

高功率激光光束经颗粒污染后的近场衍射效应*

张国文¹⁾ 卢兴强^{1)†} 曹华保¹⁾ 尹宪华¹⁾ 吕凤年¹⁾ 张臻¹⁾ 李菁辉¹⁾
王仁贵¹⁾ 马伟新²⁾ 朱俭²⁾

1) (中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

2) (上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

(2011年2月24日收到; 2011年3月30日收到修改稿)

采用高功率激光驱动器设计软件 Laser designer 数值研究了激光光束经颗粒污染后的近场衍射特性. 对颗粒污染所产生的调制进行了分类, 并详细分析了真空和石英玻璃中, 振幅调制型和位相调制型颗粒污染对光束近场的影响. 研究表明, 无论在真空或石英玻璃中, 位相型颗粒污染对高功率激光光束的近场调制影响较大. 且在石英玻璃中, 位相型硬边颗粒污染所引起的高功率激光光束小尺度自聚焦热像调制现象相当严重. 而由颗粒污染引起光束强区的横向偏移, 却在一定程度对小尺度自聚焦有抑制作用.

关键词: 高功率激光光束, 污染颗粒, 小尺度自聚焦, 热像

PACS: 42.25.Fx, 42.65.-k, 42.65.Jx, 03.50.De

1 引言

在高功率激光驱动器中, 光束质量对于物理实验及整个驱动器的安全稳定运行都是极为关键的因素. 实际的激光放大链中, 高功率激光光束常常由于环境和光学元件所存在各种调制因素而造成光束质量的下降. 这不仅对物理实验产生了重大影响, 同时也增加了放大链中光学元件受损伤破坏的风险. 除鬼像和反激光外, 高功率激光驱动器中非线性介质的自聚焦效应及热像也会对光学元件造成破坏的风险. 文献 [1] 研究了高功率激光驱动器中的自聚焦效应, 相应的热像效应也成为了研究的热点 [2-5]. 研究发现 [1-12], 光学元件所携带的缺陷和环境中存在的诸如气溶胶等颗粒污染是造成光束质量下降和下游光学元件被破坏的重要因素之一. 基于此, 文献 [6,7] 采用功率谱密度 (PSD) 的方法来描述光学元件缺陷的分布状况, 并获得了弱调制情况下, 光学元件“缺陷”分布功率谱密度与光束近场强度分布 PSD 之间的定量关系 [6,7]. 而 Mainguy 等人利用法国兆焦耳激光传输软件中的 MIRO 程序研究了高功率激光光束与颗粒污染之间的相互作用, 其重要研究结果是获得了颗粒污

染尺寸大小对后续光路的影响 [9]. 高功率激光驱动器中的激光诱导损伤是非常重要的研究课题, 而颗粒污染是高功率激光驱动器中常出现的一种污染, 因此颗粒污染对后续光束质量的影响及造成光学元件破坏风险的研究是非常必要的. 目前国内尚无颗粒污染对高功率激光光束近场调制现象研究的详实报道, 本文采用自主开发的高功率激光设计软件 Laser designer, 就颗粒污染对高功率激光光束在放大链中的近场衍射效应作了大量数值研究, 对于高功率激光驱动器的安全稳定运行和改进及优化设计具有一定的参考价值.

2 数值计算程序

Laser designer 软件是作者在设计高功率激光驱动器过程中自主开发的, 其功能已经在神光 II 第九路驱动器的改进、韩国原子能院的四路激光系统、上海光机所拍瓦超强超短激光主放大器抽运系统、以色列 NLF 激光系统以及九院二所的大功率激光系统等高功率激光驱动器的物理与光学设计中得到校验. 本文采用 Laser designer 软件数值研究了颗粒污染对高功率激光光束分别在真空

* 国家自然科学基金 (批准号: 60707019) 资助的课题.

† E-mail: jianm_xingqianglu@siom.ac.cn

和石英玻璃中激光近场调制现象. 在数值计算中, 平顶分布的方形脉冲可表示为

$$E(r, t) = A_0 \exp \left[-\frac{\ln 2}{2} \cdot \left(\frac{r}{\sigma} \right)^{2n} \right] \times \exp \left[-\frac{\ln 2}{2} \cdot \left(\frac{t}{\tau} \right)^{2m} \right], \quad (1)$$

式中, A_0 为信号振幅, r 表示空间径向柱坐标, n 为超高斯光束阶数 (当 $n = 1$ 为高斯光束, $n > 1$ 时为平顶光束), σ 为光斑半径, t 为时间坐标, τ 为脉冲半高半宽, m 为时间脉冲阶数. 高功率激光驱动器中光束传输主要涉及到衍射、非线性自聚焦和光强的放大或衰减三种物理过程. 在考虑前两种效应的情况下, 光束的传输可由 NLS 方程表示为

$$2ik_0 \frac{\partial E}{\partial z} + \nabla_{\perp}^2 E + 2k_0^2 \frac{n_2}{n_0} |E|^2 E = 0, \quad (2)$$

在综合考虑三种物理过程情况下, 放大和衰减过程主要体现在折射率为复数, 则 NLS 方程可推广为

$$2ik_0 \frac{\partial E}{\partial z} + \nabla_{\perp}^2 E + 2k_0^2 \frac{n_2}{n_0} |E|^2 E + ik_0(\alpha - \beta)E = 0, \quad (3)$$

式中第二、三、四项分别表示衍射、非线性和放大 (衰减) 过程. n_0 表示介质线性折射率, n_2 表示非线性折射率, k_0 表示传输常数, α 是介质的损耗系数, β 为增益系数.

3 数值计算及结果分析

高功率激光驱动器中的颗粒污染通常由环境灰尘、气溶胶或光学元件在制备和加工过程中所带来的残留颗粒等形成, 其对光束的强度和相位具有调制作用. 当光束经由颗粒污染衍射后, 在后续光路中会形成激光热像斑点, 出现峰值功率极强区域, 从而增加后续光学元件被破坏的风险. 在这衍射过程中, 可把颗粒污染对高功率激光光束的影响分解为三类: 振幅调制、位相调制以及振幅和位相调制兼有的情况. 在激光放大链中, 光束在真空和石英玻璃中传输是两个重要环节. 因此, 颗粒污染对真空和石英玻璃中光束近场调制情况的研究, 可为高功率激光装置安全稳定运行和优化设计提供重要的参考依据. 下面就高功率激光光束分别在真空和石英玻璃中经颗粒污染后的近场衍射情况进行数值模拟和分析.

3.1 颗粒污染在真空中的近场衍射效应

在高功率激光放大链中, 由于不同的来源颗粒污染的种类不一样, 从而导致颗粒污染的形状、物

理结构、化学性质等对光束的影响都不同. 但就光学性质而言, 颗粒污染对光束产生的影响可简单的分为振幅调制和位相调制. 以经典的圆形振幅和位相调制为例, 研究颗粒污染对光束的近场衍射效应, 这对于其他性质和物理结构的颗粒污染影响光束近场情况是具有典型借鉴意义的.

