

编者按 空间环境中物质形态主要以等离子体的形式存在,其中发生的等离子体物理过程(各种等离子体波动和磁场重联等)决定了空间环境中发生的包括磁层亚暴在内各种爆发现象以及伴随高能带电粒子的加速等。因此,对空间环境中等离子体物理过程的了解是揭示空间环境中各种物理现象发生和发展的基础,有助于提高对各种空间爆发过程的预报能力,更好地服务于国家的航天战略。为加强空间等离子体物理领域的学术交流,促进我国空间物理学科的发展,《空间科学学报》邀请陆全明作为执行主编,陈耀、倪彬彬、张清和、周猛作为执行编委,策划了“空间环境中的等离子体物理过程”专题,相关论文将在本刊持续刊出。

HU Shihang, LU Quanming, GUAN Yundan, LU San. Particle-in-cell Simulation of Electromagnetic Field Structure in the Electron-only Reconnection (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, 44(6): 970–978. CSTR:32142.14.cjss.2024–yg31. DOI:10.11728/cjss2024.06.2024–yg31

»空间环境中的等离子体物理过程

电子重联中电磁场结构的粒子模拟*

胡市航 陆全明 关云丹 卢 三

(中国科学技术大学地球和空间科学学院 合肥 230026)

摘 要 采用 2.5D 全粒子模拟程序研究了强引导场情况下的电子重联,分析了重联率最大时刻霍尔磁场、霍尔电场及电子流速的空间分布特征。重联率最大时刻,观察到分离线两侧的电子入流及出流,并且有四极霍尔磁场生成。与早期标准重联的研究结果不同,霍尔磁场并未在引导场的作用下发生明显扭曲。同时分离线区域发生电荷分离,并生成近似对称分布的霍尔电场。此外,研究了电子流速空间分布的时间演化。在重联前期,电子主要沿磁力线流动,即 $\mathbf{v}_e \approx v_{ey} \mathbf{B}/B_y$; 在重联后期,电子运动由电场漂移所主导,即 $\mathbf{v}_e \approx \mathbf{E} \times (B_y \mathbf{e}_y)/B_y^2$ 。模拟结果表明,电子重联中可以发生极强的电荷分离,生成近似对称分布的霍尔电场。在引导场下,这种霍尔电场将导致电子的电场漂移,并主导电子流速的面内空间分布,进而生成近似对称分布的霍尔电流和四极霍尔磁场。

关键词 电子重联, 霍尔磁场, 霍尔电场, 电子流速

中图分类号 P354

Particle-in-cell Simulation of Electromagnetic Field Structure in the Electron-only Reconnection

HU Shihang LU Quanming GUAN Yundan LU San

(School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract Standard collisionless magnetic reconnection couples with both electron and ion dynamics.

* 国家重点研发计划项目资助 (2022YFA1604600)

2024-10-28 收到原稿, 2024-11-10 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Recently, a new type of magnetic reconnection, electron-only magnetic reconnection without ion outflow, has been observed. Using 2.5D particle-in-cell simulation, the electromagnetic field structure in the electron-only reconnection with a strong guide field was studied. At the moment of the maximum reconnection rate, the electron inflow and outflow are observed on either side of the separatrix. The spatial distribution of the electron bulk velocity is approximately symmetric, which generates the nearly symmetrically distributed Hall current, resulting in the quadrupole Hall magnetic field. The Hall magnetic field is not obviously distorted despite the presence of the strong guide field. Meanwhile, the charge separation is caused in the separatrix region, which generates the nearly symmetrically distributed Hall electric field. Besides, the evolution of the spatial distribution of the electron bulk velocity was studied. The equation of motion for the frozen electrons was analytically obtained: $\mathbf{v}_e = v_{ey}\mathbf{B}/B_y + \mathbf{E} \times (B_y\mathbf{e}_y)/B_y^2$. According to the equation of motion for the electrons, we divide the electron-only reconnection with a strong guide field into two stages. In the first stage, the $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift is negligible because of the weaker Hall electric field, and then the electrons flow mainly along the magnetic field line following the equation $\mathbf{v}_e \approx v_{ey}\mathbf{B}/B_y$. In the second stage, the Hall electric field is so strong that the motion of electrons is dominated by the $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift following the equation $\mathbf{v}_e \approx \mathbf{E} \times (B_y\mathbf{e}_y)/B_y^2$. The simulation shows that extremely strong charge separation can be caused in electron-only reconnection, which generates the nearly symmetrically distributed Hall electric field. With a guide field, this Hall electric field leads to the $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift, which dominates the spatial distribution of the electron bulk velocity. Therefore nearly symmetrically distributed Hall current is formed, which generates the nearly symmetrically distributed quadrupole Hall magnetic field.

Key words Electron-only reconnection, Hall magnetic field, Hall electric field, Electron bulk velocity

0 引言

磁场重联是一种通过磁力线拓扑结构的变化将磁能转化为等离子体动能和热能的物理过程^[1-4], 广泛发生在各种等离子体环境中, 例如太阳大气^[5-7]、行星际空间^[8-11]、各种行星的磁层^[12-16]以及实验室等离子体中^[17-22]. 标准磁场重联的扩散区由离子扩散区及电子扩散区构成, 电子扩散区镶嵌在离子扩散区中^[23-27].

数值模拟、卫星观测和地面等离子体实验对这种标准重联的扩散区进行了详细的研究. 结果表明, 电子扩散区的空间尺度为电子惯性长度, 其中不仅是离子, 电子的运动也是非磁化的, 都不与磁场冻结在一起, 重联电场主要由电子压力的非对角项贡献^[28-30]. 包围着电子扩散区的离子扩散区的尺度是离子惯性长度, 其中离子的运动是非磁化的, 不与磁场冻结在一起; 而电子的运动是磁化的, 与磁场冻结在一起. 离子扩散区中, 离子和电子的这种分离运动导致了霍尔效应, 由此产生了霍尔电流和电荷分离, 霍尔电流导致了垂直于重联面的四极型分布的霍尔磁场, 而电荷分离可导致霍尔电场和平行电场^[23,26,31,32]. 在没有引

导场的情况下, 霍尔磁场和霍尔电场有很好的对称性, 而引导场可以破坏这种对称性^[33-36].

