

文章编号: 0258-7025(2009)05-1224-05

# 激光冲击过程中等离子体实际作用面积实验研究

张凌峰 任凤章 周合玉 熊毅

(河南科技大学材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471003)

**摘要** 为了研究激光冲击(LSP)过程中冲击波的实际作用面积,对涂敷新型吸收层的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷材料进行了冲击,通过烧蚀形貌的变化,分析了等离子体的横向膨胀效应对实际冲击过程的影响;通过对 0Cr18Ni9 奥氏体不锈钢,3A21 防锈铝合金的冲击过程,分析了变形面积及深度的变化,验证了对不同材料而言,等离子体的膨胀效应具有普遍意义。结果表明,等离子体的膨胀与约束层材料有着直接的联系,在目前普遍使用的 8 mm 直径的光束冲击下,若使用柔性约束,由于等离子体的膨胀,冲击波的实际作用面积直径约在 12 mm。

**关键词** 激光技术; 激光冲击; 等离子体; 实际作用面积; 横向膨胀; 柔性约束层

中图分类号 TB484.5; TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093605.1224

## Experimental Study on Actual Role Area of Plasma in Laser Shock Processing

Zhang Lingfeng Ren Fengzhang Zhou Heyu Xiong Yi

(School of Material Science and Engineering, Henan University of Science and Technology,  
Luoyang, Henan 471003, China)

**Abstract** For studying the actual action area of shock wave in laser shock processing (LSP), the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic materials have been impacted at new absorbing layer. The effect of horizontal inflation on actual shock processing is analyzed with the variety of ablation characteristic. The change of transforming area and depth is analyzed through the shock processing of 0Cr18Ni9 austenitic stainless steel and 3A21 antirust aluminum alloy, and the universality of the inflation effect is validated for different materials. It can be found that the inflation of plasma have direct contact with the material of confinement layer. The active function diameter of the shock wave is about 12 mm if the flexible coating is used with the light beam diameter of 8 mm.

**Key words** laser technique; laser shock processing; plasma; actual vole area; horizontal expansion; flexible confinement layer

## 1 引 言

在激光冲击(LSP)过程中,冲击波能量的产生是基于等离子体的爆炸过程的,所以冲击波能量的大小与等离子体的作用面积有直接的关系<sup>[1]</sup>。

以往的研究中,基本所有的计算都是使用激光束的截面积来代替等离子体的实际作用面积的。这样可以简化计算,特别是在玻璃约束层作用下,这一计算模式是可以获得与实际情况较近似的结果的<sup>[2~4]</sup>,冲击效果也比较符合。但随着激光冲击实

用化方向的研究,开始出现高分子约束层与水约束层等柔性约束层<sup>[5]</sup>,再使用以前的计算方法就会导致一定的偏差出现<sup>[6]</sup>。

在大量的实验过程中,发现约束层材料性质对等离子体的实际作用面积有较大的影响。在使用柔性约束层约束时,等离子体会出现不同程度的膨胀,从而使冲击效果出现较大的差别。除了约束层的刚性等问题<sup>[7]</sup>外,还有一个重要的原因在于不同的约束层改变了冲击波的实际作用面积。

收稿日期: 2008-05-13; 收到修改稿日期: 2008-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(50705038,50771042)资助课题。

作者简介: 张凌峰(1974—),男,讲师,博士,主要从事激光表面加工方面的研究。E-mail: zlf-601@sohu.com

## 2 实验材料及方法

使用的激光器为江苏大学强激光技术研究所的钕玻璃脉冲激光器,实验过程中使用相同的激光参数(脉冲能量 25 J;激光波长  $1.06\ \mu\text{m}$ ;脉冲宽度 23 ns;脉冲能量输出不稳定性  $\leq \pm 5\%$ ;光斑直径 8 mm)。

冲击试件分别为:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷, 0Cr18Ni9 奥氏体不锈钢和 3A21 防锈铝合金,试样尺寸均为  $90\ \text{mm} \times 90\ \text{mm}$ ,厚度分别为 4 mm, 1 mm, 1 mm。

吸收层使用自己研制改进的新型黑漆涂层<sup>[6]</sup>,分别使用玻璃、PVC 胶和水作为约束层。

使用 MMD-220 轮廓仪测量表面形变,轮廓仪导轨直线性系统精度  $\leq 0.15\ \mu\text{m}/100\ \text{mm}$ ,测量长度  $\leq 220\ \text{mm}$ ,Z 向量程 10 mm。

