国防科技大学学报
JOURNAL OF NATIONAL UNIVERSITY OF DEFENSE TECHNOLOGY
一九八七年第四期　总第六十期　No.4　1987　Sum.60

强脉冲 CO_2 激光与靶的相互作用

王春奎　方慧英　李淑英

（中国科学院力学研究所）

李惠宁　吴占林　樊　涛　刘淑英

（北京电子工程总体设计部）

摘要　在真空背景下的实验表明，当微秒量级的强脉冲激光与靶材相互作用时，由于靶材的升华，激光维持爆震波依然存在。爆震波产生的压缩波传入靶内，该应力波的作用是材料破坏的重要因素。而强脉冲激光引起的汽化反冲压力、热应力和烧蚀破坏也是不可忽视的因素。实验还表明，在真空背景下维持爆震波足以将后续激光屏蔽。

关键词：LSD波；汽化反冲压力；应力波；剪切，热应力，热烧蚀；溅射；屏蔽效应

1. 引　言

激光与固体材料的相互作用的破坏机理研究，对于工业加工与其他目的的应用领域，是一项很有意义的工作。因此，人们在激光问世不久，就开展了这一领域的研究工作[1]。但是，由于脉冲激光与固体材料的相互作用过程十分复杂，特别是强激光与固体材料的相互作用，涉及到传热学、气体动力学、等离子体物理、爆炸力学、断裂力学、物理力学等许多不同的学科，至今尚存在很多问题，有各种不同的观点与争论，值的进一步研究探讨[2]。

在研究激光与物质在大气中的相互作用的同时，人们也注意到了真空背景下的情况，特别在高功率密度下，有很多现象与在大气环境下有所不同。例如，激光维持爆震波的阈值约是8-10[3]托，在真空环境下自然不产生激光维持爆震波，因而，激光与靶的耦合系数将比大气中大。高功率密度的激光辐照到靶上，靶被激光升华。在我们的实验中测量得出，平均每个激光脉冲使铝箔靶造成的质量迁移约150微克。为了估算靶前区光学击穿以前的环境背景，我们假设激光造成靶面质量迁移的过程是在激光脉冲的前十分之一的时间内完成的，那么靶表面附近的粒子密度此刻将跃升到大约 5×10^{19}/厘米^3。从而在这一小空间内的原真空（$10^{-2}-10^{-3}$托）背景也就一下被改变了。尽管这是

本文1987年6月15日收到

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

在靶表面附近的小区域内，但它达到了激光维持爆震波的点火阈值，因而，当激光脉冲足够强和足够宽时，尽管在真空背景下，激光脉冲开始后的某一时刻也将形成激光维持爆震波，从而改变在真空环境下靶表面与激光的耦合率，改变局部靶面的环境压力，使靶受到更复杂的力的作用和热烧蚀的减弱。

2. 实验装置

实验是在一个设有观察窗的真空靶室内进行的，装置如图 1 所示。实验中靶室内的真空度是10^{-2}—5×10^{-3}托。激光的入射窗口是一个镀增透膜的ϕ60 毫米的锗聚焦透镜，焦距为 $f=20$ 厘米。靶被一个螺纹环约束在靶架上。靶架也是一个环形，它通过调节装置可以在轨道上移动，用以调节靶面上入射光斑的大小。激光光源是一台多模输出的电子束控制脉冲co_2激光器，其波形参数见文献[4]，脉冲宽度为1.2微秒。

