

安瓿瓶激光封口

唐文龙¹ 王新兵¹ 黄 余² 焦俊科¹

(¹ 华中科技大学光电子科学与工程学院 武汉光电国家实验室激光科学与技术研究部, 湖北 武汉 430074)

² 华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074

摘要 为了实现 CO₂ 激光封口安瓿瓶, 提出了对 CO₂ 激光预热后的安瓿瓶, 再利用 CO₂ 激光使安瓿瓶熔融封口的技术方案。在考虑玻璃物性参量随温度变化和安瓿瓶表面对流换热的情况下, 利用有限元软件(ANSYS)对 CO₂ 激光辐照不同规格和转速的安瓿瓶的温度场和应力场进行数值计算。结果表明在加工参量相同的情况下, 安瓿瓶瓶壁越厚, 激光加热时所达到的温度越低。当 CO₂ 激光加热旋转的安瓿瓶时, 不同的旋转速度只是使得外表面温度以不同周期上升, 但如果激光加热时间相同, 则温升基本相同。对封口过程中的应力场进行了计算, 结果表明导致安瓿瓶封口失败的热应力主要是冷却时的张应力。

关键词 激光技术; CO₂ 激光; 玻璃; 温度场; 安瓿瓶; 有限元软件

中图分类号 TG506.4; TN249 **文献标识码** A

Sealing Glass Ampoule by CO₂ Laser

Tang Wenlong¹ Wang Xinbing¹ Huang Yu² Jiao Junke¹

¹ *Division of Laser Science and Technology, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, College of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China*

² *College of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China*

Abstract The technology of sealing glass ampoule by preheating, melting and sealing by CO₂ laser was presented in this paper. The ANSYS software was used to simulate the temperature and thermal stress distributions considering the influences of surface convection and the variation of the physical properties of the glass with temperatures. The relationships between temperature and the thickness and rotating velocity of the ampoule were obtained. The results show that the surface temperature decreases with the increase of thickness; the temperature of the outer surface will reach almost the same value at different rotating velocities, if the laser interaction time is the same. The main cause of the ampoule broken is the tensile stress during the cooling.

Key words laser technique; CO₂ laser; glass; temperature field; ampoule; ANSYS

1 引 言

由于玻璃具有的优越的保护性能和良好的化学稳定性, 绝大部分针剂药品都是采用安瓿瓶进行包装^[1]。目前, 国际、国内小容量注射剂安瓿灌封机, 都采用拉丝封口技术。采用火焰进行封口, 封口燃气可使用煤气、液化石油气以及气化汽油。由于针剂药品生产的整个过程处于高度洁净的环境, 但煤气等燃烧产物会降低针剂的生产环境, 甚至会沉积到药水里, 影响药品的澄明度, 并对一些要求较高的

药品的疗效产生影响, 因此必须研制新型的封口技术。由于玻璃几乎完全吸收 CO₂ 激光, 可以考虑利用 CO₂ 激光器作为热源来实现安瓿瓶的快速封口。采用 CO₂ 激光代替火焰封口, 可提高针剂药品的生产环境; 通过改变激光器的光束参量, 可用于各种尺寸的安瓿瓶的激光封口。

在 CO₂ 激光对安瓿瓶封口的过程中, 涉及到激光与玻璃的相互作用。目前, 对激光与玻璃的相互作用的研究主要集中在激光制作各种微小光纤结构

基金项目: 国家自然科学基金(60478028)资助课题。

作者简介: 唐文龙(1983—), 男, 湖南人, 硕士研究生, 主要从事激光加工方面的研究。

E-mail: tangwen@smail.hust.edu.cn

导师简介: 王新兵(1967—), 男, 湖北人, 教授, 博士生导师, 主要从事新型气体激光技术以及激光加工等方面的研究。

E-mail: xbwang@hust.edu.cn

和对平板显示器玻璃基板的切割^[2~7]。本文则是通过数值计算,研究了 CO₂ 激光作用安瓿瓶时的热力学性质,对 CO₂ 激光封口安瓿瓶的实验有一定的指导意义。

2 计算模型的建立

在用 CO₂ 激光封口安瓿瓶的过程中,安瓿瓶以一定的速度旋转,先用一束 CO₂ 激光进行预热安瓿瓶到一定温度后,在另外一束 CO₂ 激光的共同作用下,安瓿瓶的温度迅速上升,实现熔融封口。激光辐照旋转安瓿瓶,其温度场可以采用圆柱坐标下无内热源的非线性瞬态热传导方程进行计算^[8]

