

激光钕玻璃包边残余应力实验研究

胡俊江^{1,2} 孟涛¹ 温磊^{1,2} 陈尤阔¹ 陈辉宇¹ 程继萌¹ 唐景平¹ 王标¹ 陈树彬¹
陈伟¹ 胡丽丽¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为减少放大自发辐射和抑制寄生震荡,需在激光钕玻璃片侧面粘接一层吸收介质包边玻璃,其中,包边残余应力是粘接的一个重要参数。详细描述了激光钕玻璃与包边玻璃在包边粘接过程中粘接界面附近残余应力的来源,实验讨论分析了精密退火、加工、包边粘接等对界面附近残余应力的影响。结果表明,退火过程中的边缘应力对粘接界面附近残余应力影响比较大,且包边面加工面型匹配越差,则界面附近残余应力越大,而低收缩率和低模量的粘接胶对界面附近的残余应力影响较小。

关键词 激光技术; 激光钕玻璃; 包边; 残余应力; 应力双折射

中图分类号 TQ171.73; O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0206001

Experiment Investigation on Residual Stress of Nd:Glass Edge Cladding

Hu Junjiang^{1,2} Men Tao¹ Wen Lei^{1,2} Chen Youkuo¹ Chen Huiyu¹ Chen JiMeng¹
Tang Jingping¹ Wang Biao¹ Chen Shubin¹ Chen Wei¹ Hu Lili¹

¹Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to decrease the reflectivity of amplified spontaneous emission, suppress parasitic oscillations, an edge cladding that absorbs the reflected or scattered light is required. The residual stress of the edge cladding is an important parameter for bonding. The influence factors on the residual stress birefringence near the bonding interface are described in detail. The effects of fine annealing, polishing and bonding are investigated. The results indicate that the effects of the edge stress of samples on the residual stress near the bonded interface are in evidence; the poorer of polishing surface flatness makes, the larger birefringence near the cladding interface; and the low shrink percentage and modulus adhesive polymer have less impact for the residual stress near the interface.

Key words laser technique; Nd:glass; edge cladding; residual stress; stress birefringence

OCIS codes 140.3530; 260.1440; 120.3940; 220.5450

1 引言

用于惯性约束核聚变(ICF)研究的高功率固体激光系统,对能源发展具有重要意义。目前在建或已经建成的用于ICF研究的激光系统中,大量采用片状掺钕磷酸盐激光玻璃作为增益介质^[1-4]。同其他固体激光器

收稿日期: 2014-08-04; 收到修改稿日期: 2014-09-03

基金项目: 国家惯性约束聚变领域资助项目

作者简介: 胡俊江(1979—),男,博士研究生,高级工程师,主要从事光学材料性能测试和包边工程化等方面的研究。

E-mail: hjj@siom.ac.cn

导师简介: 陈伟(1969—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光学材料光谱性能和光学性能测试等方面的研究。

E-mail: weichen@siom.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

一样,系统储能效率和激光输出能力不可避免受放大自发辐射(ASE)和寄生振荡(PO)的影响^[5-6]。包括掺铈激光玻璃、Yb:YAG晶体、钛宝石晶体等增益介质内的ASE和PO产生的机理已被广泛讨论分析^[7-12]。为抑制激光放大介质内的ASE和PO,科学家们研究并发展了高低温烧结包边、液体包边、斜边设计、涂覆包边、聚合物粘接等包边技术^[13-23]。

目前,对于片状掺铈磷酸盐激光玻璃,主要采用聚合物粘接包边技术^[22-23],即在片状掺铈激光玻璃四周用聚合物粘接一层吸收ASE和PO的包边玻璃。相对于烧结涂覆等包边技术,其具有易于实现,成本低等优点。在设计时,需要综合考虑折射率匹配、吸收材料选择、包边粘接强度、包边粘接残余应力、包边温升和使用寿命等因素。其中包边粘接残余应力(特别是通光口径范围内)要足够小[如美国国家点火装置(NIF)使用的铈玻璃包边完成后通光口径范围内应力双折射要求小于5 nm/cm],一方面是应力过大会造成粘接过程中材料炸裂,另外一方面是过大残余应力会在铈玻璃材料内部产生较大的应力双折射,影响光学精密加工透射波前质量。因此,分析掺铈激光玻璃包边过程中残余应力(应力双折射)的产生原因及其影响因素,从而为降低铈玻璃的包边残余应力提供指导,是一项具有实际意义的研究。

