

40CrNiMoA 钢表面激光淬火后的组织和性能

杨振, 樊湘芳^{1*}, 邱长军¹, 李勇², 柳宁²

¹南华大学机械工程学院, 湖南 衡阳 421001;

²衡阳中钢衡重设备有限公司, 湖南 衡阳 421002

摘要 采用光纤激光器对卷取机卷筒主轴常用的 40CrNiMoA 钢进行了激光淬火实验, 采用金相显微镜观察试样表面的显微组织, 采用维氏硬度计测试相变硬化层的显微硬度, 采用立式万能摩擦磨损试验机评估试样的摩擦磨损性能, 采用体视显微镜观察试样截面的宏观组织及磨损形貌, 采用电化学工作站测试试样的耐蚀性能。结果表明: 40CrNiMoA 钢经激光淬火后, 表面会出现一层相变硬化层, 其显微组织主要为细小的马氏体、少量的残留奥氏体以及部分弥散的碳化物; 硬化层深度约为 200 μm , 硬度值可达 638.3~711.2 HV, 约为基体的 2.6~2.8 倍; 平均摩擦因数为 0.506, 与基体相比下降了 42.5%, 磨损量为 1.3 mg, 仅为基体的 36.1%, 其主要磨损机制为磨粒磨损; 腐蚀电位为 -0.497 V, 自腐蚀电流密度为 2.16789×10^{-9} A/cm², 与基体相比, 腐蚀电位略有提高, 而自腐蚀电流密度有所降低, 耐腐蚀性能得到了较大提升。

关键词 激光技术; 激光淬火; 40CrNiMoA 钢; 显微组织; 摩擦磨损; 耐蚀性能

中图分类号 TG456.7; TG142.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.011405

Microstructure and Properties of 40CrNiMoA Steel Surface After Laser Quenching

Yang Zhen¹, Fan Xiangfang^{1*}, Qiu Changjun¹, Li Yong², Liu Ning²

¹College of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;

²Hengyang Sino-Steel Hengzhong Equipment Co., Ltd., Hengyang, Hunan 421002, China

Abstract In this study, a laser-quenching experiment is conducted on the 40CrNiMoA steel base material of a reel spindle using a fiber laser. Further, the microstructure of sample surface is observed using a metallographic microscope, the microhardness of the phase-transformation hardening zone is evaluated using a Vickers hardness tester, and the friction and wear properties of the sample are evaluated using a vertical universal friction-and-wear tester. The macroscopic structure of the sample cross-section and morphology after wear are observed using a stereo microscope, and the corrosion resistance of the sample is verified using an electrochemical workstation. The results denote that after laser quenching of the 40CrNiMoA steel, a phase-transformation hardening zone can be observed on the surface with a microstructure that is mainly characterized by fine martensite, a small amount of retained austenite, and partially dispersed carbides. The hardened layer exhibits a depth of approximately 200 μm , and the hardness can become 638.3–711.2 HV, which is approximately 2.6–2.8 times that of the substrate. The average friction coefficient is 0.506, which is 42.5% lower than that of the substrate. The amount of wear is 1.3 mg, which is only 36.1% of that of the substrate. Herein, the abrasive wear is observed to be the main wear mechanism. Furthermore, the corrosion voltage is -0.497 V, which is slightly higher than that of the substrate, while the self-corrosion current density is 2.16789×10^{-9} A/cm², which is lower than that of the substrate. The corrosion resistance is considerably improved.

Key words laser technique; laser quenching; 40CrNiMoA steel; microstructure; friction and wear; corrosion resistance

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

收稿日期: 2019-05-10; 修回日期: 2019-07-02; 录用日期: 2019-07-15

基金项目: 衡阳市科学技术发展计划项目(2018KJ170)

