0254-6124/2012/32(6)-778–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Xu Xiaojun, Wei Fengsi, Feng Xueshang. Characteristics of reconnection diffusion region in the solar wind. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(6): 778-784

太阳风中磁场重联离子扩散区的大尺度特征 *

徐晓军[1,2] 魏奉思[2] 冯学尚[2]

1(南昌大学空间科学与技术研究院 南昌 330031)

2(中国科学院空间科学与应用研究中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

摘 要 利用 ACE 和 WIND 卫星 2007 年 1 月 6 日的联合探测, 在 1 AU 附近发现了一个等离子体密度极低的 Petschek-like 重联喷流区. 该喷流区内部出现了非常明显的 Hall 双极磁场、等离子体密度下降区以及与 Hall 电流相符的低能段电子投掷角分布. 这些特征与重联离子扩散区的 Hall 效应非常吻合, 说明很可能在太阳风中观测到了一个离子扩散区. 分析表明, 与之相关的磁场重联为准稳态快速完全反向重联, 其扩散区以一对慢模波为边界, 空间尺度达到 80 个离子惯性长度, 表现出了大尺度重联的特征.

关键词 磁场重联, 离子扩散区, 重联喷流区, Hall 效应

中图法分类号 P 353

Characteristics of Reconnection Diffusion Region in the Solar Wind

XU Xiaojun[1,2] WEI Fengsi[2] FENG Xueshang[2]

1(*Institute of Space Science and Technology, Nanchang University, Nanchang* 330031)

2(*State Key Laboratory of Space Weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract A Petschek-like reconnection exhaust of extremely low plasma density was detected by ACE and WIND on 6 January 2007 near 1 AU in the solar wind. The exhaust is characterized by an apparent Hall bipolar magnetic field, ion and electron density depletion layers and pitch angle distribution of low energy electrons anti-parallel to the direction of Hall current. Such features indicate a possible reconnection ion diffusion region in the solar wind. To the best of our knowledge, this is the first time to report direct detections of ion diffusion region associated with solar wind reconnection exhaust. Observations show that the associated reconnection is quasi-steady, almost anti-parallel merging (no guide field) and fast with a dimensionless reconnection rate of about 2%. Meanwhile, the diffusion region is bounded by a pair of slow-mode waves and the spatial width is up to 80 ion inertial lengths, performing large-scale characteristics of reconnection for large systems.

Key words Magnetic reconnection, Ion diffusion region, Reconnection exhaust, Hall effect

---

* 国家自然科学基金项目 (40890162, 40921063, 40904049 和 41031066) 和国家重点实验室专项基金共同资助

2011-05-04 收到原稿, 2011-11-18 收到修定稿

E-mail: xjxu.ncu@gmail.com

0 引言

磁场重联是一个将磁能快速转化为等离子体动能和热能并且改变磁场拓扑结构的过程. 快速重联被认为在空间等离子体的爆发现象中发挥了重要作用, 例如, 太阳耀斑和日冕物质抛射以及地磁暴和磁层亚暴都与磁场重联有关 [1]. 理论上, 有限电阻等离子体中的 Petschek 机制 [2] 和无碰撞等离子体中的 Hall 效应均能实现快速重联 [3−8].

在无碰撞等离子体中, 磁场耗散主要发生在重联 X 线附近的离子扩散区和电子扩散区, Vasyliunas[9] 从广义欧姆定律出发推导出扩散区的尺度分别与离子惯性长度和电子惯性长度相当. 在离子扩散区中, 离子与磁场退耦, 电子和磁场仍然冻结, 离子和电子的退耦运动产生了 Hall 电流, 其载流子主要为电子, 该电流同时感应出了垂直于重联平面的 Hall 四极磁场. 此外, Hall 双极电场也是离子扩散区的重要特征之一 [4,8]. 数值计算结果 [4−8] 以及磁层顶 [10−11] 和磁尾 [12−13] 大量的观测资料都证实了 Hall 效应在无碰撞重联中发挥了主导作用.