2 残余应力来源

包边粘接过程中残余应力的产生受各方面因素的影响,例如与聚合物本身的特性,被粘接包边玻璃和激光玻璃机械性能、应力状况,粘接胶层厚度,包边面的光学加工质量和包边工艺(如:晾置时间、固化温度、固化时间、固化压力等)等因素有关^[24-27]。

由于包边粘接用的聚合物具有粘弹性特点,而粘弹性材料在力学行为方面表现为应力松弛、蠕变和滞后^[28]。在恒温条件下,其固化过程中应力主要来自胶的收缩、粘弹性特性^[24-25]。在凝胶前,由于胶的体积收缩会对应力产生影响。在胶固化初流动性很强,此时可将其近似看成黏性流体,其弹性模量为零,此时松弛模量 Y 为零,没有应力松弛。当胶开始固化后,其应力松弛现象渐渐表现出来。可粗略得出胶在恒定温度下固化应力随时间而变化,当固化完成后,存在一定的残余应力,将影响被粘接物体。根据胡克定律,收缩应力大小同收缩率以及胶接剂弹性模量成正比,为了减小收缩应力,应尽量选择低收缩率和小弹性模量的胶接剂^[25]。对于包边胶可视其为线性粘弹性体,可以利用广义麦克斯韦模型描述其应力松弛行为。

包边胶在固化过程中需要加温,需要考虑温度对应力松弛过程的影响,包边胶为聚合物,可视为热流变简单材料,满足时温等效原理,因此,在不同温度下的松弛模量曲线可以沿着时间轴平移,其移动因子满足Williams-Landel-Ferry方程^[28]。

将两种热膨胀系数不同的材料胶接起来,由于温度的变化使得材料产生热膨胀,当膨胀受到约束时,在材料内部会产生应力即热应力,热应力大小与温度的变化量、胶接剂和被胶接结构的材料的弹性模量以及热膨胀系数相关。热应力的大小与被胶接结构的热膨胀系数之差呈正比^[29-30],因此,为减少材料在加热固化过程中由于膨胀系数差异引入的残余应力,被粘接材料热膨胀系数需要尽可能接近。

包边工艺过程较多,各种因素都会在包边界面附近产生一定的残余应力,导致包边附件材料的折射率特性会发生改变,即产生应力双折射^[31]。

3 实 验

3.1 粘接样品准备

激光铈玻璃包边工艺过程主要是将精密退火后的铈玻璃和包边玻璃切割,包面面磨削抛光,然后将铈玻璃片和包边玻璃条通过包边胶(环氧树脂胶)对贴粘接,并在包边条上施加适当的压力使得包边条固定并使得胶填满粘接面,在室温条件下,让包边胶收缩固化,然后再升温固化。包边结构如图1所示。

铈玻璃样品:型号为SIOM N3135,线性热膨胀系数(30 ℃~100 ℃, 11.18×10^{-6}),杨氏模量52.7 GPa,泊松比0.27,密度2.87 g/cm³。包边玻璃样品:型号为SIOM C3103,线性热膨胀系数(30 ℃~100 ℃, 11.27×10^{-6}),杨氏模量52.7 GPa,泊松比0.27,密度2.86 g/cm³^[11,3-4]。包边玻璃和铈玻璃线性热膨胀在固化温度范围内基本一样(固化温度小于100 ℃)。包边胶为合成环氧树脂胶^[22-23],体积收缩率小于10%。

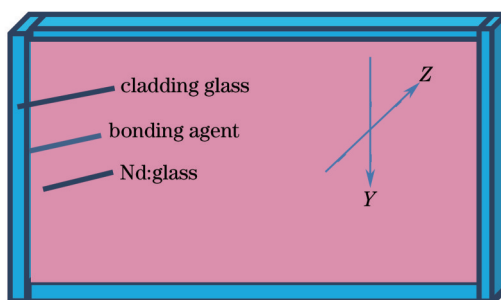


图1 钕玻璃包边示意图

Fig.1 Schematic of Nd:glass edge cladding

退火和加工对粘接残余应力影响实验,样品编号为 S_1 。钕玻璃样品尺寸约为 $490\text{ mm}\times 270\text{ mm}\times 46\text{ mm}$,样品经过精密退火后,两大面经过研磨、抛光,并检测大面方向应力双折射。然后将其侧面切割、研磨、抛光,检测其应力双折射,通过比较前后的应力变化,可以分析退火和加工对残余应力的影响。