* E-mail: hefanyibang@163.com

1 引言

40CrNiMoA 钢具有韧性好、强度高、淬透性好以及热稳定性良好等优点,在航空航天、汽车、冶金和大型齿圈等领域得到了广泛应用,主要被用于制造高负荷的轴类零件和承受冲击载荷的构件^[1-4],如涡轮发动机的涡轮轴、大型客机的起落架、卷取机卷筒主轴及航空用大型齿圈等^[4-5]。这些零部件长期承受冲击、摩擦、腐蚀、交变载荷等作用,服役环境恶劣,对材料表面性能的要求较高,因此,必须对其表面进行强化处理。对于 40CrNiMoA 钢,常见的表面强化处理手段有渗氮、渗碳淬火和喷丸等^[6-7],但经过这些传统工艺处理后的材料有时仍存在着表面硬化层厚度、组织分布不均匀,硬度梯度不均匀以及局部热影响区较大等缺陷^[8]。与传统的淬火工艺相比,激光淬火在提高材料性能、优化材料组织方面更具优越性^[9]。激光淬火又称激光相变硬化,是一种在材料表面快速加热、冷却的自激淬火技术,可使材料表面需要强化部位的温度很快达到奥氏体化温

度,随后以 $10^4 \sim 10^6$ °C/s 的快速冷却,从而使得组织转变为细小的马氏体,获得理想的淬火组织^[10-12]。激光淬火具有淬硬层硬度高、工艺周期短、加热轨迹易于控制以及易于实现自动化等优点;此外,激光淬火过程中恒定的功率和扫描速率保证了相硬化层的均匀性^[13-14]。

光纤激光器具有结构紧凑、转换效率高、光束质量好、热管理方便等优点,在工业、国防等领域具有广阔的应用前景^[15]。鉴于此,本文采用光纤激光器对冶金关键装备零部件——热轧地下卷取机卷筒主轴常用材料 40CrNiMoA 钢的表面进行淬火处理,分析该钢激光淬火后的组织和性能,以期为冶金企业降低生产成本、延长零部件的使用寿命提供实验方法和依据。

2 实验

2.1 实验材料与制备

实验基体为 40CrNiMoA 钢,其化学成分如表 1 所示。

表 1 40CrNiMoA 钢的化学成分

Table 1 Chemical compositions of 40CrNiMoA steel

Type of element	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Fe
Standard mass fraction /%	0.37-0.44	0.50-0.80	0.17-0.37	0.60-0.90	1.25-1.65	0.15-0.25	margin
Detection mass fraction /%	0.41	0.70	0.28	0.70	1.38	0.16	margin

采用粗砂纸打磨基体的待处理表面,然后将基体放入丙酮溶液中用 KQ-500E 型超声波清洗机清洗,以达到去除基体表面氧化物和油污的目的。采用 RFL-C3300 型光纤激光器进行激光淬火实验,实验参数如下:激光功率 $P = 1600$ W,扫描速度 $v = 20$ mm/s,光斑尺寸为 $12 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,单道扫描。采用线切割加工法将基体沿垂直于激光扫描方向切割成 $14 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 的试块,利用 XQ-2B 镶嵌机镶样,试样采用砂纸逐级打磨后,再用金相砂纸逐级精磨,然后用 PG-2A 抛光机抛光,最后用浓盐酸(HCl)和浓硝酸(HNO_3)按体积比为 3:1 组成的混合物腐蚀 10 s 左右,制成金相试样。

2.2 实验方法与检测

利用 XJG-05 型金相显微镜观察试样表面的显微组织;利用 JSZ6D 型电视显微镜观察试样的横截面形貌及磨损后的形貌;利用 HVS-1000AV 显微硬度仪检测相变硬化层的硬度,在其横截面上由表及里方向每隔 0.1 mm 打一个硬度测试点,加载载荷为 1.96 N,保压时间为 10 s,同一深度处测量 3 个点,取平均值作为最终的硬度值;利用 MMW-1B 立

式万能摩擦磨损试验机进行室温干滑动磨损测试,对磨材料为 GCr13 钢,实验载荷为 15 N,转盘转速为 50 r/min,磨损时间为 20 min;利用 BS210S 电子天平(精度 0.1 mg)称量试样磨损前后的质量;利用 CS300 型电化学工作站对试样进行电化学腐蚀测试,参比电极为饱和甘汞电极,辅助电极为铂电极,腐蚀环境为 $\text{pH} = 7$ 的 NaCl 溶液(NaCl 的质量分数为 3.5%),采样频率为 10 Hz,扫描速度 5 mV/s。