近期的卫星观测发现了一种新型磁场重联, 与标准的磁场重联不同, 其发生在厚度为电子惯性尺度的电流片中, 并且电流片电流几乎全部由电子携带. 同时, 离子对重联几乎没有响应, 没有明显的离子加速和加热^[37-40], 磁场重联过程中减少的磁能几乎全部转化为电子的动能和热能, 形成电子重联 (Electron-only reconnection). 在地球磁尾^[38,39,41-43]、地球磁鞘^[44,45]及实验室等离子体中^[22,46,47]都观察到了这种电子重联. 电子重联可发生在湍动等离子体形成的各种相干结构中或者相干结构间^[44,48], 因为电流片的厚度通常小于离子的惯性长度或回旋半径, 所以离子无法与磁场结构耦合, 这种电子重联无法演化到标准的磁场重联^[49-52]. 电子重联也可发生在厚度大于离子的惯性长度或回旋半径的电流片中, 这种情况下的电子重联会演化到标准磁场重联, 最后导致离子的加速和加热^[37,39,40,53,54]. 通常电子重联比标准重联有较高的重联率. 但是, 目前对电子重联中霍尔磁场和霍尔电场的形态的了解还很少. 本文拟使用 2.5D 的全粒子模拟程序 (Particle In Cell) 研究电子重联中垂直于

重联面的霍尔磁场和电荷分离产生的霍尔电场并揭示其空间分布特征.

1 计算方法

采用 2.5D 的全粒子模拟程序研究电子重联的演化, 粒子在二维的 xz 平面中运动, 但其速度有 x, y, z 三个分量. 在全粒子模拟中, 离子和电子在电磁场的作用下运动, 电磁场则通过求解麦克斯韦方程组得到, 而求解麦克斯韦方程组需要的电荷和电流则可通过粒子的运动状态进行求解. 采用的初始平衡态为二维无力场电流片^[55] 加上一个垂直于重联平面的引导磁场, 其磁场可表达为 $\mathbf{B}(z) = B_0 \tanh(z/\delta) \mathbf{e}_x + [B_g^2 + B_0^2 \text{sech}^2(z/\delta)]^{1/2} \mathbf{e}_y$, 其中引导场为 $B_g = 8B_0$. xz 平面内磁场对应磁通量函数为 $\Psi(z) = B_0 \delta \ln [\cosh(z/\delta)]$, 磁通量函数 Ψ 满足 $B_x = \partial \Psi / \partial z$ 和 $B_z = -\partial \Psi / \partial x$. 在模拟中初始总磁场为 $B = [B_0^2 + B_g^2]^{1/2} \approx 8B_0$. 初始有密度为 n_0 的均匀等离子体, 且初始电流片全部由电子电流贡献. 在初始磁通量中添加了小扰动^[36] $\Delta \Psi(x, z) = 0.05 B_0 \delta \text{sech}(x/\delta) \text{sech}(z/\delta)$, 以使磁场重联快速启动.

模拟中离子与电子质量比采用 $m_i/m_e = 1836$, 光速取为 $c/v_A = 300$, 其中 $v_A = B_0 / \sqrt{\mu_0 n_0 m_i}$ 为 Alfvén 速度, c 为光速. 电流片半宽为 $\delta = 0.06 d_i$, 其中 $d_i = \sqrt{m_i / (\mu_0 n_0 e^2)}$ 为离子惯性长度. 离子温度采用 $k_B T_{i0} = 128 m_i v_A^2$, 电子温度采用 $k_B T_{e0} = 8 m_i v_A^2$. 模拟中网格距为 $\Delta x = \Delta z = 5 \times 10^{-3} d_i$, 时间步长为 $\Delta t = 1 \times 10^{-5} \Omega_i^{-1}$, 其中 $\Omega_i = e B_0 / m_i$ 为离子回旋频率. xz 平面内模拟区域为 $[-L_x/2, L_x/2] \times [-L_z/2, L_z/2]$, 其中 $L_x = L_z = L = 2.5 d_i$, 因此网格数为 $N_x \times N_z = 500 \times 500$. 每种粒子的粒子数为 2.5×10^8 . x 方向对场和粒子采用周期性边界条件, z 方向对场采用理想导体边界条件, 对粒子采用反射边界条件. 模拟中的离子回旋半径 $\rho_i = \sqrt{2 m_i k_B T_{i0}} / (e B) \approx 2 d_i$, 与模拟域尺度 $L = 2.5 d_i$ 相当.

2 结果与分析

模拟中的电子重联发生在极小尺度 (d_i 尺度) 和极短时间 (离子回旋周期) 内, 模拟结果适用于湍动等离子体环境中的小尺度电流片^[44,48]. 发生重联的

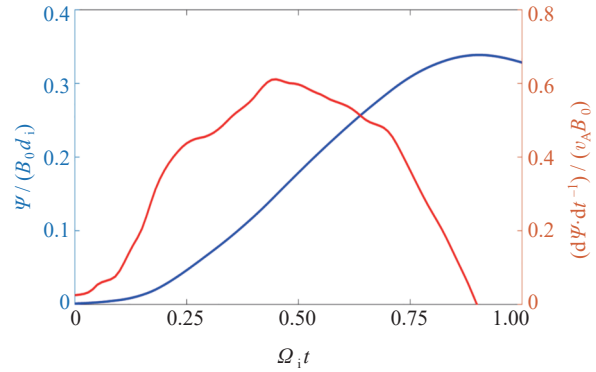


图 1 重联点磁通量 Ψ 和重联率 $d\Psi/dt$ 随时间的演化

Fig. 1 Temporal evolution of the reconnected magnetic flux Ψ and the reconnection rate $d\Psi/dt$ at the X-line

X 点位于模拟域中心 $(0, 0)$ 附近. 图 1 所示为重联点磁通量 Ψ 和重联率 $d\Psi/dt$ 随时间的演化. 重联率可通过对重联磁通量求时间导数得到. 重联触发后, 重联磁通量随时间增大, 在 $\Omega_i t = 0.90$ 时刻达到饱和, 并且在 $\Omega_i t = 0.45$ 时刻有最大重联率 0.61, 重联率较标准重联要高^[31,56]. 在重联磁通量达到饱和前, 模拟中的电子重联并未演化为标准重联.

