

文章编号 : 1001-3806(2002)05-0359-05

## 激光熔覆石化阀门密封面熔覆层裂纹控制的研究

王新林

漆海滨

(南华大学电气工程学院,衡阳,421001)

(国防科技大学理学院,长沙,410073)

石世宏

(南华大学机械工程学院,衡阳,421001)

**摘要:** 采用 5kW 横流 CW CO<sub>2</sub> 激光器,对不同基体材料的石化高参数阀门密封面进行激光熔覆,所用合金粉末为 CoCrWB 与 NiCrFeBSi 合金粉末。在研究解决了厚层单道熔覆裂纹问题基础上,得到了厚 2mm ~ 3.5mm,表面平整、无质量缺陷的激光熔覆层。结合激光熔覆阀门零件的试验研究,分析探讨了影响熔覆层,特别是厚层熔覆层裂纹形成的各种因素及其综合影响,提出了关于建立判断熔覆层裂纹形成的应力判据模型的思路。

**关键词:** 激光熔覆;石化阀门密封面;熔覆层裂纹;应力判据

**中图分类号:** TG665 **文献标识码:** A

## Study on crack control of layer during laser cladding sealing surface of petrochemical valves

Wang Xinlin<sup>1</sup>, Qi Haibin<sup>2</sup>, Shi Shihong<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Nanhua University, Hengyang, 421001)

(<sup>2</sup> Institute of Science, National University of Defence Technology, Changsha, 410073)

(<sup>3</sup> Department of Mechanical Engineering, Nanhua University, Hengyang, 421001)

**Abstract:** This paper investigates laser cladding the sealing surface of high parameter petrochemical valves with 5kW transverse flow CW CO<sub>2</sub> laser. The base metal of valves is various, and the cladding powder is CoCrWB or NiCrFeBSi powder. A 2mm ~ 3.5mm thick layer of laser cladding with smooth surface and non-flaw can be made, based on solution of crack problem of cladding layer by a single scanning and thick cladding. Various elements and their interaction which influence the formation of crack in laser cladding layer, especially of thick layer, and control of crack are discussed and analyzed according to the experiments. The thought of building a model of stress judgement to judge the formation of crack in cladding layer is put forward.

**Key words:** laser cladding; sealing surface of petrochemical valve; crack of cladding layer; stress judgement

### 引 言

激光熔覆技术以其特有的技术优势,已成为材料表面工程领域研究与应用的热点,但目前国内工业应用实例不多<sup>[1,2]</sup>。笔者在进行激光熔覆试验时,发现熔覆层裂纹是影响其质量的主要缺陷,特别对用于有受载要求的工件表面(如高参数石化阀门密封面)的厚层激光熔覆层,裂纹经常难以控制。下面将结合激光熔覆高参数石化阀门零件的试验过程,对激光熔覆层的开裂行为及影响因素从熔

覆工艺、覆层材料、基体因素等方面作一分析,并探讨这些因素的综合影响,提出关于建立激光熔覆层裂纹问题应力判据模型的思路,为激光熔覆的质量控制提供参考。

### 1 试验方法

激光熔覆的加工对象为石化用截止阀与组合阀(通径为  $\varnothing 8\text{mm}$ ,  $\varnothing 65\text{mm}$ ,  $\varnothing 105\text{mm}$ ,  $\varnothing 130\text{mm}$  4 种)零件上的密封面。试验用试块厚 10mm ~ 20mm,阀瓣模拟件为圆柱形( $\varnothing 50\text{mm}$  ~  $\varnothing 100\text{mm}$ ),阀体模拟试件是三通状。熔覆面为平面环形。零件、试块、模拟件的材料有 1Cr18Ni9Ti, Cr18Ni12Mo3Ti, 2Cr13, 45 钢,铸钢。熔覆合金粉末为 NiCrFeBSi 和 CoCrWB 等自熔性合金粉末。采

\* 湖南省自然科学基金项目。

作者简介:王新林,男,1970 年 5 月出生。讲师。现从事光电检测、激光与物质相互作用的教学与科研工作。

收稿日期:2001-07-12;收到修改稿日期:2001-12-31

用预置粉末法,粘接剂为 2123 酚醛树脂。

选用 5kW 横流 CW CO<sub>2</sub> 激光器,在试件的合金涂层上进行单道或多道环形扫描与直线扫描。试件由 MNC801 数控回转工作台和三维数控工作台驱动。预置层粉末厚度 2mm~4mm,熔覆工艺参数为激光功率  $P=2.5\text{kW}\sim 4\text{kW}$ ,扫描速度  $v=3\text{mm/s}\sim 8\text{mm/s}$ ,光斑尺寸  $\varnothing 5\text{mm}\sim \varnothing 8\text{mm}$ 。