本文研究从单一颗粒污染到多颗粒污染对光束的调制现象, 逐步对光束质量的变化进行分析与对光学元件造成破坏的风险估计. 首先设有一圆形硬边颗粒污染处于高功率激光放大链真空腔体光路中. 其对强度和波前均匀分布的光束会诱导产生不均匀的突变. 这种突变在衍射效应作用下将对整个激光束的近场分布产生调制, 具体如图 1 所示. 图 1 为振幅型 ((a) 到 (d))、振幅和位相型 ((e) 到 (h)) 以及位相型 ((i) 到 (l)) 颗粒污染的近场衍射情况比较图, 每组四图分别对应传输距离位于 0 mm, 200 mm, 400 mm 和 600 mm 处 x 方向的一维曲线分布. 从图中可以很清楚地看出衍射场中 x 方向光强分量随传输距离的变化关系. 相比而言, 振幅型颗粒污染对激光近场调制最弱, 位相型颗粒污染对激光近场调制最强, 振幅和位相兼有型颗粒污染对激光近场的调制介于两者之间. 且振幅型颗粒污染容易在激光近场的局部形成暗区, 位相型颗粒污染更容易在激光近场形成强区. 由此可知, 位相型颗粒污染对高功率激光光束质量的影响是最为严重的, 其他类型颗粒污染的影响较小.

在衍射效应作用下, 被颗粒污染衍射后的激光光束在真空中传输时, 会在传输方向形成一强度亮斑, 这种强度亮斑称之为热像. 图 2 给出了真空中直径为 200 μm 的振幅型和位相型颗粒污染衍射后, 传输距离分别为 10 mm, 30 mm, 90 mm 和 180 mm 的光束近场强度分布图. 对比分析图 2 中的衍射效应, 可知振幅型颗粒衍射出的热像强度较弱, 而位相型颗粒污染的经常调制却很强.

图 3 和图 4 分别给出了真空中波长分别为 1053 nm 基频和 351 nm 三倍频激光光束经振幅型与位相型颗粒衍射后, 所形成的热像强度增加倍数随传输距离的变化关系. 由图 3 和图 4 中可以发现, 高功率激光光束经振幅型颗粒污染衍射后的热像强度增加倍数小于 1.5 倍, 而经位相型颗粒污染衍射后的热像强度增加倍数最高约为 9 倍. 另外, 波长越长, 颗粒尺寸越小, 衍射效应就越强烈, 所形成的热像最强区的传输距离就越短. 而被同种颗粒污染衍射后的热像强度增加倍数与波长无关. 图 5 给出了 1053 nm 基频和 351 nm 三倍频激光光束分别经直径为 100 μm 的振幅型颗粒污染与直径

为 $300\ \mu\text{m}$ 的位相型污染颗粒衍射后轴上强度增加倍数随传输距离的变化关系. 从图中可以看出, 基频和三倍频激光在形成热像最强区时所需要的传输距离之间也存在三倍关系.

以上研究的是真空中单一颗粒污染对光束的近场衍射情况. 但实际光路中, 颗粒污染的数量繁多, 现选取规则分布数量分别为 2, 4 和 8 的颗粒污染为例来研究多颗粒污染的集群热像效应, 这些颗粒污染空间分布情况如图 6 所示, 图中相对两颗粒污染之间的间距为 $0.4\ \text{mm}$.

图 7 和图 8 分别给出了位相型颗粒污染和振幅型颗粒污染在真空中衍射后的激光近场分布情况. 图 7(a) 到 (d) 为两颗粒污染分别对应传输距离 $10\ \text{mm}$, $30\ \text{mm}$, $90\ \text{mm}$ 和 $190\ \text{mm}$ 位置处的激光近场分布图, 其中的一维曲线为 y 方向上的强度变化曲线. 图 7(e) 到 (h), (i) 到 (l) 分别对应四颗粒与八颗粒情况, 传输距离与 (a) 到 (d) 对应. 由图中可看出, 随着传输距离的增加, 颗粒污染越多, 光束弥散越迅速. 而在污染颗粒环形分布情况下, 数量越多, 中央衍射叠加的强度越强.

