

超薄熔石英玻璃的 CO₂ 激光热熔焊接工艺

王文华^{1,2} 于清旭¹ 姜心声³

¹大连理工大学物理与光电工程学院, 辽宁 大连 116024
²广东海洋大学理学院, 广东 湛江 524088
³福建福晶科技股份有限公司, 福建 福州 350003

摘要 利用小功率 40 kHz 的 CO₂ 脉冲激光对 25 μm 厚的超薄熔石英玻璃与熔石英毛细管端面进行热熔焊接, 研究和分析了占空比(脉冲激光功率)、离焦激光预热、离焦激光退火对熔石英玻璃热熔焊接的影响。结果表明, 实现超薄熔石英玻璃与毛细管端面无气化穿孔、密封、牢固焊接的占空比为 37%; 占空比为 20% 的 +2 mm 离焦脉冲激光预热对超薄熔石英玻璃无裂纹/裂缝的焊接起到了关键作用; 适当占空比的 -2 mm 离焦脉冲激光退火能够释放超薄熔石英玻璃在热熔焊接过程中产生的残余热应力, 提高熔石英器件的性能, 经激光焊接的光纤法布里-珀罗传感器的压力和温度曲线的线性度分别为 0.9995 和 0.9991, 而且重复性好。

关键词 激光技术; CO₂ 激光; 热熔焊接; 熔石英玻璃

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1003004

CO₂ Laser Heating Fusion Welding Technique of Ultra-Thin Fused Silica Glass

Wang Wenhua^{1,2} Yu Qingxu¹ Jiang Xinsheng³

¹ School of Physics and Optoelectronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China
² School of Science, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong 524088, China
³ Fujian Casteck Crystals. Inc., Fuzhou, Fujian 350003, China

Abstract The study on the heating fusion welding between the ultra-thin fused silica glass with 25 μm-thickness and the end face of the fused silica capillary tube is carried by using low power CO₂ pulse laser with a pulse frequency of 40 kHz. The duty ratio, the defocus laser preheating and the defocus laser annealing impacting on the heating fusion welding of the fused silica glass are researched and analyzed. The results show that a duty ratio of 37% can perform perfectly the no penetration, sealing and firm welding between the ultra-thin fused silica glass and the fused silica capillary tube. For the welding without crack or split of the ultra-thin fused silica glass, the preheating of the +2 mm defocus pulse laser with a duty ratio of 20% plays a key role. The annealing of the -2 mm defocus pulse laser with an appropriate duty ratio can release the residual thermal stress produced in the process of the heating fusion welding in the ultra-thin fused silica glass, enhancing the performance of the fused silica device. The pressure and temperature linearity of the fiber-optic Fabry-Pérot sensor welded perfectly by the CO₂ laser are 0.9995 and 0.9991, respectively, and their repeatabilities are good.

Key words laser technique; CO₂ laser; heating fusion welding; fused silica glass

OCIS codes 140.3390; 350.2660; 350.3850; 350.3390

收稿日期: 2012-05-30; **收到修改稿日期**: 2012-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(60977055)和教育部高校博士学科专项研究基金(20100041110028)资助课题。

作者简介: 王文华(1976—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤传感技术和激光加工技术等方面的研究。

E-mail: mrwangwh@yahoo.com.cn

导师简介: 于清旭(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感技术、激光技术和光声光谱等方面的研究。

