

全固态皮秒径向偏振激光器及其加工特性

彭红攀, 杨 策, 卢 尚, 陈 檬*

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

摘要: 在自主研发的全固态皮秒激光器基础上, 腔外加入偏振转换元件输出皮秒径向偏振激光, 并对其进行侧泵 Nd:YAG 晶体放大, 最终得到中心波长 1 064 nm、平均功率 1.95 W、重复频率 1 kHz、峰值功率 1.77×10^8 W、光束质量 2.95 以及纯度 92% 的皮秒径向偏振激光器。用该激光器对 0.5 mm 厚不锈钢材料进行钻孔和刻槽实验, 并与同等加工工艺参数条件下皮秒线偏振激光器钻孔圆度和刻槽深度进行对比, 分析两种激光器对加工效果的影响。实验结果表明, 相比皮秒线偏振激光, 利用皮秒径向偏振激光进行加工, 钻孔圆度更好、刻槽深度更深且槽侧壁更为平坦。该结果为皮秒径向偏振激光器在材料加工领域的应用提供参考。

关键词: 固体激光器; 径向偏振; 激光加工; 皮秒激光; 激光放大

中图分类号: O437 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0106003

All-solid-state picosecond radially polarized laser and its processing characteristics

Peng Hongpan, Yang Ce, Lu Shang, Chen Meng*

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: An average power of 1.95 W picosecond radially polarized laser was obtained with 1 064 nm at 1 kHz, which based on an all-solid-state picosecond laser developed independently. The peak power of the radially polarized beam was up to 1.77×10^8 W and the beam quality was measured to be $M^2 = 2.95$ with the pulse width 11 ps, corresponding to the beam purity of 92%. The radially polarized seed beam was obtained by adding the polarization conversion element outside the laser cavity. In addition, the modulation attenuator caused two different polarization lasers to output the same optical power and then enter the subsequent optical system; and a 0.5 mm thick stainless steel was drilled and grooved by using the obtained picosecond radially polarized laser and picosecond linearly polarized laser under the same processing parameters, respectively. The difference on the circularity of the holes and the depth of the grooves were compared with each other when it was processed by the two polarized picosecond lasers. The results show that the picosecond radially polarization laser has better drilling roundness, deeper notch depth and flatter sidewall of the groove compared to the picosecond linear polarization

收稿日期: 2018-08-10; 修订日期: 2018-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(U1631240); 北京市基金重点 B 类项目(KZ201510005001)

作者简介: 彭红攀(1985-), 男, 博士生, 主要从事全固态皮秒径向偏振激光器方面的研究。Email: phphit@126.com

导师简介: 陈檬(1963-), 女, 研究员, 博士, 主要从事全固态纳秒、皮秒、倍频激光器件等方面的研究。Email: chenmeng@bjut.edu.cn

laser processing results. This results provides a reference for the application of picosecond radial polarization laser in the field of material processing.

Key words: all-solid-state laser; radial polarization; laser process; picosecond laser; laser amplification;

0 引言

近年来,径向偏振激光因其特有的偏振方向,即沿光轴对称分布、光轴上光强始终为零,经高数值孔径透镜聚焦后焦点处光斑小且具有极强的纵向电场分量等特点^[1],在光学微操纵、粒子捕获、超分辨率成像、精密量子测量、微加工等方面受到充分重视^[2-4]。在激光加工方面,线偏振光由于在材料不同位置具有不同的吸收率而导致加工形状畸变或效率低下^[5]。径向偏振光因其偏振方向径向分布的特点弥补了线偏振光进行微加工时的不足。此外,固体皮秒激光器具有脉宽窄、单脉冲能量高等特点,与毫秒、纳秒激光器相比其在材料加工方面很大程度上可避免“热影响”,具有更高的加工精度和加工质量^[6-10]。文中结合二者的优势研究了两种偏振激光的加工特性,从实际应用的角度,分析比较并解释了两种激光器加工效果的差异,也为下一代高质量冷加工光源的研制提供重要参考。