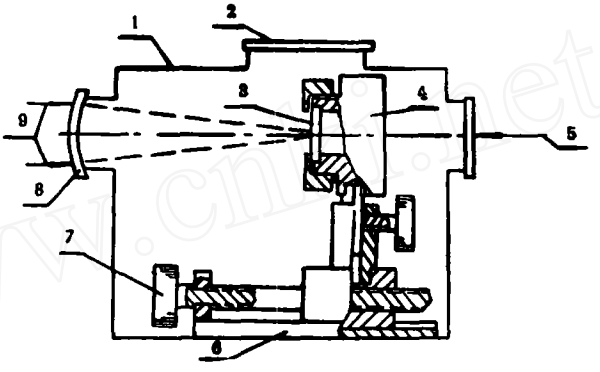


图 1 实验装置简图

1. 真空室；2. 观察窗；3. 靶片；4. 靶架；5. 准直He—Ne光；6. 导轨；7. 靶距调节柄；8. 锗透镜窗；9. CO_2激光束。

3. 实验结果分析

1) 激光与MgF_2靶片的相互作用

将光学抛光的MgF_2红外材料做成靶，在真空靶室内用3×10^8瓦/厘米^{2}至5×10^7瓦/厘米^{2}的功率密度（改变光斑大小）辐照靶。

在下限功率密度情况下，入射光束在靶上几乎没有留下烧痕。在中间功率密度值处，入射光在靶上已经留下了直观的斑痕。这时，即使靶片不破碎，也引起了光学透过率的显著变化。用日产 IR440 红外分光光度计测量2—7微米波段靶片的透过率，发现靶片在2—4微米波段透过率下降了9%—20%，在 4～6 微米波段下降了4%—9%，在 6 微米以上波段也有较大幅度下降。图 2 是受辐照区在辐照前后的透过率对比曲线。图 2 是用NEDPHOT—21 金相显微镜拍摄的靶片受激光辐照后的显微照片。在上限功率密度情况下入射光束在靶上留下了与入射光斑大小一样的痕迹。由于热应力作用，在靶面上形成了很多不甚规则的大大小小的微裂纹。斑痕的中间区域明显的弱。这显然是由于激光维持爆震波屏蔽了入射的激光束的缘故。图 4 是这种情况下的典型的显微照片。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

