

基于混合注入机制的级联尾场电子加速*

谭放¹⁾²⁾ 张晓辉²⁾ 朱斌²⁾ 李纲²⁾ 吴玉迟²⁾ 于明海²⁾ 杨月²⁾
 闫永宏²⁾ 杨靖²⁾ 范伟²⁾ 董克攻²⁾ 卢峰²⁾ 谷渝秋^{2)†}

1) (中国科学技术大学近代物理系, 合肥 030006)

2) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 高温高密度等离子体物理国家重点实验室, 绵阳 621900)

(2019年4月2日收到; 2019年6月20日收到修改稿)

激光尾场电子加速装置中, 为了获得可稳定重复产生的高质量单能尾场电子, 电子的可控注入是其中的关键. 基于自主设计的级联加速喷气靶, 研究离化注入、冲击波前沿注入等可控注入技术及其结合对尾场电子产生阈值、电子能谱及其稳定性的影响. 研究结果显示, 离化注入机制、冲击波前沿注入机制以及级联加速喷嘴的结合, 可以使尾场电子的注入阈值大幅度降低, 且电子的离化注入区域被限制于冲击波前沿处, 最终大幅度降低电子束的绝对能散、提高稳定性. 在最优化的条件下, 可以获得最小发散角为 (3.6×3.8) mrad, 平均中心能量为 (63.24 ± 6.12) MeV, 平均能散为 (13.0 ± 3.9) MeV、平均电量为 (5.99 ± 3.10) pC 的重频单能尾场电子.

关键词: 尾场加速, 级联加速, 冲击前沿注入, 离化注入

PACS: 52.38.Ph, 29.27.Ac, 47.40.Nm, 32.80.Aa

DOI: 10.7498/aps.68.20190484

1 引言

1979年, Tajima 和 Dawson^[1] 提出了激光等离子体波加速器的设想. 其基本原理是超短超强激光在气体里传输, 其尾部可以激发出纵向的尾波电场, 该电场可以用于加速带电粒子. 当尾波场强度超过等离子体所能允许的最大电场强度而发生波破时, 运动速度超过尾波场相速度的电子可以被注入进尾波场中, 随后在尾波电场中被进一步加速^[2]. 等离子体尾波电场的强度 E_0 主要由等离子体密度 n_p 决定, 其简易表达式为 E_0 [GV/m] = $300(n_p)^{1/2}$ [10^{19} cm⁻³], 通常为数十 MV/cm—GV/cm 量级. 激光尾场电子加速器可以通过毫米至厘米的加速距离,

将电子加速至几十 MeV 至 GeV 量级, 代表了新一代加速器的发展方向^[3]. 2004年美国 LBNL 实验室^[4]、英国 RAL 实验室^[5] 以及法国 LOA 实验室^[6] 同时报道了在激光尾场电子加速方面的实验结果, 重新唤起了尾场电子. 而经过多年的发展, 激光尾场加速器已经可以获得能量为数 GeV 量级的尾场电子^[7-10].

激光尾场电子加速器产生的高品质电子束可以进一步产生高质量的辐射源. 2001年, Catravas 等^[11] 提出了全光汤姆逊散射光源的设想, 使用激光尾场加速产生高能电子, 再用激光与尾场电子相互作用产生 X 射线脉冲. 全光汤姆逊散射光源有望获得脉宽短至 10 fs, 源尺寸小于 5 μ m、发射角 mrad 量级、单色性很好的高品质台面硬 X 射线和伽马射线源. 目前, 实验建立的全光汤姆逊散射光

* 中国工程物理研究院院长基金 (批准号: 2014-01-17)、国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金 (批准号: U1630246)、国防基础科研核基础科学挑战专题高能密度科学领域 (批准号: JCKY2016212A505) 和国家重点研发计划 (批准号: 016YFA0401100) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yqgu@caep.cn

源主要有两种类型:一种采用两束激光对打^[12-16],对激光和电子的时空同步要求极高,但能够用于喷嘴、气室、毛细管等多种尾场电子加速器上;另一种使用等离子体镜反射主激光,使其与尾场电子相互作用^[17-19],激光与电子的时空同步难度低,但需要主激光被良好地自聚焦且能量不能损耗过大,只能用于较短的喷气靶尾场电子加速器。

稳定的高品质单能全光汤姆逊散射光源的核心需求是稳定的高品质单能尾场电子,这也是激光尾场电子加速技术本身发展的需求。为了获得稳定的高品质单能尾场电子,国内外的研究者开展了一系列针对尾场电子注入机制的研究。早期研究中,波破导致的电子注入被称为自注入^[20-26],其发生时间、位置以及注入的电量严重依赖于激光在等离子体内部的非线性传输及自聚焦过程,因此具有很强的随机性,对初始参数也非常敏感,每发打靶电子的注入位置都会改变,使得最终获得的尾场电子发与发之间的重复性很差。为了进一步提高尾场电子的稳定和重复性,电子注入技术得到了深入的研究,如离化注入^[7,27-30]、碰撞注入^[31-33]、密度梯度注入^[34-37]、冲击波前沿注入^[38-43]等。离化注入^[27]是在低 Z 气体里混入少量高 Z 气体,例如在He气里混入少量 N_2 气,激光功率密度较高的部分可以将N原子内层的电子电离并直接注入进尾场加速相从而得到加速。激光在混合气体中传输时,离化注入通常发生在整个等离子体通道中,由此产生的尾场电子电量较大,但能谱为连续谱。碰撞注入^[31-33]是使用第二束激光与主激光碰撞形成驻波,在驻波波峰所在区域激光强度大大提高,使得电子只在驻波波峰附近注入,该方法也可以获得稳定的单能尾场电子,但需要实现两束激光高精度时空同步,实现的技术难度很高。密度梯度注入^[34-37]通过使用具有连续变化的密度梯度的气体靶,变化的等离子体密度可以控制尾场加速结构的尺度,从而实现电子的注入和持续加速。密度梯度注入也是一个持续的过程,导致电子能谱通常也为连续谱。冲击波前沿注入(shock wave front injection)^[38-43]可以看作一种发生在极陡峭的密度梯度处的电子注入。其原理是在超音速喷嘴上加刀片,超音速气流接触刀片时,在刀边边缘被减速,产生一个尺度极小但密度变化非常陡峭的高密度区域。激光在这个区域的密度下降沿处形成急速膨胀的尾场结构,尾场相速度降低,使原本不能被注入进尾场加