3 实验结果与分析

3.1 激光淬火的组织形貌

图 1 为激光淬火后试样横截面的宏观形貌图。观察后可知,40CrNiMoA 钢淬火后由表及里依次可分为相变硬化层、热影响区和基体。

图 2 所示为基体和激光淬火后相变硬化层表面的微观组织图。由图 2(a)可知,原始基体表面的显微组织主要为铁素体和不均匀的珠光体。观察图 2(b)可知,相变硬化层主要由大量细小的马氏体、少量残留的奥氏体以及部分弥散的碳化物组成。与基体相比,硬化层的组织更加细小、致密,产生这

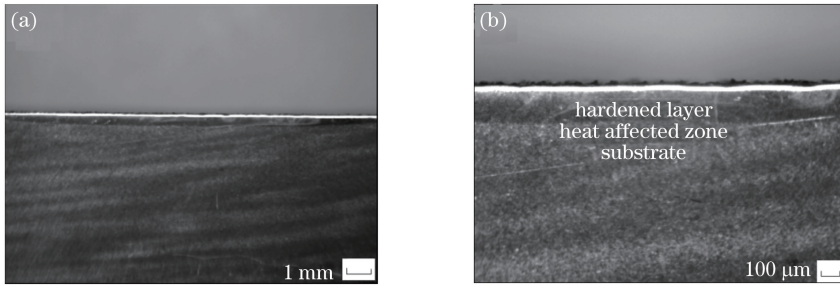


图 1 激光淬火 40CrNiMoA 钢的横截面形貌。(a)低倍体视显微镜照片;(b)高倍体式显微镜照片

Fig. 1 Cross-sectional morphology of laser-quenched 40CrNiMoA steel. (a) Photograph of low-power stereo microscope; (b) photograph of high-power stereo microscope

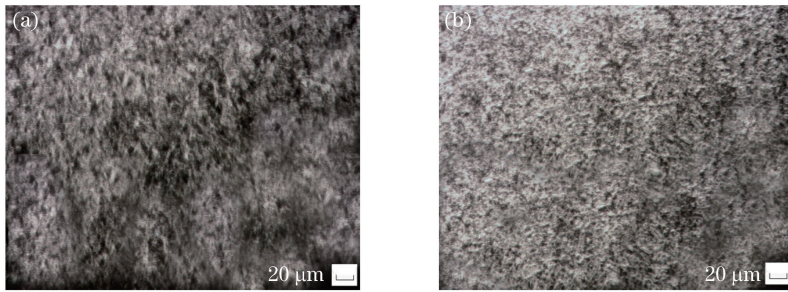


图 2 基体和激光淬火后相变硬化层表面的微观组织。(a)基体;(b)相变硬化层

Fig. 2 Microstructures of substrate surface and phase-transformation hardening zone after laser-quenching.

(a) Substrate; (b) phase-transformation hardening zone

种现象的原因是:高能量激光束作用于 40CrNiMoA 钢基体时,材料表面温度急剧升高,温度超过相变点后,钢的原始组织转变为大量奥氏体;此外,由于钢的过热度极大,导致相变驱动力较大^[16],从而使得奥氏体形核数量剧增。在快速加热条件下,奥氏体区域的碳含量分布不均匀,使得奥氏体中含碳量相似的微观区域的尺寸减小,各微区的 M_s 点(马氏体开始形成温度)差异明显增大,从而对激光相变硬化马氏体切变量产生限制,使得马氏体晶体在相当高的约束条件下形成,最终导致马氏体晶体难以生长而细化。当激光束加热结束后,钢的冷却速度极快,大部分奥氏体晶粒还未来得及长大就转变成了马氏体。与此同时,组织中弥散的碳化物对奥氏体晶粒的成形起到了抑制作用,使得奥氏体晶粒逐步细化,细化的奥氏体在马氏体相变的作用下,也转变成细小的马氏体组织,同样也会导致马氏体晶粒难以长大,从而使材料产生晶粒细化现象。大量细小的马氏体和碳化物是造成淬火组织硬度较高的主要原因。