粘接胶对粘接残余应力的影响实验,样品编号为 S_2, S_3 。钕玻璃样品粘接约为 $170\text{ mm}\times 46\text{ mm}\times 25\text{ mm}$,包边玻璃条为 $170\text{ mm}\times 46\text{ mm}\times 15\text{ mm}$,将钕玻璃与包边玻璃条粘接面切割、研磨、抛光,在粘接面涂敷上包边胶(胶层厚度控制在 $0.05\sim 0.2\text{ mm}$,可以忽略胶层厚度对残余应力的影响),将钕玻璃片和包边条粘接在一起,室温静置一段时间后(大于 10 h),升温固化。检测粘接前后应力双折射的变化,分析包边胶的体积收缩、粘弹性特性和时温效应对残余应力的影响。

加工面型对残余应力的影响实验,样品编号为 S_4 。钕玻璃样品约为 $490\text{ mm}\times 270\text{ mm}\times 46\text{ mm}$,包边玻璃条约为 $490\text{ mm}\times 46\text{ mm}\times 15\text{ mm}$,包边面光学抛光,在粘接前,检测包边面平整度和平行于粘接面 Z 方向的应力双折射,粘接完成后再次测量 Z 方向的应力双折射,分析加工表面质量(平整度)对残余应力的影响。

3.2 应力双折射检测

应力双折射测量采用偏光应力双折射即德塞拿蒙(Senarmon)法^[31-32],测试设备为 ilis Strain Matic/M4 150.10,光源为发光二极管(LED)光源,中心波长 592 nm ,测试孔径 $105\text{ mm}\times 105\text{ mm}$,通过拼接可以测量大口径样品的应力双折射。

4 结果与讨论

4.1 退火与加工的影响

在精密退火过程中,钕玻璃和包边玻璃边缘和中间,表面和内部存在温差,样品会在边缘和内部形成应力^[31-33],在后续加工中只能部分切除边缘和表面,可能会在包边界面附近残存较大应力。在加工过程中侧面和包边条承受机械挤压和切削温度,也可能引入残余应力。

实验结果如图2所示,从图中可以看出,样品退火后在边缘存在较大残余应力,最大区域基本就集中在样品的4个边缘中间部分,其最大值可超过 5 nm/cm ,可见精密退火的边缘应力,对包边后界面附近的残余应力有较大影响。加工前后应力双折射结果见表1,从表中可以看出钕玻璃加工前后边缘应力双折射的最大值(Max)、平均值(Average)和均方根值(RMS)值并未明显变大,包边玻璃切割成条状,其应力变化也非常小(见4.2),说明在磨削、抛光过程中对钕玻璃侧面和包边条并未引入新的应力。因此,加工过程对包边界面附近

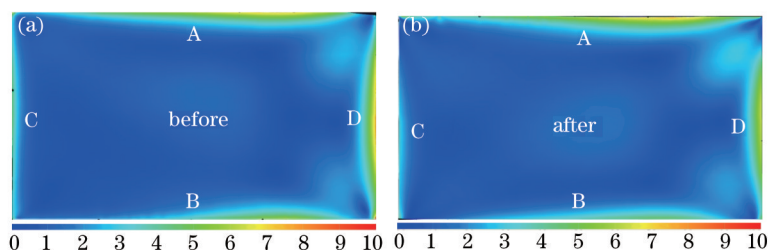


图2 加工前后应力双折射分布。(a) 加工前;(b) 加工后

Fig.2 Birefringence distributions of sample before and after polishing. (a) Before polishing; (b) after polishing

的残余应力基本无影响。

表 1 加工和退火对应力双折射的影响

Table 1 Effects of the polishing process and fine annealing on the birefringence

Sample	Edge	Max /(nm/cm)		Average/(nm/cm)		RMS /(nm/cm)	
		Before	After	Before	After	Before	After
S1	A	7.7	7.3	2.4	2.4	2.8	2.8
	B	6.1	5.3	1.8	1.9	2.1	2.1
	C	4.3	3.4	1.4	1.3	1.7	1.5
	D	7.3	7.0	2.9	3.0	3.2	3.3

