

文章编号: 1001-3806(2006)01-0016-04

## 激光熔覆金属陶瓷涂层开裂的机理及防止措施

赵亚凡<sup>1,2</sup>, 陈传忠<sup>1\*</sup>

(1. 山东大学 材料科学与工程学院, 济南 250061; 2 山东建筑工程学院, 济南 250014)

**摘要:** 在总结国内外激光熔覆金属陶瓷涂层开裂研究现状的基础上, 分析了裂纹的形成机理, 从激光处理工艺和参数选择、熔覆层成分及基体形状的设计等方面阐述了裂纹行为的影响因素及相应的防止措施, 最后展望了其发展前景。

**关键词:** 激光技术; 激光熔覆; 金属陶瓷; 裂纹; 防止措施

**中图分类号:** TG174; TG665 **文献标识码:** A

### Mechanism of the deformation and preventive measures of the cracks in metal ceramics cladding layer

ZHAO Ya-fan<sup>1,2</sup>, CHEN Chuan-zhong<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2 Shandong Architecture Engineering Institute, Ji'nan 250014, China)

**Abstract:** After summarising the current situation of domestic and foreign researches of cracks of metal ceramics cladding layer, the mechanism of the deformation of the cracks is analyzed. The four influential factors and corresponding preventive measures of the cracking behavior including the technical process, the parameters of laser cladding, the designing of coating components and the form of matrix are discussed. The development prospect of the technique is also pointed out.

**Key words:** laser technique; laser cladding; metal ceramics; cracks; preventive measure

## 引 言

激光熔覆金属陶瓷是采用高能激光束在普通金属材料表面熔覆一层硬度高、热稳定性好且与基材结合牢固的金属陶瓷。它成功地将金属的高强度、高韧性与陶瓷优良的耐磨、耐蚀及抗氧化等性能结合起来, 构成一种新的复合材料, 既满足了对材料表面特殊性能的要求, 又节约了大量的贵重元素。它的发展为工程材料制备耐磨、耐蚀等性能的表面涂层开辟了广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。激光熔覆中最棘手的问题是熔覆层的开裂, 这也成为激光熔覆技术向工业实用化推进的一大障碍<sup>[2]</sup>。作者在总结国内外激光熔覆涂层开裂研究现状的基础上, 深入分析了裂纹的形成机理, 从工艺和材料等角度全面阐述了裂纹的影响因素及防止措施, 以促进该项技术在生产中的实际应用。

## 1 裂纹产生的原因

通过测定熔覆层开裂时的温度和对裂纹的断口分析可知, 激光熔覆层裂纹是在凝固温度附近形成的热

裂纹, 也称凝固裂纹<sup>[3]</sup>。在凝固温度区间, 初生的发达枝晶相互连接形成一个结晶固态网, 造成枝晶间的液体封闭, 在随后冷却中, 由于收缩而无足够液体补充, 易于在枝晶间硬质相和杂质等应力集中的部位形成凝固裂纹源。随着温度不断降低, 应力增大, 裂纹将会沿枝晶间扩展。由于激光熔覆冷却的温度梯度分布复杂, 故不同区域可能会出现不同的结晶方向, 不同生长方向的共晶组织在快速凝固过程中会发生强烈的组织碰撞, 导致共晶团界面产生较大的应力而形成显微裂纹。此外, 由于陶瓷材料与金属基体结构上差异较大, 二者的润湿性与匹配性不好, 裂纹源也易在结合面处产生。归纳起来, 裂纹源产生的部位主要有 3 种: (1) 熔覆层中的硬质相及夹杂物; (2) 熔覆层中共晶团间的显微孔; (3) 熔覆层与基材界面间的微孔洞。

萌生的裂纹如果继续稳态扩展和失稳扩展便会造成涂层的开裂。研究表明<sup>[4]</sup>, 熔覆层裂纹断口大多具有脆性断裂特征, 由强度理论可知, 当最大应力大于材料的强度极限, 即  $\sigma_{\max} > [\sigma]$  时, 便会发生断裂。激光熔覆处理后材料内部存在较大的残余应力, 可分为热应力、组织应力及拘束应力 3 种。激光熔覆处理是一个快速加热和冷却的过程, 在熔覆层与基体间形成极高的温度梯度, 而陶瓷材料与金属基体的熔点、热膨胀系数、弹性模量及导热系数等物理性能参数相差很大,