产生径向偏振激光的方法通常有两种,一种是在激光腔内直接产生,一种是在腔外插入特殊光学元件实现径向偏振光的输出。腔内法一般利用晶体的双折射或热致双折射效应在谐振腔内特定位置插入小孔或锥形布儒斯特棱镜、衍射光栅等其他选择元件,抑制其他偏振状态的震荡,只允许径向方向偏振振荡输出^[11]。腔内法通常对激光器谐振腔设计有较高要求,腔内能量损耗较多,产生功率低,而现在已有良好的腔外偏振转换元件,可高效地将线偏振转换为径向偏振光,省去了特殊谐振腔设计步骤,可获得较高输出功率。2014年,李政委等利用半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模和热致双折射方法得到功率 13 W、偏振纯度大于 92%、重复频率 59 MHz 的皮秒径向偏振光^[12];2017年,常程程等利用闪光灯泵浦 Nd:YAG 晶体对径向偏振光放大得到单脉冲能量 772 mJ、频率 10 Hz、脉宽 10 ns 的纳秒径向偏振光^[11]。有报道分析了光束偏振对板材切割速度的影

响,未从皮秒脉冲激光不同偏振态对特定材料加工效果角度做出比较分析。文中使用腔外法实现皮秒径向偏振光输出,采用 LD 侧泵 Nd:YAG 晶体放大皮秒径向偏振光方法进一步提高输出功率。将其导入四轴联动加工系统,对 0.5 mm 厚不锈钢材料进行钻孔和刻槽实验,并与同工艺条件下皮秒线偏振光打孔和刻槽效果进行了比较分析。

1 实验与装置

如图 1 所示,LD 泵浦 Nd:YVO₄ 晶体,经半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模产生种子激光,再经过 LD 侧泵 Nd:YAG 晶体再生放大器放大,输出中心波长 1 064 nm、重复频率 1 kHz、脉宽约 11 ps(FWHM)、功率 1.2 W 的激光。经半波片和偏振片共同组成的衰减器之后,垂直入射到偏振转换元件 S 波片(具有空间结构周期变化的半波片)上^[13]。

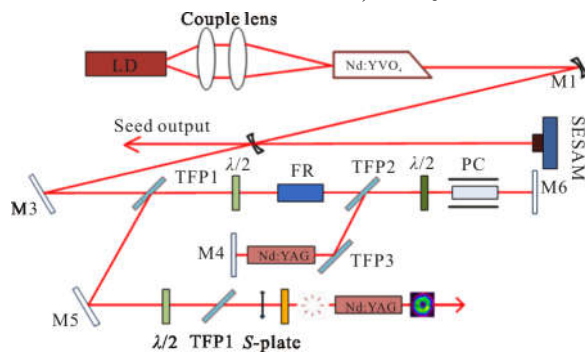


图 1 全固态皮秒激光器结构图

Fig.1 Structure of all solid-state picosecond laser

S 波片具有空间变化的亚波长光栅结构,形成双折射,产生类似慢轴方向连续变化的半波片的效果,当通过线偏振光偏振方向与 S 波片光轴平行时,变为径向偏振光。线偏光通过 S 波片(双面镀 1 064 nm 增透膜透,偏振转换效率 75%)得到功率为 0.9 W 的径向偏振光,其光速质量因子 M^2 为 2.45。将该光束通过扩束器模式匹配后再经一个侧泵 Nd:YAG 晶体放大,最后得到功率为 1.95 W 的皮秒径向偏振激光输出,其频率为 1 kHz,脉宽 11 ps,峰值功率

为 1.77×10^8 W。其中,Nd:YAG 晶体(直径 4 mm,棒长 63 mm),泵浦频率 1 kHz,泵浦波长 808 nm,泵浦峰值功率为 840 W。图 2 为采用自相关仪(APE, PulseCheck-SM)测得的脉宽。图 3 为使用 500 M 示波器和高速光电管测得的波形图。

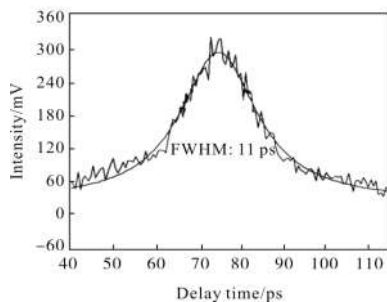


图 2 径向偏振光脉冲宽度

Fig.2 Radially polarized beam pulse width

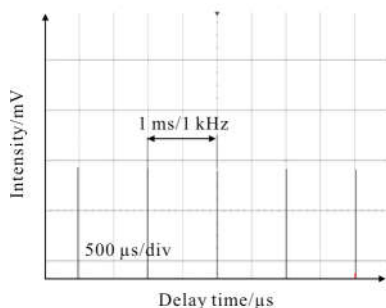


图 3 径向偏振光波形

Fig.3 Radially polarized beam waveform

径向偏振光输出光斑强度分布由电荷耦合器件 (CCD)探测(图 4),由计算机软件采集图像数据。径向偏振光通过与光轴呈布儒斯特角放置的偏振片后,透过的一侧呈左右分瓣,被反射的一侧呈上下分瓣分布,当在 CCD 软件上观察到透过偏振片的光斑如上述分布时,透过 S 波片的光即为径向偏振光。由光束质量分析仪(Spiricon M^2 -200 s)测量输出光的光