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

式中 $\lambda(T)$ 为导热系数, c 为比热容, T 为温度, t 为时间。

在利用有限元软件对 CO₂ 激光辐照下安瓿瓶的温度和应力分布进行模拟时,将激光能量作为表面热流加载在圆柱外表面。这里以基模 CO₂ 激光作为热源,离光斑中心 r 处激光功率密度分布 $Q(r)$ 为

$$Q(r) = aq \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2}\right), \quad (2)$$

式中 a 为玻璃对激光的吸收率, q 为激光功率密度, ω 为光斑半径。

由于安瓿瓶不断旋转,对流换热系数较大,同时由于整个表面都存在对流换热,故在数值计算中只考虑对流换热,不考虑辐射换热,为第三类边界条件^[8]。

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} = \beta(T - T_\infty), \quad (3)$$

式中 T_∞ 为环境温度, β 为对流换热系数。

安瓿瓶一般为硼硅玻璃,其密度为 2200 kg/m³,玻璃对波长为 10.6 μm 的 CO₂ 激光的吸收率为 90%。由于激光加热后玻璃的温度升高,其物性参量随温度变化,在模拟计算中考虑材料导热系数 $\lambda(T)$ 和比热容 c 随温度变化,如表 1 所示。

表 1 玻璃的物性参量

Table 1 Physics properties of the glass

$T/^\circ\text{C}$	$c/[\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})]$	$\lambda/[\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})]$
20		1.38
200	836	1.65
400	973	1.86
600	1061	2.02
800	1086	2.15
1000	1103	2.29
1200	1128	2.43

玻璃是非晶态物质,没有固定的熔点,硼硅玻璃的熔融温度高,软化温度为 820 °C,成形始点温度为 1220 °C^[9],热加工温度为 1000~1400 °C,为了能使封口作业正常进行,必须使一定宽度范围安瓿瓶丝壁内外表面同时热加工。

3 计算结果及分析

由硼硅玻璃安瓿瓶国家标准 YBB00322002 得,5 mL,20 mL 安瓿瓶的丝外径(直径)分别为 6 mm 和 7.3 mm,丝壁厚度 d 分别大于 0.2 mm 和 0.3 mm。5 mL,20 mL 安瓿瓶封口时旋转速度分别为 385 r/min 和 250 r/min。

3.1 温度场分析

图 1 所示是容量为 5 mL 的安瓿瓶以 385 r/min 的速度旋转时,先用功率为 35 W,光斑半径为 3 mm 的激光预热 0.78 s 后,再加一束功率为 45 W 的激光辐照 0.31 s 安瓿瓶内外圆周面温度周向分布(起点是激光刚开始作用时光斑中心点,下同),由图可知,内表面最低温度 1310 °C,从而可以确定此时安瓿瓶一定宽度范围内整周处于熔融状态,可以进行封口作业。而且由于安瓿瓶壁厚只有 0.3 mm,热传导延迟时间很短,外表面热源在很短时间内就能影响到内表面,故其内外表面的温度相差较小。

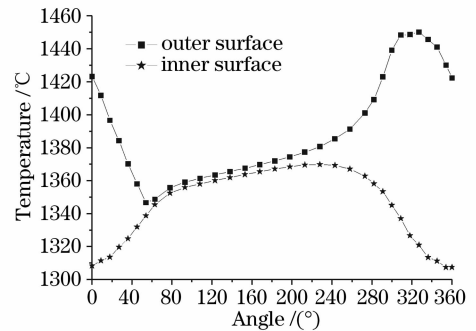


图 1 $t=1.09$ s 时 5 mL 安瓿瓶内外表面中心线周向温度分布

Fig. 1 Temperature distribution at the center of the outer and inner surface at $t=1.09$ s