作者简介: 赵亚凡 (1973-), 女, 博士研究生, 主要从事材料表面激光强化与改性研究。

\* 通讯联系人。E-mail: czchen@sdu.edu.cn

收稿日期: 2004-11-08; 收到修改稿日期: 2005-02-24

因此便产生了热应力。激光熔化凝固过程中,伴随着交界面处基材的固态相变还会产生组织应力。此外,熔池内材料的体积胀缩还受周围基材的限制,可归纳为拘束应力。这里的强度极限除包括熔覆层及基体自身的强度外,还有二者的结合强度。对于少数塑性开裂的涂层,则应按照强度理论中塑性断裂的判据  $\epsilon_{\max} > [\epsilon]$ ,即局部区域的最大应变达到了材料所能承受的极限应变值,而极限应变是与材料塑性有关的量。事实上,高韧性的结晶组织可以协调变形,缓解裂纹尖端的应力集中,抑制裂纹扩展。由此可见,裂纹的产生和行是熔化凝固过程中产生的应力应变与相应组织的强度和韧性之间动态作用的结果。防止裂纹应从降低残余应力和提高熔覆层及结合区域的强度及韧性入手。

## 2 裂纹防止措施

裂纹行为的影响因素较复杂,包括激光处理工艺和参数、熔覆材料以及基材等因素。下面就从这 4 个方面分别讨论它们对裂纹的影响及相应的预防措施。

### 2.1 优化激光处理工艺

激光处理前对基体预热以及处理后缓冷是避免裂纹的有效措施之一。预热与缓冷的实质是降低熔覆层的温度梯度,这对于减少残余应力有一定作用,但会削弱激光快速加热和快速冷却的技术优势,使组织晶粒粗大,性能下降。WANG 等人<sup>[5]</sup>认为,相对于预热,缓冷对熔覆层晶粒度及硬度的影响相对要大些,温度最好在 300℃ 以上,而预热温度也以不超过 600℃ 为宜。

激光熔覆的残余拉应力是一个三维应力场,其中沿激光扫描方向的残余拉应力最大<sup>[6]</sup>,故单道激光熔覆时裂纹多为垂直于激光扫描方向,且裂纹间成平行分布。多道熔覆搭接后,各道熔覆产生的应力会叠加,熔覆层开裂更敏感,而第 1 道往往是裂纹的起源。LUAN<sup>[7]</sup>还提出“临界搭接量”的概念,即不同熔覆材料在其临界搭接量之内可避免开裂。但实际操作中,搭接量的精确性不易把握,故有一定局限性。对必须采用多道搭接的大面积激光熔覆,最好在两条熔覆带间保留一定宽度的未熔覆区,可有效控制裂纹的产生和传递。另外,单道熔覆后增加一道回火工艺,再进行第 2 道搭接,也可减小应力叠加值。

此外,在熔池中施加电磁搅动以及采用激光二次扫描等方法也有助于减少裂纹。

### 2.2 选择合适的激光处理工艺参数

粉末预置法的主要参数有激光功率  $P$ 、扫描速度  $v$  及光斑直径  $D$ 。这些工艺参数对熔覆层质量的影响是相互关联的。已经提出不少与几个工艺参数相关的物理量,应用较广的是熔覆层单位面积吸收的能量(也称比能)<sup>[8]</sup>。比能过低会使涂层粉末熔化而基体未

熔,基体与熔化粉末间的界面能增大,熔体的表面张力占优势,将在基体表面形成不连续的珠状熔层,降低了二者的结合强度。比能过高会在熔池中形成强烈的对流,对流一方面能促进各种合金元素及陶瓷硬质相在熔池中的均匀分布,但另一方面,如果对流过于强烈,会使熔覆层的表面不平整,易形成垂直于表面的裂纹,且晶粒粗大,力学性能降低。此外由于熔覆层与基体间相互扩散严重还会增大稀释率<sup>[9]</sup>。许多材料工作者提出了确定涂覆工艺参数的“最小比能原则”<sup>[10]</sup>,即激光熔覆处理的最小比能应能够使涂层熔化并加热基体至其熔点,而最佳输入能量应稍高于最小比能。许多研究表明,在影响比能的 3 个参量中,裂纹对扫描速度的变化较敏感。原因是加快扫描速度即增大了温度梯度,热应力随之增加。因此,参数的选择要根据涂层的厚度,同时考虑材料的熔点、吸收系数等因素,在能量密度满足理想比能的条件下,适当降低扫描速度。另外考虑到激光束温度分布的不均匀,还应适当增大光斑直径,采用宽带激光熔覆或改变光束模式,如采用振荡光束,使能量为“多峰值分布”,这样热量分布较均匀,降低裂纹敏感性。