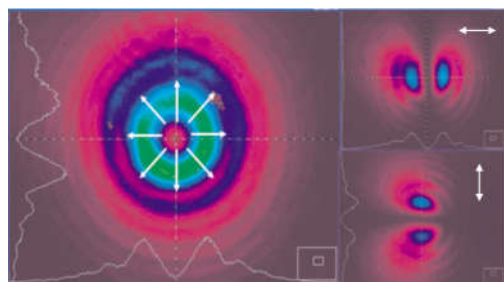


图 4 径向偏振光经过偏振片前后光强分布

Fig.4 Radially polarized beam distribution before and after passing through a polarizer

束质量因子,由激光功率计(Coherent-FieldMax II)测其平均功率。最终得到 $M^2=2.95$ (图 5)、平均输出功率 1.95 W、纯度 92%(狭缝法^[12])的皮秒脉冲径向偏振激光。光束质量因子放大前后发生变化主要由放大器中非均匀泵浦和晶体热透镜效应引起。

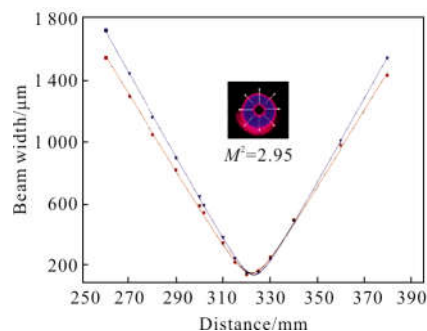


图 5 径向偏振光光束质量

Fig.5 Radially polarized beam quality

将所得径向偏振光导入加工平台,加工系统光路如图 6 所示。

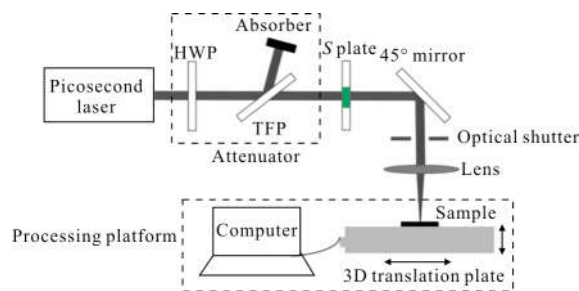


图 6 激光微加工系统

Fig.6 Schematic of laser micro-processing system

径向偏振光通过 45° 反射镜入射到加工平台,经透镜聚焦至放置在平移台的样品表面,透镜焦距 61 mm,聚焦光斑直径约 $55 \mu\text{m}$ 。调整衰减器($\lambda/2$ 波片 HWP 和偏振片 TFP 组成)致径向偏振光输出功率为 1.8 W,对 0.5 mm 不锈钢板进行钻孔和刻槽实验。同等条件下,使用线偏振光对 0.5 mm 不锈钢板进行钻孔和刻槽。加工后的样品都利用激光扫描共聚焦显微镜(Olympus Lextol LS3000)和扫描电子显微镜 (SEM Hitachi TM-1000) 对其形貌和深度进行检测。所用 0.5 mm 不锈钢在实验前后均用酒精浸泡,并进行超声波清洗。对于钻孔实验,即冲击打孔,将样品固定在加工台上,直冲 30 s。对于刻槽实验,在 0.5 mm 厚不锈钢上沿特定方向(选择与线偏

振光平行方向)扫描,其速率 0.5 mm/s,扫描 14 次进行刻槽。

2 实验结果与分析讨论

2.1 钻孔实验效果对比

图 7 为线偏振光和径向偏振光冲击不锈钢出孔效果图,可以看出,利用线偏光冲击的小孔出孔为椭圆形形状,利用径向偏振光冲击的小孔出孔基本为圆形。

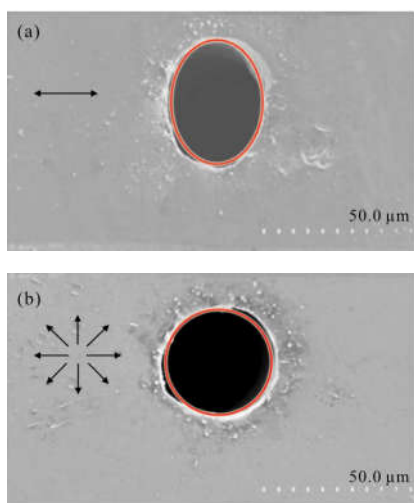


图 7 线偏振光(a)和径向偏振光(b)在不锈钢表面钻孔出孔
Fig.7 Exit holes drilled on stainless steel by linearly polarized beam (a) and radially polarized beam (b)

