

板条 Nd:YAG 晶体的合成盘抛光技术*

谢瑞清¹, 廖德锋¹, 王晓博², 袁志刚¹, 钟 波¹, 陈贤华¹, 王 健¹, 雷向阳¹, 侯 晶¹

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 2. 常州西南交通大学 轨道交通研究院, 江苏 常州 213100)

摘 要: 针对高功率板条激光器核心工作器件——板条 Nd:YAG 晶体的超精密加工开展研究, 分析了具有特殊构型的板条 Nd:YAG 晶体元件的加工性能及工艺难点, 提出了一种新的基于合成盘抛光的板条 Nd:YAG 晶体加工工艺, 并对规格为 100 mm×30 mm×3 mm 的板条 Nd:YAG 晶体进行了加工实验。实验结果表明, 合成盘抛光可以很好地控制元件的塌边现象; 通过磨料的优化选择, 在合成盘抛光工艺中匹配合适粒度的 Al₂O₃ 磨料能够实现元件的低缺陷加工, 元件下盘后的全反射面平面度达 0.217 λ (1 λ = 632.8 nm), 端面平面度达到 0.06 λ, 表面粗糙度达 0.55 nm(RMS), 端面楔角精度可达 2''。

关键词: 板条激光器; Nd:YAG 晶体; 抛光; 合成盘; 面形; 粗糙度

中图分类号: TQ171.73

文献标志码: A

doi: 10.3788/HPLPB201426.012007

板条激光器作为获得高平均功率的有效途径之一, 自从其诞生之日起就得到世界各国广泛的研究^[1-3]。作为高功率板条 YAG 激光器的核心工作器件, 板条 YAG 晶体元件的加工精度直接影响到激光器的输出光束质量^[4-6], 而各种加工缺陷将造成晶体的内部激光损耗, 降低元件的抗损伤能力^[7]。随着板条激光器输出功率要求的不断提升, 所需板条的几何尺寸越来越大, 加工难度和质量要求也越来越高。针对 YAG 晶体材料的光学加工, 目前已报道的加工方法大多是在研磨机上利用沥青、聚氨酯或纯锡等抛光模, 选用金刚石或氧化铝微粉磨料进行手工抛光或机抛^[8-11], 但现有的各种工艺方法还无法完全解决板条 YAG 晶体元件高面形精度与高表面光洁度之间的矛盾, 实现该类元件高精度、高效率和低缺陷的加工制造仍比较困难。针对高功率板条激光器对大尺寸板条 Nd:YAG 晶体元件的加工需求, 本文详细分析了这种具有特殊构型元件的加工特性, 提出一种新的抛光方法, 为实现高精度板条 Nd:YAG 晶体元件批量化加工提供一条有效的技术途径。

1 Nd:YAG 晶体加工特性分析

Nd:YAG 晶体是典型的硬脆难加工材料。这类材料的弹性极限与强度极限非常接近, 当材料所承受的载荷稍稍超过弹性极限时就会发生断裂破坏, 加工表面容易产生微裂纹和凹坑, 严重影响其表面质量和性能。表 1 列出了 Nd:YAG 晶体的基本物化性能^[8], 其晶体结构属石榴石型, 是自然界中仅次于金刚石、立方氮化硼的第三大硬脆材料, 因此加工这种晶体比一般的光学材料更加困难, 研磨、抛光阶段对于磨料的选择性非常强, 如碳化硅、金刚石、氧化铝等。同时, 由于其化学性质非常稳定, 仅在 250 ℃ 以上的高温条件才溶于某些酸性物质 (如 H₃PO₄)^[12], 在正常的研磨或抛光条件下无明确的化学反应产生, 加工过程主要依靠磨料的机械作用进行材料去除, 因此抛光表面极易产生划痕等加工缺陷。

表 1 Nd:YAG 晶体的基本物理化学性能

Table 1 Basic chemical and physical properties of Nd:YAG

molecular formula	crystal structure	modulus of elasticity/(kg · cm ⁻²)		rupture stress/(kg · cm ⁻²)	melting point/℃
Nd ₂ Y ₃ Al ₅ O ₁₂	cube	3 × 10 ⁶		(1.3~2.6) × 10 ⁶	1950
density/(g · cm ⁻³)	Mohs hardness	thermal expansion coefficient (0~250 ℃)/K ⁻¹			chemical properties
		[100] orientation	[110] orientation	[111] orientation	
4.55	8.5	8.2 × 10 ⁻⁶	7.7 × 10 ⁻⁶	7.8 × 10 ⁻⁶	high stability*