图 2 所示为重联率最大时刻 ($\Omega_i t = 0.45$) 面外重联电场 E_y , 电子面外电流 J_{ey} , 离子面外电流 J_{iy} 和 $J_{ey} E_y$ 的面内空间分布. 在磁场重联中重联点处发生磁力线的“断开”与“重新连接”, 这个过程中, 磁通量发生改变, 并生成重联电场. 同时, 重联电场加速电流片中的粒子, 将磁场中的磁能转化为等离子体的动能和热能. 如图 2(a) 所示, 重联电场 E_y 分布在 X 点周围, 强度约为 $0.6 v_A B_0$. 然而, 在电子重联中电流片电流几乎全部由电子携带, 没有明显的离子电流片. 图 2(b) 所示的电子电流片分布在 X 点以及电子出流区, 但是并未在图 2(c) 中发现明显的离子面外电流. 因此, $J_{iy} E_y \approx 0$, 重联电场对离子几乎没有加速或加热作用, 电子重联过程中减少的磁能几乎全部转化为电子的动能和热能. 如图 2(d) 所示, 靠近 X 点的区域发现能量耗散区的存在, 这部分区域内, $J_{ey} E_y > 0$, 重联电场对电子有加速加热作用.

图 3 所示为重联率最大时刻 ($\Omega_i t = 0.45$) x 方向离子流速 v_{ix} , z 方向离子流速 v_{iz} , x 方向电子流速 v_{ex} 和 z 方向电子流速 v_{ez} 的面内空间分布. 在标准的无碰撞磁场重联中, 可以观察到离子的入流及出流, 并且离子出流速度可以达到 Alfvén 速度量级^[57,58]. 然

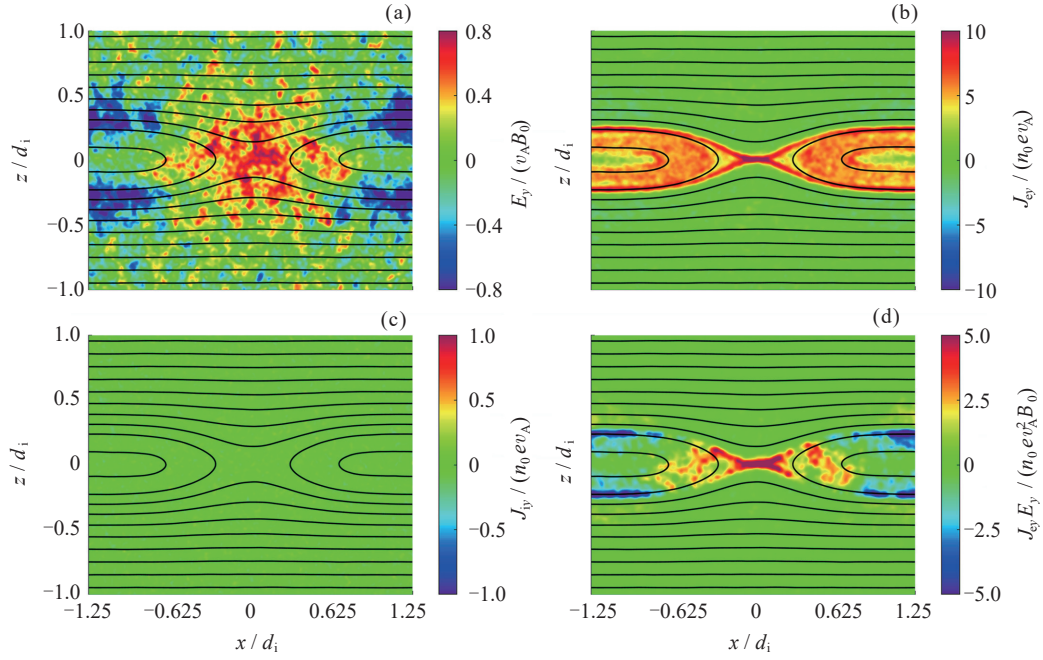


图 2 $\Omega_i t = 0.45$ 时刻面外重联电场 E_y , 电子面外电流 J_{ey} , 离子面外电流 J_{iy} 和 $J_{ey}E_y$ 面内空间分布 (黑色实线表示磁力线)

Fig. 2 Color contours of the reconnection electric field E_y , the out-of-plane current of electrons J_{ey} , the out-of-plane current of ions J_{iy} , and $J_{ey}E_y$ at $\Omega_i t = 0.45$ (The black lines represent the magnetic field lines)