激光对金属材料进行加工时,偏振态是影响材料对光吸收能力的关键因素^[14]。当光线辐照材料表面时, P 偏振光平行于入射面, S 偏振光垂直于入射面。图 8 为铁制材料对于 P 偏振光和 S 偏振光的反射率与入射角的关系曲线。根据能量守恒定律,不透明材料对于光的反射率与吸收率之和为 1,即可用

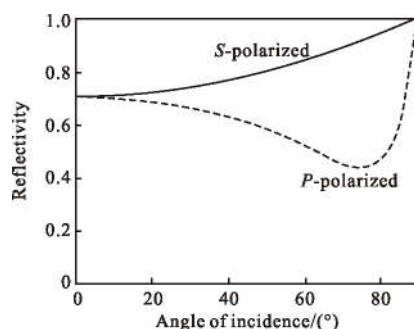


图 8 铁制材料对于 P 偏振光和 S 偏振光的反射率与入射角的关系图^[14]
Fig.8 Relationship between the reflectivity of the P , S polarized beam and the incident angle^[14]

材料反射率描述材料对光的吸收能力^[15]。当光波垂直或小角度入射时,材料对不同偏振态激光的反射系数差可基本忽略,但随着入射角的增大,对不同偏振态激光的反射(吸收)差别增大。

当激光初始作用在材料时,在表面形成凹坑,后续脉冲继续在该凹坑表面作用,形成较大的入射角如图 9 所示。材料越厚,入射角越大,通常为 $70^\circ \sim 85^\circ$ ^[16]。对于线偏振光,沿光束传播方向在同一平面内的光束,其电场偏振方向在同一平面内,位置 A 处原电场偏振方向在入射面内与 P 矢量方向重合,没有其他分量且场强最强,此时材料与电场相互作用最强,在同一层面的其他位置(C 点与 A 点对称,

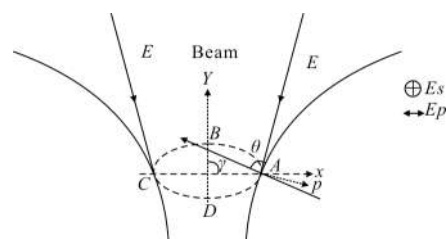


图 9 激光束入射剖面示意图

Fig.9 Schematic diagram of laser beam incident profile

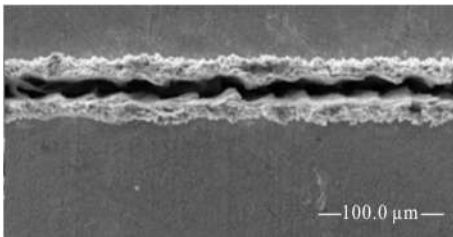
除外),原电场偏振方向不在入射面内,只有原电场偏振矢量的 P 分量在入射面内,并且随着 S 偏振光强度增强而减弱。在位置 B 处(与 D 点对称)原电场方向垂直于 Y 方向所在的入射面,其中 S 偏振分量最大, P 偏振分量最小,此时电场与材料作用强度最弱。由于材料对不同偏振光的吸收率不同,在入射光角度一定情况下,材料对 P 偏振光吸收率高与 S 偏振光,因此,从同一层面四点(A 、 B 、 C 、 D)可以看出,线性偏振激光打孔形状呈椭圆分布,与图 7(a)所示线偏振激光冲击的小孔出孔为椭圆分布相对应。由于径向偏振光在传播过程中,偏振方向始终保持完美的轴对称径向分布,电场偏振方向就是 P 偏振方向,因此其打孔出孔应为圆形分布,如图 7(b)所示。不仅如此,对于径向偏振光只要满足合适的入射角度, P 偏振光的反射率就远小于 S 偏振光的反射率,且径向偏振光偏振态总是 P 偏振的,所以材料对径向偏振光能量的吸收总是大于对其他偏振态激光的吸收。因此,相比于线性偏振光,利用径向偏振光进行打孔,不但打孔圆度较好而且效率较高。