速区的电子包含进加速区,从而在一个尺度极小且位置受控的区域内实现电子的注入。在冲击波前沿注入的电子的初始状态以及后续的加速距离都一致,因此可以大大提高尾场电子的单能性和稳定性。

因为尾场电子的注入和加速需要不同的等离子体密度条件,一个很自然的想法就是将电子的注入和加速分开,分别使用不同的气体密度来满足两个过程不同的需求。小尺度的高密度注入级可以产生能量较低的单能电子作为种子束。大尺度的低密度加速级无法注入电子但是可以通过较长距离的加速将种子束加速至高能量,这就是所谓的级联加速^[44,45]。级联电子加速技术既可以实现对电子注入和加速过程的控制,同时也可以为之后开展多路级联研究奠定基础,有希望通过多次尾场加速将电子加速至 TeV 量级^[46,47]。在多路级联电子加速技术中,小能量高重频激光器产生的尾场电子可以作为种子源,在后续的级联加速过程中得到进一步的加速。种子源的单能性和稳定性对后续的电子加速过程以及最终获得的电子束参数有重要影响,因此有必要探索小能量高重频激光条件下降低尾场电子绝对能散并提高电子束参数稳定性的途径。

项目组在之前的研究中已经在激光聚变研究中心的 SILEX-I 装置上成功获得了 58 MeV 的单能尾场电子^[48],但尾场电子的重复性仍然不够好。基于新建的 45 TW 重频激光器,通过对现有的电子注入技术以及电子加速技术的调研,项目组确定了技术路线:在现有的超音速喷嘴尾场电子加速装置上引入冲击前沿注入技术、离化注入技术以及级联电子加速技术,来产生全光汤姆逊散射光源所需的可以稳定重复运行的单能电子束。为了获得更加稳定且重复性好的尾场电子,Thaury 等^[49]和 Golovin 等^[50]的研究表明,结合多种控制注入技术以及级联加速技术的混合加速技术可以有效克服单个技术的极限,获得质量和稳定性更好的单能尾场电子。目前混合加速相关的研究成果较少,还有大量的物理细节需要探索。因此我们开展了这方面的研究,通过对喷嘴的设计,使用单个喷嘴实现了注入和加速的分离,然后在注入级引入冲击前沿结合离化注入的方式,获得了稳定产生的尾场电子。

2 实验布局及参数

尾场电子加速实验的喷嘴设计及实验排布如

图 1(a) 所示. 实验中使用的超音速喷嘴为单路供气的双出口喷嘴, 第一个出口为直线型管道, 出口直径为 1 mm, 第二个出口为锥形管道, 出口直径 2 mm. 直线型管道喷出的气体尺度小、流速慢、气体密度高, 对应的等离子体密度也高, 激光与其作用更容易产生电子注入, 因此可以作为级联加速的电子注入级. 锥形管道喷出的气体尺度大、流速快、气体密度低, 不容易发生电子注入, 但对激光能量的损耗较小, 可以支持长距离的电子加速, 因此可以作为级联加速的电子加速级. 注入级的出口处安装刀边, 气体流经刀边边缘时可以产生密度更高、尺度更小的冲击波前沿, 更有利于电子注入. 同时由于注入级与加速级分开, 注入级的刀边不会影响加速级的气体密度分布. 飞秒激光聚焦到喷嘴的加速级中心, 与超音速喷嘴喷出的气体相作用产生尾场电子. 使用荧光屏 ($Gd_2O_3:S:Tb$) 将电子的束斑转换成可见光光斑, 再使用一台 16 bit CCD (1024×1024 像素) 结合成像镜头可以实现电子束斑的在线监测. 使用磁谱仪 (0.8 T, 230 mm) 对电子进行偏转, 用荧光屏 ($Gd_2O_3:S:Tb$) 结合 16 bit CCD 记录电子能谱. 整套磁谱仪的效率经过标定,

可以直接由荧光屏发光强度给出电子电量.

实验中为了保护激光器, 打靶功率限制为 30 TW, 到靶能量为 700 mJ, 脉宽 25 fs, 激光波长为 800 nm, 激光聚焦 OAP 的焦距为 420 mm, 聚焦焦斑为 $10 \mu m$ (半高全宽, 40% 能量集中度), 激光的归一化强度 $a_0 = 2.9$. 激光打靶高度距离喷嘴上游 2 mm, 激光聚焦位置为加速级中心. 为了测量喷嘴附近的气体密度分布, 使用探针激光对气体进行阴影照相, 同时在 $0-180^\circ$ 范围内旋转喷嘴, 每隔 3° 测量一次气体密度分布, 最后使用三维 CT 重建算法计算得到喷嘴附近气体密度的三维分布. 喷气气压为 650 kPa 且喷嘴附加刀边时, 其附近的气体密度分布如图 1(b) 所示, 喷嘴轴线上距离喷嘴 2 mm 处气体密度的一维分布如图 1(c). 可以看到, 刀边的引入在喷嘴的两个出口之间 2 mm 位置处产生了一个高密度气柱, 其后沿存在一个极陡的气体密度下降沿.