* Nd:YAG can not be dissolved to H₂SO₄, HCl, HNO₃, HF at room temperature, but can be dissolved to H₃PO₄ (>250 ℃)

板条 Nd:YAG 晶体的加工难点还体现在其特殊的外形结构。为了消除热透镜的影响, 通常板条并不做成方形, 而是将两个供振荡激光通过的端面切割成绕元件长轴倾斜的布儒斯特角, 并将板条的两个大面也抛光,

* 收稿日期: 2013-07-22; 修订日期: 2013-08-25

基金项目: 国家科技重大专项课题 (2013ZX04006011-101)

作者简介: 谢瑞清 (1982—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事先进光学制造技术研究; xieruiqing@163.com。

使得振荡激光在晶体内部通过两个大面的全内反射而呈“之”字形传播^[13],如图1所示。这种特殊构型的板条元件比传统的圆柱形激光棒几何形状复杂,加工面多,抛光面大,且呈非圆对称,光学加工难度非常大。

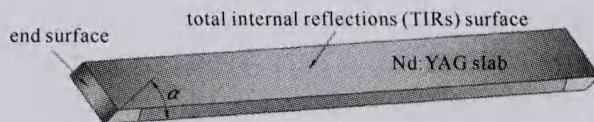


Fig. 1 Typical structure of Nd:YAG crystal slab

图1 板条Nd:YAG晶体的典型结构

首先,需要保证两端面具体高的楔角精度。在

传统的棱镜加工工艺中,楔角的加工通常先用角度块定位,然后再浇筑石膏的方式进行装夹,但这种装夹方式一方面装夹精度不高,另一方面加工效率也很低,不能适应批量化生产。其次,板条Nd:YAG晶体是典型的超薄型光学零件(其径厚比大于60),结构刚性差,传统的上盘方式通常会带来非常大的加工变形。由于元件对面形精度的要求是全口径的,因此在抛光过程还必须严格控制塌边量。最后,为提高器件性能,板条各棱边倒角尺寸极小甚至不倒角,棱边较锋利,加工过程中如果装夹不当,极易造成元件的崩边、崩角甚至报废。

因此,针对具有超硬材料特性及特殊结构特性的板条Nd:YAG晶体元件的超精密光学加工,需从抛光盘材料与抛光磨料的优化匹配、工件上盘及装夹方式入手,改进加工方式及原理,才能克服传统加工方法的缺点,最终同时获得高精度、高效率、低缺陷的抛光加工效果。

2 基于合成盘抛光的板条Nd:YAG晶体加工工艺

针对传统抛光方法无法同时满足高面形精度、低表面缺陷以及批量加工的问题,我们提出了一种基于合成盘抛光的板条Nd:YAG晶体加工工艺。该工艺采用新型的合成抛光盘来代替传统的沥青、聚氨酯、锡等抛光盘材料。新型合成抛光盘的硬度大大高于前述传统抛光材料,使得工件压向抛光盘时接触表面几乎不发生弹性形变,不会引起工件边缘压力的奇异性,从而可避免工件的塌边现象。在实验中我们比较了利用不同抛光模材料进行Nd:YAG晶体抛光时工件的面形塌边量大小,如图2所示,可以看出,合成盘抛光基本实现了无塌边抛光,使工件获得高精度面形成为可能。

实验所用合成抛光盘由树脂微粉、锡微粉、粘结剂等成分制成,并包含大量气孔,如图3所示。由于其中的金属锡微粉硬度低于所使用的抛光磨料硬度,抛光磨料可部分嵌入抛光盘表面,整个抛光环境将构成一种半固结磨料抛光的状态,在保证元件表面质量的同时可大大提高抛光效率。