2.2 刻槽实验对比

图 10(a)、(b)分别为皮秒线偏振激光和皮秒径向偏振激光所刻微槽电镜图,图 10(c)、(d)分别为任意位置横断面共聚焦图。

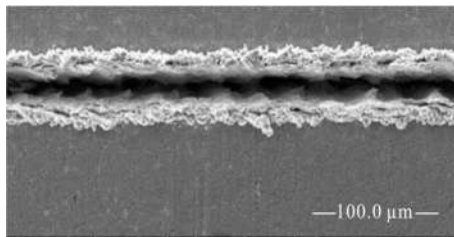
在相同工艺参数条件下,径向偏振激光刻槽深 78 μm ,宽度 31 μm ,锥度 5.5°;线偏振光刻槽深度 29 μm ,宽度 18 μm ,锥度 20°。两者对比可知,径向偏振激光加工深度较深,宽度宽于线偏振光加工效果,具有较小的锥度分布,且切割壁和底部较平坦。

参考文献[1]中描述了柱矢量偏振光聚焦焦深高于线偏振光聚焦焦深情况,径向偏振光属于柱矢量光束,因此径向偏振光刻槽深度大于线性偏振光刻



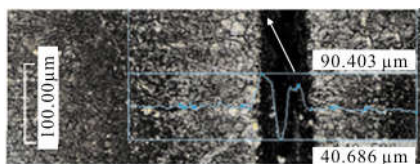
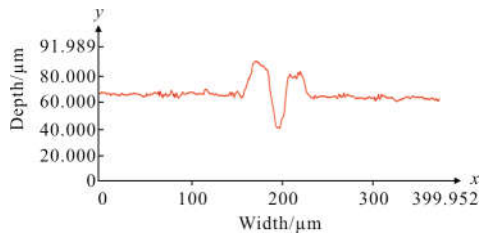
(a) 线偏振光加工

(a) Linearly polarized beam process



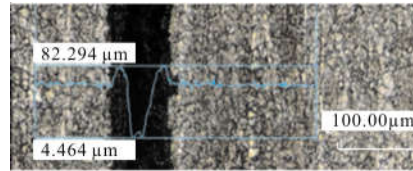
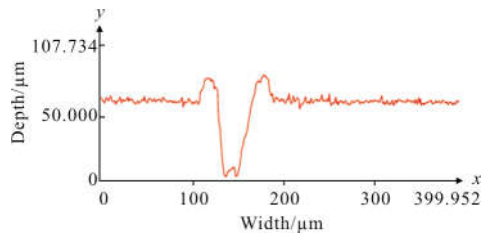
(b) 径向偏振光加工

(b) Radially polarized beam process



(c) 线偏振皮秒激光所刻微槽横断面共聚焦图

(c) Con-focal image of cross section of groove processed by linearly polarized beam



(d) 径向偏振皮秒激光所刻微槽横断面共聚焦图

(d) Con-focal image of cross section of groove processed by radially polarized beam

图 10 电子显微镜下不锈钢表面微槽轮廓

Fig.10 Micro-groove profile of stainless steel surface under electron microscope

槽深度。在焦平面处,径向偏振光偏振态始终是 P 偏振且均匀对称分布,但线偏振光 P 偏振分量大小随作用位置改变而变化,仅在 P 偏振与原偏振方向重合时强度最强。在线偏光进行刻槽实验时,选择刻槽方向与线偏振光原电场偏振方向平行,由上述分析可知,线偏振光刻槽宽度小于径向偏振光刻槽宽度,且线偏振光刻槽槽型呈“V”型分布。在径向偏振光刻槽时,由于其电场偏振方向就是 P 偏振方向且中心对称分布,被槽两侧材料均匀吸收且能量吸收率高于线偏振光(刻槽时,材料对 P 偏振光吸收率高于 S 偏振光吸收率),因此,径向偏振光所刻槽型侧壁和底部更为平坦。

3 结论

文中通过在自主研发的全固态皮秒激光器基础上利用腔外法实现了径向偏振光的输出,并进行放大,最终得到功率为 1.95 W 的皮秒径向偏振激光器,为超短脉冲激光在材料加工领域的应用提供了光源参考。分别利用径向偏振激光和线偏振激光对钢制材料进行打孔和刻槽实验并进行了对比分析,得出了在实际应用过程中利用皮秒径向偏振光打孔和刻槽,其孔型圆度更高,刻槽深度更深且侧壁和底部更为平坦的结论。文中将全固态皮秒径向偏振激光器的制造、放大,应用加工结合在一起,完整阐述了整个实验过程,为后续此类激光器设计及其加