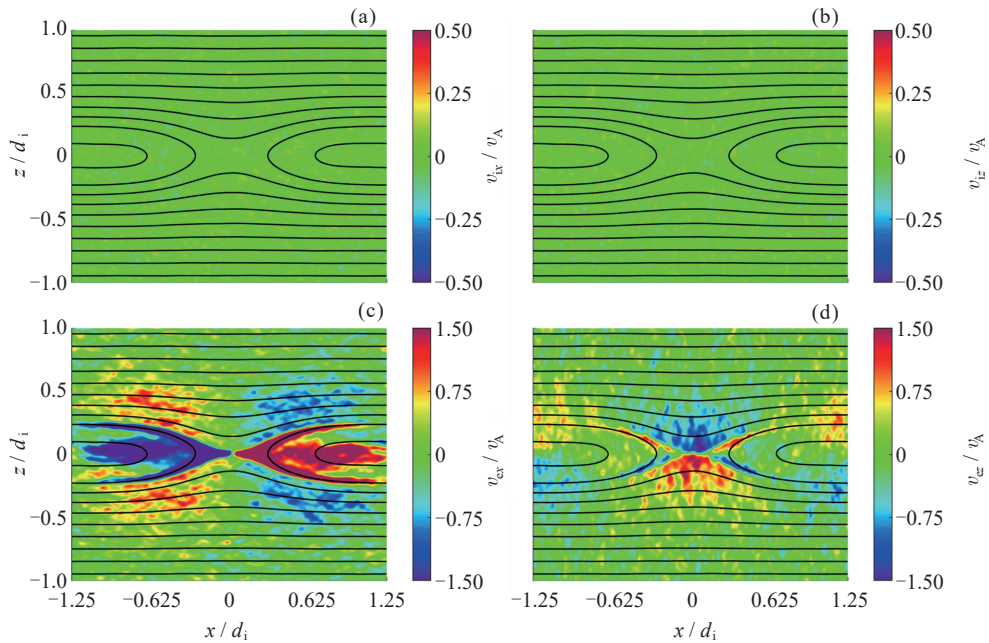


图 3 $\Omega_i t = 0.45$ 时刻 x 方向离子流速 v_{ix} , z 方向离子流速 v_{iz} , x 方向电子流速 v_{ex} 和 z 方向电子流速 v_{ez} 的面内空间分布 (黑色实线表示磁力线)

Fig. 3 Color contours of the ion bulk velocity in the x direction v_{ix} , the ion bulk velocity in the z direction v_{iz} , the electron bulk velocity in the x direction v_{ex} , and the electron bulk velocity in the z direction v_{ez} at $\Omega_i t = 0.45$ (The black lines represent the magnetic field lines)

而,在图3(a)(b)中并没有发现明显的离子入流及出流,这表明离子对重联几乎没有响应.这很容易理解,模拟中离子回旋半径 $\rho_i \approx 2d_i$ 与模拟域尺度 $L = 2.5d_i$ 相当,在一个离子回旋周期内,离子在X点区域内停留时间短暂,不足以与重联电场进行充分的相互作用,最终发生电子重联^[52].此外,在图3(c)(d)中可以观察到分离线两侧的电子入流及出流,并且电子流速的空间分布是近似对称的.早期标准重联的研究结果表明^[33,34],在强引导场重联中,电子流速的面内分布将在引导场的作用下发生明显扭曲.模拟结果表明,即便存在强引导场,电子流速同样可以保持近似对称的空间分布.

磁场重联中,离子与电子的运动解耦导致了霍尔效应,由此产生了霍尔电流和电荷分离.面内的霍尔电流生成垂直于重联平面的四极霍尔磁场^[25,26,32],电荷分离生成面内的霍尔电场^[36,57,59].图4给出了重联率最大时刻($\Omega_i t = 0.45$)霍尔磁场 $\Delta B_y = B_y - B_g$,电荷密度 ρ ,面内电场 E_x 和面内电场 E_z 的面内空间分布.与早期标准重联的研究结果不同^[33-35,60,61],图4(a)所示的霍尔磁场 ΔB_y 有近似对称的空间分布,其结构并未在引导场的作用下发生明显扭曲.霍尔电

流主要由电子电流贡献,因而霍尔磁场的对称性与电子流速的面内分布有关(见图3c, d).同时,在图4(b)中可以观察到分离线区域的电荷分离.其中第一、三象限分离线区域存在正电荷的堆积,第二、四象限分离线区域存在负电荷的堆积.电荷密度 ρ 的空间分布决定了面内电场(E_x, E_z)的空间分布.可以观察到面内电场 E_x 主要分布在电子入流区,电场方向从第一象限指向第二象限(或者从第三象限指向第四象限);面内电场 E_z 主要分布在电子出流区,电场方向从第一象限指向第四象限(或者从第三象限指向第二象限);此外,电子入流区也分布有较弱的面内电场 E_z .

模拟结果显示,重联率最大时刻霍尔磁场的结构并未在引导场的作用下发生明显扭曲.因此,将分析电子流速的分布及演化,进而解释霍尔磁场的对称性.在电子扩散区外,电子是冻结的,即有动力学方程 $\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B} = 0$.在 x 方向和 z 方向,该方程可以写为

$$\begin{cases} E_x + v_{ey}B_z - v_{ez}B_y = 0, \\ E_z + v_{ex}B_y - v_{ey}B_x = 0. \end{cases} \quad (1)$$