### 2.3 合理设计熔覆层

与激光熔覆处理工艺相比,熔覆层的组织性能对裂纹行为的影响更明显,也较易控制。因此,合理设计熔覆层是抑制开裂的主要途径。以下从 4 个方面加以讨论。

#### 2.3.1 保持金属相与陶瓷相成分、数量的合理配比

在设计复合涂层时,除了考虑涂层的使用性能外,还应考虑陶瓷颗粒与金属相及合金基体物理性能的匹配,涂层与基材间的界面结合、润湿性及化学反应等<sup>[11]</sup>。而这些因素都对熔覆层及其与基体的结合强度及残余应力有影响。在激光熔覆的 3 种残余应力中,因熔覆层温度变化急冷急热的特点,热应力是主要影响因素。其计算公式为<sup>[12]</sup>:  $\sigma_{\text{th}} = E\Delta a\Delta T / (1 - \nu)$  (1) 式中,  $E$ ,  $\nu$  分别是熔覆层的弹性模量和泊松比;  $\Delta a$  是熔覆层与基材间热膨胀系数之差;  $\Delta T$  是熔覆温度与室温之差。由此式可知,温度梯度和熔覆层与基体的热膨胀系数之差是产生热应力的主要原因。事实上,当熔覆层膨胀系数与基体材料相当时,虽然熔覆层宏观热应力为 0,但其内部因陶瓷相与金属粉末膨胀系数的差异,仍存在残余拉应力。国内外已有许多材料工作者通过不同手段测定出了激光熔覆的应力分布。大量测试结果表明,残余应力峰值大多出现在涂层表面附近或涂层与基材交界处,也有的出现在涂层厚度方向的中部<sup>[13]</sup>。图 1 为 HERNANDEZ 等在马氏体不锈钢 Z10CNDV12-2 基体上激光熔覆 stellite 合金涂层的横向和纵向残余应力<sup>[14]</sup>。

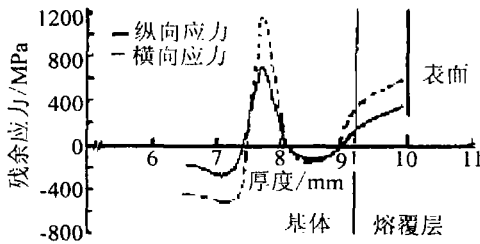


图1 涂层的残余应力分布

结果表明,涂层中残余应力峰值在表面。因此,不仅界面结合处,熔覆层内部也容易出现开裂。而陶瓷相作为高熔点硬质相,往往是产生裂纹的薄弱环节。通常颗粒表面吸附了一层气体,阻碍它与基体的结合。当颗粒体积分数较大时,越过某一临界值,颗粒外吸附的气体将促使颗粒桥接,更不利于颗粒与基体的结合<sup>[15]</sup>。WU等<sup>[16]</sup>的研究表明,激光熔覆金属陶瓷时,随陶瓷相含量的增加,存在一个裂纹率的峰值。笔者认为,为防止开裂,一方面在满足性能条件的基础上,应控制陶瓷相的数量,并尽量使其均匀细小的分布于金属粘结相中。另一方面,可选择加入低熔点、高膨胀系数的陶瓷材料,如CaO,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ 和 $\text{ZrO}_2$ 等,使其与金属粉末有较好的相容性和匹配性。

**2.3.2 采用中间过渡层或梯度涂层** 在基体与熔覆层中间设置一过渡层,即采用抗裂性强且与基体匹配较好的粉末做底层,可使硬度较高的熔覆层与基体间有较好的应变协调能力<sup>[17,18]</sup>。常采用Ni基合金作为过渡层,这是因为Ni基合金韧性较好,且导热率、热膨胀系数与Fe相近,有利于降低温度梯度引起的热应力。此外,Ni与Fe可在界面处形成固溶体,提高结合强度<sup>[19]</sup>。近几年,在涂层结构设计方面引入了梯度材料设计中的有关理论。梯度涂层亦称成分渐变涂层,其组成与性能沿厚度连续梯度变化,使金属基体与陶瓷相涂层间无明显界面,保证了应力由表及里均匀传递。但成分渐变涂层制备中还存在一些问题,如难以精确控制涂层成分按理论设计变化,难以应用于大尺寸零件等。过渡层的制备也增加了技术复杂性,提高了成本。