E-mail: yuqx@dlut.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

由于熔融石英玻璃具有抗损伤能力强、热膨胀系数小、硬度高、耐热、化学性质稳定、耐腐蚀以及易于光学冷加工等优点,所以在光纤传感器件、光纤通信器件以及其他光学和光电子器件中得到了广泛应用。但是这些器件的传统制造工艺通常都涉及到光学胶粘技术。光学胶的使用导致器件的性能下降,并且使得器件在恶劣条件下的使用受到限制,甚至由于光学胶在恶劣条件下分解,从而导致器件失效,所以改进现有的制造工艺在器件的实际应用中显得尤为重要。随着激光技术的发展,激光加工为研究高性能的光纤传感器件、光纤通信器件以及其他光学和光电子器件等提供了先进制造工艺和技术保障,将激光技术应用于石英玻璃器件的制造过程可以在很大程度上改善器件的性能及其可靠性,所以石英玻璃器件的激光加工技术和激光表面缺陷修复受到人们的青睐^[1~10]。对于膜片式光纤法布里-珀罗(F-P)传感器,膜片厚度决定了传感器件的灵敏度,在其他结构参数不变的情况下,厚度越薄灵敏度越高。近年来,为了提高膜片式光纤 F-P 传感器的灵敏度,采用薄石英片是一种有效而实用的手段^[4,5],但是,厚度越薄,激光加工工艺要求越高、条件越苛刻,加工过程中极易产生热应力分布不均、裂纹或裂缝、石英玻璃气化穿孔。Xu 等^[4,5]实现了厚度大于100 μm 的熔石英玻璃热熔焊接,迄今为止还没有超薄熔石英玻璃热熔焊接的文献报道。因此,对超薄熔石英玻璃的激光加工工艺研究具有较大的工程价值和实际意义。通常情况,CO₂激光器是对熔石英玻璃进行激光精细加工的首选光源^[11~13],其激光加工的可操作性强,污染小,熔石英对它的吸收较高,透射较低^[14],足以保证熔石英材料通过吸收足够的激光能量熔化待加工区域,并且使熔石英达到一定的软化度。国外在利用 CO₂ 激光对石英玻璃的激光加工和表面缺陷修复方面的研究相对深入一些,国内在这方面的研究开展的很少,尤其是石英玻璃之间的 CO₂ 激光热熔焊接方面。

本文采用小功率 40 kHz 的 CO₂ 激光对超薄熔石英玻璃膜片与熔石英玻璃毛细管端面之间进行热熔焊接。对于超薄熔石英膜片的激光热熔焊接,激光加工过程中引起的热应力和应力分布不均容易导致膜片产生裂纹或裂缝,另外,膜片也很容易气化穿孔,导致石英玻璃的热熔区域软化度不够、焊接不密封或不牢固。因此,如果要得到连续的无穿孔、无裂纹/裂缝的密封焊接,必须要优化激光器的参数和完

善超薄熔石英玻璃的焊接工艺。实验中,采用额定功率为 60 W、脉冲频率为 40 kHz、占空比为 37%的 CO₂ 激光实现了超薄熔石英玻璃膜片(25 μm)与熔石英毛细管端面之间的快速密封焊接,实验验证了超薄熔石英玻璃膜片热熔焊接的可行性,并且研究了激光器参数和焊接工艺对热熔焊接的影响,为熔石英玻璃的热熔焊接提供了实验依据和工程经验。

2 实验设备与方法

实验采用美国 Coherent 公司的 GEM-60 波导腔封离型 CO₂ 激光器,连续额定输出功率为 60 W,输出波长为 10.6 μm 。独特的谐振腔结构使得激光具有优异的模式质量和功率稳定性。激光器的脉冲功率和脉冲频率由 Labview 平台的软件系统控制,通过占空比调节脉冲宽度,从而获得不同激光能量的单个脉冲,脉冲频率为 40 kHz。实验采用的毛细管是带锥形口的熔石英玻璃毛细管,长度约为 7 mm,外径为 1.8 mm,内径为 127 μm ,锥形口内径为 0.7~1.0 mm。热熔焊接之前采用美国 ULTRAPOL 1200 型光纤研磨机对毛细管端面进行磨砂抛光,使其端面垂直于毛细管轴线。熔石英玻璃采用美国 Corning 公司的 7980 熔石英,经光学冷加工后,超薄熔石英玻璃膜片的尺寸为 2.5 mm×2.5 mm、厚度为 25 μm 。熔石英材料的杨氏模量为 77.8 GPa、泊松比为 0.17。

