀性能的影响[J]. 热加工工艺, 2015, 44(12):207-210.
YANG Q Y, ZHAO H, YANG C, et al. Effect of two stage gas nitriding process on fatigue and corrosion properties of 35CrMo steel[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(12):207-210.
- [4] 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.
GE P F. Application of laser quenching technology in drill pipe joint surface harden treatment [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2015, 41(1):119-120.
- [5] 甄延波,程良,常森,等. 激光淬火工艺及应用研究[J]. 金属加工(热加工), 2018(12):63-66.
ZHEN Y B, CHENG L, CHANG S, et al. Study and application of laser surface quenching and [J]. MW Metal Forming, 2018(12):63-66.
- [6] 姜彬霖. 渗硼技术用于钻杆接头表面硬化的试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008, 35(3):28-29.
JIANG B L. Test study on boriding technology in surface hardening of drilling rod joint [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008, 35(3):28-29.
- [7] 刘杰,王程,钟洁,等. 45 钢激光相变硬化和感应加热表面淬火硬化后的组织和性能[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(11):58-66.
LIU J, WANG C, ZHONG J, et al. Microstructure and properties of 45 steel after laser transformation hardening and induction heating surface hardening [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2018, 39(11):58-66.
- [8] 皮华春,赵中里,薛勇杰. 热作模具激光表面淬火工艺与性能分析[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2020, 32(4):281-284.
PI H C, ZHAO Z L, XUE Y J. Laser surface quenching process and performance analysis of hot work Die [J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2020, 32(4):281-284.
- [9] 尹燕,魏小红,张瑞华,等. GCr15 光纤激光淬火工艺及性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4):117-121.
YIN Y, WEI X H, ZHANG R H, et al. Surface quenching of GCr15 steel by fiber laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4):117-121.
- [10] 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.
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.
- [11] 苏超然,吕长乐,师陆冰,等. 激光离散淬火对球墨铸铁磨损与损伤性能的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(11):85-90.
SU C R, LYU C L, SHI L B, et al. Effect of laser dispersed quenching on wear and damage property of ductile iron [J]. Surface Technology, 2018, 47(11):85-90.
- [12] 崔权维,孙文磊,黄勇. 曲面光斑面积变化模型及其对熔覆质量的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(11):225-232.
CUI Q W, SUN W L, HUANG Y. Surface facula area changing model and its effect on quality of laser cladding [J]. Surface Technology, 2018, 47(11):225-232.
- [13] 张群莉,童文华,陈智君,等. 光斑尺寸对 42CrMo 钢激光深层淬火硬化层几何特征的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(1):254-261.
ZHANG Q L, TONG W H, CHEN Z J, et al. Effect of spot size on geometrical characteristics of laser deep quenching hardened layer of 42CrMo steel [J]. Surface Technology, 2020, 49(1):254-261.
- [14] XU H W, CHEN W W, ZHOU K, et al. Temperature field computation for a rotating cylindrical workpiece under laser quenching [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 47(5/6/7/8):679-686.
- [15] 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.
- [16] 王硕桂,翟超,周榆生. 等离子表面淬火过程的简化算法和淬硬相变温度计算[J]. 金属热处理, 1998, 23(3):52-54
WANG S G, ZHAI C, ZHOU Y S. Simplified algorithm and quench-hardening phase transformation temperature calculation for plasma surface quench [J]. Heat Treatment of Metals, 1998, 23(3):52-54
- [17] 雷声,赵雅丽,桂中祥,等. 轴承滚道激光淬火的温度场数值模拟[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(1):21-25.
LEI S, ZHAO Y L, GUI Z X, et al. Numerical simulation of the transient temperature field of laser hardened layers for race surface of bearing rings [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 33(1):21-25.
- [18] 吴会亮,周平,霍孝新,等. 热处理对 35CrMo 预硬型塑料模具钢组织与硬度的影响[J]. 金属热处理, 2013, 38(12):54-57.
WU H L, ZHOU P, HUO X X, et al. Effects of heat treatment process on microstructure and hardness of 35CrMo pre-hardened plastic Die steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(12):54-57.