4.2 包边胶的影响

包边胶具有粘弹性特点,其体积收缩和粘弹性特性可能会在包边界面附近产生残余应力。实验结果如表 2 所示,从表中可以看出,在垂直于粘接面的 Y 方向,粘接前后应力双折射变化不大,说明在 Y 方向形变比较小,而在平行于粘接面的 Z 方向(通光方向)应力双折射增加了 1 倍左右,说明粘接在 Z 方向影响较大,但最大值均小于 5 nm/cm。其应力分布如图 3 所示,从图中可以看出,粘接后应力增加主要来源于包边玻璃区域,铍玻璃区域基本不变化。这主要是由于铍玻璃在 Y 方向尺寸较包边玻璃大得多(厚将近 2 倍),且压力施加在包边玻璃条上,使得粘接过程中的形变主要集中于包边条上,从而使得应力集中在包边条上,而铍玻璃区域(通光区域)变化不大。因此,包边胶对包边残余应力也存在较大影响,但在铍玻璃区域的影响并不显著。

表 2 粘接前后应力双折射

Table 2 Birefringence before and after bonding

Sample		Max /(nm/cm)		Average /(nm/cm)		RMS/(nm/cm)	
		Before	After	Before	After	Before	After
S2	Y	2.28	2.46	0.76	0.72	0.86	0.83
	Z	1.50	3.91	0.54	0.86	0.64	1.25
S3	Y	1.97	2.38	0.72	0.71	0.81	0.82
	Z	1.53	3.52	0.44	0.74	0.54	1.00

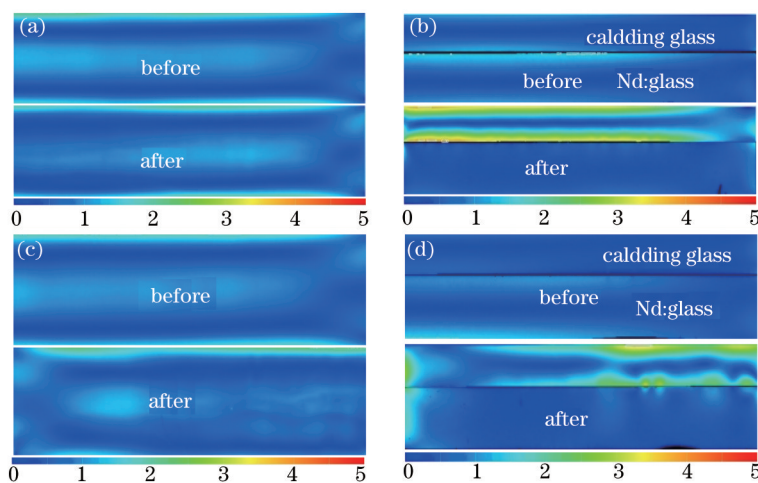


图 3 粘接前后应力双折射分布。(a),(c)样品 S₂,S₃在 Y 方向应力双折射;(b),(d)样品 S₂,S₃在 Z 方向应力双折射

Fig.3 Birefringence distributions of samples before and after bonding. (a), (c) Birefringence pictures of Y direction of the sample S₂ and S₃; (b),(d) birefringence pictures of Z direction of the sample S₂ and S₃

4.3 加工面型的影响

样品 S4 加工完成后,用干涉仪检测其铍玻璃包边侧面和对应的包边条平整度,取样品中间区域面型。如图 4、5 所示,从图中可以看出 A, B, C, D 边面型的匹配峰谷(PV)分别约在 10λ, 6λ, 5λ, 和 7λ 附近(λ = 632.8 nm), B, C 边分别较 A, D 边匹配得更好。

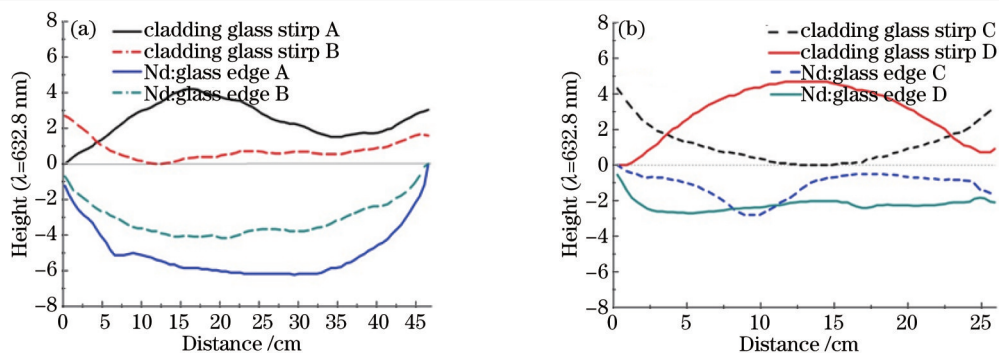


图4 包边面面型。(a)长边(约490 mm);(b)短边(约270 mm)