通过式(1)可知电子速度

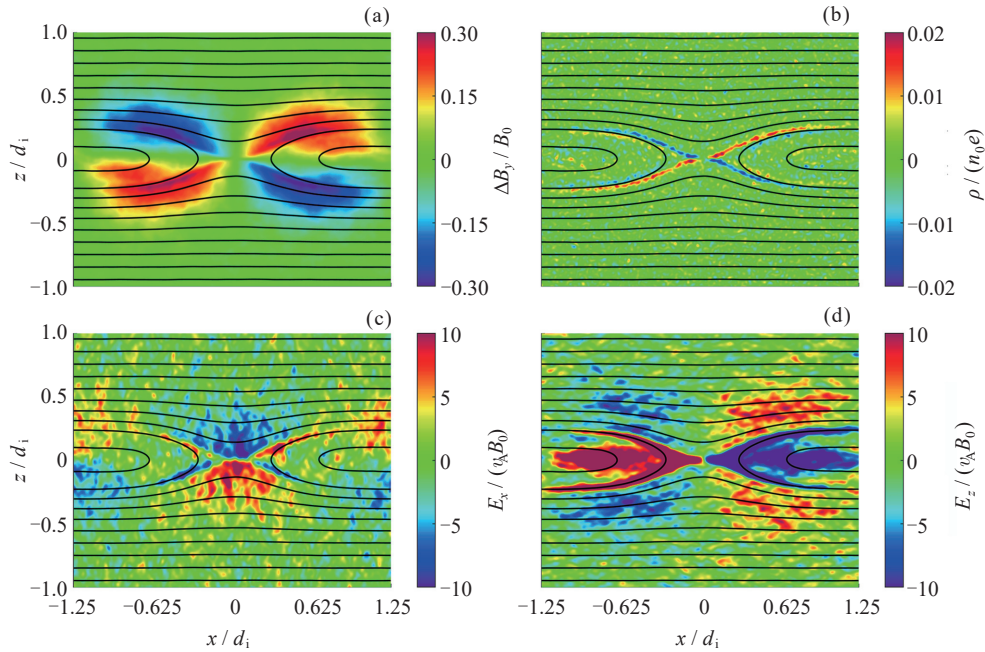


图4 $\Omega_i t = 0.45$ 时刻霍尔磁场 $\Delta B_y = B_y - B_g$,电荷密度 ρ ,面内电场 E_x 和面内电场 E_z 的面内空间分布(黑色实线表示磁力线)

Fig. 4 Color contours of the Hall magnetic field $\Delta B_y = B_y - B_g$, the charge density ρ , the electric field E_x , and the electric field E_z at $\Omega_i t = 0.45$ (The black lines represent the magnetic field lines)

$$\begin{cases} v_{ex} = \frac{v_{ey}}{B_y} B_x - \frac{E_z}{B_y}, \\ v_{ez} = \frac{v_{ey}}{B_y} B_z + \frac{E_x}{B_y}. \end{cases} \quad (2)$$

式 (2) 可以写为如下矢量形式:

$$\mathbf{v}_e = \frac{v_{ey}}{B_y} \mathbf{B} + \frac{\mathbf{E} \times (B_y \mathbf{e}_y)}{B_y^2}. \quad (3)$$

其中, 等式右侧第一项表示电子沿磁力线的流动, 第二项表示电场漂移对电子流速的贡献. 根据式 (3) 可以将电子流速空间分布的时间演化分为两个阶段. 其中第一阶段面内电场较弱, 电场漂移可以忽略, 电子主要沿磁力线流动, 电子流速 $\mathbf{v}_e \approx v_{ey} \mathbf{B} / B_y$; 第二阶段面内电场较强, 电子运动由电场漂移所主导, 电子流速 $\mathbf{v}_e \approx \mathbf{E} \times (B_y \mathbf{e}_y) / B_y^2$. 图 5 给出了 $\Omega_i t = 0.10$ 和 $\Omega_i t = 0.45$ 时刻 x 方向电子流速 v_{ex} 和 z 方向电子流

速 v_{ez} 的面内空间分布, 分别对应第一阶段和第二阶段. $\Omega_i t = 0.10$ 时刻, 电子沿磁力线流动, 即 $\mathbf{v}_e \approx v_{ey} \mathbf{B} / B_y$. 其中, 面外磁场 $B_y \approx B_g > 0$, 电子面外流速 $v_{ey} < 0$, 因而电子流速与磁场方向相反. 模拟结果中, 电子沿第一、三象限分离线流入扩散区, 沿第二、四象限分离线流出扩散区, 与理论分析一致. $\Omega_i t = 0.45$ 时刻, 电子运动由电场漂移所主导, 即 $\mathbf{v}_e \approx \mathbf{E} \times (B_y \mathbf{e}_y) / B_y^2$, 因而电子流速的空间分布与面内电场有关. 观察到 x 方向电子流速 v_{ex} 的空间分布与面内电场 E_z 相似, 即 $v_{ex} = -E_z / B_y$; z 方向电子流速 v_{ez} 的空间分布与面内电场 E_x 相似, 即 $v_{ez} = E_x / B_y$ ($\Omega_i t = 0.45$ 时刻面内电场的空间分布如图 4 所示). 模拟结果说明, 电子重联中, 可以发生极强的电荷分离, 由此产生了极强的霍尔电场, 使得电子运动完全由电场漂移主导. 在引导场下, 电荷分离主