**2.3.3 添加合金元素,提高强韧性** 在熔覆层中添加一种或几种合金元素,在满足其性能的基础上,增加韧性相,是抑制裂纹产生及扩展的一种有效方法。GREZEV等<sup>[20]</sup>曾在Ni-Cr-B-Si合金中分别加入质量分数为3%的FeV, FeTi, FeSi合金,发现熔覆层中韧性相 $\gamma$ 明显增加,其开裂敏感性也显著下降。SONG等<sup>[21]</sup>的研究表明,Fe基合金中加入Ni, Co能提高熔覆层的塑韧性,随Ni含量的变化,覆层搭接区的结晶方向发生了变化而导致裂纹走向与激光扫描方向的夹角减小,直至裂纹消失。由此进一步提出通过控制结晶方向减少覆层开裂敏感性的方法。通常,涂层中加

入低熔点的Ni, Co和活性金属如Ti及其化合物可使界面获得良好的润湿性。

激光熔覆层中加入适量的稀土元素及其氧化物也可以优化组织,提高性能。研究表明<sup>[11]</sup>,陶瓷涂层中加入 $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , CaO和MgO等稀土氧化物会使重熔层的裂纹减少,且抗拉强度、断裂韧性及热循环寿命有所提高。ZHANG等<sup>[22]</sup>分析了添加质量分数为4%  $\text{CeO}_2$ 后激光熔覆质量分数为20% WC + NiCrBSi复合涂层的显微结构,发现涂层总的主项 $\gamma$ -(Fe, Ni)晶粒得到细化。归纳起来,稀土及其氧化物主要作用:(1)可有效促进涂层材料中Si等元素发生脱氧造渣反应;(2)可减少残渣与熔体的表面张力,促进熔体对流,使残渣迅速上浮到熔池表面,隔绝与大气的接触,防止氧化;(3)有利于提高熔覆合金的结晶形核率,细化晶粒,提高熔覆层的强韧性。

**2.3.4 采用原位反应自生陶瓷涂层** 近年来,结合原位反应技术兴起的激光熔覆自生陶瓷涂层为激光熔覆陶瓷涂层注入新的活力。原位反应技术是通过自生反应放热,各元素或组元间原位合成化合物,这些化合物可以是硼化物、碳化物、氮化物、氧化物、金属间化合物或是它们的任何组合<sup>[15,23]</sup>。从而实现了陶瓷相在基体内原位合成。克服了传统加入方法中陶瓷相和基体间润湿性差、结合力弱等缺点,也避免了陶瓷相作为增强相的同时又是裂纹产生的根源,使基体与陶瓷相之间界面干净,且陶瓷相组织均匀细小。ZHOU等<sup>[24]</sup>1992年在铝基体上激光熔覆 $\text{SiO}_2$ 粉,使 $\text{SiO}_2$ 与Al反应生成 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 复合陶瓷涂层,其与 $\text{SiO}_2$ 反应放出的热量又进一步帮助反应的进行,得到无裂纹的薄熔覆层(厚度小于0.1mm)。激光熔覆自生TiC颗粒增强钛基复合材料也是近年来研究较多的材料。ZHANG等人<sup>[25]</sup>选择涂层材料为钛粉和 $\text{C}_2\text{F}_4$ 粉末,粒径为 $60\mu\text{m} \sim 70\mu\text{m}$ ,选择合适的激光工艺参数,可使钛粉与 $\text{C}_2\text{F}_4$ 粉末全部转化为TiC,粉末平均尺寸小于 $1.5\mu\text{m}$ ,熔覆层晶粒细小,与基体呈良好的冶金结合。