由于不同厂家生产的同一规格的安瓿瓶壁厚不一样,必须考虑壁厚对安瓿瓶封口的影响,图 2 是同等加热条件下不同壁厚的 5 mL 安瓿瓶内外表面温度周向分布。由图可知,在其他条件相同情况下,不同壁厚的安瓿瓶,温度相差很大,有些处于熔融不完全状态,而有些温度则超过了拉丝作业温度,故实际生产过程中,必须准确测量丝壁厚度,根据壁厚的不同,来确定激光功率和旋转速度。

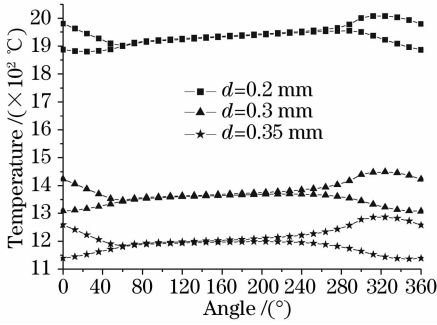


图2 $t=1.09$ s时不同丝壁厚度 d 安瓿瓶内外表面温度周向分布

Fig. 2 Temperature distribution of the outer and inner surface for glass ampoule with different thickness at $t=1.09$ s

图3所示容量为5 mL, 20 mL的安瓿瓶以不同速度旋转时, 安瓿瓶光斑中心上一点的温度随时间的变化关系, 该点的温度在预热激光辐照时缓慢上升, 到一定温度后在封口激光束的共同作用下温度迅速上升实现安瓿瓶封口。其中方案A, B预热和封口加热时安瓿瓶的旋转圈数分别相同, 由于转速慢的加热时间长, 故方案B最终温度高; 方案C, D预热和封口加热时间分别相同, 由图可以得出, 不同转速情况下温度以不同的频率沿一中心线周期起伏, 加热时间相等时, 温度基本一致。相比5 mL安瓿瓶, 20 mL的安瓿瓶温度上升较慢, 原因是其壁厚和丝外径大。故在对不同规格的安瓿瓶进行封口作业时, 也必须根据实际情况选择合适的工艺参量和激光功率。

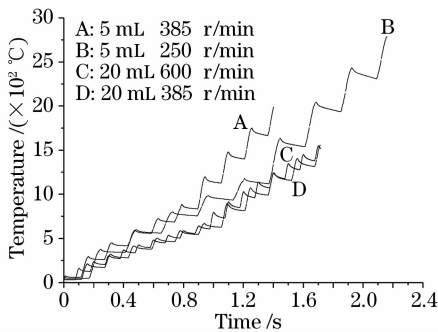


图3 光斑扫描路径上一点的温度随时间变化关系

Fig. 3 Temperature variation with time at fixed point on the glass ampoule

3.2 应力分析

利用得到的温度场, 对封口过程中的应力场进行了计算, 硼硅玻璃的热膨胀系数为 $4.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 泊松比为 0.22^[9], 弹性模量为 $8.2 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, 玻璃的抗压强度为 10^9 Pa 数量级, 抗拉强度为 10^7 Pa 数量级。图4所示是容量为20 mL的安瓿瓶以

600 r/min的速度旋转时, 先用功率为35 W, 光斑半径为3 mm的激光预热1.1 s, 再加一束功率为45 W的激光辐照0.7 s安瓿瓶内外圆周面热应力分布(起始点位于光斑中心左侧0.008 m处)。可见, 最大应力出现在光斑中心, 且在轴向(z 方向)应力迅速下降, 应力在下降到一定程度之后有一个回升的过程, 其原因是中间玻璃受热产生膨胀, 在接近边缘处, 由于受到玻璃边界的约束, 使膨胀受阻, 在双重挤压下使应力增大。