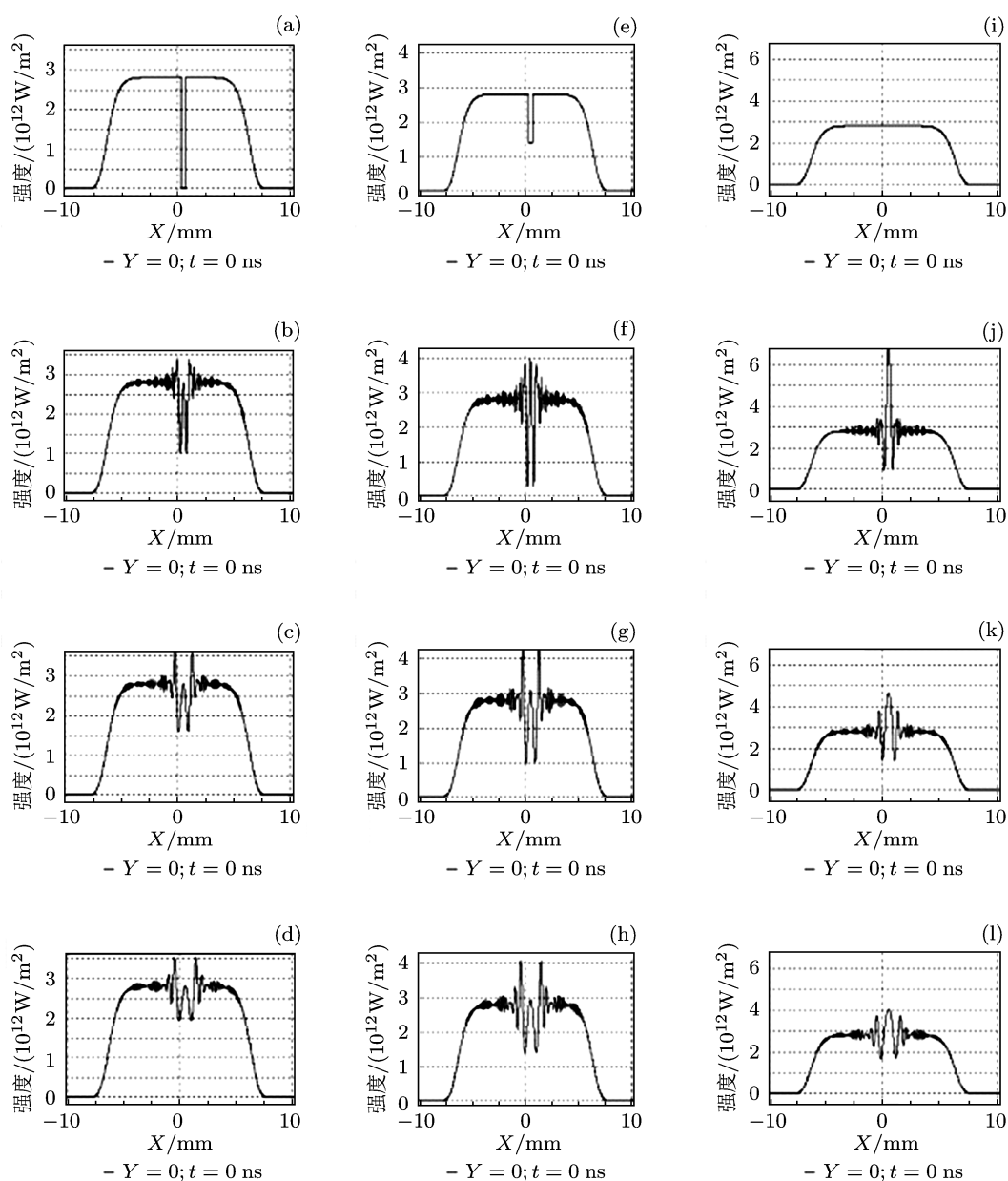


图 1 真空中单一颗粒污染对高功率激光光束近场的调制情况 (a) 到 (d) 为振幅型; (e) 到 (h) 为振幅和位相型; (i) 到 (l) 为位相型

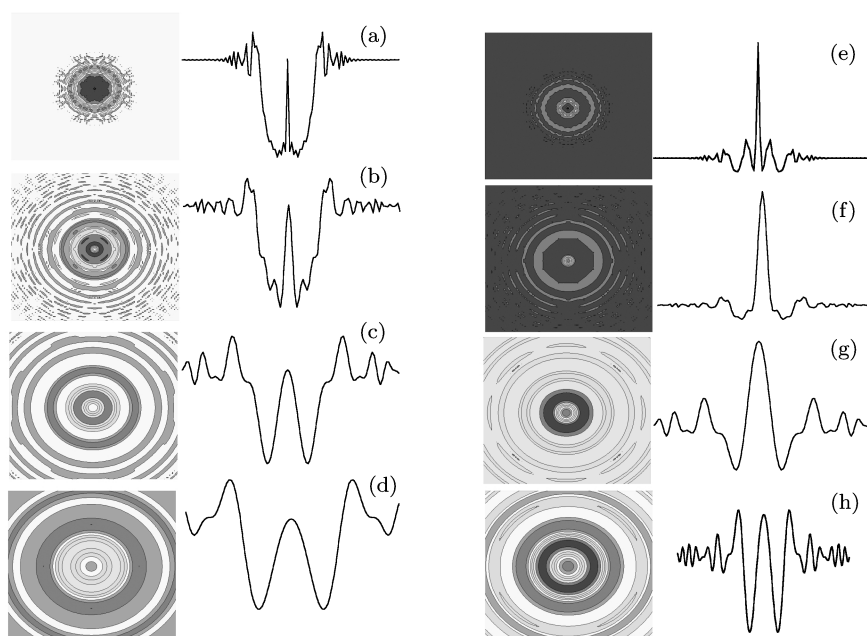


图2 真空中颗粒污染的近场衍射效应 (a)到(d)为振幅型颗粒污染; (e)到(h)为位相型颗粒污染

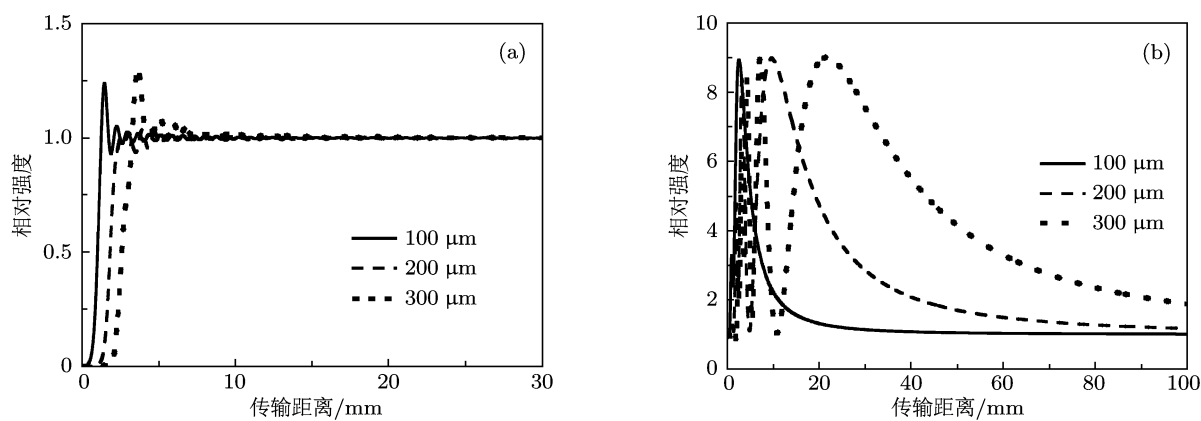


图3 真空中基频光经单一颗粒污染衍射后轴上相对强度增加倍数随传输距离的变化关系 (a)为振幅型颗粒污染; (b)为位相型颗粒污染

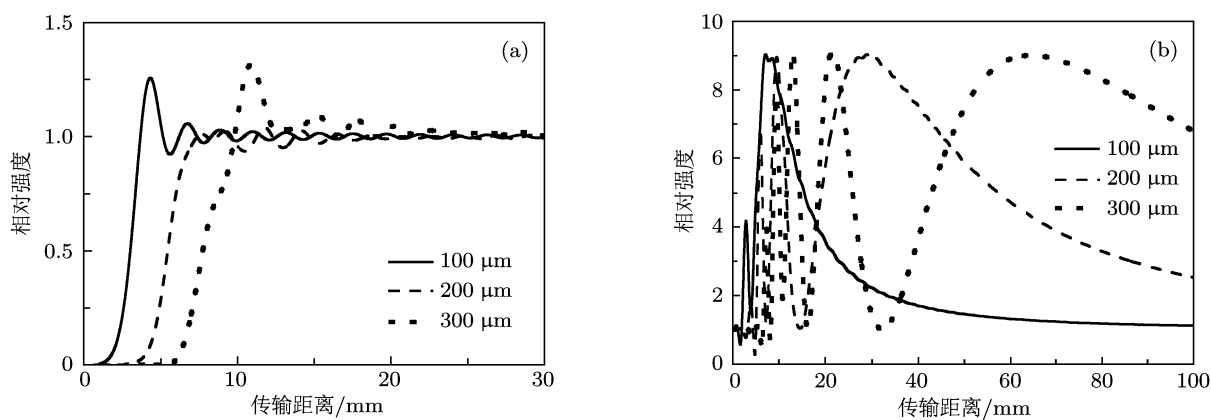


图4 真空中三倍频激光经颗粒污染衍射后的轴上相对强度增加倍数随传输距离的变化关系 (a)为振幅型颗粒污染; (b)为位相型颗粒污染

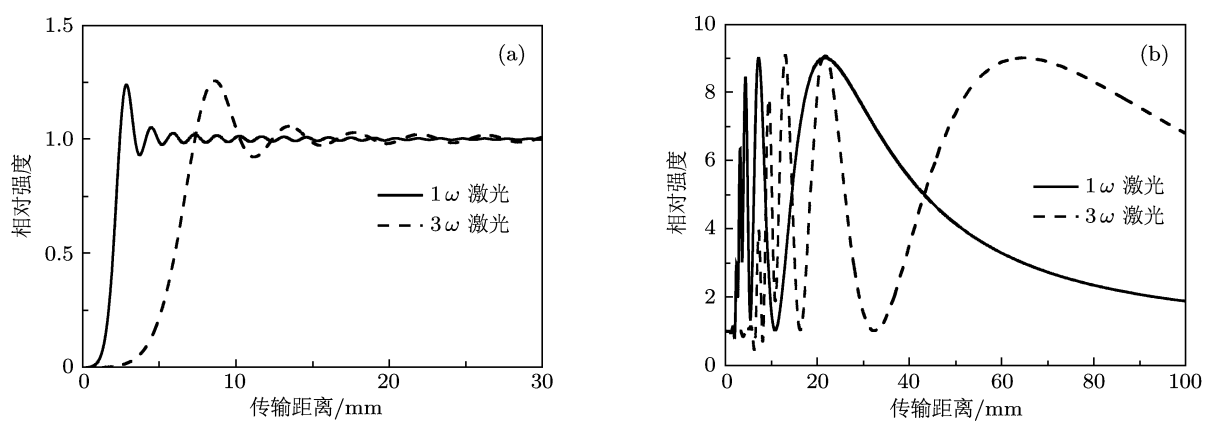


图5 不同波长情况下,衍射场轴上相对强度增加倍数随传输距离的变化关系 (a)为振幅型颗粒污染;(b)为位相型颗粒污染

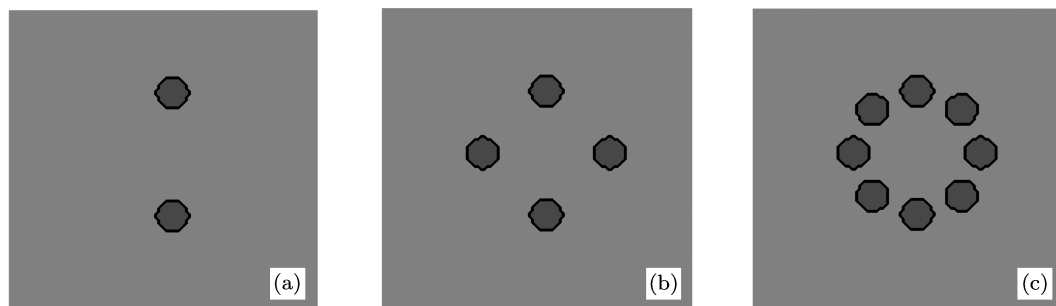


图6 颗粒污染空间分布示意图