## 3 实验结果与分析

图 1(a)是在 PVC 胶约束,黑漆涂层厚度约 0.1 mm 时,涂敷于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷表面在 25 J 的激光能

量下单次冲击后的冲击面形状。可以看出涂层没有出现任何的破裂、剥落等情况,依然保持较好的防护作用。在烧蚀图样上,形成的烧蚀区域要明显大于激光光束直径,也明显大于非约束状态下的烧蚀面积,不过在激光束的直接作用区域内烧蚀更为严重,它是受到激光直接辐射烧蚀的结果,而周围区域相对颜色较浅,其烧蚀是由高温高压的等离子体的横向膨胀造成的。

将这一图形与非约束下靶纸上的激光光斑形状(图 1(b))进行对比可以发现,非约束条件下,烧蚀面积基本等于激光束面积,而在约束条件下,光斑的烧蚀区域明显增大,边缘也更不规则。实验中使用的是直径 8 mm 的光束,但产生的烧蚀面积直径经实际测量平均为 12 mm 左右。在约束情况下,约束层起到了增压的作用,但同时不可避免地产生等离子体的横向膨胀,也就是说,实际的约束模式下,等离子体的作用面积并不是和激光光束的直径相等的。

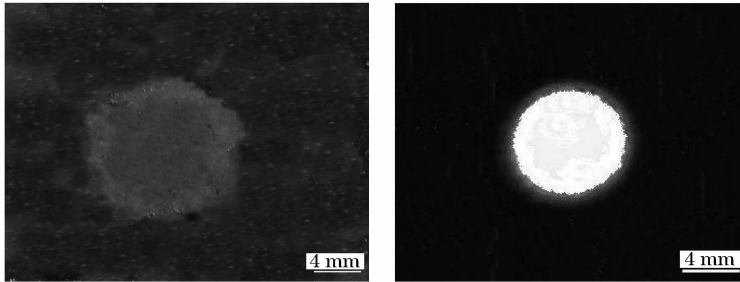


图 1 不同约束条件下的激光冲击光斑形状。(a) PVC 约束; (b) 非约束条件

Fig. 1 Faculae characteristic by laser shocking under different confinement. (a) PVC confinement; (b) No confinement

关于横向膨胀量的大小,在实验中发现这和约束层的种类有很大的关系,对于 K9 玻璃约束层,在使用夹具的情况下,烧蚀面积增大有限,基本上与激光输出光场相差不多;PVC 和丙烯酸合成树脂约束的情况下,直径 8 mm 的光斑增加到大约 12 mm 左右,但等离子体膨胀相对还是均匀的;水约束时横向膨胀最为明显,直径 8 mm 光斑冲击下的烧蚀面积直径达到 16 mm 左右,对比玻璃约束层和 PVC 约束层,水对等离子体的横向膨胀限制作用比前两者都要弱,这直接导致了烧蚀面积的增大。

图 2 是水约束条件下的激光冲击光斑形状。仔细观察可以发现,冲击区的烧蚀可以大致分三个不同的层次。最里边的烧蚀最严重,其面积基本与激光束的截面积相当,直径大约 8 mm。中间一层颜色稍深,直径大约 12 mm。最外面的颜色发白,直径大

约 16 mm。这一现象说明等离子体在膨胀的过程中,其能量逐步在减弱,对吸收层的烧蚀深度也逐渐降低。

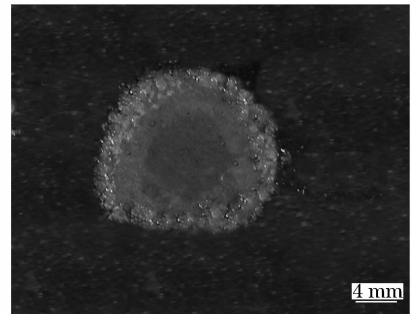


图 2 水约束条件下的激光冲击光斑形状

Fig. 2 Faculae characteristic by laser shocking under water confinement

对比前面 PVC 约束层实验中的等离子体横向膨胀, PVC 约束下虽然产生横向膨胀,但总体而言等离子体形成的冲击波对材料的冲击作用还是比较均匀的。这一点在对金属材料进行冲击的实验中观察得更为清楚一些。PVC 约束时,在使用与冲击陶瓷材料同等的激光参数和夹具装夹情况下,0Cr18Ni9 奥氏体不锈钢的变形区域面积与陶瓷冲击时产生的激光烧蚀面积基本相同,直径平均值都在 12 mm 左右。也就是可以认为 PVC 约束下,使用 8 mm 激光光斑直径进行冲击产生的等离子体的作用区域直径为 12 mm。

