

Fe-6.5% Si 合金热轧板焊接接头的组织和力学性能

柳金龙, 沙玉辉, 温秀秀, 左良

(东北大学 材料各向异性与织构教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对 Fe-6.5% Si 合金热轧板焊接接头易萌生裂纹的问题, 研究了不同氩弧焊工艺对焊接接头显微组织和力学性能的影响规律. 研究表明: 不使用填充焊丝的 TIG 焊不适合 Fe-6.5% Si 合金热轧板焊接, 因在焊缝内出现大量显微裂纹; 使用工业纯铁焊丝的 MIG 焊实现了 Fe-6.5% Si 合金热轧板的良好连接, 焊缝表面连续、鱼鳞纹均匀, 焊缝内无显微裂纹. 稀释硅浓度是改善焊缝区组织和力学性能的有效方法. 优化工艺下的焊接接头在 500 °C 拉伸延伸率 5.5%, 抗拉强度 280 MPa, 满足 Fe-6.5% Si 合金板带制造过程中的温轧工艺要求.

关 键 词: Fe-6.5% Si; 焊接; 组织; 性能; MIG

中图分类号: TG 115.62

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)01-0039-05

Microstructure and Mechanical Properties of Welding Joints of Fe-6.5% Si Alloy Hot Bands

LIU Jin-long, SHA Yu-hui, WEN Xiu-xiu, ZUO Liang

(Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: SHA Yu-hui, professor, E-mail: yhsa@mail.neu.edu.cn)

Abstract: To solve the problem that welding joint is easy to crack in hot bands of Fe-6.5% Si alloy, the effect of argon arc welding process on the microstructure and mechanical properties of joints was investigated. The results showed that TIG welding without filler wire is not suitable for the welding of Fe-6.5% Si alloy hot bands because it produces a large number of cracks in the weld. While MIG welding using the electrodes made of industrial pure iron successfully connects the hot bands. The weld is continuous in the surface, the fish-scale pattern is uniform and no micro-cracks are in the weld. The optimization of microstructure and plasticity can be attributed to the dilution of silicon concentration in the weld zone. After the optimization of welding process, the tensile elongation and the ultimate tensile strength of the joint are 5.5% and 280 MPa, respectively, which can meet the requirement of warm rolling process of Fe-6.5% Si alloy.

Key words: Fe-6.5% Si; weld; microstructure; properties; MIG

Fe-6.5% Si(质量分数)合金具有高磁导率、超低铁损和低噪音等优异的软磁性能,是高频电机和高频变压器等电力电子器件的理想铁芯材料.但 Fe-6.5% Si 合金本征高硬脆性导致其冷加工性极差,目前国际上仅日本具备了 Fe-6.5% Si 合金的商业化生产能力.近 10 多年我国

在 Fe-6.5% Si 合金制造技术上取得了显著进步,东北大学和北京科技大学均在实验室中成功实现了 Fe-6.5% Si 合金板带的轧制法制造^[1-2].

轧制是最有效的金属板带制造方式,热轧板焊接是保证 Fe-Si 合金板带连续轧制生产十分

收稿日期: 2014-11-11

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2012AA03A505); 国家自然科学基金资助项目(51171042); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N120410002); 辽宁省博士科研启动基金资助项目(20121008).

作者简介: 柳金龙(1979-),男,山西大同人,东北大学讲师,博士; 沙玉辉(1969-),男,辽宁岫岩人,东北大学教授,博士生导师; 左良(1963-),男,安徽怀宁人,东北大学教授,博士生导师.

重要的工序^[3]. Fe-6.5% Si 合金焊接的特殊性在于其本征脆性大, B₂、大 B₂ 和 DO₃ 等有序结构的存在使其室温延伸率几乎为零^[4], 故焊缝极易形成热裂纹, 而且高硅含量造成的低热导率会增大焊缝附近温度场的不均匀分布, 从而引起较大的焊接内应力, 增大裂纹的形成倾向. Miyazaki 等^[5] 提出了采用焊接前在 150~600 °C 预热, 焊接后热处理去除热应力的方法抑制 Fe-6.5% Si 合金焊接接头的裂纹萌生, 但预热和焊后热处理需要增加设备投资, 并显著延长焊接工序时间, 极大地降低了生产效率.

惰性气体保护焊(TIG 和 MIG)具有投资成本低、技术成熟稳定、焊缝质量良好和易于实现自动化等优点^[6], 是应用最广泛的金属材料焊接方法. 本文在不采用焊前预热和焊后热处理的条件下, 分别采用 TIG 和 MIG 焊焊接 Fe-6.5% Si 合金热轧板, 通过分析不同焊接方式对焊接接头显微组织和力学性能的影响, 选出最佳焊接方法, 为 Fe-6.5% Si 合金热轧板焊接提供理论基础.