磁云边界层 [14−15] (Magnetic Cloud Boundary Layer) 和重联喷流区 [16] (Reconnection Exhaust) 等行星际太阳风中磁场重联现象的发现为研究磁场重联提供了新的依据. 太阳风等离子体的独特性质表现在速度快、湍动强、边界开放等方面, 使得其中的磁场重联呈现出与磁层顶和磁尾重联不同的性质. Gosling[16] 指出重联喷流区具有 Petschek-like[17] 特征, 即喷流区边界存在一对背靠背的阿尔芬波或慢模波, 并给出了其判定条件: 等离子体的速度矢量和磁场矢量呈现出先正相关后反相关或先反相关后正相关的变化, 同时伴随有磁场强度下降, 质子温度上升以及速度增加 (相对于静止太阳风) 的情况. 观测表明, 太阳风中绝大多数的 Petschek-like 重联喷流区事件都是准稳态的分量重联和快速重联 [18−21]. 同时, Phan[20] 等发现与喷流区相关的重联 X 线可以超过 $390\,R_{\rm e}$ ($R_{\rm e}$ 为地球半径), Gosling[21] 也指出重联两侧出流区的反向高速流可以延伸至几百个地球半径以外, 说明开放边界条件的太阳风等离子体中磁场重联具有比较明显的大尺度特性. 然而, 至今尚未在太阳风中观测到与喷流区相关的重联扩散区, 无法从观测上认识太阳风中重联扩散区可能具有的特殊性质.

本文从观测上认证了一个与 Petschek-like 喷流区相关的重联离子扩散区, 并对其特征进行分析, 以提高对太阳风中磁场重联扩散区的认识和理解.

1 观测

2007 年 1 月 6 日, WIND 和 ACE 卫星均处于 1 AU 附近, 其在 GSE 坐标系下的位置分别为 $(254.3, -25.8, 21.5)\,R_{\rm e}$ 和 $(218.6, -24.4, 22.5)\,R_{\rm e}$, 二者基本为上下游关系. 在时间段 05:30−05:50 UT, WIND 和 ACE 分别先后观测到了同一个重联喷流区 (由于这段时间内 WIND 的等离子体数据湍动剧烈, ACE 的观测可作为一个佐证有效弥补 WIND 卫星的数据缺陷). 如图 1(b)∼(e) 所示, 喷流区内的磁场强度减小, 等离子体速度和温度增加, 磁场和速度分量遵循先正相关后反相关的变化规律. 图 1(a) 描绘出了喷流区附近大致的磁场位形, 而等离子体速度增加发生在 GSE 坐标系的 $+x$ 方向, 说明观测到了一个朝向太阳 (sunward directed) 的重联喷流区. 需要说明的是, 图 1 中 ACE/MAG 磁场数据的分辨率为 16 s, ACE/SWEPAM 等离子体参数的分辨率为 64 s, WIND/MFI 磁场数据和 WIND/PM3DP 等离子体数据分辨率均为 3 s.

为了研究分析重联电流片的基本性质, 这里利用 MVAB[22] (Minimum Variation Analysis of Magnetic Field) 方法构造了重联电流片的 LMN 坐标系, 其中, N 为电流片的法向, M 为重联 X 线延伸的方向, L 则沿着重联高速流, 并且 L, M, N 构成右手坐标系. WIND 和 ACE 观测得到的 LMN 坐标系基矢分别为 ([0.91, 0.00, 0.41], [0.09, 0.98, 0.20], [0.40, 0.22, 0.89]) 和 ([0.92, 0.02, 0.39], $[-0.07, 0.99, 0.11]$, $[-0.38, -0.14, 0.91]$), 各分量之间的夹角分别为 1.92°, 4.81° 和 5.06°, 说明重联电流片在 WIND 和 ACE 先后观测到的时间间隔内保持准稳态.