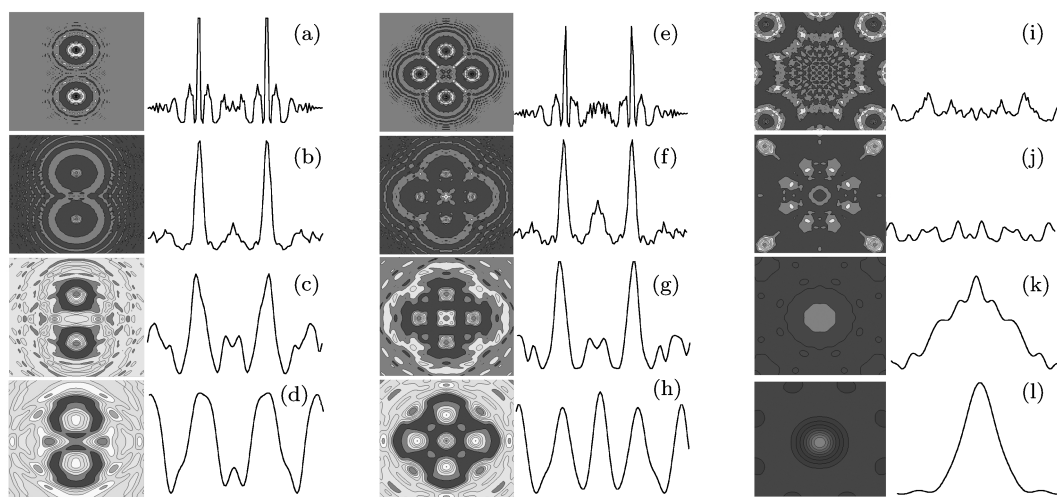


图7 规则分布位相型颗粒污染的近场衍射效应

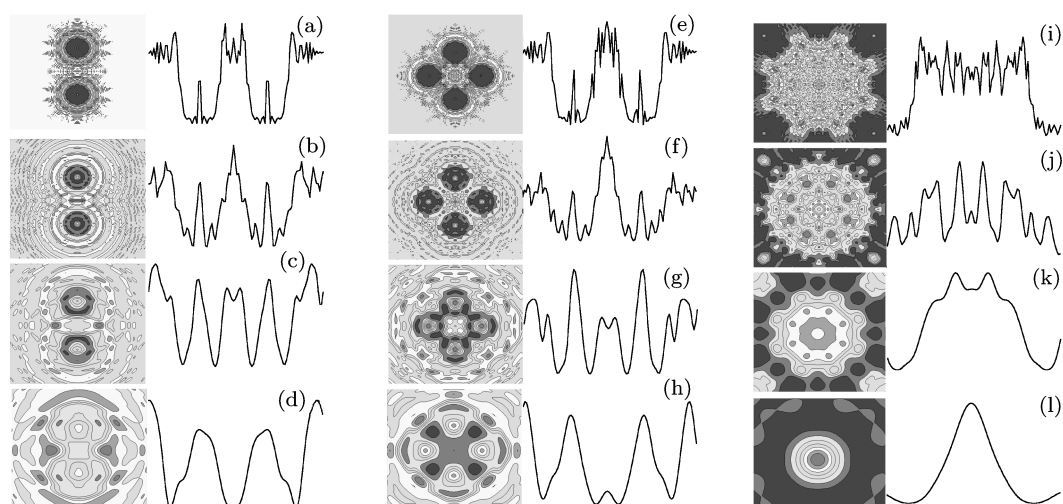


图8 规则分布振幅型颗粒污染的近场衍射效应

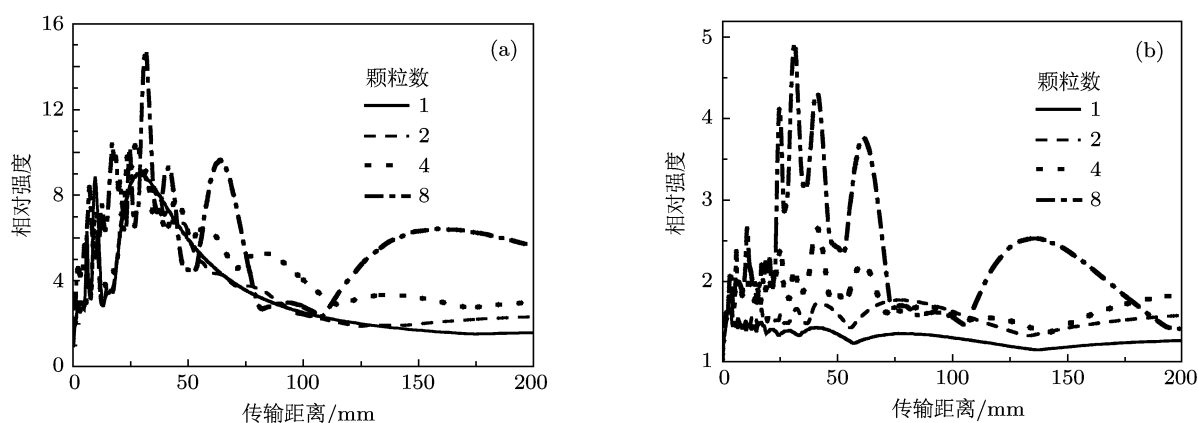


图9 不同数量颗粒污染情况下,轴上强度增加倍数随传输距离的变化关系 (a) 位相型颗粒污染; (b) 振幅型颗粒污染

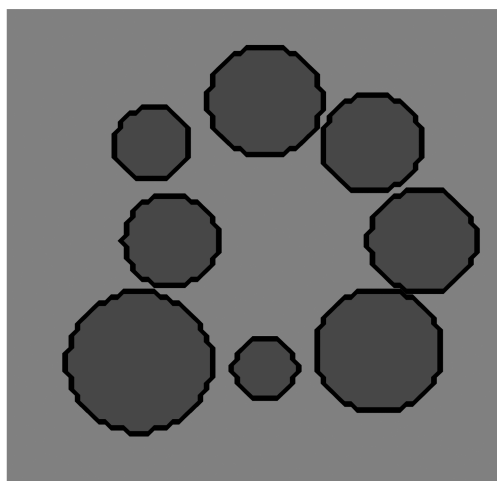


图10 颗粒污染空间随机分布示意图

在多颗粒污染共同作用下,会产生集群效应. 即会在激光近场形成很多热像斑点,其中的激光强

区会随传输距离的变化而发生偏移,最大的强度值超过单一颗粒污染情况. 不同数量的颗粒污染情况下,轴上强度增加倍数随传输距离的变化关系如图9所示. 图中的激光波长为 351 nm , 颗粒污染物的直径为 $200\text{ }\mu\text{m}$, 有多个颗粒污染物时,假设它们在半径 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的圆周上规则分布. 计算结果说明颗粒污染物数量越多,形成的激光热像区强度就越强,在真空中可持续的破坏距离就越长.