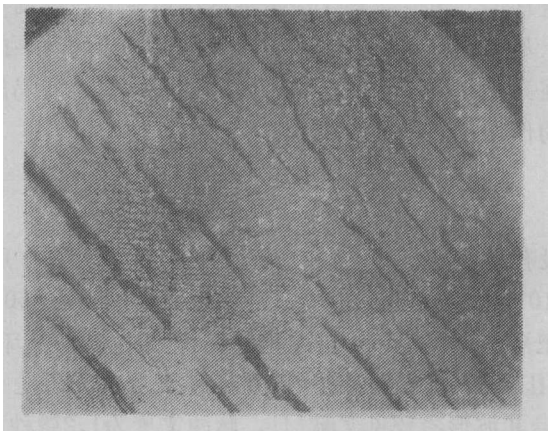


图 2 MgF_2 被 1.3×10^8 瓦/厘米^2 的激光辐照后的显微照片

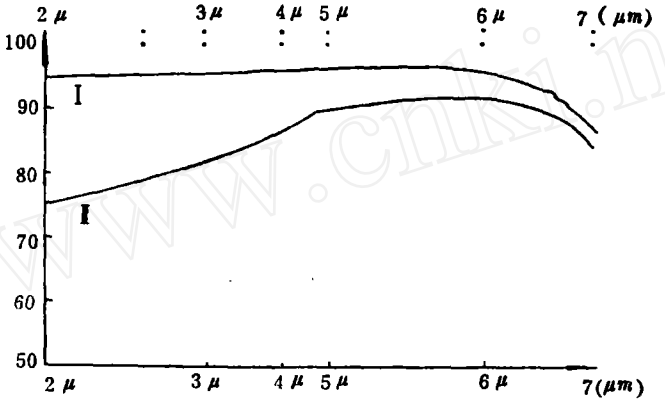


图 3 MgF_2 被 1.3×10^8 瓦/厘米^2 的激光辐照前后透过率的变化，上边曲线I是辐照前透过率，下边II是辐照后透过率

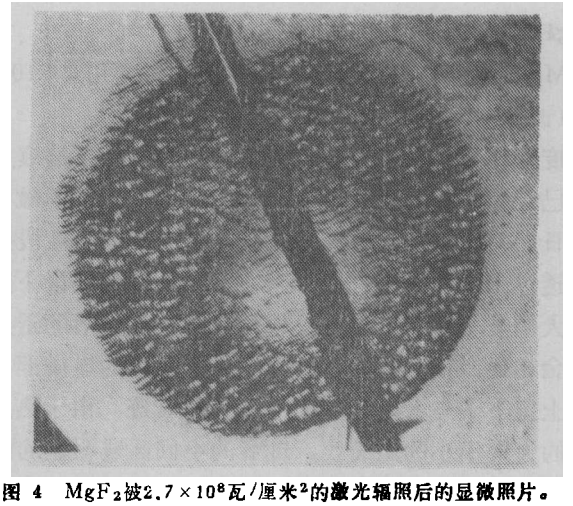


图 4 MgF_2 被 2.7×10^8 瓦/厘米^2 的激光辐照后的显微照片。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

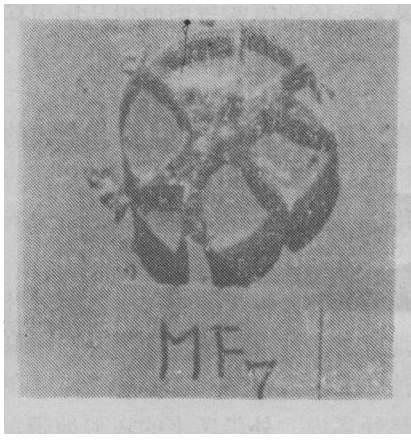


图 5 MgF_2被1.7×10^8瓦/厘米^{2}的激光辐照后的破碎情况

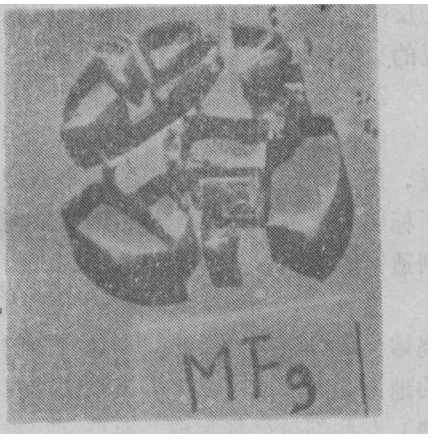


图 6 MgF_2被6.0×10^7瓦/厘米^{2}的激光辐照后的破碎情况

在中等功率密度以上，受到辐照的MgF_2靶片被击碎时，在光斑辐照区域碎片大都是小于毫米尺度的碎块，在光斑以外，碎块大都是几个毫米尺度的，图5是这种情况下破碎的照片。它们破碎时，碎块一般不掉下来，而且碎片不是解理断口，这时，热应力对破坏起了一定作用。在低功率密度下，碎块是明显的解理断口，而且较大。它们一般在靶破碎的同时脱出靶架掉下来。在入射光斑处几乎看不出烧蚀痕迹。图6、7是这种情况下破碎的照片。

为了测量真空背景下的破坏阈值，我们用直径ϕ16毫米、厚2毫米的经光学抛光的MgF_2红外材料作靶片：在相同的入射光斑下（固定光斑直径为0.7厘米，靶片用两个带螺纹的金属同心圆环夹固）辐照靶，对不同的靶使用不同的输入能量，以改变功率密度值。经实验得到：靶片在3.7×10^7瓦/厘米^{2}下，靶片碎成三大块和一个小块（见图7）；在1.8×10^7瓦/厘米^{2}下，靶面刚刚产生一个小裂纹（见图8）。可见，当入射光斑为0.7厘米直径时，破坏阈值在1.8—3.7×10^7瓦/厘米^{2}之间；在上述两种功率密度条件下，均没有发现有击穿现象。这说明在较低功率密度下起主要破坏作用的力是汽化产生