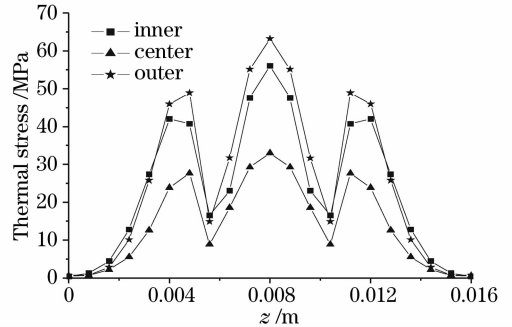


图4 不同厚度处热应力轴向分布

Fig. 4 Thermal stress distribution along the axis direction

在封口过程中, 玻璃受热膨胀, 受到周围玻璃的挤压, 光斑处主要受到压应力的作用, 由于玻璃的抗压强度为 10^9 Pa , 一般不会出现封口处碎裂。但封口后的冷却过程中, 玻璃冷却收缩, 主要受拉应力作用, 由于玻璃的抗拉强度同产生的拉应力处于同一数量级, 处置不当, 则可能会引起封口失败。此结果同实际激光封口过程中安瓿瓶碎裂常常发生在封口后的一段时间相符合, 从而证明了理论计算的正确性, 因此, 在冷却过程中, 应采用低功率激光继续辐照封口处一段时间, 减缓冷却速度, 从而减小冷却过程中拉应力。

4 结论

提出了先低功率激光预热安瓿瓶, 高功率激光加热实现封口, 最后低功率激光辐照降低冷却过程张应力的安瓿瓶封口方案。并利用有限元方法得到了封口过程中安瓿瓶的温度场和应力场, 比较了5 mL, 20 mL安瓿瓶温度随时间的变化, 以及不同丝壁厚度及旋转速度情况下温度场的分布, 得出丝壁厚度对拉丝封口时的温度场有很大影响, 必须根据安瓿瓶实际情况来确定拉丝封口作业时的工艺参量。而对应不同转速, 温度以不同频率周期性上升, 加热相同时间后不同转速所达到的温度基本一致。采取本方案进行激光封口安瓿瓶时产生的热应力小

于安瓿瓶的破坏应力,说明 CO₂ 激光封口安瓿瓶是可行的。

参 考 文 献

- 1 Jiang Jingming, Xu Bin. Study on seal pattern of ampoule[J]. *Chin. J. Medical Device*, 2006, **1**: 21~22
蒋井明,徐 斌. 关于安瓿封口方式的探讨[J]. *医疗装备*, 2006, **1**: 21~22
- 2 C. H. Tsai, B. C. Lin. Laser cutting with controlled fracture and pre-bending applied to LCD glass separation [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, **32**(11-12): 1155~1162
- 3 Jiao Junke, Wang Xinbing. Temperature distribution of moving quartz glass heated by CO₂ laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(1): 1~4
焦俊科,王新兵. CO₂ 激光作用下运动石英玻璃的温度分布[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(1): 1~4
- 4 Gi-Jung Nam, Meong-Hui Seo, Kwang-Hyun Ryu *et al.*. Laser cutting and sealing methods of capillary glass tube[C]. *SPIE*, 2004, **5662**: 154~159
- 5 Liu Feng, Chen Yusheng, Wu Zhensen *et al.*. Analysis of the laser parameters choice for a rotational thin cylinder Shell under CW-laser irradiation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1052~1058
刘 峰,陈雨生,吴振森等. 强激光加热旋转薄柱壳的参量选择分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1052~1058
- 6 Liu Feng, Wu Zhenshen, Wang Yuheng *et al.*. Heating efficiency repetitive frequency intensity laser-irradiated cylinder [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 461~466
刘 峰,吴振森,王玉恒等. 重复频率激光辐照柱壳的加热效率[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 461~466
- 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 Chen Weihai, Xu Guoliang, Jin Shiping. Heat Transfer[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2004. 10~12
陈维汉,许国良,靳世平. 传热学[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2004. 10~12
- 9 D. G. Holloway. The Physical Properties of Glass[M]. London and Winchester: Wykeham Publications (London), 1973. 142~144