3.2 显微硬度

图 3 为试样的显微硬度分布图。由图 3 可见:试样经激光淬火后,表面的相变硬化层深度约为 200 μm ,淬火层硬度为 638.3~711.2 HV,表层最大

硬度值可达基体的 2.8 倍左右;随着测试点至表面距离的增加,硬度呈急剧下降的趋势,并最终与基体本身的硬度持平。

材料硬度与晶粒尺寸的关系符合 Hall-Perch 公式^[17]:

$$H = H_0 + Kd_{hkl}^{-\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

式中: d_{hkl} 为晶粒直径; H_0 和 K 为常数。可以看出,材料的硬度随晶粒尺寸的变小而增大。当激光束聚集在试样表面时,近表层组织的温度超过 A_{C3} (A_{C3} 为铁素体转变为奥氏体的温度),淬火时的大冷速使近表层组织转变为细小的马氏体,从而得到完全淬火的相变硬化层,其组织最为细小致密,所以表现出了最高的显微硬度;热影响区组织被加热到 A_{C1} 和 A_{C3} 之间 (A_{C1} 为开始形成奥氏体的温度),淬火后转变为马氏体和铁素体,还有部分残余奥氏体,属于未完全淬火的硬化层,其硬度相比近表层略有降低;远离表面的基体温度低于 A_{C1} ,原始组织并未发生转化,所以硬度表现为基体本身的硬度,无明显变化。

3.3 摩擦磨损性能

图 4 所示是在同样的摩擦条件下 40CrNiMoA 钢基体和淬火后试样的摩擦因数曲线。可以直观地看出,激光淬火试样的瞬时摩擦因数下降明显,这是

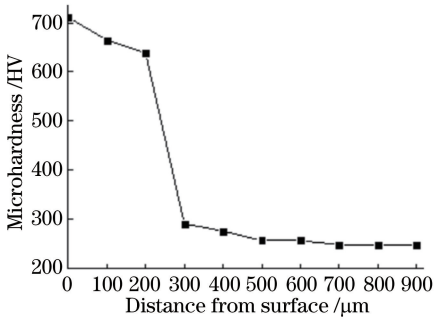


图3 激光淬火试样横截面上的显微硬度分布
Fig. 3 Microhardness distribution of cross section of laser quenched specimen

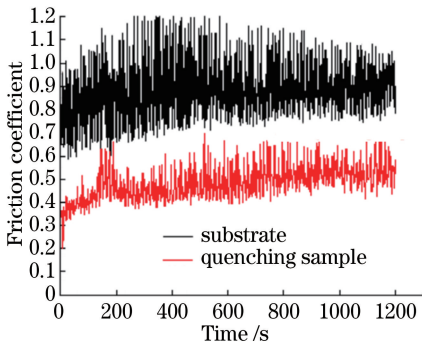


图4 摩擦因数随时间变化的曲线
Fig. 4 Friction coefficient as a function of time

由于试样表面的硬度远高于基体,摩擦时塑性变形程度较小,摩擦性能得到了改善,减摩效果显著。结合表2中的数据可知,激光淬火试样的平均摩擦因数相比基体试样下降了42.5%,且磨损量仅为基体的36.1%,摩擦磨损性能较好。

表2 试样的磨损量和平均摩擦因数

Table 2 Loss of weight and average friction coefficient of sample

Type of sample	Loss of weight /mg	Average friction coefficient
Substrate	3.6	0.880
Quenched-sample	1.3	0.506

图5为基体和激光淬火试样摩擦磨损后的表面形貌图。观察图5(a)可以发现,基体表面出现了很深的磨痕,对磨件对基体产生了很强的犁削作用,所以基体表面呈现出了较深的犁沟形貌,并伴有脱落现象发生,其主要的磨损机制为剥落磨损和黏着磨损。由图5(b)可以看出,激光淬火试样表面相对较为平整,划痕较浅,表面嵌有磨粒,发生磨粒磨损。由此可见,40CrNiMoA钢经激光淬火后可以有效地提高其耐磨性,降低磨损量,黏着现象得以抑制。这是因为,基体表面的硬度较低,当对磨件端面的微小