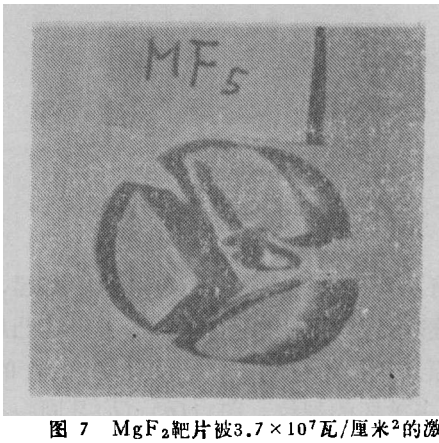


图 7 MgF_2靶片被3.7×10^7瓦/厘米^{2}的激光辐照后的破碎情况

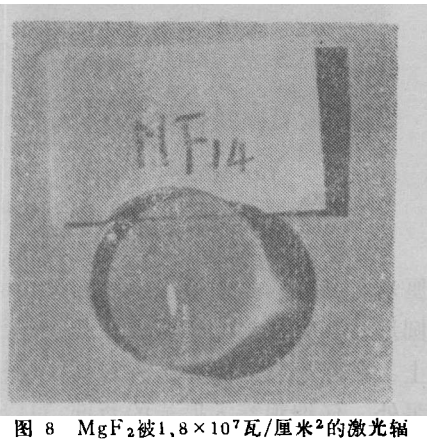


图 8 MgF_2被1.8×10^7瓦/厘米^{2}的激光辐照后的损伤情况

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

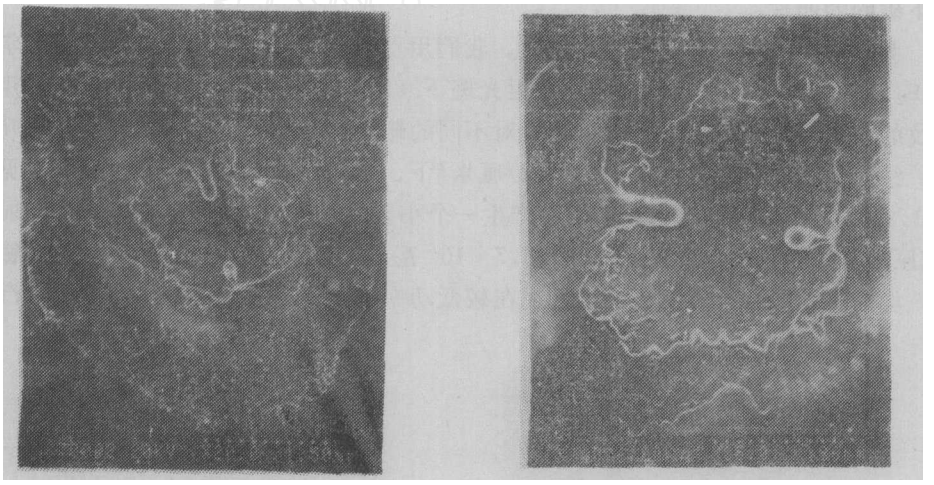
的反冲作用，而在高功率密度下的破坏就比较复杂。这在激光与铝箔相互作用过程中表现的更明显。

2） 激光与铝箔的相互作用

我们把0.1毫米厚的工业用软铝箔夹持在真空靶室内的靶架上，在锗透镜的焦点附近，用10^8瓦/厘米^{2}以上的功率密度激光辐照铝箔。实验中每个靶片只被辐照一次。为了标明每次被辐照的靶片相对于透镜的距离变化，以及相关的现象，我们用ρ表示靶片到透镜的距离，并以ρ值从小到大的顺序描述实验结果。

当$\rho=18.5$厘米时，靶片上的入射光斑直径为0.48厘米。该情况下光斑外环基本上烧熔(以下均称烧蚀环)。在烧蚀环的外沿有的地方已经形成了清晰的向外喷溅痕迹；有的地方尚未形成喷溅但有清晰的熔化边界。烧蚀环的内沿上有向心的喷溅（图14很清楚）有些部位已经形成，有些部位没有形成。烧蚀环内、外沿所夹的环形地带，除已经凝固的带有明亮的金属光泽的环以外，还可以清晰地看到中间部分是一道浮在熔化的金属上的白色小泡泡形成的环。烧蚀环向里是光斑的中心部位，这里略向里凹进去。用显微镜观察其底部，尚有部分表面仍保持原来铝箔的纹路。观察靶的入射光背面与光斑对应处，可看到边界不甚清晰的凸起，大小约0.32—0.4厘米^2。图9(a,b)是用电子扫描显微镜拍摄的受辐照区概貌照片。