Fig.4 Flatness of the cladding surface. (a) Long edge (about 490 mm); (b) short edge (about 270 mm)

粘接完成后,检测样品应力双折射,包边界面Z方向的应力双折射见表3所示。从表3可以看出,粘接完成后,包边界面附近的钕玻璃应力双折射变化并不大,包边面型匹配对钕玻璃影响较小。包边玻璃应力变化较大(包边前包边玻璃应力双折射较小),可见面型匹配对包边玻璃条上的应力双折射影响较大,面型匹配越差,包边玻璃应力双折射将越大。其关系如图5所示,从图中可以看出面型PV值增大时,其对应的边的包边玻璃区域的应力最大值、平均值和RMS值也增加,两者呈现一定的线性关系。应力双折射测试结果分布如图6(a)~(d)所示,上部是包边前样品的应力双折射分布,下部为包边完成后样品的应力双折射分布。从图6可以清楚看出,对于面型匹配较差的边,包边玻璃出现了应力双折射较大区域,而钕玻璃区域应力双折射变化很小,这主要是面型较差时,固化后,包边玻璃变形较大,造成应力主要集中在包边玻璃区域。因此,面型匹配越差,在固化过程中包边玻璃条的形变也越大,残余应力也越大。

表3 不同面型粘接后应力双折射

Table 3 Birefringence for different flatness surfaces

Sample	Edge	PV /λ		Max /(nm/cm)		Average /(nm/cm)		RMS /(nm/cm)	
		PV	Average	Before	After	Before	After	Before	After
S4	A	10.0	7.42	5.42	5.62/7.05*	1.82	1.85/2.28	2.17	2.11/2.58
	B	4.68	3.86	4.42	4.90/5.46	1.60	1.62/2.28	1.65	1.85/2.53
	C	4.88	2.28	4.62	4.84/6.35	1.50	1.58/2.05	1.60	1.84/2.34
	D	6.87	5.00	6.52	7.07/7.17	1.40	2.35/2.61	1.67	2.73/3.10

Note: * data before “1” excludes the cladding glass; data after “1” includes the cladding glass

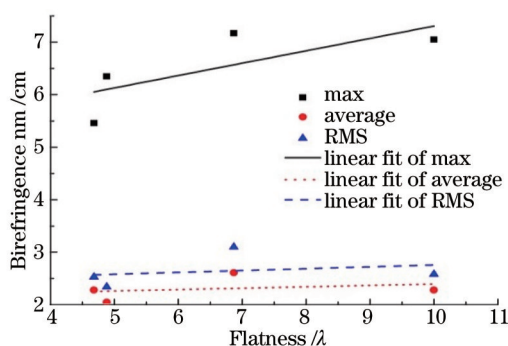


图5 应力双折射与包面面型匹配关系

Fig.5 Relationship diagram between birefringence and surface flatness

5 结论

在高功率激光钕玻璃包边过程中,钕玻璃材料精密退火过程中的边缘应力,包边粘接胶的收缩率、模量和粘弹性特性,包边面的切割加工过程,包边面型的加工平整度和平整度的匹配,钕玻璃和包边玻璃的热膨胀系数等都会影响包边粘接界面附近的残余应力。为降低包边界面附近残余应力和应力双折射,提高包边