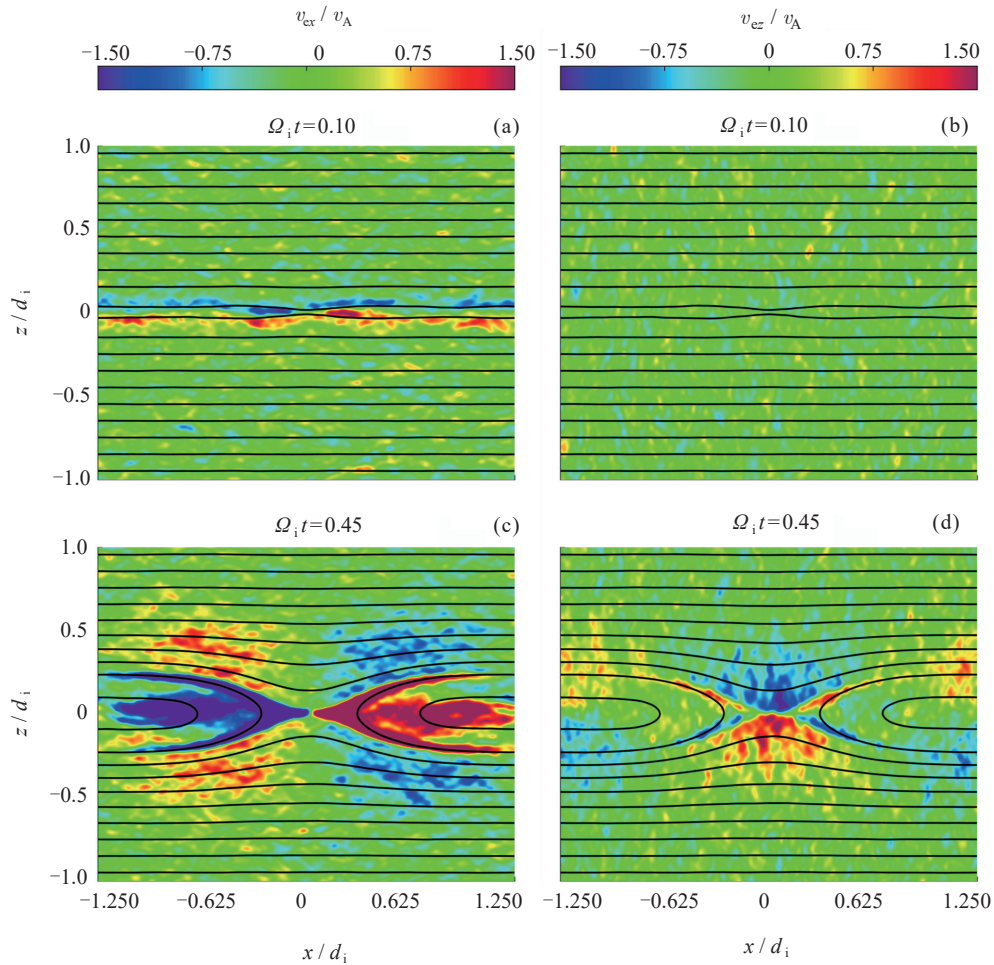


图 5 $\Omega_i t = 0.10$ 和 $\Omega_i t = 0.45$ 时刻 x 方向电子流速 v_{ex} 和 z 方向电子流速 v_{ez} 的面内空间分布 (黑色实线表示磁力线)

Fig. 5 Color contours of the electron bulk velocity in the x direction v_{ex} and the electron bulk velocity in the z direction v_{ez} at $\Omega_i t = 0.10$ and $\Omega_i t = 0.45$ (The black lines represent the magnetic field lines)

要发生在分离线区域, 并生成近似对称分布的霍尔电场, 最终电子流速及霍尔电流有近似对称的空间分布, 并生成近似对称分布的四极霍尔磁场。

3 结论与讨论

采用 2.5D 全粒子模拟程序研究了强引导场情况下的电子重联, 分析了重联率最大时刻霍尔磁场、霍尔电场及电子流速的空间分布特征。电子重联中, 离子对重联几乎没有响应, 没有明显的离子流动和加热。重联率最大时刻, 可以观察到分离线两侧的电子入流及出流, 并且电子流速的空间分布是近似对称的。由电子电流贡献的霍尔电流生成了四极霍尔磁场, 与早期标准重联的研究结果不同^[33-35,60,61], 霍尔磁场并未在引导场的作用下发生明显扭曲。同时观察到分离线区域的电荷分离, 其中第一、三象限分离线区域存在正电荷的堆积, 第二、四象限分离线区域存在负电荷的堆积。这种电荷密度的空间分布生成了近似对称分布的霍尔电场。

此外, 研究了电子流速空间分布的时间演化。通过理论分析, 得到了冻结电子的运动方程: $\mathbf{v}_e = v_{ey}\mathbf{B}/B_y + \mathbf{E} \times (B_y\mathbf{e}_y)/B_y^2$ 。根据电子的运动方程, 将强引导场情况下的电子重联分为两个阶段。在第一阶段, 霍尔电场较弱, 电场漂移可以忽略, 电子主要沿磁力线流动, 即 $\mathbf{v}_e \approx v_{ey}\mathbf{B}/B_y$ 。模拟中, 面外磁场 $B_y \approx B_g > 0$, 电子面外流速 $v_{ey} < 0$, 因而电子流速与磁场方向相反。此时, 电子沿第一、三象限分离线流入扩散区, 沿第二、四象限分离线流出扩散区。在第二阶段, 霍尔电场较强, 电子运动由电场漂移主导, 即 $\mathbf{v}_e \approx \mathbf{E} \times (B_y\mathbf{e}_y)/B_y^2$ 。此时, 电子流速的空间分布与霍尔电场相似。模拟结果说明, 电子重联中可以发生极强的电荷分离, 生成近似对称分布的霍尔电场。在引导场下, 这种霍尔电场将导致电子的电场漂移, 并主导电子流速的面内分布, 进而生成近似对称分布的霍尔电流和四极霍尔磁场。这种霍尔磁场并未在引导场的作用下发生明显扭曲, 与早期标准重联的研究结果不同^[33-35,60,61]。