当$\rho=18.75$厘米时，入射光斑直径为0.45厘米。这一参数下的典型的概貌见图10(a)、(b)。从照片上可看到：在烧蚀环中有一段明显的撕裂痕迹。撕裂痕迹在直径约为

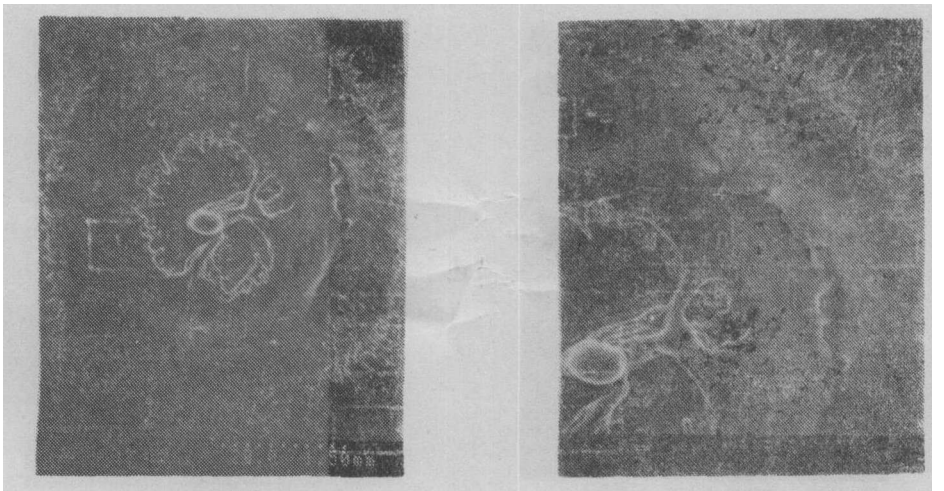


(a) 全貌　　(b) 烧蚀环的内喷

图 9　当$\rho=18.5$厘米时，以2.1×10^8瓦/厘米^{2}的激光辐照铝箔的电子扫描显微照片

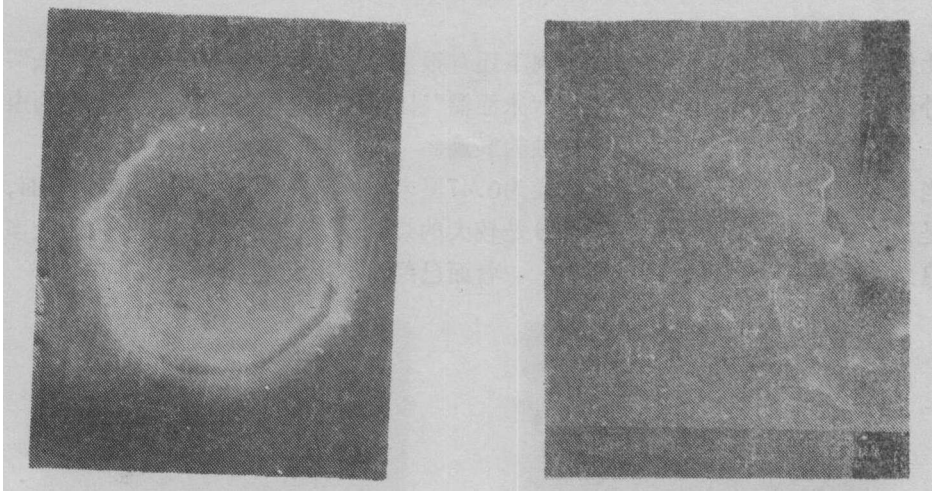
0.32厘米与光斑同心的圆上（图10(b)）。靶片背面形成了一个边界十分清晰的凸起，近似于圆形，其直径约0.33厘米，凸起高出靶面达毫米量级。可以发现：撕裂恰在凸起的边缘上。在凸起正面的底部有局部区域保持着原来铝箔的纹路，似乎没有受到光的辐照。另外，仔细观察入射光的背面，可以看到冲击破坏的裂纹。图11(a)、(b)是同一个参数下的另一样品的背面照片。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