3 实验结果

电子的束斑大小可以反映尾场加速机制是否生效. 前期的实验结果证实, 当电子的束斑变成极

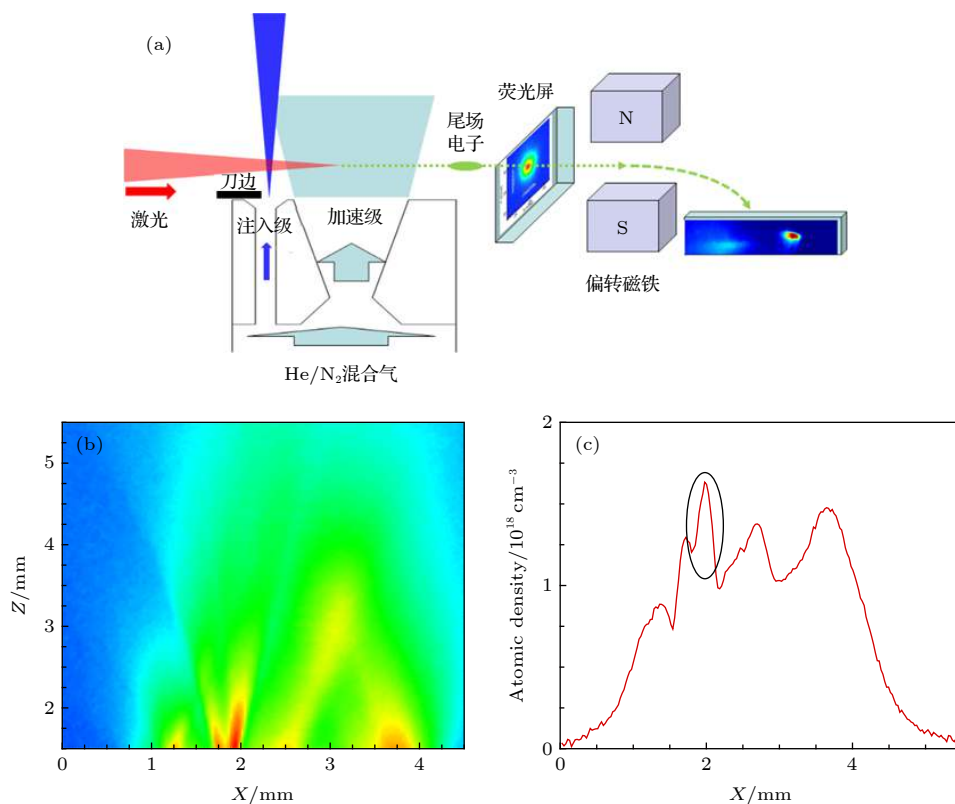


图 1 (a) 喷嘴设计及实验排布; (b) 气体密度分布侧视二维图; (c) 2 mm 高处气体密度对应电子密度的一维分布

Fig. 1. (a) The gas jet designment and the experimental layout; (b) the side view of the gas density distribution; (c) the one dimensional electron density at a height of 2 mm from the gas jet.

小的没有旁瓣的斑时, 可以认为激光在等离子体内得到了良好的引导, 尾场电子在等离子体通道内得到充分的加速, 其电子能量达到最大值, 其束斑才能达到极小. 因此可以通过检测电子束斑的尺寸随激光和靶参数的变化, 优化电子束斑, 来寻找最优的尾场加速条件.

通过比较不同的实验条件下电子束斑随喷气气压的变化, 可以研究冲击波前沿注入、离化注入、级联加速等技术的有效性. 实验中涉及四种实验条件: I) 使用刀边堵住注入级, 形成只有单加速级的喷嘴, 工作气体使用纯 He 气; II) 喷嘴包含注入级和加速级, 不附加刀边, 工作气体为 He(97.5%)/N₂(2.5%) 混合气; III) 喷嘴包含注入级、加速级和刀边, 工作气体为纯 He 气; IV) 喷嘴包含注入级、加速级和刀边, 工作气体为 He(97.5%)/N₂(2.5%) 混合气.

图 2(a)—图 2(e) 为条件 I) 下所获得的电子束斑, 可以观察到, 对于纯 He 气、单加速级情况, 喷气气压低于 2200 kPa 时完全没有电子产生. 只有当喷气气压提升至 2200 kPa 时, 才能产生尾场电子, 但束斑位置非常不稳定. 在更高的气压下 (2600 kPa) 会出现多次注入导致的多个电子束斑. 进一步的测量显示, 电子能谱的稳定性很差, 且全为连续谱, 说明电子主要来自于自注入机制, 并且在激光与靶相互作用的全过程中都会发生.

去掉刀边, 同时将工作气体更换为混合气体, 条件 II) 下所获得的电子束斑如图 2(f)—图 2(j) 所示. 与条件 I) 下获得的结果相比, 注入级以及混合气体的使用使得产生尾场电子的下限气压明显降低至 1800 kPa, 且电子束斑的位置变稳定. 进一步对电子能谱的测量显示, 电子能谱仍然为连续谱,

但稳定性变好, 说明混合气体的引入使得电子注入的物理机制变为离化注入, 提高了电子注入的稳定性. 在不附加刀边的情况下, 注入级与加速级的等离子体密度差不够高, 不能稳定地将电子注入位置限制于注入级, 在激光与靶相互作用的全过程中都会发生离化注入.