图 2 给出了 WIND 的磁场数据在 LMN 坐标系下的分量以及质子和电子密度. 图 2 中两条竖直蓝线之间为重联喷流区, 期间 $\boldsymbol{B}_{\rm N}$ 基本保持稳定而且趋近于零, 磁场的方向变化主要发生在 $\boldsymbol{B}_{\rm L}$ 方向, 符合重联喷流区附近的磁场变化特征, 而 $\boldsymbol{B}_{\rm M}$ 的平均值非常小, 意味着此次重联事件几乎不存在垂直于磁场平面的引导场, 为一次完全反向重联 (anti-parallel reco-

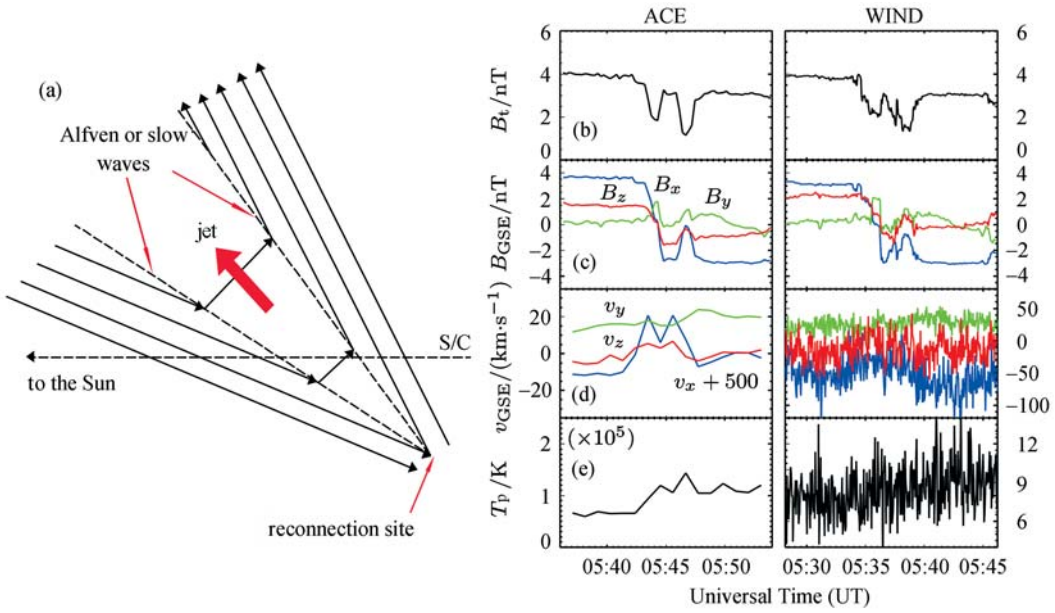


图 1 2007 年 1 月 6 日 ACE 和 WIND 共同观测到的一个 Petschek-like 重联喷流区. (a)~(e) 依次为重联位形示, 磁场强度, 磁场的 GSE 分量, 等离子速度的 GSE 分量和质子温度

Fig. 1 Petschek-like reconnection exhaust detected by ACE and WIND on 6 January 2007. Panels (a) to (e) are sketch geometry of the reconnection exhaust, magnetic magnitude, GSE components of magnetic field, GSE components of proton velocity and proton temperature

nnection), 这个结果与之前的结论 [23] 不同, 是首次在太阳风中观测到完全反向重联的喷流区事件. 重联喷流区的边界由外向内的磁场强度减小, 等离子体密度和温度上升, 呈现出明显的慢模波或阿尔芬波特性, 由于速度的变化小于阿尔芬速度, 因此, 该重联喷流区是一个以慢模波而非阿尔芬波为边界的 Petschek-like 重联喷流区.

垂直于重联平面的磁场 $\boldsymbol{B}_{\rm M}$ 在图 2 中两条竖直红线之间的区域表现出了明显的双极特征, 需要提出的是, 在对分辨率为 1 s 的 ACE Level 2 磁场数据 * 进行 LMN 分析后得到了相同的结论, 如图 3 所示, 而对分辨率为 16 s 的磁场数据进行同样处理的时候却没有得到明显的 $\boldsymbol{B}_{\rm M}$ 双极特征. ACE 和 WIND 同时观测到的 $\boldsymbol{B}_{\rm M}$ 双极特征说明该特征是准稳态存在而非由于扰动暂时产生的. 此外, 在两条红线之间存在一个质子和电子的密度下降区. 这两个现象也是首次出现在太阳风的重联喷流区结构中, 之前还没有关于重联喷流区内 $\boldsymbol{B}_{\rm M}$ 双极特征以及等离子体密度下降区的报道. 利用速度的法向分量在重联喷流区两侧的偏移量 (12 km·s^{-1}) 可以得到重联的入流速度 (6 km·s^{-1}), 入流速度除以入流区的阿尔芬速度 (300 km·s^{-1}) 可以估算出重联率约为 2%, 属于快速重联.