a 全貌　　b 局部

图 10　$\rho=18.75$厘米时，以2.2×10^8瓦/厘米^{2}的激光辐照铝箔的电子扫描显微照片



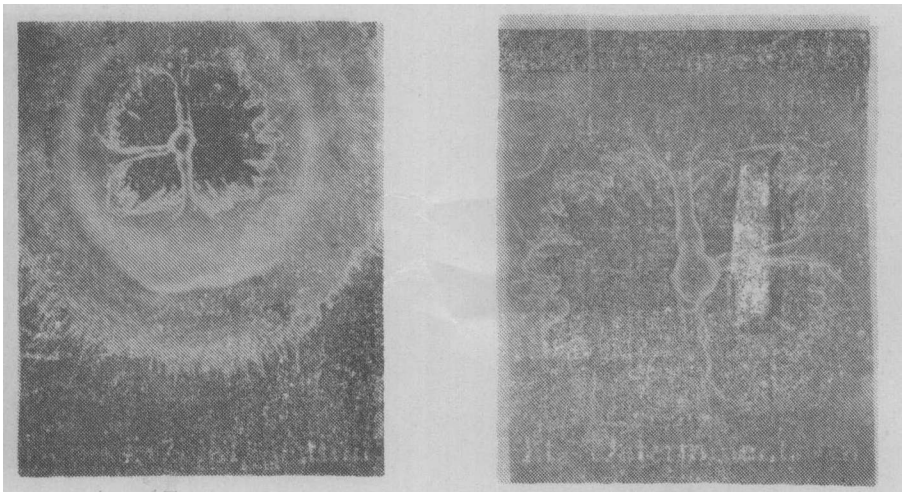
a 全貌　　b 局部拉伸撕裂

图 11　当$\rho=18.75$厘米时，以2.6×10^8瓦/厘米^{2}的激光辐照靶面后，其背面的电子扫描显微照片

当 $\rho=18.8$ 厘米时，入射光斑直径是 0.44 厘米。从该情况的电子扫描显微照片图 12(*a*)、(*b*)可以看到，其烧蚀环部分的结构是最典型的。环的中间部分被完整的一圈乳白色泡沫状物所占据，它又被内、外两个完整的亮晶晶的金属环夹在中间。外环向外吐出放射状金属“光芒”；内环向心喷吐“露珠”。入射光斑的中心部分形成一个凹坑，其底部基本保持原基底的样子，没有激光烧蚀的痕迹。有趣的是向心喷溅形成丁字型的大块熔料如同悬浮在凹坑上的一座“桥”。内喷口的直径约为 0.2 厘米。靶的入射光背面是一个边界清晰的凸起，象一口缩小的铝锅扣在上面，锅口直径约为0.34厘米，比内喷口的直径大得多。

当 $\rho=19.0$厘米时，入射光斑直径是0.42 厘米。该情况下的典型照片见图 13(*a*)、(*b*)。我们从它的喷口可以看到：从烧蚀环内沿向心喷吐的参差不齐的金属铝的“冰溜