用莱茨 ORTHOPLAN 偏光显微镜, SX-40 型扫描电镜对阀门试件熔覆层取样作金相组织分析、晶粒度评定和微观形貌观察;用 HZG4-PC X 射线衍射仪 J C X A-733 电子探针进行熔覆层物相、成分分析。

## 2 试验分析

研究中,在进行高参数石化阀门的大功率激光熔覆时,对激光熔覆层的开裂行为及影响因素从熔覆工艺、覆层材料、基体因素等方面做了分析,并试验研究了这些因素的影响。

### 2.1 熔覆工艺的影响

激光熔覆工艺参数中的功率  $P$ ,扫描光斑宽度  $b$  和扫描速度  $v$  是决定合金熔覆层吸收比能与传入基体的热量大小的主要参数,也是激光熔覆过程中的主要可控参数。激光熔覆比能  $E=P/bv=E_1+E_2$ <sup>[3]</sup>( $E_1$  为激光熔化粉末涂层所需的比能量; $E_2$  为激光加热和微熔基体表层所消耗之比能),对厚层熔覆而言,涂层熔化的比能  $E_1$  不可再忽视。

图 1 为 Ni 基自熔合金在 1Cr18Ni9Ti 基材上熔覆后在互熔结合区的形貌,其主要熔覆参数标注于图上。其中图 1a 为输入比能偏低的情况,可见覆层和基体没有形成良好的冶金结合,结合面还有缺陷存在;图 1b 图所示在结合面为一平直细窄的白色亮带,说明形成了良好的冶金结合,输入比能比较合适;图 1c 为输入比能偏大的情况,可见结合区加宽,熔覆层与基体的互扩散严重,稀释较大;图 1d 所示为厚熔覆层的状况,虽然输入比能不小,但在结合区出现了较严重的缺陷。图 1a 和图 1d 所示的缺陷均可成为裂纹源。这说明输入比能越大,熔覆层出现裂纹等缺陷的几率越小,但会使熔覆层的稀释率加大,晶粒变粗,硬度降低。

同时,激光熔覆由于加热冷却速度极快,熔池寿命很短,常使熔池中可能存在的杂质、气体来不及上浮析出,很容易成为裂纹源。另外,熔覆层在瞬间凝固结晶,凝固缺陷增多,并伴有微区成份不均,造成局部热脆性增大,成为应力释放突破口,开裂敏感性

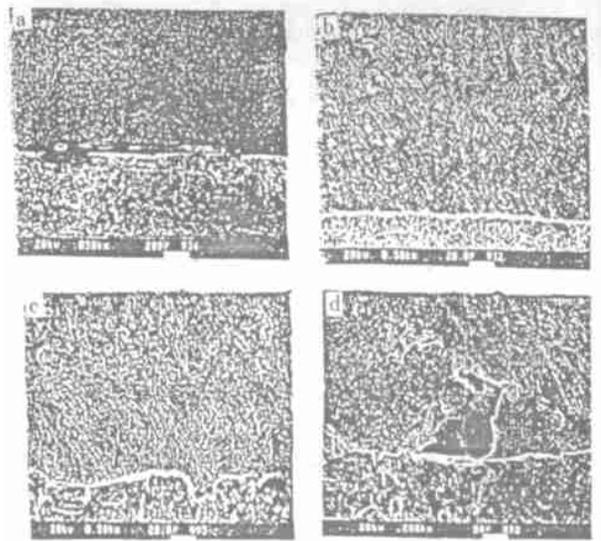


Fig. 1 Microstructure of bonding zone of layer cladded by laser with different layer thickness and various parameter

a -  $D=2\text{mm}$ ,  $P=2.5\text{kW}$ ,  $b=6\text{mm}$ ,  $v=10\text{mm/s}$

b -  $D=2\text{mm}$ ,  $P=2.5\text{kW}$ ,  $b=6\text{mm}$ ,  $v=6\text{mm/s}$ ,  $500\times$

c -  $D=2\text{mm}$ ,  $P=2.8\text{kW}$ ,  $b=6\text{mm}$ ,  $v=6\text{mm/s}$ ,  $500\times$

d -  $D=3.5\text{mm}$ ,  $P=3\text{kW}$ ,  $b=6\text{mm}$ ,  $v=3.5\text{mm/s}$ ,  $200\times$