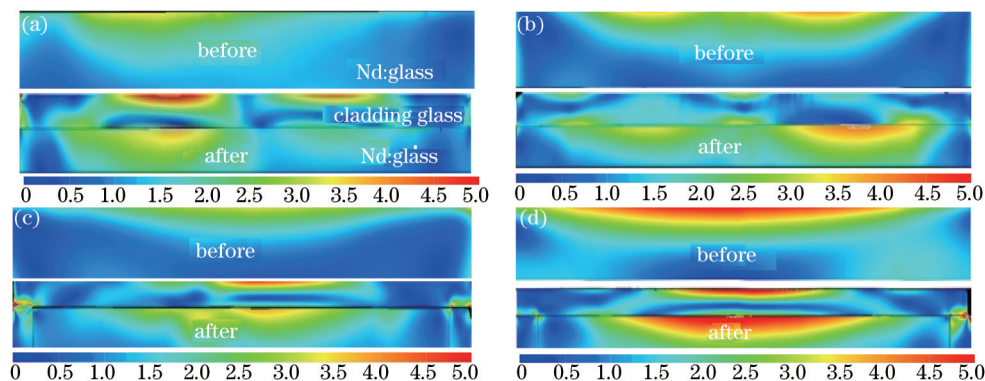


图6 不同面型包边后界面附近应力分布。(a),(b)分别为长边A,B边;(c),(d)分别为短边C,D边

Fig.6 Birefringence distribution near the bonding interface for the different surface flatness. (a),(b) Long edge A and B respectively; (c),(d) short edge C and D respectively

粘接的质量,需要减小钕玻璃退火的边缘应力,采用低收缩率、低模量粘接剂,增加固化晾置时间,提高包边面光学平整度等工艺手段,控制钕玻璃和包边玻璃膨胀系数,可以有效降低包边界面附近的残余应力,提高包边质量。

致谢 特别感谢中国科学院上海光学精密机械研究所检测中心刘世杰博士,白云波工程师,王微微硕士在检测上给予的大量帮助和讨论。

参 考 文 献

- 1 Jiang Zhonghong. ICF laser glass[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(9): 1265-1276.
姜中宏. 用于激光核聚变的钕玻璃[J]. 中国激光, 2006, 33(9): 1265-1276.
- 2 Lin Zunqi. Progress of laser fusion[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2202-2207.
林尊琪. 激光核聚变的发展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2202-2207.
- 3 Hu Lili, Chen Shubin, Meng Tao, *et al.*. Advances in high performance large neodymium laser glasses[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(10): 2560-2565.
胡丽丽, 陈树彬, 孟涛, 等. 大口径高性能激光钕玻璃研究进展[J]. 强激光与离子束, 2011, 23(10): 2560-2565.
- 4 L L Hu, S B Chen, J P Tang, *et al.*. Large aperture N31 neodymium phosphate laser glass for use in a high power laser facility[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2014, 2(1): 1-6.
- 5 C Goren, Y Tzuk, G Marcuset, *et al.*. Amplified spontaneous emission in slab amplifiers[J]. IEEE J Quan Electron, 2006, 42(12): 1239-1247.
- 6 P Peterson, A Gavrielides, T C Newell, *et al.*. ASE in thin disk lasers: Theory and experiment[J]. Opt Express, 2011, 19(25): 25672-25684.
- 7 J M McMahon, J L Emmett, J F Holzrichter, *et al.*. A glass-disk-laser amplifier[J]. IEEE J Quan Electron, 1973, 9(10): 992-999.
- 8 D C Brown, S D Jacobs, N Nee. Parasitic oscillations, absorption, stored energy density and heat density in active mirror and disk amplifiers[J]. Appl Opt, 1978, 17(2): 211-224.
- 9 K Contag, M Karszewski, C Stewen, *et al.*. Theoretical modeling and experimental investigations of the diode-pumped thin disk Yb:YAG laser[J]. IEEE J Quan Electron, 1999, 29(8): 697-703.
- 10 D Albach, J C Chanteloup, G L Touz. Influence of ASE on the gain distribution in large size, high gain Yb³⁺:YAG slabs[J]. Opt Express, 2009, 17(5): 3792-3801.
- 11 J Speiser. Scaling of thin disk lasers influence of amplified spontaneous emission[J]. J Opt Soc Am, 2009, 26(1): 26-35.
- 12 M Sawicka, M Divoky, A Lucianetti, *et al.*. Effect of amplified spontaneous emission and parasitic oscillations on the performance of cryogenically-cooled slab amplifiers[J]. Laser and Particle Beams, 2013, 31: 553-560.
- 13 J A Glaze, S Guch, J B Trenholme. Parasitic suppression in large aperture Nd:glass disk laser amplifiers[J]. Appl Opt, 1974, 13(12): 2808-2811.
- 14 J R Guch. Parasitic suppression in large aperture disk lasers employing liquid edge claddings[J]. Appl Opt, 1976, 15(6): 1453-1457.