通过在注入级附加刀边, 可以在注入级中产生冲击波前沿, 比较工作气体分别为纯 He 气以及 He/N₂ 混合气时的电子束斑, 如图 3(a)—图 3(e) 以及图 3(f)—图 3(j), 分别对应实验条件 III) 和 IV). 图 3(a)—图 3(e) 显示, 工作气体为纯 He 气时, 在 1800 kPa 才开始有电子注入. 提高喷气气压时, 角分布光斑的位置波动极大, 并且高于 2400 kPa 时会有多光斑出现. 进一步的电子能谱测量结果也显示, 在下限气压 (1800 kPa) 时, 仍然无法产生稳定的单能电子. 通过比较图 2(f)—图 2(j) 以及图 3(a)—图 3(e) 的结果可以发现, 对于离化注入 (混合气)、冲击波前沿注入 (附加刀边)、级联加速 (双喷嘴) 这三种条件, 实验中只采用其中两种时, 发生电子注入所需的气压皆高于 1800 kPa, 并且皆不能将电子注入稳定地约束在注入级内. 而同时应用上述三种条件, 即实验条件 IV), 不同喷气气压下的电子束斑如图 3(f)—图 3(j) 所示. 可以看到, 在喷气气压 500 kPa 时就开始有电子注入, 且电子的出射方向基本稳定. 对电子能谱进行测量, 发现有部分发次出现单能电子. 由此可见, 混合气体中的离化注入可以显著降低电子注入发生的气体密度, 结合冲击波前沿注入, 可以有效地将离化注入约束到冲击波前沿处. 这些注入的电子可以在加速级中得到进一步加速, 有望获得稳定的单能电子.

基于图 3(f)—图 3(j) 的结果, 在条件 IV) 时,

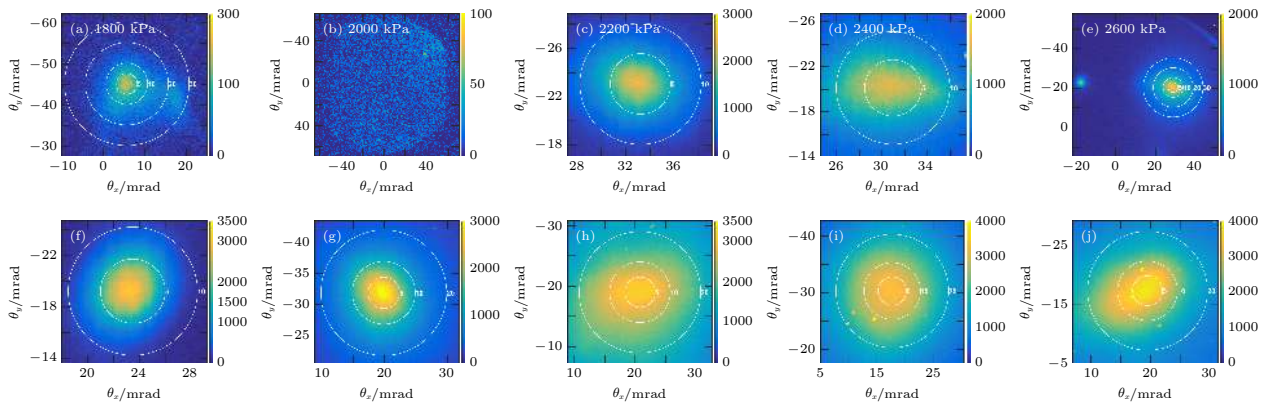


图 2 电子束斑 (上) 单喷嘴、纯 He 气结果; (下) 双喷嘴无刀边、混合气结果

Fig. 2. Electron angular distribution for ((a)–(e)) single stage gas jet and ((f)–(j)) dual-stage gas jet.

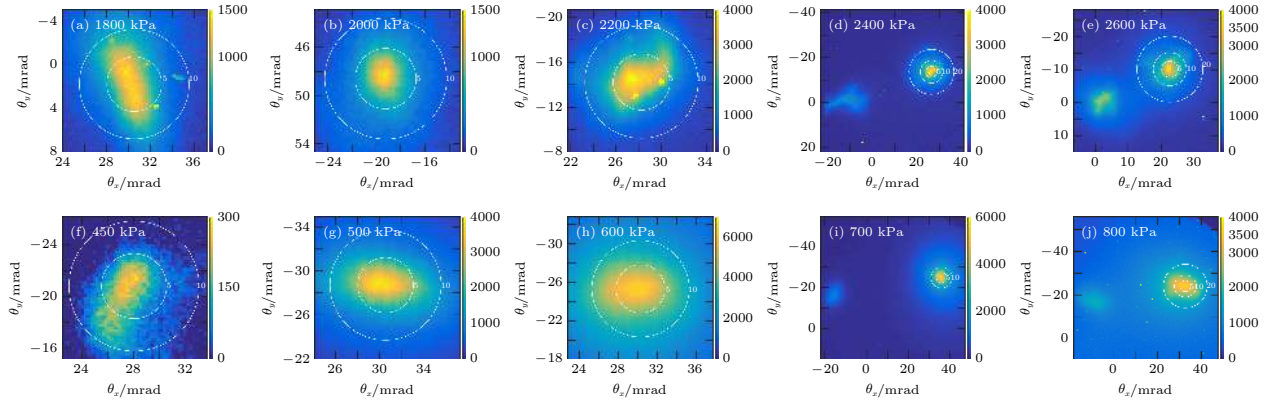


图 3 电子束斑 (a)—(e) He 气结果; (f)—(j) He 气混入 2.5% N₂ 气结果

Fig. 3. The electron angular distribution for (a)–(e) pure He and (f)–(j) the mixed gas of He with 2.5% N₂.

在喷气气压 600 kPa 附近精细地调节喷气气压, 最后发现喷气气压为 650 kPa 时电子束斑大小和指向的稳定性最佳, 因此在该密度下连打 6 发, 测试其多发打靶条件下的稳定性, 打靶结果见表 1.

表 1 喷气气压 650 kPa 时连续打靶 6 发得到的电子束斑参数, θ_x, θ_y 为出射方向, σ_x, σ_y 为角分布光斑的半高全宽直径

Table 1. The emitting direction θ_x, θ_y and the FWHM angular spread σ_x, σ_y of the electron angular distribution for continuous 6 shots under jet pressure of 650 kPa.