也就增大。覆层越厚,以上情况就越明显。笔者在加大功率密度、减慢扫描速度方面作了一些试验,目的在于延长熔池的寿命,增大能量输入,起到了一些好的效果,但基于稀释度与组织形态效果的原因应适度控制。采用二次扫描方法也有一定效果,即在第一次扫描后的熔层上连续再扫描一次。这对均匀组织成分、排除杂质、平整表面、消除缺陷有一定用处。反复多次发现,一次扫描后出现的微裂纹在第 2 次扫描后消失了,而对于覆层硬度、晶粒度影响甚微。

### 2.2 覆层材料的影响

目前,国内尚无商品化的专用于激光熔覆的合金粉末,较多是采用热喷涂或热喷焊用的自熔性合金粉末,自熔性元素一般为 B 和 Si,且 B、Si 含量均较高。众所周知,B、Si 和 C 含量的增加都能生成硬质相,从而提高熔覆层硬度,但导致塑性下降,降低熔层抗裂性。另外,B、Si 在产生脱氧、造渣、除气和润湿界面的作用的同时,B 和 Si 在 Ni 基合金中极易产生偏析<sup>[4]</sup>,在熔覆层快速冷却凝固过程中,当覆层凝固收缩时,易产生结晶裂纹。所以,在满足性能的要求下应尽量降低 B、Si 的含量严格来说,现在用热喷焊粉末进行激光熔覆是不尽合理的,本研究采用了自行设计的 NiCrFeBSi 和 CoCrW 合金粉末获得了较好效果。

在覆层材料方面还有一种控制覆层开裂的方法

是引入过渡层,即采用抗裂性强,与基体匹配较好的粉作末底层,此层较薄,激光熔覆后,再在其上熔覆能满足使用要求的上层,采用这种二次铺粉和熔覆的方法在不同基体上都有成功的例子,但增加了工序,且技术更复杂,粉末利用率低,成本增加。

### 2.3 基体的影响

在研究中发现,大功率激光熔覆过程中,基体对熔层裂纹的影响大而复杂。下面从基体材质、表面状况、热容量大小及基体的形状结构等角度分别加以讨论。

**2.3.1 基体材质** 在本研究的熔覆过程中,选用几种钴基与镍基合金粉末分别在 1Cr18Ni9Ti, 2Cr13, 碳钢、铸钢、铸铁上做熔覆试验。经检测与统计分析发现:按以上顺序,熔层开裂倾向依次增大。由以上材料的热物理性质,可见基体材料膨胀系数越小,覆层开裂倾向越大。据此可以分析:熔层在激光束作用时处于熔化状态,基体表面微熔,此时从熔池到基体,由表及里形成一温度梯度,并出现不同程度的热膨胀。当激光束移开后,熔层速冷并开始收缩,基体热影响区也开始降温并收缩。此时膨胀系数越大,冷却收缩也越大,当基体结合层收缩大于覆层收缩时,覆层受压应力作用,反之受拉应力作用。如果在固态或准固态下,覆层受拉应力作用而达到覆层在此温度下的强度极限时覆层将被拉裂。基于以上分析,基体材料的热膨胀系数比熔覆材料的膨胀系数略大一些的好。

**2.3.2 基体表面状况** 基体表面的缺陷与残余应力都将影响熔层的凝固过程及应力状况。其缺陷如微裂纹等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最好为平整、光滑、组织均匀、无残余应力、无缺陷。

**2.3.3 基体热容量** 激光熔覆的特点之一就是熔覆层升温快、温度高,激光束移开后,熔层因基体传热而激冷。那么基体质量、体积越大,热容量越大,熔层向基体传热速度快,熔层冷却越快。此时熔层的应力可能越大,开裂倾向也增大。

基体采用预热和缓冷处理,是避免裂纹的有效措施之一。基体预热实际上是通过预加温降低了熔覆面由里及表的温度梯度,也即减缓了覆层的冷却速度,从而防止凝固过程中热裂倾向。熔覆处理后的保温与缓冷对减少覆层残余应力、抑制熔层冷裂纹有一定的作用。但是预热与缓冷处理会削弱激光快速加热和快速冷却的技术优势,将会使覆层组织粗化、晶粒增大、硬度降低,从而耐磨、耐腐蚀性能下