水约束时等离子体的膨胀要复杂一些,不但与激光参数有关,使用的夹具也会造成一定的影响。为具体分析水约束过程中等离子体的横向膨胀,以及水约束时的约束效果,使用不同的凹模进行了水约束下 0Cr18Ni9 奥氏体不锈钢的冲击实验。

分别使用圆形凹模孔径为 8 mm, 12 mm, 16 mm 进行冲击,另外为分析约束边界的影响,使用了另一种凹模形状为 60 mm×45 mm 的方孔进行冲击。

激光冲击结束后,测量各种约束边界条件下的变形轮廓形状。可以发现材料的变形量与约束边界有非常明显的对应关系。在 42 J 的能量下,8 mm 凹模孔径冲击后所形成的变形区面积最小,但变形量却最大;随凹模孔径增大,变形区面积相应增加,同时变形量逐步减小。而使用 60 mm×45 mm 的方孔凹模冲击时得到的变形区面积相比 16 mm 孔径下冲击的面积没有增加,但变形量仍有所减小,具体界面轮廓如图 3 所示。

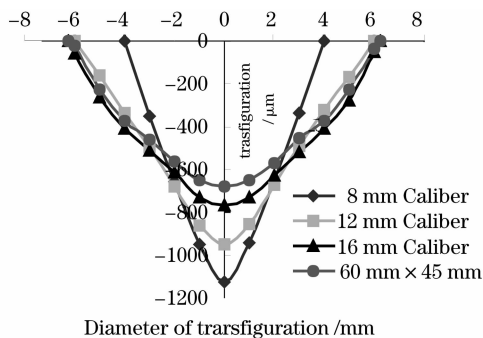


图 3 水约束不同凹模下奥氏体不锈钢的冲击区域截面轮廓

Fig. 3 Section contour of austenitic steel by water confined laser shocking under different moulds

这一结果与其他约束层特别是玻璃约束层有很大的差异。有研究表明<sup>[8]</sup>,在 K9 玻璃约束层下,当激光能量大于 15 J 时,板料的变形量随凹模孔径的增大有增大的趋势。原因是在玻璃约束时,冲击波

压力远大于材料的动态屈服强度,材料的变形能力得到了有效提高,凹模孔径的增大意味着参加变形的材料增多,变形区材料受到的约束相应减小,从而塑性流动容易发生,板料变形量增大。

玻璃约束时出现的这种情况与水约束时产生了较大的差异。分析认为主要是由以下两方面的作用造成的:一是水对激光能量有一定程度的衰减,使冲击波压力降低;二是等离子体的横向膨胀问题。对比三种约束情况下的烧蚀形状可以发现,玻璃约束时必须用夹具装夹,使约束层与板料紧密接触,等离子体形成后,瞬间对玻璃造成冲击。但玻璃本身变形能力极小,且硬度与刚度较高,从而限制了等离子体的横向膨胀。这样在材料变形时,凹模尺寸的变化引起的是参加变形的材料量的变化。PVC 约束时,其刚度与强度相比于玻璃均大幅下降,但 PVC 的粘结性保证其与基体具有一定的结合力,所以也有较好的约束效果,受横向膨胀的影响小于水约束;水约束的激光冲击过程中,变形量受到等离子体横向膨胀的影响更大,水是一种流体,与基体间没有太大的结合力,对等离子体的横向膨胀基本没有明显的约束能力。在这种条件下,越小的凹模,在冲击时形成的等离子体横向膨胀空间越小,相应等离子体纵向膨胀越明显,所以会产生更大的变形量<sup>[9,10]</sup>。水约束时等离子体的膨胀进一步削减了冲击波压力,而在激光能量较低时,板料在小约束边界上更容易产生塑性变形,所以使板料的变形量随着约束层边界凹模孔径的减小而增大。