2 分析

结合上述观测资料, 可以认为 WIND 和 ACE 很有可能观测到了 Petschek-like 重联喷流区内的一个离子扩散区 (图 2 竖直红线之间的区域), 其主要证据有如下三点.

(1) 垂直于磁场重联平面的磁场 $\boldsymbol{B}_{\rm M}$ 表现出来的双极特征是离子扩散区中典型的 Hall 磁场信号. 如图 4 所示, 在离子扩散区内, 离子已经去磁化, 而电子仍然与磁场冻结在一起, 并且向重联中心 X 线运动至电子扩散区. 离子和电子的这种退耦运动形成了 Hall 电流. 该电流又感应出垂直于重联平面的四极磁场. 当卫星从一侧的重联喷流区流过时, 就能观测到垂直于重联平面的磁场表现出来的双极特

*http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/new/intro.html

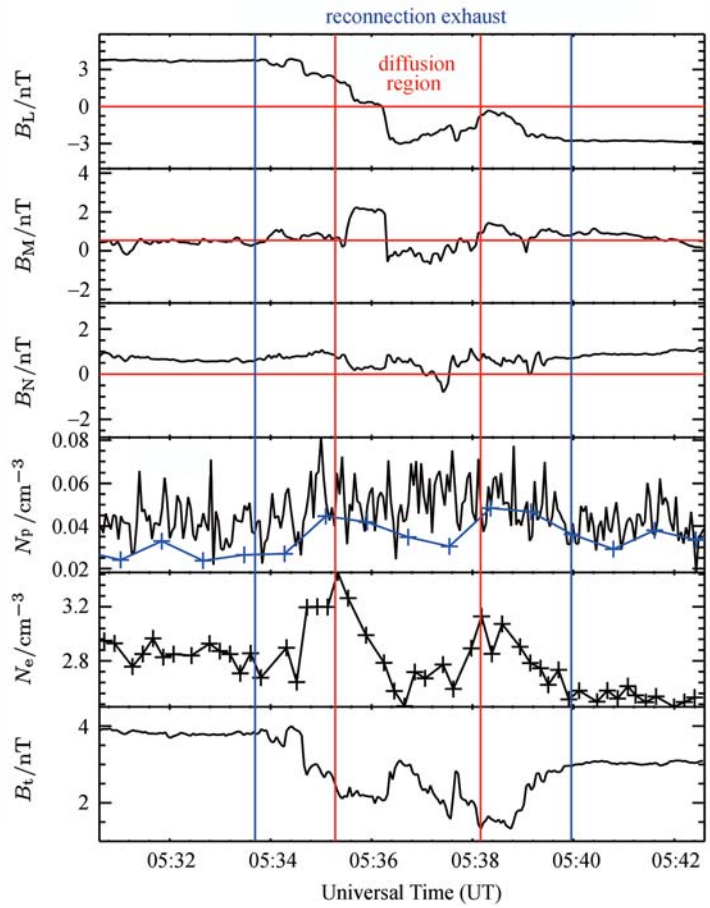


图 2 2007 年 1 月 6 日重联喷流区附近 LMN 分析 (从上到下依次为磁场在 LMN 坐标系下的 L, M, N 分量, 质子密度, 电子密度和总的磁场强度)

Fig. 2 LMN analysis of the reconnection exhaust on 6 January 2007. From top to bottom are L, M and N components of magnetic field, proton density, electron density and magnetic strength

征. 在本文的喷流区事件中, ACE (见图 3) 和 WIND 观测到的 $\boldsymbol{B}_{\rm M}$ 双极特征与 Hall 双极磁场 (见图 4) 吻合.