降。图 2 为 Ni 基合金激光熔覆层中下部组织形貌。其中图 2a 所示为未作任何预热、保温缓冷处理,其晶粒度为 10 级,硬度为 HRC54;图 2b 所示为预热温度 600℃,熔覆后未作保温缓冷处理,其晶粒度为 9~10 级,硬度为 HRC50;图 2c 所示为预热 600℃,熔覆后又随炉 500℃ 缓冷,16h 后取出空冷,测得其晶粒度为 8 级,硬度为 HRC42。由此可见,预热对熔覆层硬度与晶粒度影响相对要小些,而保温、缓冷则明显使硬度降低,组织变粗大。一般采用 300℃ 以下温度保温和缓冷才不致于对硬度、晶粒度产生太大的影响,预热温度也以不超 600℃ 为宜。



Fig. 2 Microstructure of laser cladding layer treated with preheating or slowly cooling at different temperature, 250 $\times$

**2.3.4 基体形状与结构** 基体的形状与结构对激光熔覆过程中裂纹形成的影响,主要是不同的形状结构会影响基体传热时的热循环过程<sup>[5]</sup>,从而影响温度分布和温度梯度分布,进而改变熔层的应力状况。复杂的形状与结构容易引起应力的集中,而出现裂纹。基体的形状、结构尽量以简单为好,尖角、拐弯处极易产生裂纹。

基体结构的热对称性也很重要,一些试样块、模拟件和一些简单零件由于它们的外形结构简单,对称性好,所以在熔覆时热应力分布均匀,开裂性很小。但在一些形状结构不那么规则的零件上,开裂几率就明显增大。笔者在阀门零件的阀瓣密封面与阀座密封面上进行熔覆时发现,后者由于形状结构复杂,对称性差而开裂几率大得多。阀瓣、阀座结构如图 3a、图 3b 所示。图 3c 为试验用阀座模拟件。

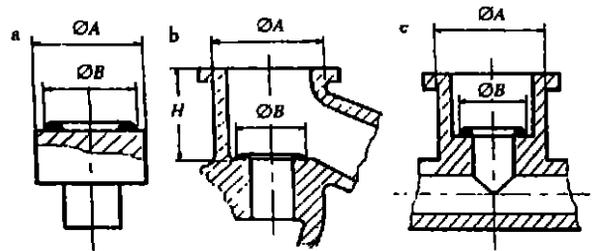


Fig. 3 Sketch map of parts clad by laser with different structure a - valve clack b - valve seat c - simulator of valve seat

消除基体形状结构复杂对熔层裂纹影响的措施之一是,研究使用实时光束变换系统进行激光功率密度分布的实时变化控制<sup>[5]</sup>来平缓因不同热循环

而造成的应力不均状况,以抑制裂纹的出现,这是激光熔覆乃至整个激光处理技术研究发展的方向之一。但对激光熔覆区域远小于加工面其余面积的情况,此方法的作用会受到限制。

### 3 激光熔覆层裂纹控制的理论探讨

在激光熔覆中,相对而言输入基体的能量极少,一般不致引起基体变形,熔覆后残余应力相对较小,因此,由残余应力引起冷裂纹的情况极少。熔覆层出现裂纹主要由上述的凝固裂纹和高温低塑性裂纹

形成,影响熔覆层裂纹形成的因素极其复杂。

激光熔覆裂纹产生的充分条件是热应力的作用,裂纹控制中,一方面要优化合金粉末成分,减少杂质,尽量使其热物性和膨胀系数与基体匹配,同时控制好熔层合金的微观组织,提高熔层合金的强韧性与均匀性;另一方面就是要设法降低热应力的作用并均匀其分布。结合激光熔覆的理论及试验分析,借助传热学、凝固学与凝固技术及热弹性力学的理论,就可试图建立关于判断熔覆层裂纹形成或抑制的应力判据模型,如图4。