除了等离子体的横向膨胀问题,约束层的光学性质也可能会导致冲击波作用面积的变化。玻璃约束层通常为光学面,对激光束的透过影响较小。而柔性约束层一般为非光学面,特别是水约束层本身存在一定的非均匀性,将使激光束波面产生畸变,与靶面的作用光斑将会增大。但不管是由于等离子体的横向膨胀影响,还是约束层的光学性质影响,在柔性约束层作用下,激光束作用面积的增加是直观可见的。由此可知,在实际的计算与应用中,等离子体作用面积的增加是需要加以考虑的,而不能简单以激光光束截面积代替。

对大孔径凹模而言,水约束时等离子体的横向膨胀量比 PVC 约束要大得多。但真正的变形区面积与 PVC 约束却没有太大的差别,这与前面分析的一样。等离子体的膨胀过程中,横向的应力逐步减小,最后不足以使板料变形,只能形成局部的残余应力。

对于 16 mm 孔径与 60 mm×45 mm 的两种凹模, 等离子体的最大横向膨胀量不会超过直径 16 mm 的区域。这也是为什么两者可以得到基本相同的板料变形面积。在板料变形过程中, 除了等离子体的影响外, 夹具本身的约束也对成型过程有一定的影响, 由于 16 mm 孔径是圆形凹模, 这样在板料受力时各个方向上的对称性好, 受力均匀, 相应的板料变形的流动阻力就小, 所以板料的变形量大于 60 mm×45 mm 的方孔凹模。

而对 16 mm 圆孔凹模和 60 mm×45 mm 方孔凹模的冲击, 等离子体膨胀面积(直径 16 mm)大于成型面积(直径略大于 12 mm)的结果, 与图 2 所示的烧蚀图样非常吻合。当凹模孔径大于等离子体的横向膨胀时, 夹具对材料变形的影响逐渐减弱。虽然等离子体膨胀中可以扩展到大约直径 16 mm 的范围, 但该处能量密度已大幅下降。就像图 2 中直径在 12 mm 以外烧蚀区域呈白色, 虽然存在等离子体的影响但不足以使材料发生变形。

为防止材料因素对冲击过程可能产生的影响, 还使用 3A21 防锈铝合金对这一结果进行了验证。同样使用孔径分别为 8 mm, 12 mm, 16 mm, 60 mm×45 mm 的凹模对 1 mm 厚防锈铝在水约束下进行冲击, 然后分别测量变形轮廓, 不同凹模下的结果如图 4 所示。

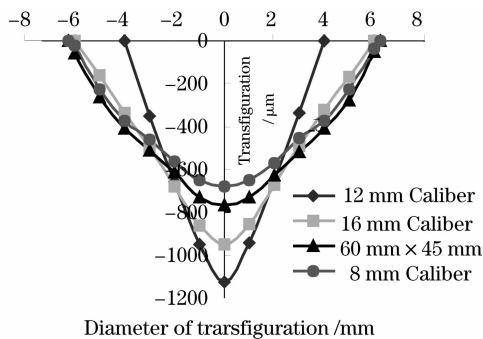


图 4 水约束不同凹模下防锈铝的冲击区域截面轮廓  
Fig. 4 Section contour of aluminum alloy by water confined laser shocking under different moulds

由图 4 可知, 在 42 J 的能量冲击下, 由于 3A21 防锈铝的强度较低, 同时塑性也较 0Cr18Ni9 奥氏体不锈钢差。在 8 mm 凹模冲击后材料出现冲穿现象, 穿孔直径大约 1 mm。随着凹模孔径的增加, 板料变形区域增大, 但变形量逐步降低, 同时也不再出现断裂问题。在 16 mm 孔径和 60 mm×45 mm 的凹模上冲击时均获得与 12 mm 凹模冲击相差不远的变形区域, 这说明超过 12 mm 的部分冲击波压力已不

足以使板料变形<sup>[11,12]</sup>。

在水约束激光冲击时, 一方面水对 1.054 μm 的激光有一定程度的衰减, 同时对等离子体横向膨胀的约束效果较差。烧蚀区域较大, 总体约束效果不如 PVC 好, 更不能与玻璃约束层相比。但水对成型表面具有自适应性, 特别是在重复冲击过程中其优势非常明显<sup>[13]</sup>。在进行曲面等非平面冲击时, 也不可能使用夹具, 所以 60 mm×45 mm 大孔径、水约束下的冲击方式与实际生产过程的结果可能更接近。这种情况下就必须考虑等离子体横向膨胀对冲击过程的影响。