(2) 等离子体密度下降区特征. Shay[8] 和 Pritchett[6] 利用 Hall MHD, Hybrid 和 Full Particle 三种模拟手段发现, 在磁场分割线 (separatrix) 下游会形成等离子体密度下降区, 其认为电子将磁力线拖曳至重联分割线附近使得该处的磁场强度增强, 由于已经与磁场退耦, 离子能感受到很强的重联平面内的磁场, 并在该磁场的偏转下离开重联平面, 形成离子密度下降区. Cluster 和 Polar 卫星在磁层顶扩散区的观测证实了重联分割线附近会形成密度下降区 [11], 而 Yang[24] 则通过数值模拟详细讨论了重联中的等离子密度下降区结构, 其模拟结果与观测也非常吻合. 本文中, 等离子体的密度下降主要发生在离子扩散区中心区域 (见图 2), 其原因为在离子扩散区, Hall 磁场强度很强 (占总磁场强度的 60% 以上), 由于离子已经不再与磁场冻结, 因而会在 Hall 磁场的作用下发生偏转. 此次事件中, 可以计算出离子扩散区的宽度 (N 方向的尺度) 达到了 32 个离子惯性长度, 而以平均速度运动的离子回旋半径只有大约 3 个离子惯性长度, 因此, 大多数离子在 Hall 磁场的偏转之下不能进入离子扩散区内部, 从而形成了离子密度下降区. 此外, 电子的密度下降区与 Lu[25] 的模拟结果基本相符, 即电子的密度极小值出现在 $\boldsymbol{B}_{\rm M}$ 极大值附近. 稍有不同的是, 由于 $\boldsymbol{B}_{\rm L}$ 的突然增强, 导致局部等离子体压力比周围强, 以致于该处的电子密度比 $\boldsymbol{B}_{\rm M}$ 极大值附近还要小.

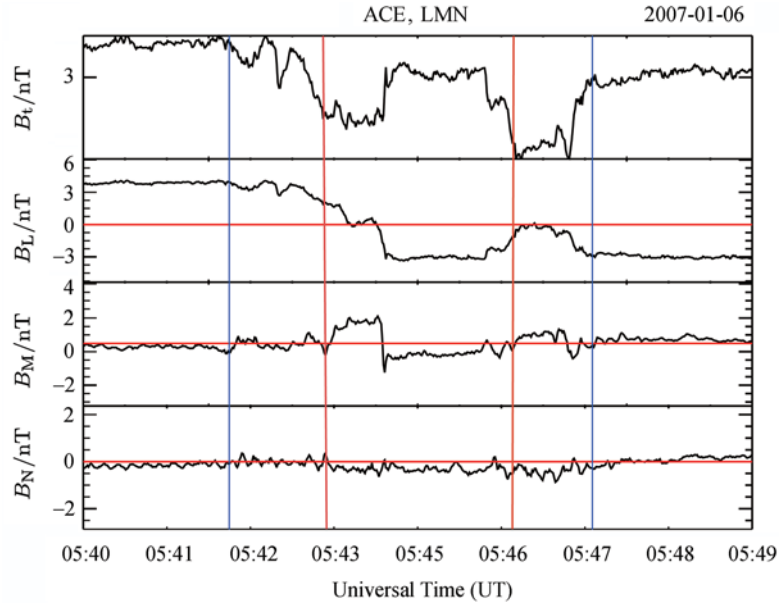


图 3 对 ACE Level 2 磁场数据 LMN 分析得到的 $\boldsymbol{B}_{\mathrm{M}}$ 双极特征 (从上到下依次为总磁场强度, 磁场在 LMN 坐标系下的 L, M 和 N 分量. 磁场数据分辨率为 1 s)

Fig. 3 Bipolar feature of $\boldsymbol{B}_{\mathrm{M}}$ from LMN analysis of ACE Level 2 magnetic field data (From top to bottom are magnetic magnitude, the L, M and N components of magnetic field in LMN. Resolution of ACE Level 2 field data is 1 second)