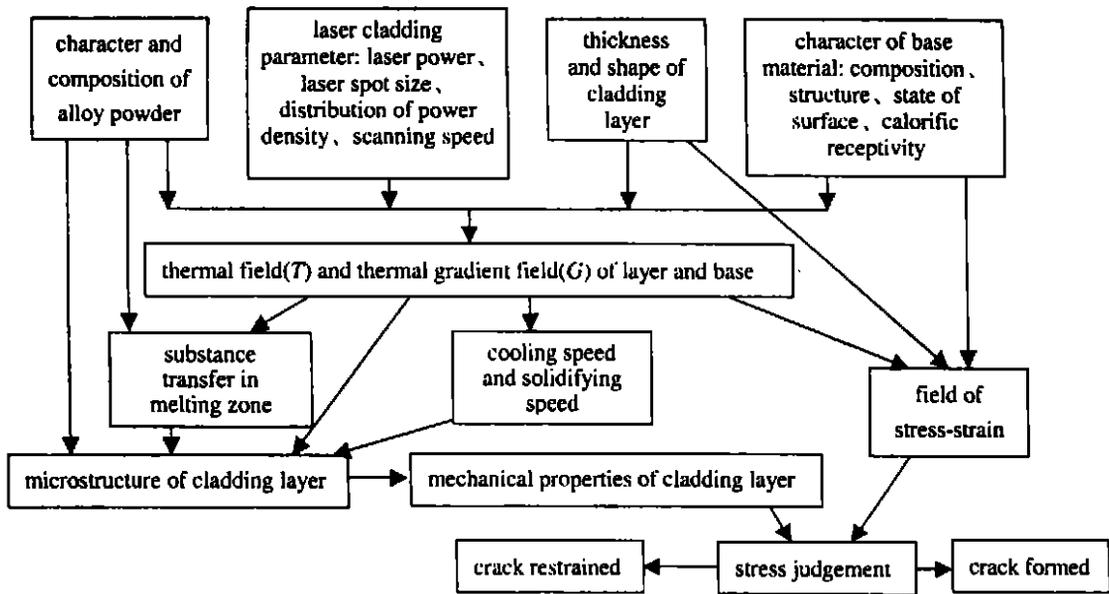


Fig. 4 Model of stress judgement and parameters and their interaction of laser cladding

这一模型的理论计算与数值模拟的思路可大致分析如下。

(1) 由激光加热与热传导理论<sup>[3,6]</sup>求解热传导方程: 
$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q(x, y, z, t)$$
 ( $k, \rho, c$  分别为材料的导热系数、密度和比热容;  $q(x, y, z, t)$  为单位时间单位体积输入的激光能量) 得到熔层与基体的温度场  $T(x, y, z, t)$  及温度梯度场  $G(x, y, z, t)$ 。这是整个模型理论计算的核心与基础。这一过程也是最为复杂的,尤其是其热传导方程一般均需采用三维的形式才能完全描述,且初始条件与边界条件的简化与确定难度大,几乎所有与激光熔覆有关的工艺参数均对此过程有直接影响。

(2) 由温度场及温度梯度场确定冷却速度

$$\dot{T}(x, y, z, t) = \frac{\partial T}{\partial t} \text{ 与凝固速度 } R = \dot{T} / G。$$

(3) 由激光熔池的对流传质理论<sup>[7]</sup>,即由激光

熔池的连续方程、运动方程与能量方程联立,由合金粉末成分与特性及已求得温度场与温度梯度场确定的初始与边界条件来求得熔体的对流状态。

(4) 由凝固学与快速凝固技术的理论<sup>[8]</sup>,根据熔层粉末成分,熔池对流状态及结晶参数预测熔层的微观组织,再由材料科学,特别是金属材料学的成果,得到熔层固态与准固态(熔层凝固过程中刚刚具备强度的状态)的高温力学性能,主要指抗拉强度。

(5) 根据热弹性力学理论<sup>[9]</sup>,由熔层与基体的温度场及基体与熔层的特性求解熔层与基体中的应力-应变场。

(6) 通过上述过程求解得到的熔层力学性能与其所受的应力的对比,即可得出裂纹形成或抑制的结果。一旦结果是形成裂纹则要在兼顾熔层性能要求的前提下调整主要可控参数,再经数值模拟过程达到抑制裂纹、指导生产的目的。

### 4 试验结果

本研究经过多次的参数调整与优化,最终得到

了厚层单道激光熔覆的较理想的熔覆效果.得到了厚 2mm ~ 3.5mm、表面平整光滑的合金熔覆层,对零件熔覆层进行内部质量超声无损检测表明熔层无裂纹、气孔、夹杂等缺陷。且熔层微观组织细密均匀,经测试,熔层耐磨、耐蚀、耐高温冲击性能优良。并将其中的石化高参数阀门应用于生产,获得良好的效果。图 5 是激光熔覆处理好的阀零件。