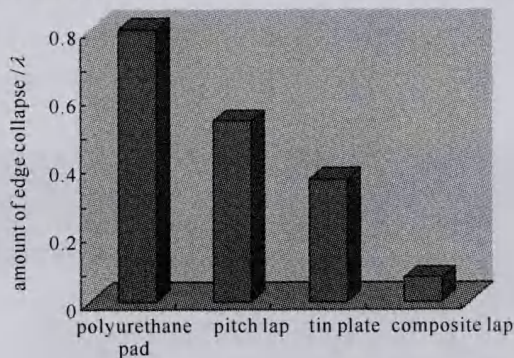


Fig. 2 Effect of polishing plate material on amount of edge collapse

图2 不同抛光模材料对工件面形塌边量的影响

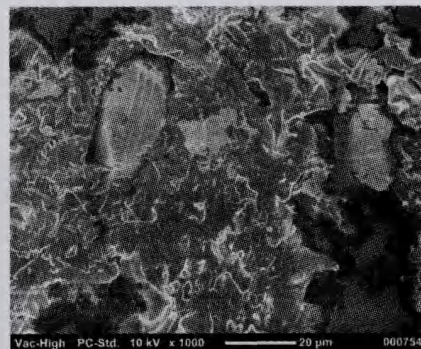


Fig. 3 SEM picture of composite polishing plate

图3 合成抛光盘表面的SEM图像

为实现板条Nd:YAG晶体的低缺陷加工,需严格控制抛光过程产生表面划痕。我们在新工艺中对抛光阶

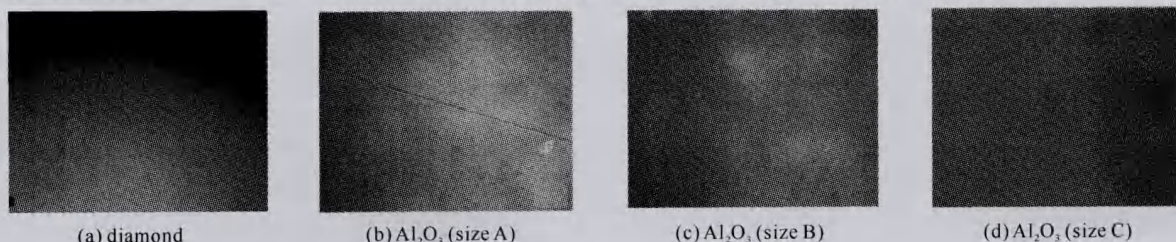


Fig. 4 Micrograph of Nd:YAG surface in composite lap polished by different abrasives

图4 使用不同磨料配合合成盘抛光Nd:YAG晶体表面的显微图

段的磨料种类和粒度的匹配进行了研究。图 4 给出了使用不同磨料配合合成盘抛光 Nd:YAG 晶体表面的显微图。实验结果表明,通过磨料的优化选择,在合成盘抛光工艺中匹配合适粒度的 Al_2O_3 磨料能够实现元件的低缺陷加工。

元件的正确装夹方式是保证最终加工精度的前提。在新的板条 Nd:YAG 晶体加工工艺中,针对端面加工,设计并使用了一种独特的抛光夹具保证了楔角精度,如图 5 所示;针对全反面射面加工,我们采用了真空弹性吸附方式对工件进行上盘。新的工件上盘技术结合合成盘抛光,无需在工件四周粘贴配盘玻璃,避免了配盘玻璃滑动后撞击工件造成的崩边或崩角;同时该方法避免了传统光胶上盘或蜡粘结上盘引起的下盘后工件变形的问题。