实验装置如图 1 所示,热熔焊接在 25 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温环境下完成。CO₂ 激光器工作时反射镜 2 处于实线位置,激光经聚焦透镜会聚于熔石英材料上;He-Ne 激光器为指示光源,工作时反射镜 2 处于虚线位置,用于光路调整,将激光聚焦于熔石英材料上进行校准,热熔焊接过程中焦斑位置位于毛细管端面边缘上方的石英片表面(即离焦量 $\Delta Z=0$);设计专用的夹具固定毛细管,夹具底座与步进电机相连,使其随步进电机旋转,步进电机由 Labview 程序控制。如果步进电机转角(步长)过大,则两个焊点之间的距离也随之增大,焊点距离过大导致焊缝不密封;如果步进电机转角太小,则石英片吸收的热量太多,过多的热量将导致超薄熔石英玻璃烧毁。因此,热熔焊接过程中设定步进电机的转角为 1.8 $^{\circ}$ (焊点之间的中心距约 0.03 mm),从而确保焊点的连续性,又不至于石英玻璃吸收的热量过多而导致烧毁。熔石英对光波长的透射曲线如图 2 所示^[14],10.6 μm 波长处的透射率和吸收率分别为 40%和 60%。60%的激光能量被熔石英玻璃膜片吸收,足以保证待热熔

区域迅速升温且达到密封焊接的软化度,40%的透射率使得部分激光能量入射到毛细管端面,使其热熔区域迅速升温且达到软化点温度,从而在熔石英玻璃膜片与毛细管端面之间实现热熔密封焊接。

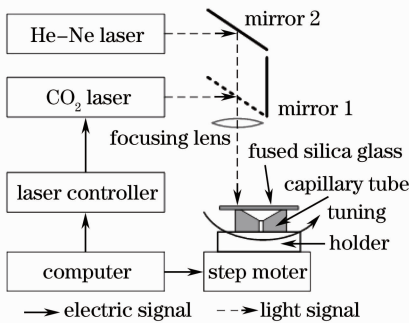


图1 热熔焊接装置示意图

Fig. 1 Setup for CO₂ heating fusion welding

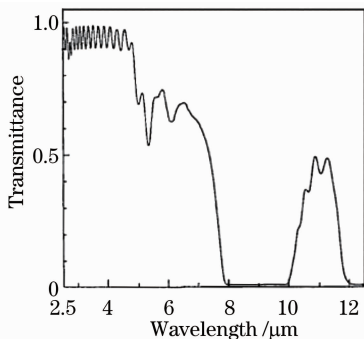


图2 熔石英玻璃的透射光谱

Fig. 2 Transmission spectrum of fused silica

热熔焊接后的焊接质量(焊缝缺陷和熔石英表面的情况)在130×的视频显微镜下观察分析,并且将焊接好的全石英结构 F-P 光纤传感器进行性能测试,传感器的压力性能在水中考核 11 h(每个测试点持续 30 min),检测器件的性能和焊缝的密封性等缺陷。

3 超薄熔石英玻璃的热熔焊接特性

在激光加工领域,激光焊接分为热传导焊接和深熔焊接两大类,两者的焊接机理和焊接效果完全不同^[15]。前者把激光能量通过热传导的方式使材料表面和材料内部相继受热并达到熔融状态。如果材料受热以后,表面和内部温度不超过材料的沸点就不会出现材料的大量气化而导致蒸发,从而实现热传导方式的热熔焊接,因此,热传导焊接方式可以忽略“熔池”(小孔效应)的相变和低温等离子体对热熔焊接的影响。后者与前者的根本区别在于深熔焊接过程中由于母材出现大量蒸发的现象,所以会形成“熔池”,从而产生宽而深的沙漏状焊缝,激光能量

通过沙漏状焊缝把激光能量传递到另一个工件表面,并且由于材料蒸发产生的大量气体吸收激光能量产生电离,导致母材表面和“熔池”壁表面形成致密的低温等离子体,等离子体对材料吸收激光能量具有屏蔽作用,导致激光焊接过程复杂化。超薄熔石英玻璃的 CO₂ 激光焊接一般采用热传导焊接,即热熔焊接,在焊接过程中引起的热应力和应力分布不均容易导致超薄熔石英玻璃产生裂纹或裂缝,另外,超薄熔石英也很容易气化穿孔,导致石英玻璃的热熔区域软化度不够、焊接不密封或不牢固。

熔石英材料吸收脉冲激光能量引起材料内部的热沉积,导致材料温度升高。10.6 μm 的 CO₂ 激光作用于熔石英玻璃时,激光源可以看作是表面加热源,所以根据激光高斯光束的特性可以建立圆柱坐标系下的热传导方程^[16]

$$\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \left[\frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial z^2} \right], \quad (1)$$