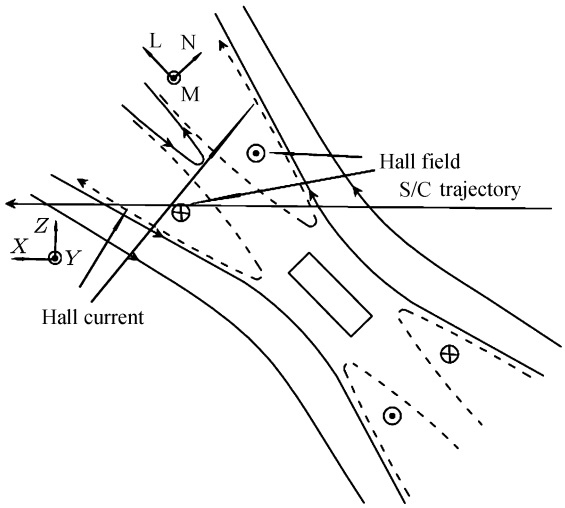


图 4 2007 年 1 月 6 日飞船穿越重联喷流区内的离子扩散区

Fig. 4 Spacecraft crossing the ion diffusion region within the reconnection exhaust on 6 January 2007

(3) 低能段电子在离子扩散区附近的投掷角分布 (见图 5) 与当地的磁场位形和 Hall 电流方向基本符合. 在离子扩散区的前后边界, 电子的投掷角主要集中在 180° 和 0° 方向, 结合前边界的磁场方向 (见图 4) 可以看出, 在扩散区边界, 低能电子主要沿磁力线进入重联喷流区, Hall 电流的方向与电子的运动方向相反, 符合无碰撞重联中的 Hall 电流位形 (见图 3 中的 Hall current).

3 总结与讨论

在 1 AU 附近, 太阳风等离子体的平均密度为 5 cm^{-3}, 对应的离子惯性长度 ($\lambda_i = 227/\sqrt{n}$, 单位 km; n 为等离子体数密度, 单位 cm^{-3}) 约为 100 km. 而太阳风的平均速度高达 400 $\mathrm{km\cdot s}^{-1}$, 该处飞船的磁场和粒子探测器时间分辨率一般只有 3 s, 因此, 要探测到与离子惯性长度相当的离子扩散区结构非常困难. 相比之下, 在较低密度的等离子体中更容易观测到重联扩散区. WIND 飞船的数据显示在 2007 年 1 月 6 日探测到的重联喷流区附近, 太阳风等离子体的平均密度只有 0.04 cm^{-3} (见图 2 中的质子密度), 对应的离子惯性长度达到 1100 km, 为观测到离子扩散区提供了有利条件.