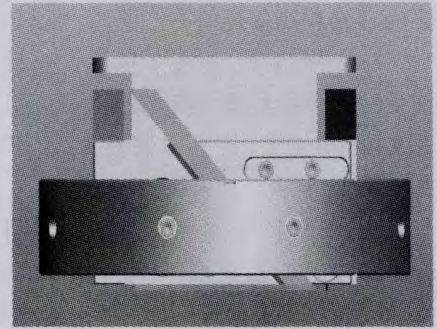


Fig. 5 Holding fixture for polishing end face of Nd:YAG slab

图 5 Nd:YAG 晶体端面抛光夹具

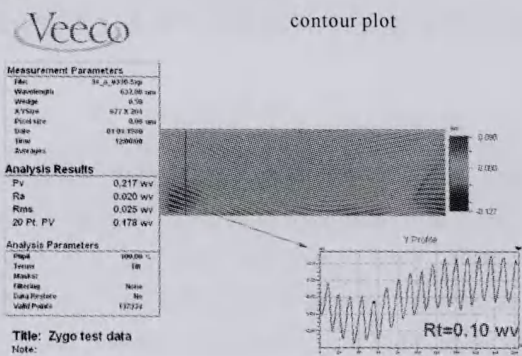


Fig. 6 Surface figure of slab TIRs surface

图 6 全反射面面形精度

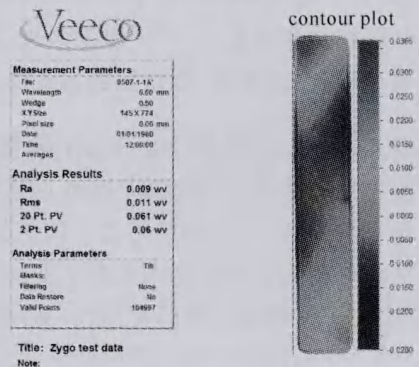


Fig. 7 Surface figure of slab end surface

图 7 端面面形精度

采用新的合成盘抛光工艺对 $100\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 板条 Nd:YAG 晶体进行加工实验,所用抛光设备为国产 36" 平面研磨机,面形精度检测采用 QED SSI 干涉仪,表面粗糙度检测采用 Zygo NV7200 三维轮廓仪,端面楔角精度检测采用 Anglax CA1000 绝对测角仪。元件最终下盘后的加工结果如图 6~9 所示:全反射面面形 PV(峰谷值) $= 0.217\lambda$ ($1\lambda = 632.8\text{ nm}$),局部面形误差 PV 值为 0.1λ ,端面 PV 值为 0.06λ ,表面粗糙度为 0.55 nm (RMS),端面楔角精度为 $2''$ 。

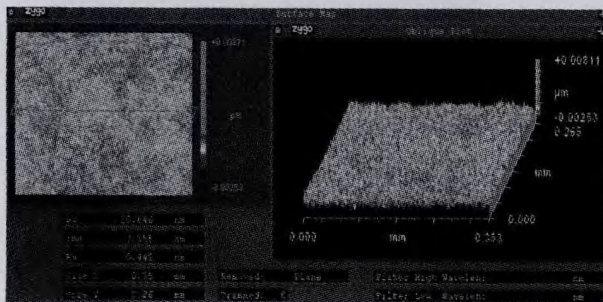


Fig. 8 Surface roughness of Nd:YAG after composite lap polishing

图 8 合成盘抛光后的 Nd:YAG 表面粗糙度

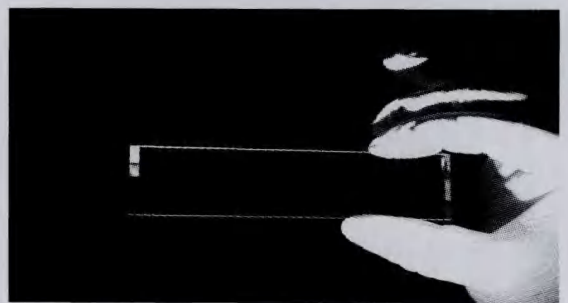


Fig. 9 Photograph of finished, Nd:YAG crystal slab

图 9 板条 Nd:YAG 晶体实物

3 结 论

对具有特殊构型的板条 Nd:YAG 晶体元件的加工性能及工艺难点进行了分析,提出了一种基于合成盘抛光的板条 Nd:YAG 晶体加工工艺。通过采用新型的合成抛光盘来代替传统的沥青、聚氨酯、锡等抛光盘材料,基本实现了无塌边抛光,从而使工件获得高精度面形成为可能。通过磨料的优化选择,在合成盘抛光工艺中匹配合适粒度的 Al_2O_3 磨料能够实现元件的低缺陷加工。 $100\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的板条 Nd:YAG 晶体加工结果表明,元件下盘后全反射面面形 PV 值为 0.217λ ,端面面形 PV 值为 0.06λ ,表面粗糙度达 0.55 nm

(RMS),端面楔角精度可达 $2''$ 。本项技术为实现高精度板条 Nd:YAG 晶体元件批量化加工提供一条有效的技术途径。

参考文献:

- [1] Eicher J. Slab-laser-technologie-ein uberblick[J]. *Laser Magazin*, 1989, **4**:12-14.
- [2] McNaught S J, Asman C P, Injeyan H, et al. 100-kW coherently combined Nd: YAG MOPA laser array[C]//Frontiers in Optics. 2009.
- [3] Goodno G D, Komine H, McNaught S J, et al. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(9): 1247-1249.
- [4] 陈月健,王建东,童立新,等. 高功率二极管端泵板条模块波前畸变实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2013, **25**(4):822-826. (Chen Yuejian, Wang Jiandong, Tonglixin, et al. Experiment research on wavefront distortion of high power diode end-pumped slab module. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(4):822-826)
- [5] 向汝建,何忠武,徐宏来,等. 固体板条 MOPA 激光光束质量主动控制[J]. 强激光与粒子束, 2013, **25**(2):358-362. (Xian Rujian, He Zhongwu, Xu Honglai, et al. Closed-loop beam quality control for MOPA solid slab laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(2):358-362)
- [6] 雷翔,董理治,杨平,等. 板条增益介质波前畸变诊断方法[J]. 强激光与粒子束, 2012, **24**(7):1651-1655. (Lei Xiang, Dong Lizhi, Yang Ping, et al. Diagnostic method of wavefront aberration for gain mediums in slab lasers. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(7):1651-1655)
- [7] Injeyan H, Goodno G D. Zigzag slab lasers[M]//High-power laser handbook. New York: McGraw-Hill Companies, 2011:187-205.
- [8] 史兴宽,徐传义,任敬心,等. YAG 单晶基片的精密抛光及 SPM 检测[J]. 航空精密制造技术, 2000, **36**(2):5-7. (Shi Xingkuan, Xu Chuanyi, Ren Jingxin, et al. Measuring the precision machining surface of YAG crystalline substrates with SPM. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2000, **36**(2):5-7)
- [9] 蔡邦维,吕百达. 多根板条激光晶体成盘加工工艺: 中国,90105801.7[P]. 1991. (Cai Bangwei, Lü Baida. Chinese Patent 90105801.7, 1991)
- [10] 李军,朱永伟,左敦稳,等. Nd:Y₃Al₅O₁₂ 透明陶瓷的超精密加工[J]. 硅酸盐学报, 2008, **36**(8):1178-1182. (Li Jun, Zhu Yongwei, Zuo Dunwen, et al. Ultra-precision machining of transparent Nd:Y₃Al₅O₁₂ CERAMICS. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2008, **36**(8):1178-1182)
- [11] Khoo C Y. Ultrasonic machining, lapping and polishing of neodymium doped yttrium aluminum garnet laser crystal rod[D]. Malaysia: Faculty of Mechanical Engineering Universiti Teknologi Malaysia, 2009.
- [12] Feldman R, Shimony Y, Jackel S, et al. Thermo-chemical strengthening of Nd:YAG laser rods[C]//Proc of SPIE. 2006;**6190**19.
- [13] Shoup M J, Kelly J H, Smith D L. Design and testing of a large-aperture, high-gain, Brewster's angle zigzag Nd:glass slab amplifier[J]. *J Appl Opt*, 1997, **36**:5827-5838.

Fabrication of Nd:YAG crystal slab using composite lap

Xie Ruiqing¹, Liao Defeng¹, Wang Xiaobo², Yuan Zhigang¹, Zhong Bo¹,
Chen Xianhua¹, Wang Jian¹, Lei Xiangyang¹, Hou Jing¹

(1. Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Railtransport, Southwest Jiaotong University Changzhou, Changzhou 213100, China)

Abstract: The present work investigates the fabrication process of precision Nd:YAG crystal slab which is extensively used in high-power slab lasers. Properties of the crystal and problems during fabrication were analyzed. A novel process based on the composite lap was proposed. Fabrication of a 100 mm×30 mm×3 mm sample revealed the validation of this process. Experiment results indicated that the composite lap was superior to conventional lap material for controlling edge collapsing in polishing process. Defect-free surface could be obtained using optimal size and size distribution of Al₂O₃ slurry. The surface figure of slab TIRs surface was 0.217λ, while that of the end surface was 0.1λ. The surface roughness approached 0.55 nm RMS. The precision of the intersection angle was 2''.

Key words: slab laser; Nd:YAG crystal; polishing; composite lap; surface figure; surface roughness

PACS: 81.65.Ps; 42.70.Hj; 42.70.-a; 81.08.-t