发次号	θ_x/mrad	θ_y/mrad	σ_x/mrad	σ_y/mrad
558	-25.5	28.9	8.5	5.6
559	-22.1	27.3	5.0	5.6
560	-23.5	23.3	6.2	4.8
561	-19.0	23.3	6.5	5.1
562	-18.1	24.2	3.8	3.6
563	-19.7	19.4	6.4	4.4

从表 1 可以看到, 连续打靶六发, 电子出射角度的平均值为 $(-21.3 \pm 2.6, 24.4 \pm 3.06)$ mrad, 角分布光斑的半高全宽 (FWHM) 为 $(6.07 \pm 1.4, 4.85 \pm 0.7)$ mrad. 光斑最小的发次为 562 发, 其放大的角分布如图 4, 角分布光斑在 x 和 y 方向的半高全宽分别为 3.8 和 3.6 mrad. 对电子束斑的测量结果显示, 基于级联加速、冲击前沿注入以及离子化注入技术, 尾场电子出射方向的稳定性得到了提升, 发散角也得到了控制.

接下来使用磁场强度为 8000 Gs ($1 \text{ Gs} = 10^{-4} \text{ T}$) 的磁谱仪对电子能谱进行测量, 连续打靶 5 发, 测量得到的电子能谱结果如图 5, 其具体参数如表 2 所列, 其中电子束电量由经标定后的荧光成像系统

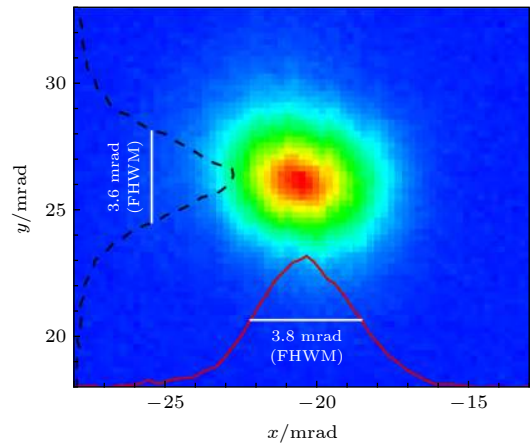


图 4 喷气气压 650 kPa 时发射角最小的电子束斑

Fig. 4. The spot size for shot 0562 when the jet pressure is 650 kPa.

给出. 由能谱测量结果可以看到, 连续打靶时, 可以基本保持电子的单能性, 且电子能谱基本没有低能尾部, 呈现干净的单能峰结构. 多发打靶时电子中心能量会有抖动, 抖动范围为 58.2—71.0 MeV, 平均能量为 (63.24 ± 6.12) MeV. 电量的抖动为 2.0—9.4 pC, 平均值为 (5.99 ± 3.10) pC, 电子绝对能散 (FWHM) 的抖动为 6.9—17.0 MeV, 平均值为 (13.0 ± 3.9) MeV.

4 结果讨论

为了获得稳定的单能尾场电子, 最基本的思路是约束尾场电子的注入范围, 使电子可以稳定地在一个区域内注入, 并且注入区域需要尽可能小, 这样可以保证注入电子初始条件的一致性以及多发重复时的稳定性, 提高种子电子束的单能性. 在后续的加速过程中, 初始注入的准单能电子可以被进

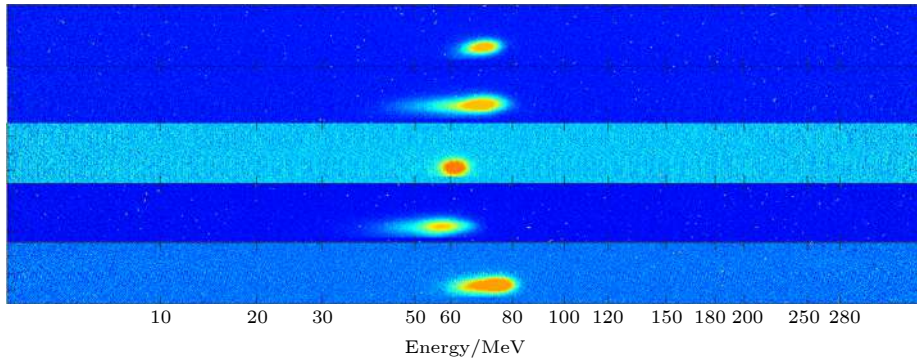


图 5 喷气气压 650 kPa 时连续打靶 5 发, 磁谱仪测量到的电子能谱

Fig. 5. Electron energy spectra for continuous 5 shots under jet pressure of 650 kPa.

表 2 喷气气压 650 kPa 时连续打靶 5 发得到的电子能谱参数

Table 2. The central energy, charge and energy spread of the electrons for continuous 5 shots when the jet pressure is 650 kPa.

发次号	中心能量/MeV	电量/pC	能散FWHM/MeV
570	66.7	6.5	10
571	66.1	9.4	17
572	58.2	2.0	6.9
573	54.2	9.2	14.3
574	71	2.86	16.6

一步加速, 由于加速距离一致, 在尾场加速未发生失相的情况下可以保持电子的单能性, 最终获得稳定的单能电子束. 如果在后续的加速过程中还会发生电子注入, 新注入的电子加速距离较小, 能量更低, 会带来电子能谱的低能尾部, 影响尾场电子束的单能性. 因此在后续的加速过程中需要抑制电子的持续注入.