式中 z 、 k 、 ρ 和 c 分别为熔石英材料的厚度、热传导系数、密度和比热。根据初始条件和边界条件解出(1)式中 $T(r, z, t)$ 就是焊接过程中的温度场分布,其中边界条件的熔石英上表面为热源的光能密度(随脉冲激光的占空比而变)。和实际温度场对应的是熔石英玻璃内部的热应力分布,是焊接过程中由加热不均匀、温度的迅速变化导致熔石英玻璃内部产生热应力的内在原因,当温度场引起的热应力超过熔石英玻璃的极限应力时就会产生裂纹或裂缝。热应力 σ 和温差 ΔT 之间的关系可以表述为^[17]

$$\sigma = \frac{G\alpha\Delta T}{1-\mu}, \quad (2)$$

式中 G 、 α 和 μ 分别为熔石英的杨氏模量、热膨胀系数和泊松比。因此,温差越大产生的热应力也越大,在热熔焊接工艺中可以通过激光预热和激光退火降低热应力对超薄熔石英玻璃的影响,确保焊接工艺的可靠性。

因此,利用额定功率为 60 W、脉冲频率为 40 kHz 的 CO₂ 脉冲激光实现连续的无穿孔、无裂纹/裂缝的密封牢固焊接,研究了对密封焊接起关键作用的激光脉冲功率、热熔焊接之前的激光预热以及之后的激光退火等工艺参数。

4 结果与讨论

4.1 占空比对热熔焊接的影响

占空比越大,脉冲宽度越大,单个脉冲的激光能

量也越大,超薄熔石英玻璃膜片吸收的能量越多,这将引起石英玻璃加热区域产生热应力和应力分布不均,导致膜片产生裂纹或裂缝,甚至引起超薄熔石英玻璃膜片被吸收的热量烧毁;占空比越小,脉冲宽度越小,单个脉冲的激光能量也越小,而且入射到膜片表面的部分激光还将被反射掉,这将导致膜片和毛细管端面只是被轻微地焊接上,其粘结强度低,或者是激光能量小到不足以使膜片和毛细管端面的待加热区域熔化,无法实现膜片和毛细管的热熔焊接。

图 3(a)是热熔焊接之前的显微照片。占空比为 20%时,膜片表面受到脉冲激光的轻微影响,激光加热区域不是很明显,如图 3(b)所示。占空比为 25%时,膜片的受热区域变得愈加明显,只是吸收的热量还不足以使熔石英的受热区域完全熔化,以实现热熔焊接,如图 3(c)所示。占空比为 30%时,膜片和毛细管已经被轻微地焊接上,但是稍微用力膜片就会从毛细管端面脱落。占空比为 37%时,膜片和毛细管之间的焊接已经非常牢固,但在焊接过程中熔石英玻璃因为应力分布不均导致膜片出现了裂

纹,如图 4(a)所示。并且有可能出现熔石英玻璃膜片碎裂的情况,如图 4(b)所示。当占空比为 42%时,毛细管端面吸收的激光能量随着占空比的增加而增加,此时也能实现牢固的焊接,但是毛细管端面的边缘将塌下较大的深度,如图 5(a)所示。图 5(b)是占空比为 39%时毛细管端面边缘下塌深度的显微照片,此时下塌的深度小很多。在占空比为 30%的脉冲激光旋转一周的基础上,调整占空比为 45%继续使脉冲激光旋转一周,此时脉冲激光能量随着占空比进一步增加,较大能量的脉冲激光来不及在超薄熔石英玻璃上形成“熔池”,而是迅速穿透超薄熔石英玻璃,引起熔石英玻璃气化穿孔,导致熔石英玻璃的热熔区域软化度不够、焊接不牢固,如图 6 所示。方形熔石英玻璃被切割成一个圆形,并且很容易从毛细管端面脱落。如果直接用占空比为 50%的脉冲激光进行热熔焊接,则熔石英玻璃瞬间吸收的激光能量过大,导致毛细管端面的超薄熔石英玻璃被完全烧毁,如图 7(a)所示。毛细管端面也将严重变形,锥形口发生严重畸变,如图 7(b)所示。