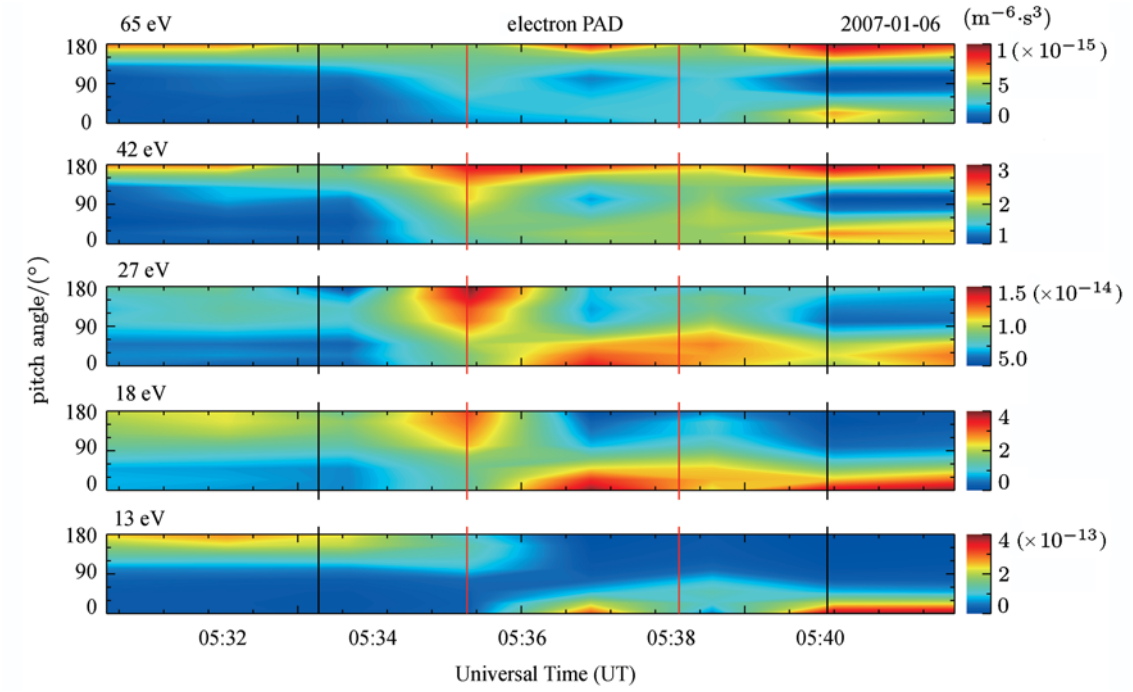


图 5 低能段电子投掷角分布 (两条竖直黑线之间为重联喷流区, 竖直红线之间为离子扩散区)

Fig. 5 Pitch angle distribution of low energy electrons (Two vertical black lines mark the boundaries of the reconnection exhaust and the vertical red lines indicate the edges of the ion diffusion region)

重联喷流区和离子扩散区的尺度可以用飞船渡越时间和局部太阳风的平均速度估算得到. 整个重联喷流区的尺度约为 180 个离子惯性长度, 其中, 前后慢模波的厚度同为 50 个离子惯性长度, 而中心离子扩散区的尺度则为 80 个离子惯性长度, 在 L 和 N 方向的跨度分别为 72 和 32 离子惯性长度, 属于大尺度重联. 太阳风开放的边界条件和大尺度的等离子体环境有利于形成类似大尺度的重联结构. 而近期的一些数值模拟结果显示, 在开放边界条件下, 电子扩散区可以延伸至数十个离子惯性长度 [26−28]. Phan[29] 在磁层顶对一个超过 60 个离子惯性长度的电子扩散区的观测证实了该模拟结果.

综上所述, 通过对一个以慢模波对为边界的 Petschek-like 重联喷流区的认证, 研究发现, 该结构内部存在明显的 Hall 磁场以及等离子体密度下降区特征, 这些特征在之前报道的重联喷流区事件中还从未出现, 是首次被观测到. 同时, 与 Hall 电流位形基本相符的低能段电子投掷角分布暗示该重联喷流区内很有可能存在一个离子扩散区. 观测发现, 此次离子扩散区具有很明显的大尺度特征, 表现在其空间尺度大, 达到 80 个离子惯性长度, 但是, 仍然在数值模拟的结论范围之内. 大尺度特征也是离子扩散区中心区域出现等离子体密度下降区的原因. 因此, 本文的结论显示, 在太阳风开放边界的等离子体环境中, 不仅由于磁场重联引起的等离子体和磁场结构具有大尺度的特征, 重联本身也可能具有大尺度的特征.

致谢 感谢 ACE/SWEPAM, ACE/MAG 和 WIND/3DP, WIND/MFI 的首席科学家 R P Lin, R Lepping, D J McComas 和 N Ness. 所用数据由美国 CDAWeb 网站提供.