通过研究离化注入、冲击波前沿注入、级联加速这三种技术对电子束斑的影响, 发现可以将三种技术结合, 降低电子注入的喷气气压下限, 将电子的注入约束于注入级中的冲击波前沿处, 从而获得了可以稳定产生的单能尾场电子. 尾场电子出射角度的平均值为 $(-21.3 \pm 2.6, 24.4 \pm 3.06)$ mrad, 角分布光斑的半高全宽 (FWHM) 为 $(6.07 \pm 1.4, 4.85 \pm 0.7)$ mrad. 尾场电子中心能量的平均值为 (63.24 ± 6.12) MeV, 能散为 (13.0 ± 3.9) MeV. 在下一步的工作中, 通过减小激光入射方向和输出能量的抖动, 有希望进一步提升尾场电子的稳定性. 目前获得的尾场电子中心能量约 60 MeV, 这主要由于喷气气压较低, 限制了尾场加速梯度以及最终获得的尾场电子能量. 如何使用更高密度的喷

嘴产生更高能量的尾场电子, 同时保持尾场电子的单能性和稳定性, 是我们下一步的研究内容.

使用粒子模拟 (PIC) 程序对图 1(c) 所示气体密度分布下的尾场加速过程进行了研究. 取高斯脉冲激光强度 $a_0 = 1.5$ 、脉宽 25 fs、焦斑 $5 \mu\text{m}$ 、波长 800 nm. 为了与喷气气压 650 kPa 下混合气体被完全电离时的电子密度相对应, 取峰值处电子密度 $1.9 \times 10^{18}/\text{cm}^3$. 模拟得到的冲击波前沿附近等离子体中电子的纵向相空间分布 $(x-\gamma V_x)$ 如图 6 所示, 在冲击波前沿所在 2.05—2.15 mm 处, 电子可以有效地被注入并被进一步加速. 进一步的模拟研究显示, 降低电子密度至 $1.6 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 时 (对应喷气气压 547 kPa), 全过程不再有电子被注入及加速. 这与实验结果图 3(f)—图 3(j) 基本符合, 当喷气气压稍微降低以后不再有尾场电子产生.

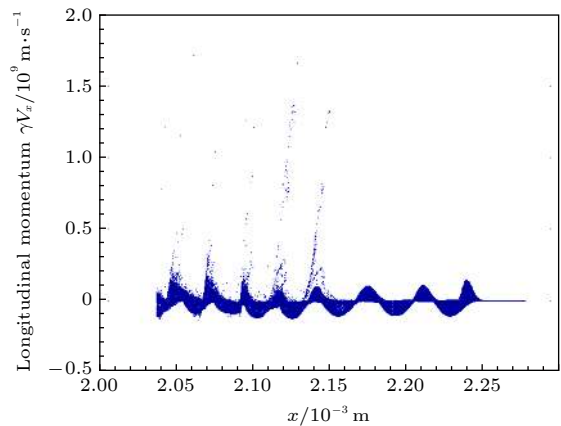


图 6 等离子体中电子在纵向相空间 $(x-\gamma V_x)$ 的分布

Fig. 6. The Distribution of electrons in longitudinal phase space $(x-\gamma V_x)$.

5 结论

通过 45 TW 激光装置上开展的激光尾场加

速实验研究以及数值模拟研究,证实通过在级联加速喷嘴中引入离子注入技术以及冲击波前沿注入技术,可以大幅度降低电子注入的阈值气压,并将电子的注入位置约束至注入级中的冲击波前沿处.然后通过在加速级中的进一步加速,稳定地产生单能尾场电子.在最优化的条件下,可以实验获得最小发散角为 (3.6×3.8) mrad, 平均中心能量为 (63.24 ± 6.12) MeV, 平均能散为 (13.0 ± 3.9) MeV, 平均电量为 (5.99 ± 3.10) pC 的重频单能尾场电子. 基于项目组发展的这种结构高度集成、只需要一路供气系统的级联尾场电子加速装置, 实验研究揭示了一种使用几十 TW 级别高重频激光器产生极小绝对能散的单能尾场电子的途径. 可以将这种小绝对能散的尾场电子束作为种子源, 导入更高加速能量的尾场电子加速装置, 有希望通过后续的级联加速过程产生中心能量 GeV 甚至 TeV 的单能尾场电子.

在当前的研究中,产生的尾场电子的中心能量较低(约 60 MeV),且多发打靶时中心能量有一定的抖动.在下一步的研究工作中,计划通过使用更高密度的喷嘴,并通过对喷嘴气体密度分布进行设计使尾场电子的注入位置不变,有希望产生更高中心能量的单能尾场电子.同时通过对激光器的改造,将激光器输出能量的波动控制在 5% 以下,有希望进一步提高尾场电子中心能量的稳定性.稳定获得单能尾场电子以后,计划开展全光汤姆逊散射光源的研究,并诊断光源的光子能量、发射角、源尺寸等参数.