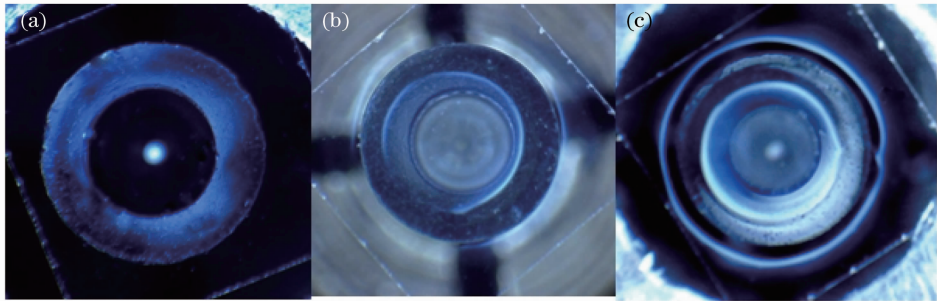


图 3 热熔焊接前(a)和占空比为 20% (b)及 25% (c)热熔焊接后的结果

Fig. 3 Microscopic images of the fused silica glass (a) before weld and after the pulse laser weld with a duty ratio of (b) 20% and (c) 25%, respectively

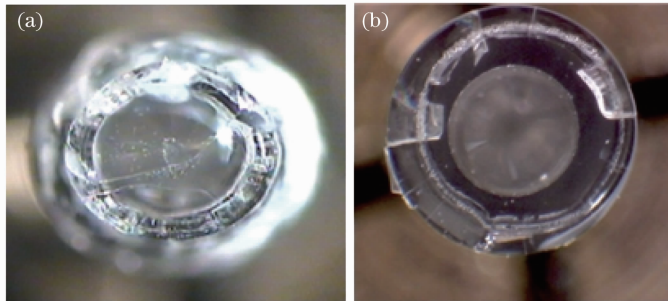


图 4 热熔焊接后膜片产生了裂纹(a)和裂缝(b)

Fig. 4 (a) Crack and (b) split on the fused silica diaphragm after welding

因此,对于超薄熔石英玻璃的热熔焊接,占空比较小时,加上部分激光能量被熔石英玻璃表面反射掉,无法实现膜片与毛细管端面之间焊接或者焊接不牢固;占空比较大时,熔石英玻璃容易产生裂纹或

裂缝,而且,由于熔石英玻璃非常薄,所以在熔石英玻璃上来不及形成“熔池”以及产生致密的低温等离子体,而是较大占空比的激光直接导致超薄熔石英玻璃气化穿孔、焊接不牢固、不密封,甚至是瞬间吸

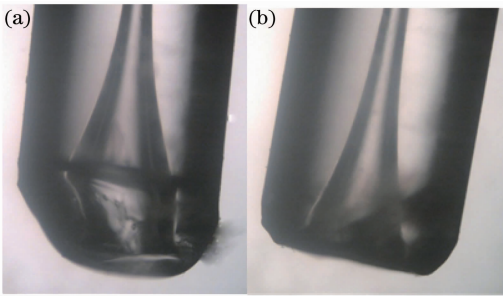


图 5 热熔焊接后毛细管端面边缘的变化
Fig. 5 Change of the edge of capillary tube end face after welded

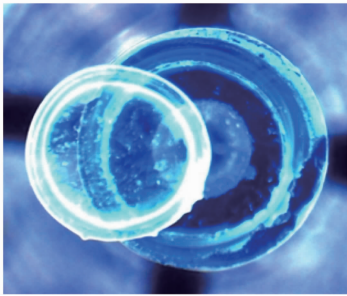


图 6 焊接不牢固导致膜片脱落
Fig. 6 Unfirm welding resulting in diaphragm to shed from capillary tube end face

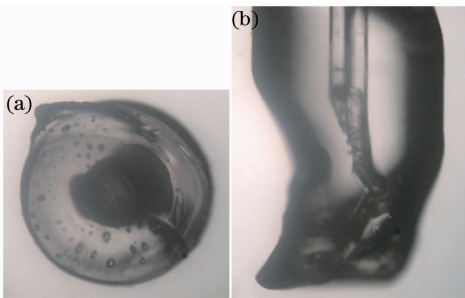


图 7 焊接导致膜片烧毁(a)和锥形口变形(b)
Fig. 7 Micrograph of (a) diaphragm burn and (b) cone-shape distortion after welding