## 2.4 合理选基体

图1还表明,残余拉应力峰值也可能出现在基体中。因此,除熔覆层外,基体对裂纹的影响也不可忽视。这可从基体材质、表面状况及体积形状等方面加以讨论。

由熔覆层热应力公式(1)式可知,当基材的热膨胀系数大于熔覆层时,熔覆层整体承受残余压应力,这有利于降低熔覆层的开裂敏感性。但如果基材的热膨胀系数过大,会在基材表面及内部形成残余拉应力。基于以上分析,基材的热膨胀系数应比熔覆材料的膨胀系数略大一些。计算熔覆层与基材的热膨胀系数差值 $\Delta\alpha$ 的合理范围为<sup>[26]</sup>:

$$-\sigma_2(1-\nu)/(E\Delta T) < \Delta a < \sigma_1(1-\nu)/(E\Delta T) \quad (2)$$

式中,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  分别为熔覆层与基材的抗拉强度, 其它同 (1) 式。

基体表面的缺陷与残余应力将影响熔覆层的凝固过程及应力状况。其缺陷如微裂纹都有可能在熔覆的激冷过程中扩展到熔层而形成熔覆层裂纹的源头。故基体的熔覆加工面应尽量平整、光滑、组织均匀无缺陷。

激光熔覆的特点是熔覆层升温快、温度高。激光束移开后, 熔层又因基体传热而激冷, 基体的体积越大, 热容量就越大, 熔层向基体传热和冷却速度就越快, 从而增大开裂倾向。可见基体体积不宜过大。基体的形状结构也会影响基体传热时的热循环过程, 从而影响温度梯度的分布而改变熔层的应力状况。复杂的形状结构, 如尖角、拐弯处易引起应力集中而出现裂纹。此外基体结构的对称性也很重要。WANG 等<sup>[5]</sup>在阀门零件的阀瓣密封面与阀座密封面上激光熔覆时发现, 后者由于对称性差, 热应力分布不均匀而开裂几率明显增大。因此基体的形状结构以简单、对称为好。

### 3 结束语

激光熔覆是一个复杂的物理、化学和冶金过程, 而裂纹现象和行为则牵涉到激光熔覆的几乎每一个因素。因此, 裂纹的控制应考虑各种因素的综合影响。

随着计算机技术的迅速发展, 激光熔覆过程的数值模拟成为可能。通过对熔覆过程的温度场、流场及残余应力场的数值模拟, 可实现对激光熔覆过程的准确把握和控制。这需从理论上作进一步研究, 如建立相应的物理和力学模型, 包括热流模型、传热方式及边界条件等; 建立较完善的材料物理性能的数据库; 对熔覆组织作定量研究, 提取其特征参数, 如各项的体积分数、形貌、晶粒度大小等。在此基础上还需要大量的实验研究来检验和确定, 以指导生产应用。激光熔覆过程的数值模拟无疑将成为未来裂纹控制的有力手段。