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

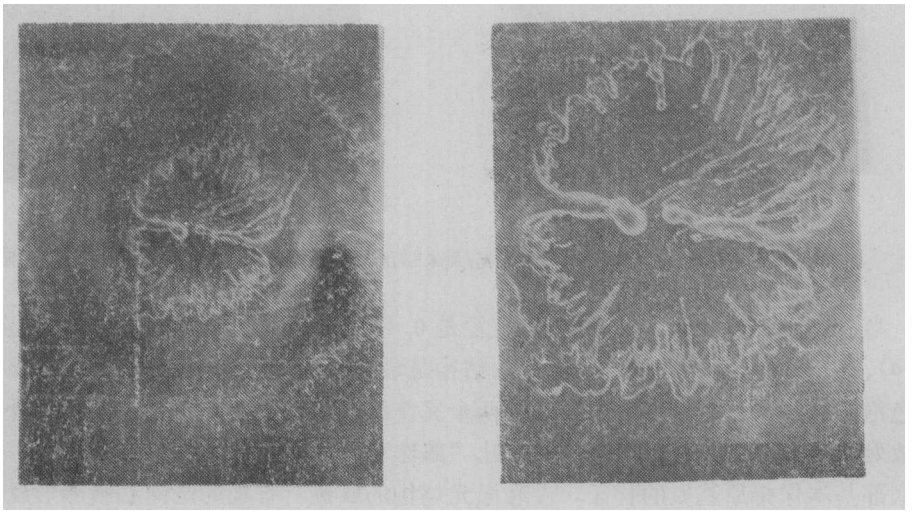


a 全貌　　b 局部

图 12 当$\rho=18.8$厘米时，以2.2×10^8瓦/厘米^{2}的激光辐照铝箔得到的电子扫描显微照片

溜”比较清晰；这些“冰溜溜”从上到下还有很多层次。它们向内喷射的“劲头”并不亚于外沿向外喷溅，而且向里喷吐的“冰溜溜”比外沿的针状喷射大得多。斑的中心部位是一个很深的坑。坑底几乎没有烧蚀的痕迹。

当$\rho=19.5$厘米时，入射光斑直径为0.47厘米。这种情况下，在入射光的正面，中心区域是铝的原基底，外边环形区大部分是较大的烧蚀斑，但没有连成一整片，众多的烧蚀斑自然形成了一个环形区（见图14）。背面已经没有了凸起。



a 全貌　　b 局部

图 13 当$\rho=19.0$厘米时，以2.4×10^8瓦/厘米^{2}激光辐照铝箔的电子扫描显微照片

当$\rho=20.0$厘米时，入射光斑直径为0.6厘米。烧斑遍布整个光斑。已经没有中部与烧蚀环的区别（见图15）。正面没有凹坑，背面也没有凸起。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

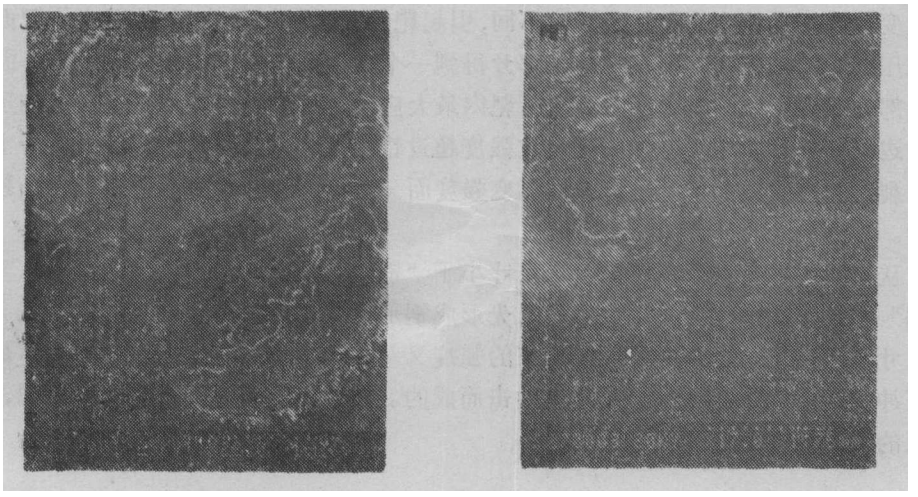


图 14 当$\rho=19.5$厘米时，以1.8×10^8瓦/厘米^{2}的激光辐照铝箔的电子扫描显微照片

图 15 当$\rho=20$厘米时，以2.2×10^8瓦/厘米的激光辐照铝箔的电子扫描显微镜下的照片

为了便于进行直观数据对比，将一些实验结果制成表格列于表 1

表 1 激光与 0.1 毫米铝箔在真空背景中的相互作用简况

样品编号	4	9	10	6	8	5	2
ρ(cm)	18.5	18.75	18.75	18.8	19.0	19.5	20.0
光斑直径(cm)	0.48	0.45	0.45	0.44	0.42	0.47	0.60
输入能量(J)	46	43	50	43	41	39	78
功率密度(W/cm^2)	2.1×10^8	2.2×10^8	2.6×10^8	2.3×10^8	2.4×10^8	1.8×10^8	2.2×10^8
背面凸起尺寸(cm)	0.32×0.4	$\phi0.33$	$\phi0.3$-0.33	$\phi0.34$	$\phi0.34$	无凸起	无凸起
内喷口尺寸(cm)	0.19～0.24	0.19～0.21	/	0.20	0.20～0.25	无内喷	无内喷
质量迁移(μg)	100	130	180	70	/	190	/
光斑中心区域现象	部分原基底	部分原基底	/	基本原基底	基本原基底	原基底	遍布烧斑