收的激光能量过大直接导致超薄熔石英玻璃烧毁，同时锥形口也受到严重影响。

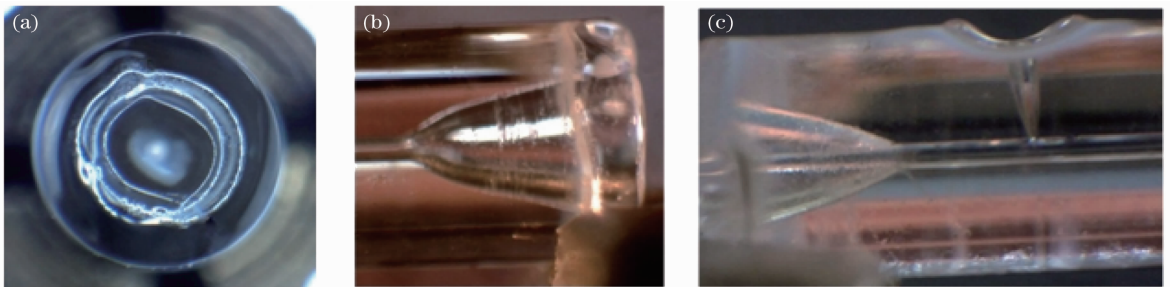


图 8 无缺陷的激光焊接。(a)正视显微图；(b)侧视显微图；(c)毛细管与光纤之间的深熔焊接
Fig. 8 Perfect laser welding. (a) Front micrograph; (b) side micrograph; (c) deep penetration welding between the capillary tube and fiber

4.2 离焦激光预热对热熔焊接的影响

对于超薄熔石英膜片的热熔焊接，虽然没有形成明显沙漏状的“熔池”以及产生致密的低温等离子体，但是由于较大温差变化引入大的热应力，并且在焊接过程中还可能引起膜片应力分布不均，从而导致熔石英玻璃产生裂纹或裂缝，如图 4 所示。采用占空比为 37%、零离焦量的参数进行焊接时，熔石英膜片出现了裂纹或者裂缝(碎裂)。为了提高焊接的成品率，完善超薄熔石英玻璃的热熔焊接工艺，在焊接之前采用离焦激光对超薄熔石英玻璃膜片进行预热，占空比为 20%(零离焦量时，该占空比的激光能量使膜片产生轻微的影响)，焦斑位置在熔石英玻璃膜片上方，在离焦量 $\Delta Z = 2 \text{ mm}$ 的情况下，激光能量不会引起石英膜片表面发生软化、气化，但在该激光能量的辐射下，毛细管旋转一周后足以使膜片的待热熔焊接区域达到一定温度，而且膜片基本不受影响。预热后立即把激光束腰调整到熔石英玻璃膜片的上表面(即离焦量 $\Delta Z = 0$)，然后在 Labview 平台上把占空比调整为 37%，快速对膜片和毛细管进行热熔焊接，焊接好后把激光焦斑沿着毛细管端面径向稍微外移，调整占空比为 45%，使焊接好的超薄熔石英玻璃气化切割成圆形，焊接结果如图 8(a)和(b)所示。和图 4 相比较，图 8 的焊接表面和焊接边缘非常完好，熔石英玻璃没有出现裂纹和裂缝。图 8(b)是图 8(a)的侧视显微图，显示了熔石英玻璃表面非常光滑平整，焊缝的密封性完好，焊缝处也没凸起状。这有别于毛细管与光纤之间的深熔焊接，深熔焊接导致毛细管的“熔池”边缘呈凸起状，如图 8(c)所示，光滑平整的表面确保了热熔焊接对该传感器的灵敏度等性能参数没有影响。

为了评估器件的性能和进一步检测焊缝的密封性，分别在水中和温度控制箱内对激光热熔焊接制作的膜片式非本征光纤 F-P 传感器进行压力和温

度性能测试,其压力、温度性能曲线如图9所示,水中的长时间压力考核也证明了没有液体通过焊缝进入毛细管的锥形口内,即熔石英玻璃和毛细管端面之间的焊缝是密封、无缺陷的。