### 参 考 文 献

- [1] MCPHERSON R A. Review of microstructure and properties of plasma sprayed ceramic coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1999, 39(40): 173~182.
- [2] LIU Y, MAZUMDER J, SH BATA K. Microstructural study of the interface in laser-clad Ni-Al bronze on Al alloy AA33 and its relation to cracking [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 1995, A26(8): 1519~1533.
- [3] CARVALHO P A. Laser alloying of Zinc with aluminum: solidification structures [J]. *Surface & Coating Technology*, 1997, 91(12): 158~166.
- [4] CHEN J, YANG H O, LI Y M *et al*. The research on two kinds of cracking behavior and mechanism of cladding in rapid laser forming process [J]. *Applied Laser*, 2002, 22(3): 300~304 (in Chinese).
- [5] WANG X L, QI H B. Study on crack control of layer during laser cladding sealing surface of petrochemical valves [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(5): 359~363 (in Chinese).
- [6] SINGH J, MAZUMDER J. Microstructure and wear properties of laser clad Fe-Mn-C alloys [J]. *Metallurgical Transactions*, 1987, 18(5): 313~318.
- [7] LUAN J F. Effect of processing factors on crack ration of laser clad layer [J]. *Material Science and Engineering*, 2002, 20(3): 349~353 (in Chinese).
- [8] XIE Ch Sh, WANG A H, HUANG K J. Fomation of cracks on laser cladded cast iron surface [J]. *Iron and Steel*, 1994, 29(8): 48~51 (in Chinese).
- [9] CHEN Ch Zh, WANG D G, LEI T Q. Structure characteristic of laser clad ceramic and its composite coatings [J]. *Laser Technology*, 2001, 25(6): 401~405 (in Chinese).
- [10] ZHOU X B, De HOSSON J T M. A reaction coating on aluminium alloys by laser processing [J]. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1993, 28(10): 219~224.
- [11] CHEN Ch Zh, LEI T Q, BAO Q H *et al*. Problems and the improving measures in laser remelting of plasma sprayed ceramic coatings [J]. *Materials Science and Technology*, 2002, 10(4): 431~435 (in Chinese).
- [12] McDONALD G, HENDRICKS R C. Effect of thermal cycling on  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$  thermal barrier coatings [J]. *Thin Solid Films*, 1980, 73(10): 491~496.
- [13] PLOZ M. Residual stress induced by laser coatings: phenomenological analysis and predictions [J]. *Material Science*, 1992, 27(2): 120~124.
- [14] ZHU B L, HU M L, CHENG L *et al*. Research status of cracking in laser cladding layer [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2000, 25(7): 1~4 (in Chinese).
- [15] PAIB C. Role of magnesium in cast aluminum alloy matrix composites [J]. *Material Science*, 1995, 30(6): 1903~1911.
- [16] WU X W, ZENG X Y, ZHU P D *et al*. Cracking tendency of laser cladding Ni-based WC composite coatings [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, 24(6): 570~576 (in Chinese).
- [17] CHEN Ch Zh, WANG H Zh, CAO H H *et al*. Properties of brittleness and abrasion of laser cladded  $Al_2O_3$ -NiCrAl composite ceramic coatings [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1999, 25(9): 841~846 (in Chinese).
- [18] CHEN Ch Zh, CAO H H, LEI T Q *et al*. Structure and properties of laser cladded  $Al_2O_3$ -CoCrAlY composite ceramic coatings on W18Cr4V steel [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 1999, 27(4): 445~451 (in Chinese).
- [19] LIU Q B, ZHU W D, CHEN J. A method of improving laser cladding Fe-based alloy coating on high temperature alloy [J]. *Journal of Guizhou University of Technology*, 2000, 29(5): 56~59 (in Chinese).
- [20] GREZEV A N, SAFONOV A N. Cracking and microstructure of laser deposited chromium-boron-nickel alloy [J]. *Welding International*, 1987, 22(1): 50.
- [21] SONG W L, ZHU P D, GAN C H *et al*. Effects of crystallizing orientation on crack direction and cracking sensitivity in laser cladded layers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1995, 22(4): 309~312 (in Chinese).
- [22] ZHANG Y M. Finite element analysis of a thermally baded interface crack in a ceramic coating [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1998, 59(2): 203~214.
- [23] WANG Zh, LIC, MENG X P *et al*. Microstructure and properties of in situ TiC particulate reinforced Al-Si alloy composite [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1994, 30(1): 39~44.

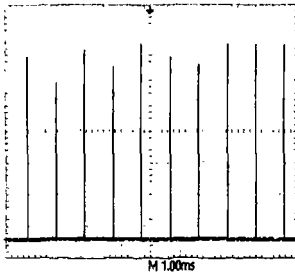


Fig 4 1.57 $\mu$ m OPO laser pulses

OPO的系列脉冲,可看出与通常的声光 $Q$ 开关激光器一样有一定程度的起伏。

在内腔单谐振 OPO (简称 DPO)中,OPO 谐振腔置于抽运源谐振腔内,OPO 与其抽运源二者是紧密相关的,故此 DPO 的动态特性十分复杂,无解析解。近年,法国的 DEBU ISSCHERT 等人提出了 DPO 的较简单模型<sup>[9]</sup>。DPO 和抽运激光器的动态特性是相关的,在 OPO 建立时间内,抽运能量逐渐增大,当抽运能量超过 OPO 阈值,光参变过程发生,而抽运能量被迅速倒空,直至抽运能量低于 OPO 阈值,这样产生一个信号脉冲,如果输出镜反射率太高,反转粒子数不能在一个脉冲内完全耗尽,则会不断重复光参变过程,直到所有反转粒子数完全耗尽,形成一串信号光脉冲即多脉冲。由于实验条件所限,没有高反射率输出镜,实验未观察到多脉冲现象。同时,输出透过率的大小也影响到 OPO 的阈值和 OPO 的建立时间,OPO 输出的脉宽与抽运脉宽有关<sup>[10]</sup>,也与输出镜透过率有关,这一点可以由前面的实验结果得到验证。在一定的重复频率和抽运功率密度条件下,通过实验可确定一个较佳的输出透过率,兼顾 OPO 脉宽和输出功率,以获得较高的信号光输出峰值功率。