## 4 结 论

使用不同的约束材料, 冲击效果会产生明显的变化, 这在很多文献中已有论述, 但涉及的条件比较复杂。已知约束层的厚度、柔性、刚性, 激光功率、激光光束截面积, 甚至吸收层材料与装夹方式<sup>[7,9]</sup>等都对等离子体的产生与膨胀产生很大的影响。如果具体分析其作用机制, 还需要大量的工作。本文使用实验方法, 验证了等离子体实际作用面积与冲击面积存在很大的差距, 希望能对激光冲击的理论计算与实际应用提供一定的借鉴。

在使用柔性约束层进行激光冲击时, 等离子体会产生膨胀效应, 从而造成冲击波的实际作用面积增大。

使用不同的约束层时, 等离子体的横向膨胀效应有较大的差别: 玻璃约束层膨胀很小, PVC 膨胀较大, 而水约束的横向膨胀效应最明显。

等离子体的膨胀对激光冲击能量的定量计算有不可忽视的影响, 特别是随着激光冲击向实用化的方向发展, 柔性约束层的使用使这一问题必将越来越显现出重要性。

## 参 考 文 献

- 1 R Fabbro, J Fournier, P Ballard *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2): 775~782
- 2 Zhou Jianzhong, Ni Minxiong, Zhang Yongkang *et al.*. Theoretical investigation and finite element simulation of laser peen forming of metal plate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 288~294  
周建忠, 倪敏雄, 张永康等. 金属板料激光喷丸成形理论研究与数值模拟[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 288~294
- 3 Hu Yongxiang, Yao Zhenqiang, Hu Jun. Numerical simulation of residual stress field for laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 846~851  
胡永祥, 姚振强, 胡俊. 激光冲击强化残余应力场的数值仿真分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 846~851

- 4 D. Devaux, R. Fabbro, L. TOLLIER *et al.*. Generation of shock waves by laser-induced plasma in confined geometry [J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**(4):2268~2273
- 5 Zhang Xingquan, Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong *et al.*. Experimental research on narrow strip laser peening forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10):1446~1450  
张兴权,张永康,周建忠等. 激光窄条喷丸成形的实验研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10):1446~1450
- 6 Zhang Lingfeng, Zhang Yongkang, Ren Xudong *et al.*. Study of confinement layer and absorbing layer in laser shock processing [J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2007, **38**(1):127~131  
张凌峰,张永康,任旭东等. 激光冲击约束层和吸收层的研究[J]. *农业机械学报*, 2007, **38**(1):127~131
- 7 Zhou Jianzhong, Yang Jicang, Zhou Ming *et al.*. Experimental study of overlay properties on laser-induced shock waves[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11):1041~1044  
周建忠,杨继昌,周明等. 约束层刚性对激光诱导冲击波影响的研究 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(11):1041~1044
- 8 Y. K. Zhang, X. R. Zhang, X. D. Wang *et al.*. Elastic properties modification in aluminum alloy induced by laser-shock processing [J]. *Material Science and Engineering*, 2001, **A297**: 138~143
- 9 Zhou Jianzhong, Zhou Ming, Xiao Aimin *et al.*. Study of the effects of overlay thickness and flexibility on laser shock processing[J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(1):7~9  
周建忠,周明,肖爱民等. 约束层厚度和柔性对激光冲击强化效果的影响[J]. *应用激光*. 2002, **22**(1):7~9
- 10 Sergei F. Boulyga, Donatella Desideri, Maria Assunta Meli. Plutonium and americium determination in mosses by laser ablation ICP-MS combined with isotope dilution technique [J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2003, **226**: 329~339
- 11 Zhu Jiabin, Ji Zhonggang, Deng Yunpei *et al.*. Study on lifetime of a plasma channel induced by femtosecond laser pulses and an external electric field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1059~1062  
朱佳斌,季忠刚,邓蕴沛等. 外加高压电场下空气中激光等离子体通道寿命研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1059~1062
- 12 L. Berthe, A. Sollier, P. Peyre *et al.*. Generation of laser shock waves in a water-confinement regime with 50 ns and 150 ns XeCl excimer laser pulses[J]. *Appl. Phys.*, 2000, **33**(17): 546~562
- 13 P. Peyre, L. Berthe, R. Fabbro *et al.*. Experimental determination by PVDF and EMV techniques of shock amplitudes induced by 0.6-3 ns laser pulses in a confined regime with water [J]. *Appl. Phys.*, 2000, **33**(5):498~507