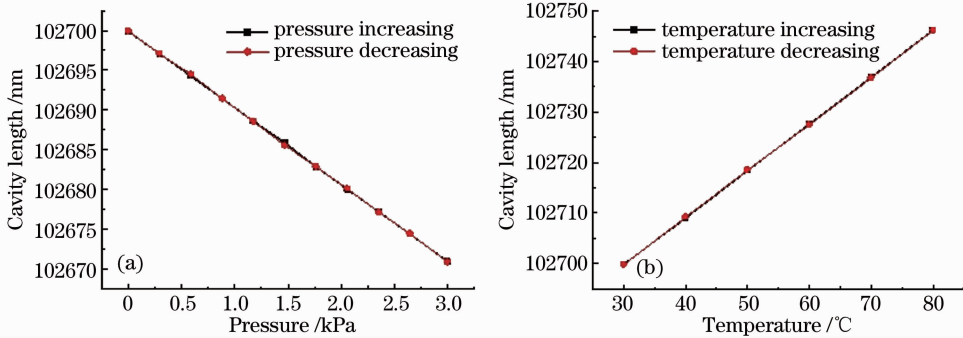


图9 热熔焊接光纤传感器的压力(a)和温度曲线(b)

Fig. 9 (a) Pressure and (b) temperature performance curves of fiber-optic sensor welded perfectly

4.3 激光退火对热熔焊接的影响

对熔石英玻璃和毛细管进行焊接之前,采用离焦激光预热可以确保很高的焊接成品率,但是实现牢固密封焊接的前提是石英玻璃达到其软化点,从而使待焊接区域处于熔融状态,在融化状态时熔石英玻璃没有应力存在。然而在焊接完毕,熔石英玻璃冷却凝固的过程中温差变化大,大温差必然导致残余热应力,这是由于焊接过程中,熔石英玻璃吸收激光能量产生热应力,熔石英内部的热应力不能完全释放,这种熔石英材料内部不能完全释放的残余热应力会降低石英器件的抗损伤能力,对石英器件的性能参数和使用寿命会产生很大的影响,甚至熔石英玻璃会产生裂纹或裂缝,从而导致石英器件失效^[18]。

为了避免上述情况的发生,有效的方法是对熔石英材料进行退火,释放材料内部的残余热应力。因此,在熔石英玻璃和毛细管端面焊接好后,调整激光束的焦斑位置于膜片下方2 mm处,即离焦量 $\Delta Z = -2$ mm,焊接好的成品随着毛细管夹具旋转。为了实现退火以后缓慢降温的效果,首先采用占空比为20%的脉冲激光进行退火(夹具旋转4周);然后每隔1 min用不同占空比的脉冲激光辐射熔石英玻璃的热熔焊接区域(夹具旋转一周),占空比依次为18%、16%、12%、10%。经激光热熔焊接制作的全石英结构光纤传感器,对其进行性能测试,激光退火后的压力、温度性能曲线如图9所示,压力和温度曲线线性度分别为0.9995和0.9991,重复性也很好。

5 结论

研究了CO₂脉冲激光实现超薄熔石英玻璃与毛细管端面之间密封、牢固焊接的热熔焊接工艺。

实验结果表明,采用额定功率为60 W、脉冲频率为40 kHz的CO₂脉冲激光器,占空比过小时熔石英玻璃无法达到软化点成为熔融状态,占空比过大时导致超薄熔石英膜片穿孔气化,玻璃膜片与毛细管无法实现连续、牢固的焊接;采用占空比37%的零离焦脉冲激光,膜片与毛细管能够实现连续、牢固的热熔焊接,但是熔石英玻璃在热熔焊接过程中容易产生热应力 and 应力分布不均而出现裂纹或裂缝,在焊接之前采用占空比为20%的+2 mm离焦脉冲激光对待热熔区域进行预热可以减小温度的急剧变化,能很好地解决熔石英玻璃在焊接过程中出现裂纹或裂缝的问题;适当的一2 mm离焦脉冲激光退火能够释放焊接过程中产生的残余热应力,极大地降低残余热应力对石英器件性能的影响。总之,实现了超薄熔石英玻璃膜片与熔石英毛细管之间连续的无气化穿孔、无裂纹/裂缝的密封焊接,获得了超薄熔石英玻璃较完善的热熔焊接工艺,这对基于熔石英材料光电子器件的CO₂激光先进加工工艺具有借鉴意义,提供了实验依据和工程经验。