工方案的优化提供参考。此外,可通过选择材料吸收率更高的波长来提高加工效率,也可通过提高种子光功率和增加放大模块数量的方法来增大皮秒径向偏振激光器输出功率。

参考文献:

- [1] Zhan Qiwen. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications [J]. *Journal of Systems Science & Complexity*, 2009, 27(5): 899–910.
- [2] Wei Tongda, Zhang Yunhai, Tang Yuguo. Effect of polarization, phase and amplitude on depletion focus spot in STED [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(5): 1157–1564. (in Chinese)
魏通达, 张运海, 唐玉国. 偏振态、相位和振幅对受激辐射损耗中损耗光焦斑的影响 [J]. 光学 精密工程, 2014, 22(5): 1157–1564.
- [3] Wang Sicong, Li Xiangping. Wavefront manipulation of tightly focused cylindrical vector beams and its applications [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(2): 185–202. (in Chinese)
王思聪, 李向平. 紧聚焦对称矢量光场波前调控及应用[J]. 中国光学, 2016, 9(2): 185–202.
- [4] Zhan Xiangkong, Li Zhengyong, Zhang Yin, et al. Radially polarized beam restructuring based on Stokes -vector measurement and interferometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0427002. (in Chinese)
詹翔空, 李政勇, 张伊, 等. 基于 Stokes 矢量测量与干涉法的径向偏振光束重建[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 0427002.
- [5] Li Manman, Yan Shaohui, Yao Baoli, et al. Optically induced rotation of Rayleigh particles by vortex beams with different states of polarization [J]. *Physics Letters A*, 2016, 380(1–2): 311–315.
- [6] Li Pingxue, Xin Chenggao, Gao Jian, et al. Research progress and development of picosecond laser processing [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(10): 1195–1203. (in Chinese)
李平雪, 辛承聪, 高健, 等. 皮秒激光加工研究进展与展望 [J]. 激光与红外, 2018, 48(10): 1195–1203.
- [7] Trtica M S, Gakovic B M, Radak B B, et al. Material surface modification by ns, ps and fs laser pulses [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(2): 221–227. (in Chinese)
- [8] Jin Fangyuan, Chen Bo, E Shulin, et al. Ablation rate of high frequency picosecond laser micromachining quartz substrated Al film [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3239–3243. (in Chinese)
金方圆, 陈波, 鄂书林, 等. 高频率皮秒激光微加工石英衬底铝膜效率[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3239–3243.
- [9] Li Chen, Stoian Razvan, Chen Guanghua. Laser -induced periodic surface structures with ultrashort laser pulse [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(1): 1–17. (in Chinese)
李晨, Stoian Razvan, 程光华. 超短脉冲激光诱导周期性表面结构[J]. 中国光学, 2018, 11(1): 1–17.
- [10] Wu Wei, Chen Guiming, Zhao Na, et al. Experimental study on the groove surface texture processed by laser on the surface of high -speed steel [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0206008. (in Chinese)
武伟, 陈桂明, 赵娜, 等. 激光在高速钢表面加工沟槽表面结构的实验研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(2): 0206008.
- [11] Chang Chengcheng, Chen Xudong, Pu Jixiong. High-energy nanosecond radially polarized beam output from Nd:YAG amplifiers [J]. *Optical Review*, 2017, 24(2): 188–192.
- [12] Li Zhengwei, Chen Meng, Li Gang. Side-pumped Nd:YAG mode-locked radially polarized laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(1): 0102006. (in Chinese)
李政委, 陈檬, 李港. 侧面抽运 Nd:YAG 锁模径向偏振光 [J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0102006.
- [13] Beresna Martynas, Gecevičius Mindaugas, Kazansky Peter G, et al. Radially polarized optical vortex conveyor created by femtosecond laser nanostructuring of glass [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(20): 20110101–20110103.
- [14] Mikheev M, Idiutulin S. Influence of light polarization on laser destruction [C]//SPIE, 1998, 3573: 36–38.
- [15] Jiang Jing, Chen Meng, Bai Zhenxu, et al. Influence of polarization on the hole formation with picosecond laser [J]. *Optical Review*, 2013, 20(6): 496–499.
- [16] Niziev G V, Nesterov V A. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 1999, 32: 1455–1461.