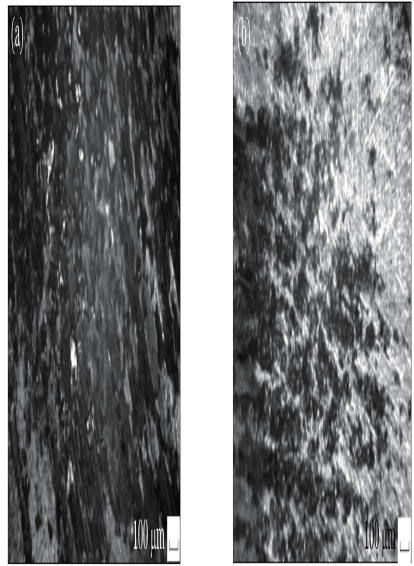


图5 表面磨损形貌。(a)基体;(b)激光淬火试样
Fig. 5 Morphologies of surface after wear.
(a) Substrate; (b) laser-quenched sample

凸起嵌入基体时,基体自身发生塑性流动而被犁削出一道道较深的犁沟;而经激光辐照后,40CrNiMoA钢表面形成的显微组织主要是细小的马氏体晶粒,比原始组织更加致密、均匀,大大增加了材料表面的硬度,进而提高其耐磨性。

3.4 耐腐蚀性能

图6为两种试样的电化学腐蚀极化曲线。由图6可见:基体试样的腐蚀电位为-0.682 V,自腐蚀电流密度为 $1.32554 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$;激光淬火试样的腐蚀电位为-0.497 V,自腐蚀电流密度为 $2.16789 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$ 。对比可以看出,40CrNiMoA钢基体经激光淬火后,其腐蚀电位略有提高,且自腐蚀电流密度降低了两个数量级,耐腐蚀性能得到明显改善。

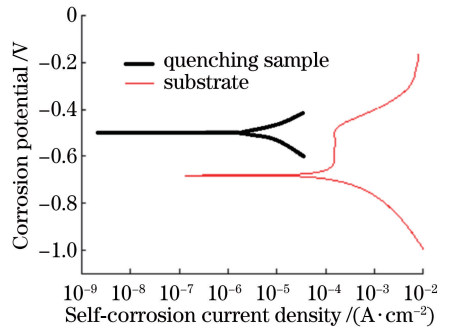


图6 不同试样的电化学腐蚀曲线
Fig. 6 Electrochemical corrosion curves of different samples

4 结 论

40CrNiMoA 钢表面经激光淬火处理后变为相变硬化层,其显微组织明显细化,主要由细小的马氏体、少量残留奥氏体以及部分弥散的碳化物组成。

40CrNiMoA 钢表面经激光淬火后,表面的硬度可达到 711.2 HV,约为基体的 2.8 倍,硬化层深度约为 200 μm ,平均摩擦因数相比基体下降了 42.5%,磨损量为基体的 36.1%,主要磨损机制为磨粒磨损,腐蚀电位略有提高,且自腐蚀电流密度有所降低,耐蚀性能较好。