参考文献

- 1 I. L. Bass, V. G. Draggoo, G. M. Guss *et al.*. Mitigation of laser damage growth in fused silica NIF optics with a galvanometer scanned CO₂ laser[C]. *SPIE*, 2006, **6261**: 62612A
- 2 B. Bertussi, P. Cormont, S. Palmier *et al.*. Initiation of laser-induced damage sites in fused silica optical components[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(14): 11469~11479
- 3 L. Gallais, P. Cormont, J. L. Rullier. Investigation of stress induced by CO₂ laser processing of fused silica optics for laser damage growth mitigation[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(26): 23488~23501
- 4 J. Xu, G. R. Pickrell, X. Wang *et al.*. A novel temperature-insensitive optical fiber pressure sensor for harsh environments [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(4): 870~872
- 5 J. Xu, X. Wang, K. L. Cooper *et al.*. Miniature all-silica fiber optic pressure and acoustic sensors [J]. *Opt. Lett.*, 2005,

- 30(24): 3269~3271
- 6 Dai Gang, Lu Jian, Liu Jian *et al.*. Experiment of long pulse high energy laser drilling on silica glass[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(2): 380~386
戴罡, 陆建, 刘剑等. 使用长脉冲高能激光对石英玻璃打孔[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(2): 380~386
- 7 Huang Jin, Lü Haibing, Ye Lin *et al.*. Damage threshold improvement of fused silica chip by CO₂ laser pretreatment[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 723~727
黄进, 吕海兵, 叶琳等. 利用 CO₂ 激光预处理提高熔石英基片的损伤阈值[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 723~727
- 8 Li Xibin, Wang Haijun, Yuan Xiaodong *et al.*. Effects of laser irradiation on surface morphology and stress distribution of fused silica[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0903002
李熙斌, 王海军, 袁晓东等. CO₂ 激光辐射对熔石英表面形貌与应力分布的影响[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0903002
- 9 Wang Feng, Wu Weidong, Jiang Xiaodong *et al.*. Study of surface modification of fused silica optical component by reactive plasma[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0522003
王锋, 吴卫东, 蒋晓东等. 反应等离子体修饰熔石英光学元件表面研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0522003
- 10 Dou Hongqiang, Chen Zhenxing, Xu Shizhen. Effects of 10.6 μm laser irradiation on quartz crystal [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(6): 0614011
窦红强, 陈贞兴, 徐世珍. 10.6 μm 激光对石英晶体的辐照效应[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(6): 0614011
- 11 J. Xu, G. Pickrell, B. Yu *et al.*. Epoxy-free high-temperature fiber optic pressure sensors for gas turbine engine applications [C]. *SPIE*, 2004, **5590**: 1~10
- 12 A. K. Dubey, V. Yadava. Laser beam machining a review[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, **48**(6): 609~628
- 13 J. Jiao, X. B. Wang. A numerical simulation of machining glass by dual CO₂ laser beams[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2008, **40**(2): 297~301
- 14 A. D. McLachlan, F. P. Meyer. Temperature dependence of the extinction coefficient of fused silica for CO₂ laser wavelengths [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(9): 1728~1731
- 15 Wang Jiajin. *Laser Machining Technology*[M]. Beijing: China Metrology Press, 1992. 335~409
王家金. *激光加工技术*[M]. 北京: 中国计量出版社, 1992. 335~409
- 16 Jia Li, Qian Xinghua. *Advanced Heat Transfer Theory*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. 12~20
贾力, 钱兴华. *高等传热学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 12~20
- 17 D. Triantafyllidis, J. R. Bernstein, L. Li *et al.*. Dual laser beam modification of high alumina ceramics[J]. *J. Laser Appl.*, 2003, **15**(1): 49~54
- 18 Liu Hongjie, Huang Jin, Wang Fengli *et al.*. Effect of thermal stresses on fused silica surface on the laser induced damage[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(2): 1308~1313
刘红婕, 黄进, 王凤荔等. 熔石英表面热应力对激光损伤行为影响的研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(2): 1308~1313

栏目编辑: 宋梅梅