实际情况下,颗粒污染是无规则随机分布,大小不一的. 接下来以8颗大小不一的颗粒污染物为例,用来研究随机分布大小不一的多颗粒污染物对激光近场调制现象,如图10所示.

图11分别给出了真空中大小不一随机分布的振幅型颗粒污染衍射出的最大激光峰值的横向坐标位置、激光强度增加倍数与传输距离的关系. 图11说明随机分布的多颗粒污染衍射后的激光强度峰值在空间中的分布位置随着传输距离的变

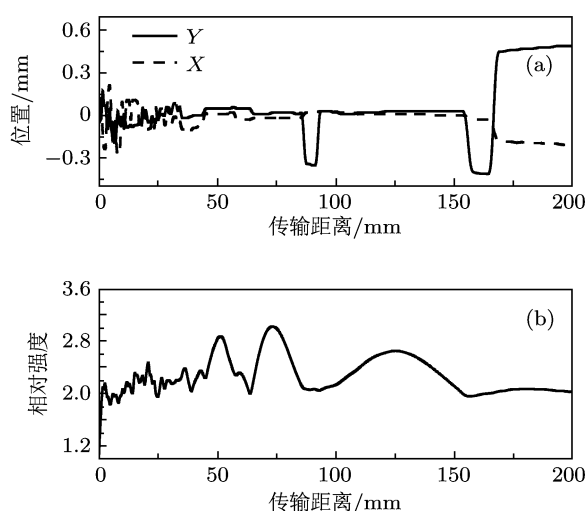


图 11 真空中随机分布的振幅型颗粒污染衍射后强度随传输距离的变化关系 (a) 横向激光强度峰值随传输距离的变化关系; (b) 轴上强度增加倍数随传输距离的变化关系

化而变化的, 不固定在同一个位置, 可能在很短的传输距离内出现较大的横向偏移现象. 这种现象

理论上有利于在一定程度上抑制小尺度自聚焦效应的发生, 从而降低光学元件被激光损伤的风险. 从图 12 中多颗粒污染衍射情况下, 横截面光强分布图可很明显的看到偏移现象. 其中给出的由 (a) 到 (c) 三幅图分别为激光在真空中传输 50 mm, 60 mm 和 70 mm 距离时的激光近场横截面光强分布图, 可见它们之中各自出现的激光强区在空间的横向分布是随着传输距离的变化而变化的, 这种横向强区偏移速度大小决定了在介质中是否能顺利形成小尺度自聚焦丝破坏.

3.2 石英玻璃中颗粒污染的近场衍射效应

相比真空情况, 光束在石英玻璃中传输具有非线性自聚焦效应, 这更值得关注颗粒污染的调制作用. 下面研究当颗粒污染附在石英玻璃的表面时, 高功率激光光束在石英玻璃中的衍射情况. 数值模拟取波长分别为 1053 nm 和 351 nm, 其折射率分别为 1.449736 和 1.4767, 非线性折射率系数分别取 0.8×10^{-13} esu 和 1.1×10^{-13} esu.

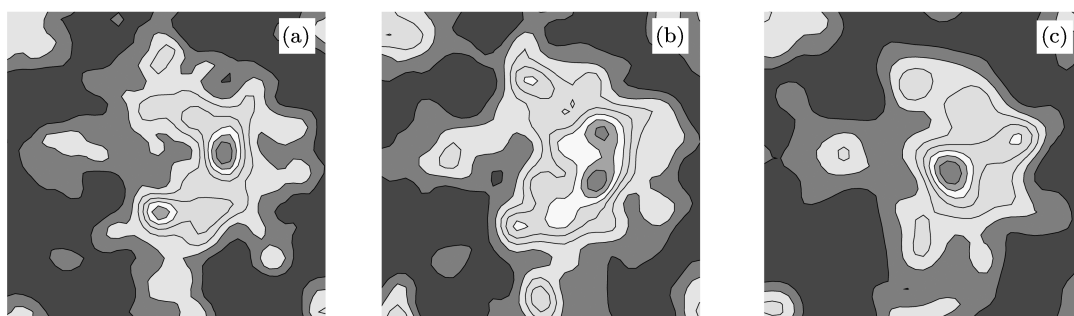


图 12 真空中随机分布振幅型颗粒污染衍射后的截面强度分布图 (a) 传输距离为 50 mm; (b) 传输距离为 60 mm; (c) 传输距离为 70 mm

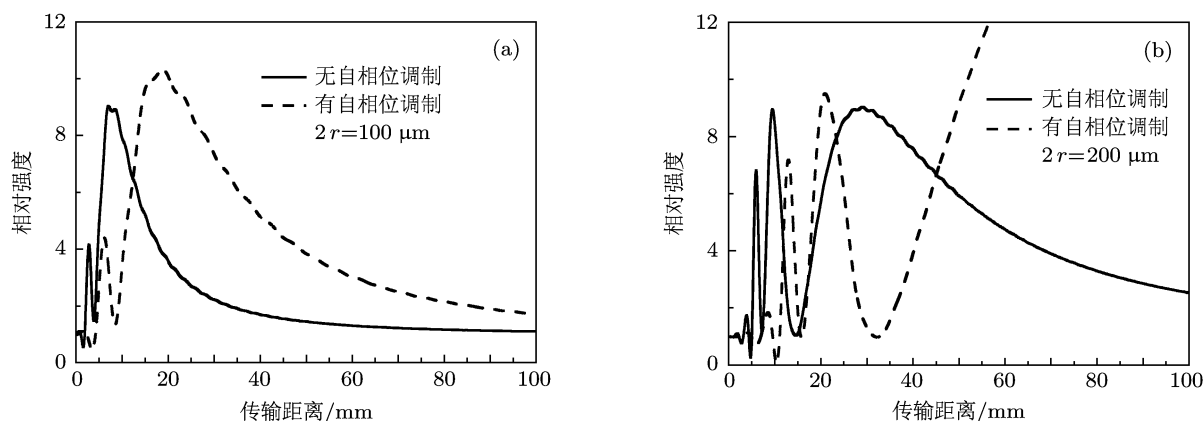


图 13 自相位调制对颗粒污染衍射场轴上强度增加倍数的影响 (a) 直径为 $100 \mu\text{m}$ 的位相型颗粒污染; (b) 直径为 $200 \mu\text{m}$ 的位相型颗粒污染