参 考 文 献

- [1] Kong D J, Zhang L, Fu G Z. Effect of laser quenching on tensile properties and fracture analysis of 40CrNiMo high strength steel [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(7): 996-1002.
孔德军, 张垒, 付贵忠. 激光淬火对 40CrNiMo 高强度钢拉伸性能与断口形貌的影响 [J]. *兵工学报*, 2014, 35(7): 996-1002.
- [2] Qin R Y, Zhou B, Ma R, et al. Microstructure and properties of 40CrNiMoA high-strength steel repaired by laser melting deposition[J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2018, 13(5): 275-280, 302.
秦仁耀, 周标, 马瑞, 等. 激光熔化沉积修复 40CrNiMoA 高强钢的组织与性能 [J]. *失效分析与预防*, 2018, 13(5): 275-280, 302.
- [3] Dai Y H, Wang W C, Qiang W, et al. Investigate of 40CrNiMoA laser quenching technology [C] // The 13th Session of the 15th China Association for Science and Technology Annual Meeting: Proceedings of the Symposium on Aero Engine Design, Manufacturing and Application Technology. Beijing: < Chinese academic CD-rom > Electronic magazine, 2013: 923-927.
戴玉宏, 王万成, 强巍, 等. 40CrNiMoA 的激光表面淬火工艺研究 [C] // 第十五届中国科协年会第 13 分会场: 航空发动机设计、制造与应用技术研讨会论文集. 北京: 《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社, 2013: 923-927.
- [4] Liu Q, Song L, Wu H. 40CrNiMoA phase-change hardening treatment by laser-broadband scanning[J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition)*, 2008, 23(4): 35-39.
刘倩, 宋力, 吴寒. 40CrNiMoA 激光宽带相变硬化处理 [J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 23(4): 35-39.
- [5] Puchi-Cabrera E, Staia M, Quinto D, et al. Fatigue properties of a SAE 4340 steel coated with TiCN by PAPVD[J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(3): 471-480.
- [6] Wang J Z, Li K Y, Liu A J, et al. Research status of 40CrNiMo steel at home and abroad [J]. *Iron & Steel*, 2018, 53(5): 1-10.
王敬忠, 李科元, 刘阿娇, 等. 40CrNiMo 钢国内外研究现状 [J]. *钢铁*, 2018, 53(5): 1-10.
- [7] Junior G S, Voorwald H J C, Vieira L F S, et al. Evaluation of WC-10Ni thermal spray coating with shot peening on the fatigue strength of AISI 4340 steel[J]. *Procedia Engineering*, 2010, 2(1): 649-656.
- [8] Xiong D H, Zhu J K, Ye B, et al. Diode laser hardening of a soft-nitrided steel-a process research [J]. *Applied Laser*, 2016, 36(1): 14-17.
熊大辉, 朱金凯, 叶兵, 等. 软氮化一半导体激光淬火复合强化工艺研究 [J]. *应用激光*, 2016, 36(1): 14-17.
- [9] Kong D J, Zhang L, Song R G, et al. Effect of laser quenching on fatigue properties and fracture morphologies of 40CrNiMo high strength steel [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(11): 1103005.
孔德军, 张垒, 宋仁国, 等. 激光淬火对 40CrNiMo 高强度钢疲劳性能与断口形貌的影响 [J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1103005.
- [10] Xu H W, Wen D G, Liu Y, et al. Influence of temperature field coupling on temperature field of laser quenching on cylinder circumferential surface [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(9): 091407.
徐宏伟, 闻德刚, 刘耀, 等. 温度场耦合对圆柱圆周表面激光淬火温度场的影响 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(9): 091407.
- [11] Fu K, Zhang X Q, Xu X X, et al. Process optimization and property analysis of 45 steel by laser quenching[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2017, 42(1): 154-158.
符轲, 张修庆, 续晓霄, 等. 45 钢激光淬火工艺优化及性能 [J]. *金属热处理*, 2017, 42(1): 154-158.
- [12] Shu F H. Application of vague set in process optimization of laser quenching of Cr12MoV steels [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 011403.
舒服华. Vague 集在 Cr12MoV 钢激光淬火工艺优化中的应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1):

- 011403.
- [13] Hou Q, Liu G X, Yang G, et al. Study on the microstructure and wear property of MoCr cast iron treated by laser quenching[J]. Applied Laser, 2015, 35(6): 657-660.
侯琦, 刘广鑫, 杨光, 等. MoCr 铸铁激光淬火组织及磨损性能研究[J]. 应用激光, 2015, 35(6): 657-660.
- [14] 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): 041401.
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): 041401.
- [15] 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.
- [16] Yang C S, Xu S H, Zhou J, et al. Research advance on the key technology of high-power fiber laser materials and components [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2017, 47(10): 1038-1048.
杨昌盛, 徐善辉, 周军, 等. 大功率光纤激光材料与器件关键技术研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(10): 1038-1048.
- [17] Kong D J, Fu G Z, Wang W C, et al. Effects of laser quenching on friction and wear properties of 40CrNiMo[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(3): 714-720.
孔德军, 付贵忠, 王文昌, 等. 激光淬火对40CrNiMo 摩擦与磨损性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(3): 714-720.