参考文献

- [1] Tajima T, Dawson J M 1979 *Phys. Rev. Lett.* **43** 267
- [2] Xu H, Sheng Z M, Zhang J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 968 (in Chinese) [徐慧, 盛政明, 张杰 2007 *物理学报* **56** 968]
- [3] Esarey E, Schroeder C B, Leemans W P 2009 *Rev. Mod. Phys.* **81** 1229
- [4] Mangles S P D, Murphy C D, Najmudin Z, Thomas A G R, Collier J L, Dangor A B, Divall E J, Foster P S, Gallacher J G, Hooker C J, Jaroszynski D A, Langley A J, Mori W B, Norreys P A, Tsung F S, Viskup R, Walton B R, Krushelnick K 2004 *Nature* **431** 535
- [5] Geddes C G R, Toth C, Tilborg J V, Esarey E, Schroeder C B, Bruhwiler D L, Nieter C, Cary J R, Leemans W P 2004 *Nature* **431** 538
- [6] Faure J, Glinec Y, Pukhov A, Kiselev S, Gordienko S, Lefebvre E, Rousseau J P, Burgy F, Malka V 2004 *Nature* **431** 541
- [7] Clayton C E, Ralph J E, Albert F, Fonseca R A, Glenzer S H, Joshi C, Lu W, Marsh K A, Martins S F, Mori W B, Pak A, Tsung F S, Pollock B B, Ross J S, Silva L O, Froula D H 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 105003
- [8] Wang X M, Zgadaj R, Fazel N, Li Z Y, Yi S A, Zhang X, Henderson W, Chang Y Y, Korzekwa R, Tsai H E, Pai C H, Quevedo H, Dyer G, Gaul E, Martinez M, Bernstein A C, Borger T, Spinks M, Donovan M, Khudik V, Shvets G, Ditmire T, Downer M C 2013 *Nat. Commun.* **4** 1988
- [9] Kim H T, Pae K H, Cha H J, I Kim I J, Yu T J, Sung J H, Lee S K, Jeong T M, Lee J 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 165002
- [10] Leemans W P, Gonsalves A J, Mao H S, Nakamura K, Benedetti C, Schroeder C B, Tóth C, Daniels J, Mittelberger D E, Bulanov S S, Vay J L, Geddes C G R, Esarey E 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 245002
- [11] Catravas P, Esarey E, Leemans W P 2001 *Meas. Sci. Technology* **12** 1828
- [12] Powers N D, Ghebregziabher I, Golovin G, Liu C, Chen S, Banerjee S, Zhang J, Umstadter D P 2013 *Nat. Photonics* **8** 28
- [13] Chen S, Powers N D, Ghebregziabher I, Maharjan C M, Liu C, Golovin G, Banerjee S, Zhang J, Cunningham N, Moorti A, Clarke S, Pozzi S, Umstadter D P 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 155003
- [14] Sarri G, Corvan D J, Schumaker W, Cole J M, Piazza A Di, Ahmed H, Harvey C, Keitel C H, Krushelnick K, Mangles S P D, Najmudin Z, Symes D, Thomas A G R, Yeung M, Zhao Z, Zepf M 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 224801
- [15] Yan W, Fruhling C, Golovin G, Haden D, Luo J, Zhang P, Zhao B, Zhang J, Liu C, Chen M, Chen S, Banerjee S, Umstadter D 2017 *Nat. Photonics* **11** 514
- [16] Khrennikov K, Wenz J, Buck A, Xu J, Heigoldt M, Veisz L, Karsch S 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 195003
- [17] Phuoc K T, Corde S, Thauray C, Malka V, Tafzi A, Goddet J P, Shah R C, Sebban S, Rousse A 2012 *Nat. Photonics* **6** 308
- [18] Tsai H E, Wang X M, Shaw J M, Li Z Y, Arefiev A V, Zhang X, Zgadaj R, Henderson W, Khudik V, Shvets G, Downer M C 2015 *Phys. Plasmas* **22** 023106
- [19] Yu C H, Qi R, Wang W T, Liu J S, Li W T, Wang C, Zhang Z J, Liu J Q, Qin Z Y, Fang M, Feng K, Wu Y, Tian Y, Xu Yi, Wu F X, Leng Y X, Weng X F, Wang J H, Wei F L, Yi Y C, Song Z H, Li R X, Xu Z Z 2016 *Sci. Rep.* **6** 29518
- [20] Modena A, Najmudin Z, Dangor A E, Clayton C E, Marsh K A, Joshi C, Malka V, Darrow C B, Danson C, Neely D, Walsh F N 1995 *Nature* **377** 606
- [21] Tzeng K C, Mori W B, Katsouleas T 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 5258
- [22] Bulanov S V, Pegoraro F, Pukhov A M, Sakharov A S 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 4205
- [23] Gordon D, Tzeng K C, Clayton C E, Dangor A E, Malka V, Marsh K A, Modena A, Mori W B, Muggli P, Najmudin Z, Neely D, Danson C, Joshi C 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 2133
- [24] Kostyukov I, Pukhov A, Kiselev S 2004 *Phys. Plasmas* **11** 5256
- [25] Lu W, Huang C, Zhou M, Mori W B, Katsouleas T 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 165002
- [26] Osterhoff J, Popp A, Major Z, Marx B, Rowlands-Rees T P, Fuchs M, Geissler M, Hörlein R, Hidding B, Becker S, Peralta E A, Schramm U, Grüner F, Habs D, Krausz F, Hooker S M, Karsch S 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 085002
- [27] Chen M, Esarey E, Schroeder C B, Geddes C G R, Leemans W P 2012 *Phys. Plasmas* **19** 033101
- [28] Rowlands-Rees T P, Kamperidis C, Kneip S, Gonsalves A J, Mangles S P D, Gallacher J G, Brunetti E, Ibbotson T, Murphy C D, Foster P S, Streeter M J V, Budde F, Norreys