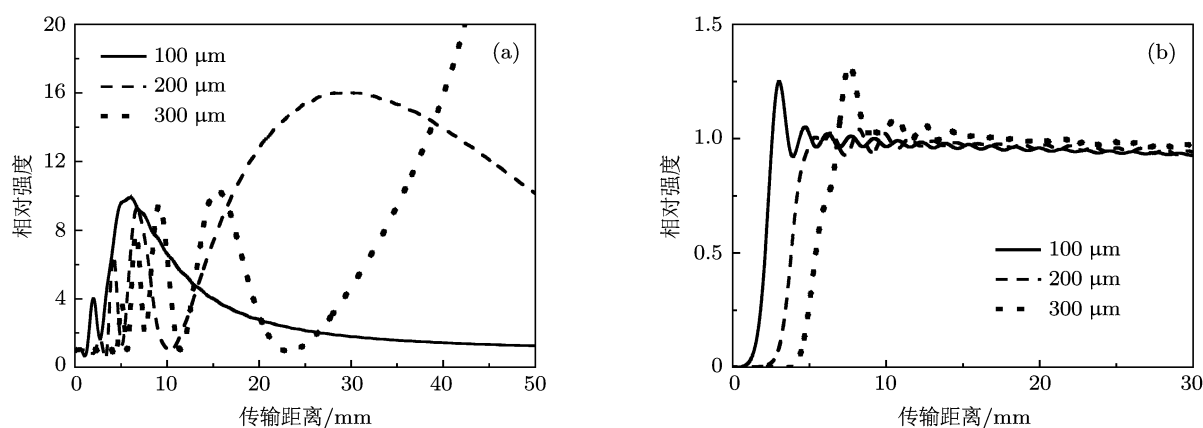


图 14 不同污染颗粒尺寸情况下, 轴上强度增加倍数随传输距离的变化关系 (a) 位相型污染颗粒; (b) 振幅型污染颗粒

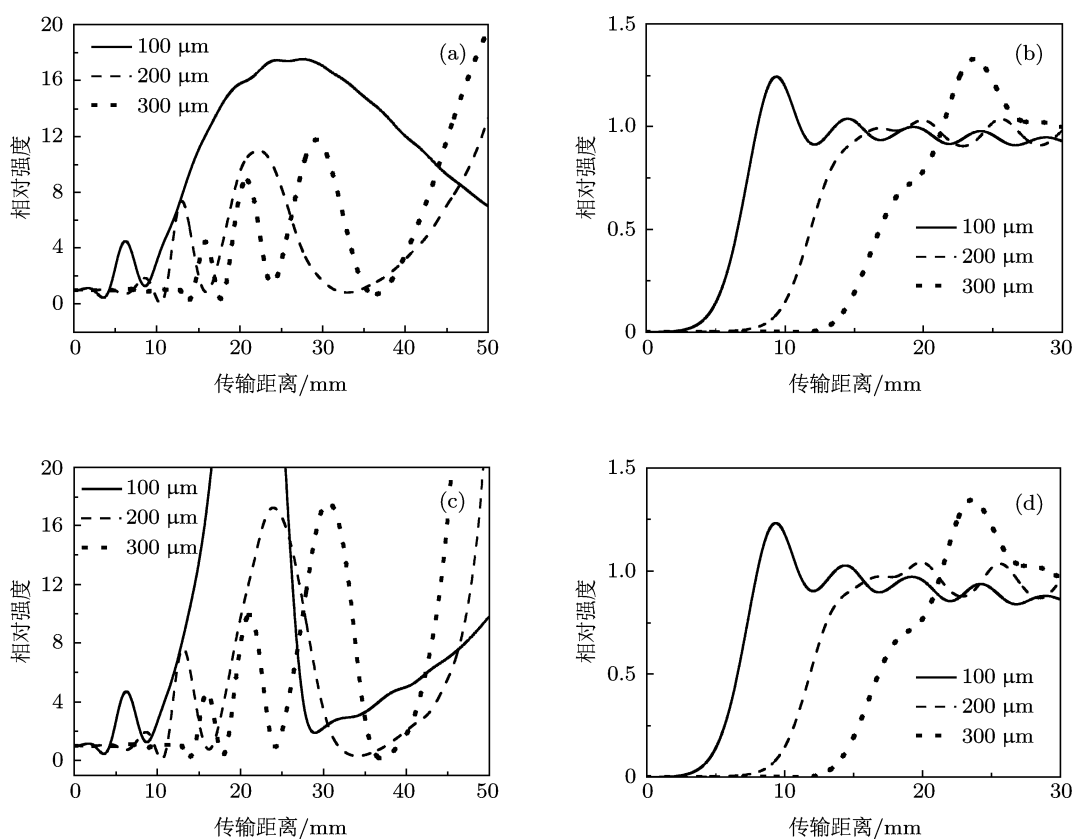


图 15 不同通量、不同尺寸情况下, 轴上强度增加倍数随传输距离的变化关系 (a) 和 (c) 表示位相型颗粒污染情况; (b) 和 (d) 表示振幅型颗粒污染情况

自聚焦效应是由自相位调制效应引起的, 在一定程度上会抑制颗粒污染对光束的衍射速度, 加大颗粒污染衍射出的轴向热像强度幅度 (如图 13 所示). 同时, 自聚焦效应还从衍射过程中筛选出最快增长的频率成分, 在强度或距离达到阈值时形成高强度的自聚焦丝, 会造成光学元件的破坏. 从图 13 可知, 不同污染颗粒尺寸对光束产生的调制

效应不同. 下面研究不同尺寸的颗粒污染情况下, 高功率激光光束近场的衍射情况. 图 14 计算了波长为 1053 nm 通量密度为 10 J/cm^2 的基频光束经不同尺寸的位相型和振幅型颗粒污染衍射后轴上强度增加倍数与传输距离之间的变化关系. 图 15 分别计算了波长为 351 nm 的 (3ω) 激光在通量密度为 3 J/cm^2 和 6 J/cm^2 情况下, 被不同口径、不同

种类的单一颗粒污染物在石英玻璃中衍射后的轴上强度增加倍数与传输距离之间的关系. 图 15 (a) 和 (b) 为通量 3 J/cm^2 脉宽 3 ns 三倍频 (3ω) 准方波激光情况, (c) 和 (d) 为通量 6 J/cm^2 脉宽 3 ns 三倍频 (3ω) 准方波激光情况. 研究说明由颗粒污染物引起的位相畸变是造成后续光学元件被破坏的最重要影响因素之一.

多颗粒污染物不仅在真空中可以衍射出比单一颗粒污染物更强的热像, 也可以在材料内部产生更严重的自聚焦效应. 图 16 和图 17 分别给出的是光束经石英材料前表面数量为 2, 4 和 8 的位相型和振幅型颗粒衍射后, 在石英材料内部轴上强度增加倍数随传输距离的变化关系. 图 16 (a) 到 (c) 表示在通量为 3 J/cm^2 , 脉宽为 3 ns 的三倍频准方波激光经

数量分别为 2, 4 和 8 位相型颗粒污染衍射后, 石英材料内部轴上强度增加倍数与传输距离之间的关系. 而图 16 (d) 到 (f) 为通量 6 J/cm^2 的情况. 图 17 表示通量分别为 3 J/cm^2 ((a) 到 (c)) 和 6 J/cm^2 ((d) 到 (f)), 脉宽为 3 ns 的三倍频准方波激光经数量分别为 2, 4 和 8 振幅型颗粒污染衍射后, 石英材料内部光场轴上强度增加倍数与传输距离之间的关系. 从图 16 和图 17 可知, 激光通量越大, 轴上强度增加倍数变化越大. 而位相颗粒污染所引起的强度调制也比振幅型颗粒污染所引起的强度调制大. 颗粒污染数量越多, 对激光近场均匀性的影响就越大, 形成的激光热像强度就越高, 在材料内部也越容易形成自聚焦破坏.