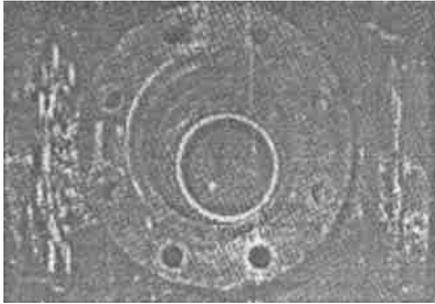


Fig. 5 Part of petrochemical stop-valve with sealing surface clad by laser

## 5 总 结

由以上试验分析与理论探讨可得到以下结论:

(1) 激光熔覆层的裂纹问题极其复杂,裂纹形成的影响因素可归结为熔覆工艺、覆层材料、基体因素 3 个方面。厚层熔覆层的裂纹抑制更为困难。

(2) 熔覆层裂纹的控制应考虑上述各种因素的综合影响,一方面优化熔层成分,控制好其微观组织,提高其强韧性与均匀性;另一方面要设法降低热应力的作用并均匀其分布。通过采用适当的工艺措施是能抑制熔层裂纹产生的。

(3) 目前,针对不同的具体熔覆过程,包括不同的覆层材料及厚度,不同的基体,乃至不同的基体形状结构,可在上述应力判据模型思路指导下,还需通过大量试验来确定最佳工艺参数以抑制裂纹的形成。

## 参 考 文 献

- [1] Riabkina Fishman M. High Temperature Materials and Processes, 1996, 15: 201 ~ 205.
- [2] 刘江龙, 邹至荣, 苏宝镛. 高能束热处理. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [3] Brass M. Laser materials processing. New York: North-Holland Publishing Company, 1983.
- [4] 高清宝. 阀门堆焊技术. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [5] 李俊昌. 激光热处理优化控制研究. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [6] Mukherjee K, Mazumder J. Laser processing of materials. Wash: American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc. 1985.
- [7] Anthony T R, Cline H E. J A P, 1977, 48(9): 3888 ~ 3893.
- [8] 大野笃美. 金属凝固学. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [9] 竹内洋一郎. 热应力. 北京: 科学出版社, 1977.

(上接第 358 页)

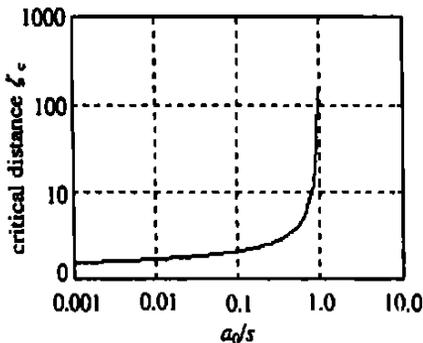


Fig. 4 The relation of  $L_c$  and  $a_0$

的表达式,其中,  $k_1$  和  $k_2$  分别为含  $s$  和  $a_0$  的常数,此时的  $(L_c, a_0)$  的表达式已不再是标准的双曲正弦型,而是一种准孤子型脉冲,这是一个非常重要的结论,因为  $s$  和  $a_0$  都是与输入脉冲有关的常数性参量,即可以根据输入脉冲的参量  $s$  和  $a_0$  来寻求到一种形如  $(L_c, a_0) = k_1 [\cos^2(m) + k_2]$  的准孤子脉冲,该脉冲的光冲击临界距离  $L_c$  为无穷大,这样就可以避免光冲击效应的出现,这方面研究在文献[6]中曾有报道,进一步验证了这种方法的可行性。

## 3 结 论

通过运用笔者提出的新型方法,分析了在高阶非线性条件下飞秒光孤子脉冲传输过程中的光冲击效应后,可以得到以下结论:(1) 即使色散存在的情况下,由于高阶非线性的作用,孤子脉冲依然会出现光冲击现象,而且同时有脉冲发生平移;(2) 光冲击效应的产生有个临界传输距离,小于该距离光冲击现象不会发生,并给出了该临界距离的表达式;(3) 从理论上论证了存在一种准孤子脉冲可以消除冲击效应,而使光冲击效应临界距离为无穷远。

## 参 考 文 献

- [1] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics. Quantum electronics principles and applications series. New York: Academic, 1989.
- [2] Alfano R R. The supercontinuum laser source. Berlin: Springer-Verlag, 1989.
- [3] Zhao W, Bourkoff E. IEEE J Q E, 1988, 24(2): 365.
- [4] De Oliverira J R. J O S A, 1992, B9(11): 2025.
- [5] Pelusi M D, Matsui Y, Suzuki A. Opt Lett, 2000, 25(5): 296.
- [6] 周国生, 李学敏, 薛文瑞 *et al.* 光学学报, 1999, 19(10): 1297.