参考文献

[1] Wang Shui, Lee L C. Magnetic Reconnection [M]. Anhui: Anhui Education Press, 1999. In Chinese (王水, 李罗权. 磁场重联. 安徽: 安徽教育出版社, 1999)

[2] Petschek H E. Magnetic Field Annihilation [M]. NASA Special Publication, 1964

[3] Priest E, Forbes T. Magnetic Reconnection: MHD Theory and Application [M]. New York: Cambridge University Press, 2000

[4] Birn J, Hesse M. Geospace Environment Modeling (GEM)

magnetic reconnection challenge: Resistive tearing, anisotropic pressure and hall effects [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A3):3737-3750

[5] Ma Z W, Lee L C. Hall effects on the generation of field-aligned currents in three-dimensional magnetic reconnection [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A11):25 951-25 960

[6] PritchettPL. Collisionless magnetic reconnection in a three-dimensional open system [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A11):25 961-25 978

[7] Rogers B N, Dento R E, Drake J F, *et al.* Role of dispersive waves in collisionless magnetic reconnection [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **87**, 195004

[8] Shay M A, Drake J F, Rogers B N, *et al.* Alfvenic collisionless magnetic reconnection and the Hall term [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**:3759-3772

[9] Vasyliunas V M. Theoretical models of magnetic field line merging. **I** [J]. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1975, **13**:303-336

[10] Mozer F S, Bale S D, Phan T D. Evidence of diffusion regions at a subsolar magnetopause crossing [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**, 015002

[11] Vaivads A, Khotyainstev Y, André M, *et al.* Structure of the magnetic reconnection diffusion region from four spacecraft observations [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**, 105001

[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**:414-417

[13] Wygant J R, Cattell C A, Lysak R, *et al.* Cluster observations of an intense normal component of the electric field at a thin reconnection current sheet in the tail and its role in the shock-like acceleration of the ion fluid into the separatrix region [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**(A09), A09206

[14] Wei F S, Hu X, Feng X S, *et al.* Magnetic reconnection phenomena in interplanetary space [J]. *Space Sci. Rev.*, 2003, **107**:107-110

[15] Wei F S, Liu R, Fan Q L, *et al.* Identification of the magnetic cloud boundary layers [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**:1263

[16] Gosling J T, Skoug R M, McComas D J, *et al.* Direct evidence for magnetic reconnection in the solar wind near 1 AU [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**:1107

[17] Levy P H, Petschek H E, Siscoe G L, *et al.* Aerodynamic aspects of the magnetospheric flow [J]. *AIAA J.*, 1964, **2**(12):2065-2076

[18] Davis M S, Phan T D, Gosling J T, *et al.* Detection of oppositely directed reconnection jets in a solar wind current sheet [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**, L19102.

[19] Xu X, Wei F, Feng X. Observations of reconnection exhausts associated with large-scale current sheets within a complex ICME at 1 AU [J]. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**, A05105

[20] Phan T D, Gosling J T, Davis M S, *et al.* A magnetic reconnection X-line extending more than 390 Earth radii in the solar wind [J]. *Nature*, 2006, **439**:175-178

[21] Gosling J T, Eriksson S, Blush L M, *et al.* Five spacecraft observations of oppositely directed exhaust jets from a magnetic reconnection X-line extending > 4.26 km in the solar wind at 1 AU [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**, 20108

[22] Sonnerup B U O, Cahill Jr L J. Magnetic structure and attitude frome Explorer 12 observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 1967, **72**:171

[23] Phan T D, Gosling J T, Davis M S. Prevalence of extended reconnection X-lines in the solar wind at 1 AU [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, **36**:9108

[24] Yang H A, Jin S P, Zhou G C. Density depletion and Hall effect in magnetic reconnection [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**(A11):11223

[25] Lu Q, Huang C, Xie J L, *et al.* Features of separatrix regions in magnetic reconnection: comparision of 2-D particle-in-cell simulations and Cluster observations [J]. *J. Geophys. Res.*, **115**(A11):208

[26] Daughton W J, Scudder J, Karimabadi H, *et al.* Fully kinetic simulations of undriven magnetic reconnection with open boundary conditions [J]. *Phys. Plasmas*, 2006, **13**:72 101

[27] Shay M A, Drake J F, Swisdak M. Two-scale structure of the electron dissipation region during collisionless magnetic reconnection [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **99**(15):155 002

[28] Karimabadi H, Daughton W, Scudder J. Mutli-scale structure of the electron diffusion region [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**(L13):104

[29] Phan T D, Drake J F, Shay M A, *et al.* Evidence for an elongated (> 60 ion skin depths) electron diffusion region during fast magnetic reconnection [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **99**(25):255 002