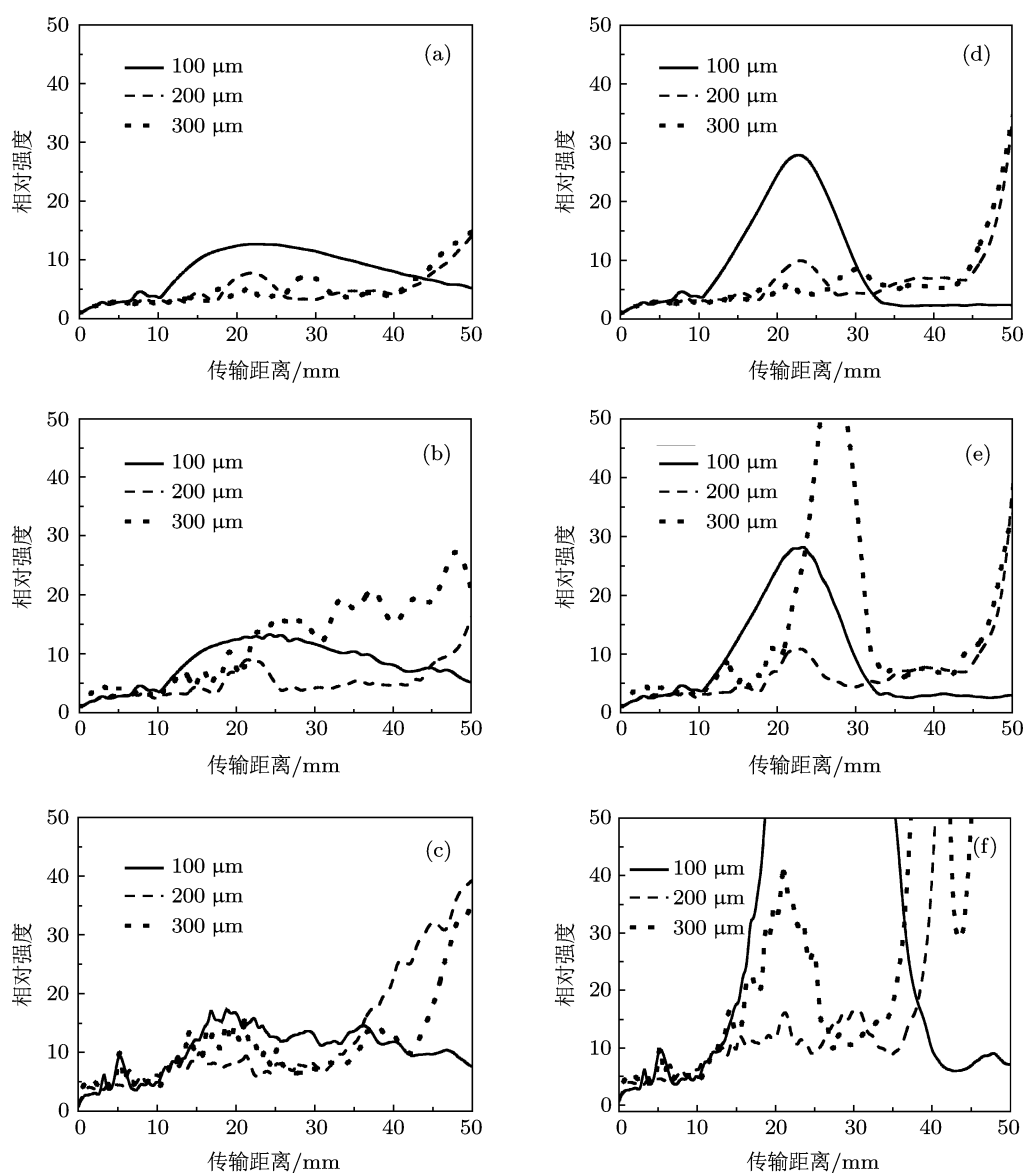


图 16 石英玻璃种位相型颗粒污染衍射后轴上强度增加倍数随传输距离的变化关系

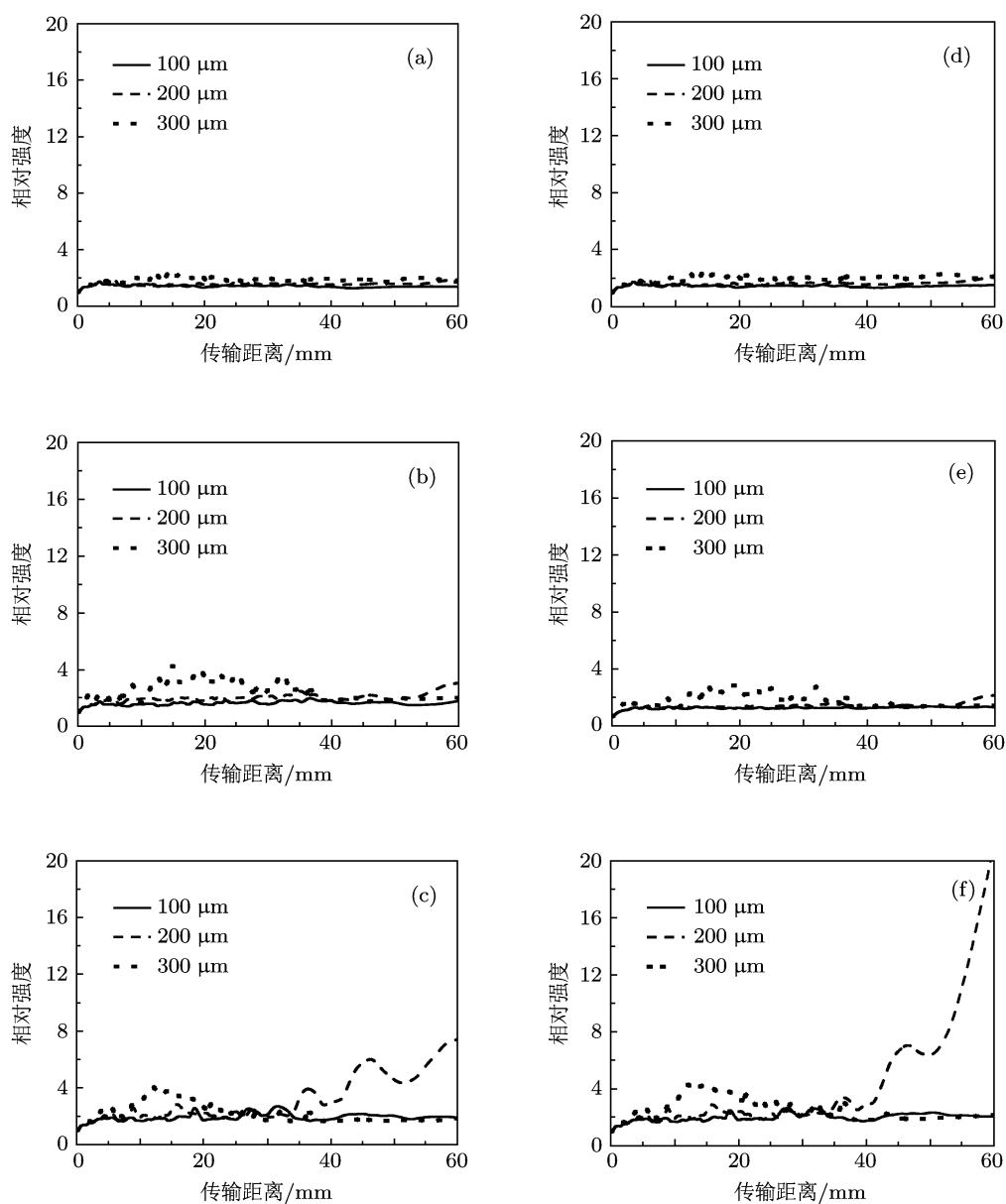


图 17 石英玻璃种振幅型颗粒污染衍射后轴上强度增加倍数随传输距离的变化关系

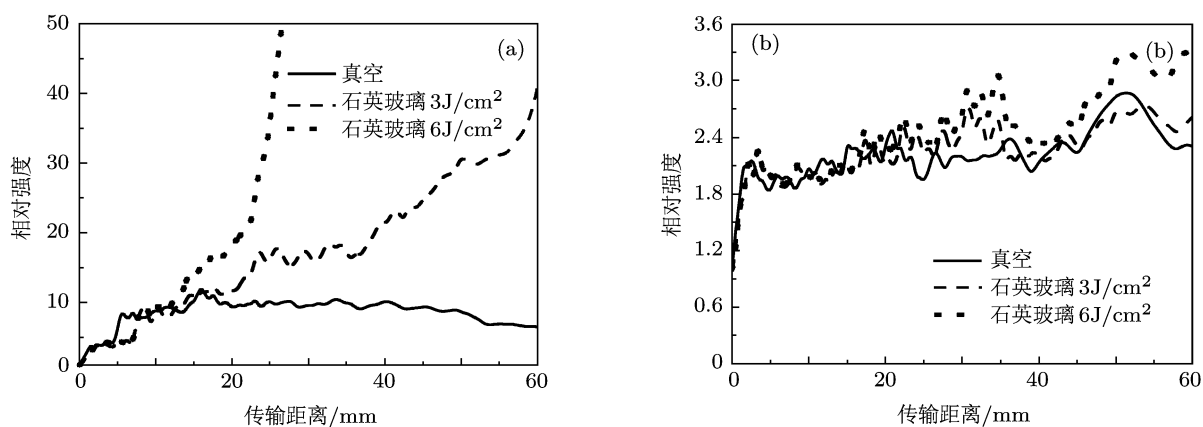


图 18 随机分布的颗粒污染在石英玻璃中衍射后, 轴上强度增加倍数随传输距离的变化关系 (a) 为位相型颗粒污染; (b) 为振幅型颗粒污染

当颗粒污染随机分布时,轴上激光强度增加倍数随传输距离的变化情况如图 18 所示. 图中说明,无论是振幅型还是位相型颗粒污染情况,在同一传输距离,石英玻璃中的光强增加倍数都比真空中的光强增加倍数小. 也就意味着在石英玻璃中所形成的破坏性热像(或自聚焦丝)需要的距离有较大的容忍度,这有利于在光路中采用更厚的光学元件,从而有利于适当降低大口径光学元件的加工与使用难度.

4 结 论

在高功率激光驱动器运行环境中,不可避免的会出现颗粒污染. 研究高功率激光光束经颗粒污染的近场衍射效应,对于驱动器安全稳定运行、装置

负载寿命、光束质量的提升以及优化设计等均有参考价值. 本文采用具有置信度的高功率激光设计软件 *Laser designer* 对光束经颗粒污染的衍射特性作了数值模拟并加以分析,提供了较为详实的参考数据和说明. 研究表明,位相型硬边颗粒污染对高功率激光光束的衍射效应最为严重,理论上大于其他种类的颗粒污染;单纯由衍射效应导致的热像调制和由衍射及小尺度自聚焦两者共同导致的热像调制相比,前者所造成的影响较低. 相比振幅型颗粒污染,位相型硬边颗粒污染所引起的小尺度自聚焦热像调制更为严重. 而由颗粒污染衍射所引起的光束近场强区横向偏移,却在一定程度上可以抑制小尺度自聚焦效应的产生,从而降低光学元件被激光损伤的风险.

-
- [1] Wen S C and Fan D Y 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1282 (in Chinese)[文双春, 范滇元 2000 物理学报 **49** 1282]
 - [2] Xie L P, Zhao J L, Su J Q, Jing F, Wang W Y, Peng H S 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2175 (in Chinese) [谢良平, 赵建林, 栗敬钦, 景峰, 王文义, 彭韩生 2004 物理学报 **53** 2175]
 - [3] Feng Z H, Fu X Q, Zhang L F, Xu H W, Wen S C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2253 (in Chinese) [冯则胡, 傅喜泉, 章礼富, 徐慧文, 文双春 2008 物理学报 **57** 2253]
 - [4] Wang Y W, Deng J Q, Wen S C, Tang Z X, Fu X Q, Fan D Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1738 (in Chinese) [王友文, 邓剑钦, 文双春, 唐志祥, 傅喜泉, 范滇元 2009 物理学报 **58** 1738]
 - [5] Peng T, Zhao J L, Xie L P, Ye Z J, Li Q, Su J Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3255 (in Chinese) [彭涛, 赵建林, 谢良平, 叶知隼, 李强, 栗敬钦 2007 物理学报 **56** 3255]
 - [6] Zhou L D, Su J Q, Li P, Liu L Q, Wang W Y, Wang F, Mo L, Cheng W Y, Zhang X M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6279 (in Chinese) [周丽丹, 栗敬钦, 李平, 刘兰琴, 王文义, 王方, 莫磊, 程文雍, 张小民 2009 物理学报 **58** 6279]
 - [7] Zhou L D, Su J Q, Li P, Wang W Y, Liu L Q, Zhang Y, Zhang X M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 024202 (in Chinese) [周丽丹, 栗敬钦, 李平, 王文义, 刘兰琴, 张颖, 张小民 2011 物理学报 **60** 024202]
 - [8] Genin F Y, Kozłowski M R, Feit M D 1998 *C&MS PROGRESS REPORT-FY97*