参考文献

- [1] VASYLIUNAS V M. Theoretical models of magnetic field line merging[J]. *Reviews of Geophysics*, 1975, **13**(1): 303-336
- [2] BISKAMP D. Magnetic Reconnection in Plasmas[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. DOI: [10.1017/CBO9780511599958](https://doi.org/10.1017/CBO9780511599958)
- [3] YAMADA M, KULSRUD R, JI H T. Magnetic reconnection[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2010, **82**(1): 603-664.
- [4] WANG Shui, LU Quanming. Collisionless Magnetic Reconnection[M]. Beijing: Science Press, 2019 (王水, 陆全明. 无碰撞磁场重联 [M]. 北京: 科学出版社, 2019)
- [5] MASUDA S, KOSUGI T, HARA H, *et al.* A loop-top hard X-ray source in a compact solar flare as evidence for magnetic reconnection[J]. *Nature*, 1994, **371**(6497): 495-497
- [6] KRUCKER S, HUDSON H S, GLESENER L, *et al.* Measurements of the coronal acceleration region of a solar flare[J]. *The Astrophysical Journal*, 2010, **714**(2): 1108-1119
- [7] CASSAK P A, SHAY M A. Magnetic reconnection for coronal conditions: reconnection rates, secondary islands and onset[J]. *Space Science Reviews*, 2012, **172**(1): 283-302
- [8] SANG L L, LU Q M, XIE J L, *et al.* Experimental studies on the propagation of whistler-mode waves in a magnetized plasma structure with a non-uniform density[J]. *Plasma Science and Technology*, 2023, **25**(9): 095301
- [9] GOSLING J T, SKOUG R M, MCCOMAS D J, *et al.* Direct evidence for magnetic reconnection in the solar wind near 1 AU[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A1): A01107
- [10] WANG R S, WANG S M, LU Q M, *et al.* Direct observation of turbulent magnetic reconnection in the solar wind[J]. *Nature Astronomy*, 2023, **7**(1): 18-28
- [11] WANG R S, YU X C, WANG Y M, *et al.* Observation of the hall magnetic reconnection as close as 56 solar Radii from the sun[J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, **947**(2): 78
- [12] OIEROSET M, PHAN T D, FUJIMOTO M, *et al.* In situ detection of collisionless reconnection in the Earth's magnetotail[J]. *Nature*, 2001, **412**(6845): 414-417. DOI: [10.1038/35086520](https://doi.org/10.1038/35086520)
- [13] WANG R S, LU Q M, DU A M, *et al.* In situ observations of a secondary magnetic island in an ion diffusion region and associated energetic electrons[J]. *Physical Review Letters*, 2010, **104**(17): 175003. DOI: [10.1103/PhysRevLett.104.175003](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.175003)
- [14] ZHANG T L, LU Q M, BAUMJOHANN W, *et al.* Magnetic reconnection in the near Venusian magnetotail[J]. *Science*, 2012, **336**(6081): 567-570
- [15] LU Q M, FU H S, WANG R S, *et al.* Collisionless magnetic reconnection in the magnetosphere[J]. *Chinese Physics B*, 2022, **31**(8): 089401
- [16] WANG R S, CHENG Z H, SLAVIN J A, *et al.* Direct detection of ongoing magnetic reconnection at mercury's high-latitude magnetopause[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, **51**(5): e2023GL106282

- [17] YAMADA M, REN Y, JI H T, *et al.* Experimental study of two-fluid effects on magnetic reconnection in a laboratory plasma with variable collisionality[J]. *Physics of Plasmas*, 2006, **13**(5): 052119
- [18] EGEDAL J, FOX W, KATZ N, *et al.* Laboratory observations of spontaneous magnetic reconnection[J]. *Physical Review Letters*, 2007, **98**(1): 015003
- [19] LI C K, SÉGUIN F H, FRENJE J A, *et al.* Observation of megagauss-field topology changes due to magnetic reconnection in laser-produced plasmas[J]. *Physical Review Letters*, 2007, **99**(5): 055001
- [20] DONG Q L, WANG S J, LU Q M, *et al.* Plasmoid ejection and secondary current sheet generation from magnetic reconnection in laser-plasma interaction[J]. *Physical Review Letters*, 2012, **108**(21): 215001
- [21] YAMADA M, YOO J, JARA-ALMONTE J, *et al.* Study of energy conversion and partitioning in the magnetic reconnection layer of a laboratory plasma[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, **22**(5): 056501
- [22] SANG L L, LU Q M, XIE J L, *et al.* Energy dissipation during magnetic reconnection in the Keda linear magnetized plasma device[J]. *Physics of Plasmas*, 2022, **29**(10): 102108
- [23] MA Z W, BHATTACHARJEE A. Hall magnetohydrodynamic reconnection: the geospace environment modeling challenge[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, **106**(A3): 3773-3782
- [24] PRITCHETT P L. Geospace Environment Modeling magnetic reconnection challenge: simulations with a full particle electromagnetic code[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, **106**(A3): 3783-3798
- [25] HUANG C, WANG R S, LU Q M, *et al.* Electron density hole and quadruple structure of B_y during collisionless magnetic reconnection[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(8): 718-722
- [26] LU Q M, HUANG C, XIE J L, *et al.* Features of separatrix regions in magnetic reconnection: Comparison of 2-D particle-in-cell simulations and Cluster observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A11): A11208
- [27] ZHOU M, DENG X H, ZHONG Z H, *et al.* Observations of an electron diffusion region in symmetric reconnection with weak guide field[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **870**(1): 34
- [28] KUZNETSOVA M M, HESSE M, WINSKE D. Kinetic quasi-viscous and bulk flow inertia effects in collisionless magnetotail reconnection[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1998, **103**(A1): 199-213
- [29] HESSE M, SCHINDLER K, BIRN J, *et al.* The diffusion region in collisionless magnetic reconnection[J]. *Physics of Plasmas*, 1999, **6**(5): 1781-1795
- [30] EGEDAL J, GURRAM H, GREESS S, *et al.* The force balance of electrons during kinetic anti-parallel magnetic reconnection[J]. *Physics of Plasmas*, 2023, **30**(6): 062106
- [31] BIRN J, DRAKE J F, SHAY M A, *et al.* Geospace Environmental Modeling (GEM) magnetic reconnection challenge[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, **106**(A3): 3715-3719
- [32] LU Q M, WANG R S, XIE J L, *et al.* Electron dynamics in collisionless magnetic reconnection[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(12): 1174-1181
- [33] LU S, LU Q M, CAO Y, *et al.* The effects of the guide field on the structures of electron density depletions in collisionless magnetic reconnection[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(1): 48-52
- [34] FU Xiangrong, GUO Jun, WANG Shui. Collisionless magnetic reconnection in presence of a guide field[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2006, **26**(6): 432-439 ((傅向荣, 郭俊, 王水. 存在初始引导场情况下的无碰撞磁场重联 [J]. *空间科学学报*, 2006, **26**(6): 432-439)
- [35] FU X R, LU Q M, WANG S. The process of electron acceleration during collisionless magnetic reconnection[J]. *Physics of Plasmas*, 2006, **13**(1): 012309
- [36] LU S, ANGELOPOULOS V, PRITCHETT P L, *et al.* Electrodynamic contributions to the hall- and parallel electric fields in collisionless magnetic reconnection[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(11): e2021JA029550
- [37] LU S, WANG R S, LU Q M, *et al.* Magnetotail reconnection onset caused by electron kinetics with a strong external driver[J]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1): 5049
- [38] HUBBERT M, QI Y, RUSSELL C T, *et al.* Electron-only tail current sheets and their temporal evolution[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(5): e2020GL091364
- [39] HUBBERT M, RUSSELL C T, QI Y, *et al.* Electron-only reconnection as a transition phase from quiet magnetotail current sheets to traditional magnetotail reconnection[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(3): e2021JA029584
- [40] LU S, LU Q M, WANG R S, *et al.* Electron-only reconnection as a transition from quiet current sheet to standard reconnection in earth's magnetotail: particle-in-cell simulation and application to MMS data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(11): e2022GL098547
- [41] WANG R S, LU Q M, NAKAMURA R, *et al.* An electron-scale current sheet without bursty reconnection signatures observed in the near-earth tail[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(10): 4542-4549
- [42] WANG R S, LU Q M, LU S, *et al.* Physical implication of two types of reconnection electron diffusion regions with and without ion-coupling in the magnetotail current sheet[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(21):