- 15 F G Patterson, J Bonlie, D Price, *et al.*. Suppression of parasitic lasing in large-aperture Ti:sapphire laser amplifiers[J]. *Opt Lett*, 1999, 24(14): 963-965.
- 16 A K Sridharan, S Saraf, S Sinha, *et al.*. Zigzag slabs for solid-state laser amplifiers: Batch fabrication and parasitic oscillation suppression[J]. *Appl Opt*, 2006, 4(14): 3340-3351.
- 17 X Y Liang, Y X Leng, C Wang, *et al.*. Parasitic lasing suppression in high gain femtosecond peta watt Ti:sapphire amplifier[J]. *Opt Express*, 2007, 15(23): 15335-15341.
- 18 K Ertel, C Hooker, S J Hawkes, *et al.*. ASE suppression in a high energy Titanium sapphire amplifier[J]. *Opt Express*, 2008, 16(11): 8039-8049.
- 19 Y L Zhang, X F Wei, M Z Li, *et al.*. Parasitic oscillation suppression in high-gain solid-state amplifiers[J]. *Laser Phys*, 2013, 23(5): 055802.
- 20 E C Honea, R J Beach. Parasitic Oscillation Suppression in Solid State Lasers Using Optical Coatings: US, 20020118718A1[P]. 2002-08-29.
- 21 Murray. Silicon Edge Claddings[R]. *Laser Program Annual Report*, UCRL-50021-83, 1984.
- 22 H Powell, M Riley, C R Wolfe. Composite Polymer Glass Edge for Laser Disks: US, 4849036[P]. 1989-07-18.
- 23 T Meng, J Tang, J Hu, *et al.*. Edge Cladding Technology to Suppress the Amplified Stimulated Emission (ASE) of the Laser Disks: China, ZL201010273819.7[P]. 2013-10-27.
- 24 Liu Jiu. Mechanical Behavior on Bonding Structure of Optical Mechanical System[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
刘 玖. 光机系统胶接结构的力学行为分析[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械研究所, 2011.
- 25 Liao Jiasheng, Gong Yan, Yuan Wenquan, *et al.*. Analysis of curing stress magnitude about low stress optical structure adhesives under stable temperature[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(5): 138-143.
廖家胜, 巩 岩, 袁文全, 等. 低应力光学结构胶恒温下固化应力大小分析[J]. *光电工程*, 2013, 40(5): 138-143.
- 26 Liu Qiang, He Xin. Investigation on solidification techniques of pastern in space mirror[J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2011, (2): 118-120.
刘 强, 何 欣. 反射镜用光学环氧胶粘接固化工艺研究[J]. *机械设计与制造*, 2011, (2): 118-120.
- 27 Yuan Jinying, Pan Caiyuan. The essence and removing methods of internal stress due to volume shrinkage during Kesin curing period[J]. *Chemistry and Adhesion*, 1998, (4): 234-240.
袁金颖, 潘才元. 树脂固化时体积收缩内应力的本质及消除途径[J]. *化学与粘合*, 1998, (4): 234-240.
- 28 Zhou Guangquan, Liu Xiaoming. Viscoelastic Theory[M]. Hefei: University of Chinese Science and Technology Press, 1996.
周光泉, 刘孝敏. 粘弹性理论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996.
- 29 Li Jianfeng, Yang Fei, Ming Ming, *et al.*. Research on the thermal stress of bond connection used in telescope primary mirror support system[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 35(1): 13-17.
李剑锋, 杨 飞, 明 名, 等. 望远镜主镜支撑中粘接连接的热应力研究[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 35(1): 13-17.
- 30 Gong Dajun, Wei Borong, Liu Yuyang, *et al.*. Influence of materials linear expansion coefficient on tensile shear performance[J]. *China Adhesives*, 2008, 17(10): 37-40.
宫大军, 魏伯荣, 刘郁杨, 等. 材料线膨胀系数对拉伸剪切性能的影响[J]. *中国胶粘剂*, 2008, 17(10): 37-40.
- 31 H W Mckenzie, R J Hand. Basic Optical Stress Measurement in Glass[M]. Sheffield UK: Society of Glass Technology Press, 2011.
- 32 H Katte. Imaging measurement of stress birefringence in optical materials and components[J]. *Photonik International (s1432-9778)*, 2009, 1: 39-41.
- 33 E D Krzyzewski. Principles of Optical Glass Linear Annealing[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1965.
E D 达纽舍夫斯基. 光学玻璃线性退火原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1965.

栏目编辑: 张浩佳