 - [9] Mainguy S, Garrec B L, Josse M 2005 *SPIE* **5991** 599105-3
 - [10] Mainguy S, Pecault I T, Garrec B L 2005 *SPIE* **5991** 59910G-1
 - [11] Palmier S, Toveni I, Lemaignere L, Rullier J L, Capoulade J, Bertussi B, Natoli J Y, Servant L 2005 *SPIE* **5991** 59910R-1
 - [12] Miller P E, Suratwala T I, Wong L L, Feit M D, Menapace J A, Davis P J, Steele R A 2005 *SPIE* **5991** 599101-1 Technology Press) p 417 (in Chinese) 肖纪美, 朱逢吾 1999 材料能量学 (上海: 上海科学技术出版社) 第 417

Diffraction effect of high-power laser beams through contamination particles*

Zhang Guo-Wen¹⁾ Lu Xing-Qiang^{1)†} Cao Hua-Bao¹⁾ Yin Xian-Hua¹⁾
Lü Feng-Nian¹⁾ Zhang Zhen¹⁾ Li Jing-Hui¹⁾ Wang Ren-Gui¹⁾
Ma Wei-Xin²⁾ Zhu Jian²⁾

1) (*National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

2) (*Shanghai Institute of Laser Plasmas, Shanghai 201800, China*)

(Received 24 February 2011; revised manuscript received 30 March 2011)

Abstract

The near-field diffraction characteristics when a high-power laser beam traverses contaminant particles are studied by using the designing software of high-power laser drivers-Laser designer. The modulations generated by contaminant particles are sorted. Then the influence of contaminant particles with amplitude or phase modulation on the near-field intensity distribution in vacuum or in fused silica is analyzed in great detail. The results show that in both vacuum and fused silica, the phase modulated contaminant particles have a greater influence on the near-field properties of high-power laser. Moreover, it is found that in fused silica, the small-scale self-focusing hot-image modulation of high-power laser induced by phase modulated hard-edge contaminant particles is momentous. But the lateral shift of high-power laser beam caused by contaminant particles maybe inhibits the small-scale self-focusing effect to some extent, thereby reducing the laser injury risk of optical component.

Keywords: high power laser beam, contaminant particle, small-scale self-focusing, hot-image

PACS: 42.25.Fx, 42.65.-k, 42.65.Jx, 03.50.De

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60707019).

† E-mail: jianm_xingqianglu@siom.ac.cn