- e2020GL088761
- [43] MAN H Y, ZHOU M, YI Y Y, *et al.* Observations of electron-only magnetic reconnection associated with macroscopic magnetic flux ropes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(19): e2020GL089659
- [44] PHAN T D, EASTWOOD J P, SHAY M A, *et al.* Electron magnetic reconnection without ion coupling in Earth's turbulent magnetosheath[J]. *Nature*, 2018, **557**(7704): 202-206
- [45] STAWARZ J E, EASTWOOD J P, PHAN T D, *et al.* Properties of the turbulence associated with electron-only magnetic reconnection in earth's magnetosheath[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, **877**(2): L37
- [46] SHI P Y, SRIVASTAV P, BARBHUIYA M H, *et al.* Electron-only reconnection and associated electron heating and acceleration in PHASMA[J]. *Physics of Plasmas*, 2022, **29**(3): 032101
- [47] SHI P Y, SRIVASTAV P, BARBHUIYA M H, *et al.* Laboratory observations of electron heating and Non-Maxwellian distributions at the kinetic scale during electron-only magnetic reconnection[J]. *Physical Review Letters*, 2022, **128**(2): 025002
- [48] PYAKUREL P S, SHAY M A, PHAN T D, *et al.* Transition from ion-coupled to electron-only reconnection: Basic physics and implications for plasma turbulence[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, **26**(8): 082307
- [49] CALIFANO F, CERRI S S, FAGANELLO M, *et al.* Electron-only reconnection in plasma turbulence[J]. *Frontiers in Physics*, 2020, **8**: 317
- [50] VEGA C, ROYTERTSHEYN V, DELZANNO G L, *et al.* Electron-only reconnection in Kinetic-Alfvén turbulence[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2020, **893**(1): L10
- [51] LU Q M, YANG Z W, WANG H Y, *et al.* Two-dimensional particle-in-cell simulation of magnetic reconnection in the downstream of a quasi-perpendicular shock[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **919**(1): 28
- [52] GUAN Y D, LU Q M, LU S, *et al.* Reconnection rate and transition from ion-coupled to electron-only reconnection[J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, **958**(2): 172
- [53] LIU D K, LU S, LU Q M, *et al.* Spontaneous onset of collisionless magnetic reconnection on an electron scale[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2020, **890**(2): L15
- [54] LIU D K, HUANG K, LU Q M, *et al.* The evolution of collisionless magnetic reconnection from electron scales to ion scales[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **922**(1): 51
- [55] AN X, ARTEMYEV A, ANGELOPOULOS V, *et al.* Kinetic equilibrium of two-dimensional force-free current sheets[J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, **952**(1): 36
- [56] LIU Y H, HESSE M, GUO F, *et al.* Why does steady-state magnetic reconnection have a maximum local rate of order 0.1?[J]. *Physical Review Letters*, 2017, **118**(8): 085101
- [57] GOLDMAN M V, NEWMAN D L, LAPENTA G. What can we learn about magnetotail reconnection from 2D PIC Harris-Sheet simulations?[J]. *Space Science Reviews*, 2016, **199**(1): 651-688
- [58] CHANG C, LU Q M, LU S, *et al.* Ion and electron motions in the outer electron diffusion region of collisionless magnetic reconnection[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2024, **8**(3): 472-478
- [59] WYGANT J R, CATTELL C A, LYSAK R, *et al.* Cluster observations of an intense normal component of the electric field at a thin reconnecting current sheet in the tail and its role in the shock-like acceleration of the ion fluid into the separatrix region[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A9): A09206
- [60] HUANG C, LU Q M, WANG S. The mechanisms of electron acceleration in antiparallel and guide field magnetic reconnection[J]. *Physics of Plasmas*, 2010, **17**(7): 072306
- [61] HUANG C, LU Q, YANG Z, *et al.* The evolution of electron current sheet and formation of secondary islands in guide field reconnection[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2011, **18**(5): 727-733

作者简介



胡市 男, 2001年3月出生于河北省武安市, 现为中国科学技术大学地球和空间科学学院在读硕士研究生。主要研究方向为磁场重联的实验研究和数值模拟。
E-mail: shihang_hu@mail.ustc.edu.cn



陆全明 (通信作者) 男, 1969年生, 现为中国科学技术大学地球和空间科学学院教授, 博士生导师。长江学者特聘教授, 国家杰出青年科学基金获得者。主要研究方向为空间等离子体物理和粒子模拟高性能计算。
E-mail: qmlu@ustc.edu.cn