内腔式 OPO 具有 OPO 建立时间短,OPO 参变转换效率高的优势,但腔内光功率密度高,且不易控制,易引起光损伤,在高重频条件下运转时更是如此,如何克服光损伤是高功率器件设计的关键,在 OPO 谐振腔设计时,需要注意选择合适的参数并采取有效的措施以避免光损伤。该实验装置有效地克服了光损伤,获得较高峰值功率的高重频人眼安全激光输出。

### 3 结 论

采用连续激光二极管抽运 Nd YAG 抽运模块和声光 $Q$ 开关,设计了较为紧凑高重频内腔 1.57 $\mu$ m 人眼安全光参变振荡器,初步的实验结果表明,连续激光二极管抽运声光 $Q$ 开关内腔光参变振荡器是获得高重频(特别是几十千赫兹重频)人眼安全激光的一种有效途径,在激光雷达等领域有着更广泛的应用前景。下一步准备提高器件脉冲重复频率(接近 100 kHz),对器件结构及激光谐振腔及输出透过率等诸参数进行优化设计和实验,进一步提高输出峰值功率和总的光效率,推动和促进高重频人眼安全激光的应用。

### 参 考 文 献

- [1] J N F, GONG M L, SHI Sh S *et al* Design considerations for 1.5X $\mu$ m eye-safe laser rangefinders [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 1998, 9(5): 439~441 (in Chinese).
- [2] ZENDZIAN W, JABCZYNSKI J K, KW ATKOWSKI J. Intracavity optical parametric oscillator at 1572nm wavelength pumped by passively  $Q$ -switched diode-pumped Nd YAG laser [J]. Appl Phys, 2003, B76(3): 355~358.
- [3] ZENDZIAN W, JABCZYNSKI J K, KW ATKOWSKI J. Passively  $Q$ -switched diode-pumped Nd YAG laser with intracavity optical parametric oscillator [J]. SPIE, 2003, 5036: 96~101.
- [4] MARSHALL L R, HAYS A D, KASANSKI J *et al* Highly efficient optical parametric oscillators [J]. SPIE, 1991, 1419: 141~152.
- [5] CHEN Y F, CHEN S W, TSAI S W *et al* High-repetition-rate eye-safe optical parametric oscillator intracavity pumped by a diode-pumped  $Q$ -switched Nd YVO<sub>4</sub> laser [J]. Appl Phys, 2003, B76(2): 263~266.
- [6] CHEN Y F, CHEN S W, TSAI S W *et al* Output optimization of a high-repetition-rate diode-pumped  $Q$ -switched intracavity optical parametric oscillator at 1.57 $\mu$ m [J]. Appl Phys, 2003, B77(3): 505~508.
- [7] DUBOISA, VICTORIS, LEPINET *et al* High-repetition-rate intracavity eye-safe optical parametric oscillator [J]. Appl Phys, 1998, B67(2): 181~183.
- [8] J N F, SHI Sh S, LI J *et al* All solid state eye-safe optical parametric oscillators [J]. Laser Technology, 2002, 26(3): 201~203 (in Chinese).
- [9] DEBU ISSCHERT T, RAFFY J, POHELLE J P. Intracavity optical parametric oscillator: study of the dynamics in pulsed regime [J]. JOSA, 1996, B13(7): 1569~1587.
- [10] J N F, SHI Sh S. Optimum pump pulse duration for eye-safe optical parametric oscillators [J]. Laser Journal, 2001, 22(6): 36~37 (in Chinese).

(上接第 19 页)

- [24] ZHOU X B, De HOSSON J T M. A reaction coating on aluminum alloy by laser processing [J]. Scripta Metallurgica, 1993, 28(9): 219~231.
- [25] ZHANG S, ZHANG Ch H, WANG M C *et al* The wear property of Ti-based composite produced by laser cladding [J]. Journal of Metall-

- urgica, 2001, 37(3): 315~320 (in Chinese).
- [26] SONG W L, ZHU P D, ZHANG J *et al* The effects of expansion coefficient of laser cladding layer on cracking sensitivity [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1999, 27(1): 42~44 (in Chinese).