- P A, Jaroszynski D A, Krushelnick K, Najmudin Z, Hooker S M 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 105005
- [29] Pak A, Marsh K A, Martins S F, Lu W, Mori W B, Joshi C 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 025003
- [30] McGuffey C, Thomas A G R, Schumaker W, Matsuoka T, Chvykov V, Dollar F J, Kalintchenko G, Yanovsky V, Maksimchuk A, Krushelnick K 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 025004
- [31] Esarey E, Hubbard R F, Leemans W P, Ting A, Sprangle P 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 2682
- [32] Faure J, Rechatin C, Norlin A, Lifschitz A, Glinec Y, Malka V 2006 *Nature* **444** 737
- [33] Kotaki H, Daito I, Kando M, Hayashi Y, Kawase K, Kameshima T, Fukuda Y, Homma T, Ma J, Chen L M, Esirkepov T Zh, Pirozhkov A S, Koga J K, Faenov A, Pikuz T, Kiriyaama H, Okada H, Shimomura T, Nakai Y, Tanoue M, Sasao H, Wakai D, Matsuura H, Kondo S, Kanazawa S, Sugiyama A, Daido H, Bulanov S V 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 194803
- [34] Bulanov S, Naumova N, Pegoraro F, Sakai J 1998 *Phys. Rev. E* **58** R5257
- [35] Geddes C G R, Nakamura K, Plateau G R, Toth C, Cormier-Michel E, Esarey E, Schroeder C B, Cary J R, Leemans W P 2008 *Phys. Rev. Lett.* **110** 215004
- [36] Faure J, Rechatin C, Lundh O, Ammoura L, Malka V 2010 *Phys. Plasmas* **17** 083107
- [37] Gonsalves A J, Nakamura K, Lin C, Panasenko D, Shiraiishi S, Sokollik T, Benedetti C, Schroeder C B, Geddes C G R, van Tilborg J, Osterhoff J, Esarey E, Toth C, Leemans W P 2011 *Nat. Phys.* **7** 862
- [38] Buck A, Wenz J, Xu J, Khrennikov K, Schmid K, Heigoldt M, Mikhailova J M, Geissler M, Shen B, Krausz F, Karsch S, Veisz L 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 185006
- [39] Suk H, Barov N, Rosenzweig J B, Esarey E 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 1011
- [40] Tomassini P, Galimberti M, Giulietti A, Giulietti D, Gizzi L A, Labate L, Pegoraro F 2003 *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams* **6** 121301
- [41] Kim J U, Hafz N, Suk H 2004 *Phys. Rev. E* **69** 026409
- [42] Chien T Y, Chang C L, Lee C H, Lin J Y, Wang J, Chen S Y 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 115003
- [43] Schmid K, Buck A, Sears C M S, Mikhailova J M, Tautz R, Herrmann D, Geissler M, Krausz F, Veisz L 2010 *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams* **13** 091301
- [44] Liu J S, Xia C Q, Wang W T, Lu H Y, Wang C, Deng A H, Li W T, Zhang H, Liang X Y, Leng Y X, Lu X M, Wang C, Wang J Z, Nakajima K, Li R X, Xu Z Z 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 035001
- [45] Wang W T, Li W T, Liu J S, Zhang Z J, Qi R, Yu C H, Liu J Q, Fang M, Qin Z Y, Wang C, Xu Y, Wu F X, Leng Y X, Li R X, Xu Z Z 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 124801
- [46] Leemans W, Esarey E 2009 *Phys. Today* **62** 44
- [47] Schroeder C B, Esarey E, Geddes C G R, Benedetti C, Leemans W P 2010 *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams* **13** 101301
- [48] Dong K G, Gu Y Q, Zhu B, Wu Y C, Cao L F, He Y L, Liu H J, Hong W, Zhou W M, Zhao Z Q, Jiao C Y, Wen X L, Zhang B H, Wang X F 2010 *Acta Phys. Sin.* **596** 8733 (in Chinese) [董克攻, 谷渝秋, 朱斌, 吴玉迟, 曹磊峰, 何颖玲, 刘红杰, 洪伟, 周维民, 赵宗清, 焦春晔, 温贤伦, 张保汉, 王晓方 2010 *物理学报* **596** 8733]
- [49] Thauri C, Guillaume E, Lifschitz A, Phuoc K T, Hansson M, Grittani G, Gautier J, Goddet J P, Tafzi A, Lundh O, Malka V 2015 *Sci. Rep.* **5** 16310
- [50] Golovin G, Chen S, Powers N, Liu C, Banerjee S, Zhang J, Zeng M, Sheng Z, Umstadter D 2015 *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams* **18** 011301

Mixed injection mechanism assisted cascaded laser wakefield accelerator*

Tan Fang¹⁾²⁾ Zhang Xiao-Hui²⁾ Zhu Bin²⁾ Li Gang²⁾ Wu Yu-Chi²⁾
 Yu Ming-Hai²⁾ Yang Yue²⁾ Yan Yong-Hong²⁾ Yang Jing²⁾ Fan Wei²⁾
 Dong Ke-Gong²⁾ Lu Feng²⁾ Gu Yu-Qiu^{2)†}

1) (*Institute of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 030006, China*)

2) (*Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Laser Fusion Research Center,*

China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 2 April 2019; revised manuscript received 20 June 2019)

Abstract

Femtosecond electron bunches can be produced by laser plasma wakefield accelerators, with energy tunable from tens of MeV to a few GeV. In order to produce stable mono-energetic electron bunches, a critical issue is to control the injection of electron into the wakefield. The ionization injection is one of the most effective methods of controlling the injection, which is usually a continuous process. So, the electron bunches produced through ionization injection usually possess large energy spread. In order to optimize the ionization injection technique and produce stable monoenergetic wakefield electron beams, experimental studies are conducted on our 45 TW laser facility. In this work, a mixed injection mechanism assisted cascaded laser wakefield accelerator is presented. Based on a double-nozzle cascaded accelerator, the influences of ionization injection, shock wave front injection and their combination are experimentally studied. The results show that the lower threshold of the injection can be substantially reduced. The ionization injection is restricted within the shock wave front. As a result, mono-energetic electron bunches with reduced absolute energy spread can be stably produced. Under the most optimal conditions, the central energy and energy spread are (63.24 ± 6.12) MeV and (13.0 ± 3.9) MeV. The charge quantity of the electron bunches is (5.99 ± 3.10) pC. The minimum emitting angular spread is (3.6×3.8) mrad.

Keywords: wakefield acceleration, cascaded accelerator, shock wave front injection, ionization injection

PACS: 52.38.Ph, 29.27.Ac, 47.40.Nm, 32.80.Aa

DOI: 10.7498/aps.68.20190484

* Project supported the Presidential Foundation of the China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2014-1-017), the Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China and the China Academy of Engineering Physics (Grant No. U1630246), the Science Challenge Project, China (Grant No. JCKY2016212A505), and the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 016YFA0401100).

† Corresponding author. E-mail: yqgu@caep.cn