从破坏机理的角度看，入射光斑的外环是由激光引起的烧蚀破坏。

在烧蚀环的内区（即入射光斑的中心部位），随着靶片与透镜距离的变化，破坏形式和破坏程度也在变化。从遍布烧斑到保持原基底，从原基底到边界不清的凸起，到冲击形成小铝锅直至锅边撕裂，这显然是力学效应占了主导地位。每次实验中，靶前明亮的击穿演变为激光维持爆震波，这波一方面屏蔽后续激光与靶的耦合，另一方面又强烈地冲击压缩靶片。由于靶片与透镜之间距离的变化，使点火中心与靶之间的距离发生

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

相应变化。压缩波到达靶片时强度不同,引起靶的力学破坏程度不一。垂直于靶面高速传播的压缩波冲击靶面，使靶受冲击部分得到一个与波的传播方向相同的应力，而未被冲击的部分保持原来的静止状态。这时靶内最大应力是拉伸性的。并发生在靶被压缩波冲击的边缘处[5]。当铝箔靶内的应力波强度超过铝箔的剪切强度时，靶就发生了上述的锅边撕裂。当应力波强度超过了弹性形变强度而又小于剪切强度时，就形成了凸起的塑性变形。

从实验结果可见：1. 内喷口尺寸小于“锅口”尺寸，内喷的“冰溜溜”又是浮在“锅”中的。这些事实告诉我们，首先形成锅形凹陷，而后产生烧蚀环的喷溅。2. 锅口尺寸小于光斑尺寸。因为入射光束的强度又基本是均匀，这说明：“锅”不是靶汽化的反冲力形成的，而是激光爆震波冲击而成的。联想各种实验现象也可以推想，爆震波点火的位置距离靶面是相当近的。

4. 结　　论

实验表明，在真空中微秒量级的强脉冲激光与靶材相互作用时，激光维持爆震波仍然存在；靶的破坏机制不仅由热效应引起的熔化，汽化和热应力支配，同时，爆震波引起的破坏也是重要因素。在真空中，由靶材的升华引起的激光维持爆震波可以屏蔽掉后续激光。

参 考 文 献

[1] 赖群：国外激光，1978第一期第一页及其参考文献。
[2] 赵伊君执笔，工学学报，1979年第三期第87页。
[3] R.E.Beverly Ⅱ and C.T.Walters, J.Appl. phys., 47(1976), 3485.
[4] 王春奎等，物理学报，36(1987),386。
[5] B.C.H.Wendlandt. NASA N74-16188 (May 1973).

Interaction of a High Intensity Pulsed Co_2 Laser With a Targets

Wang Chunkui Fang Huiying Li Shuying
(Institute of Mechanics, Academia Sinica)
Li Huining Fan Tao Wu Zhanlin Liu Shuying
(Beijing Designing Division for Electronic Engineering)

Abstract

When a high-power pulsed Laser beam interacts with a target in the time of the order of microsecond, the experimental results show that the Laser-

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

supported detonation wave yet occurs due to a sublimation of the target in a vacuum background. A compression wave generated by this Laser-supported detonation wave propagates into the target, this wave is a significant factor for damage of the target, but the recoil pressure of vaporization, the thermal stress and ablation damage of the target to irradiation by the high-power pulsed Laser are also factors that can not be neglected. Experiments also show that the follow-up Laser radiation can be shielded by the Laser-supported detonation wave when the Laser-supported detonation wave occurs in the vacuum background.

Key words: The laser supported detonation wave; The recoil pressure of vaporization; The stress wave; The shear; The thermel stress; The thermal etching; The splatter; Thield effect

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net