1 实验材料和实验方法

以 3.5 mm 厚的 Fe-6.5% 热轧板为母材, 切取尺寸为 100 mm × 60 mm × 3.5 mm 的样品进行焊接, 样品长度方向沿热轧板轧向, 焊丝从牌号为 DT4C 的工业纯铁中切取, 母材和焊丝成分见表 1. 试板不开坡口, 双面焊. 焊机采用烽火 WSE-350 交直流方波氩弧焊机. TIG 焊接试验过程中未使用填充焊丝, 固定氩气流量 15 L/min, 钨极直径为 2 mm, 焊接电流 120~130 A, 焊接速度 30~35 cm/min. MIG 焊接试验过程中固定氩气

流量 20 L/min, 焊接电流 75~80 A, 送丝速度 3~4 m/min, 焊接速度 40~50 cm/min.

在焊接接头垂直焊缝的断面上取样, 利用 DELU-REMPS2 型光学显微镜和 JSM7001F 型扫描电镜沿纵截面观察热轧板焊缝显微组织. 采用 401MVD 数显显微维氏硬度计进行硬度测试, 从焊缝中心到母材每隔 0.5 mm 测量一个硬度值. 考虑到焊缝中沿板厚方向的硬度可能存在差异, 沿板厚方向分别测试了 1/10 层、1/4 层和中心层的硬度值(分别记为 L0.1, L0.25, L0.5). 在 SANS 电子万能试验机上测试焊接接头的拉伸性能, 应变速率 0.01 s⁻¹.

表 1 Fe-6.5% Si 合金和焊丝的化学成分(质量分数)

材料	C	S	Mn	P	B	Si	Nb
母材	0.031	0.014	0.052	0.017	0.060	6.50	0.012
焊丝	0.003	0.006	0.060	0.010	—	<0.01	—

2 结果与讨论

2.1 焊接接头宏观组织分析

图 1 给出了母材显微组织和不同焊接方式下焊缝的成形情况. 由图可知, 母材中沿板厚方向存在组织梯度, 靠近表层为较均匀的等轴晶, 靠近中心层存在较多沿轧向伸长的形变态晶粒. 在 TIG 和 MIG 焊两种方式下焊缝都连续均匀, 形成鱼鳞状波纹, 表面无显著的塌陷和凸起现象. 在焊接过程中, TIG 焊焊缝局部出现了细小的裂纹, 裂纹方向垂直于焊缝, MIG 焊焊缝未发现宏观裂纹.

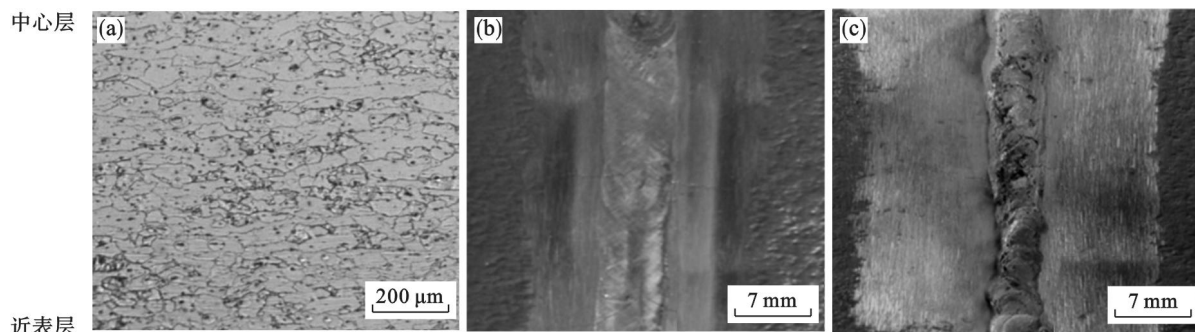


图 1 Fe-6.5% Si 合金热轧板组织和不同焊接方式下焊缝的外观形貌

Fig. 1 Microstructure and photo of the welding joint of Fe-6.5% Si alloy hot bands

(a) — 热轧板显微组织; (b) — TIG 焊; (c) — MIG 焊.

图 2a 给出了 Fe-6.5% Si 合金热轧板 TIG 焊焊缝区的显微组织. 图中黑色的针状组织推测为显微裂纹. 因为已有研究表明^[1,7], 高硅钢凝固

组织为单一铁素体, 等轴晶和发达的柱状晶凝固组织中均不会出现亚稳相, 而且本文中杂质元素含量低, 即使形成析出相, 也无法达到图 2a 中黑

色针状组织的数量. 焊缝区出现密集显微裂纹的原因主要为 Fe-6.5% Si 合金热导率较低, 仅为 $19 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 焊缝冷却时易产生较大的热应力, 从而造成局部应力集中, 而且具有铸态组织的 Fe-6.5% Si 合金具有十分显著的硬脆特性, 在室温下延伸率接近于零, 在裂纹尖端难以产生局部塑性变形和应力松弛, 裂纹易萌生和扩展.

图 2b, 图 2c 给出了 MIG 焊接头的显微组织, 接头由焊缝区、热影响区和母材区组成, 熔合线不

明显. 焊缝区形成了粗大的柱状晶, 柱状晶生长方向大致垂直于焊缝区和热影响区的交线. 由于未开坡口, 沿板厚方向从中心层向表层焊缝区体积逐渐增大. 热影响区的组织主要由等轴晶组成, 与母材区差别较大, 表明焊接过程中热影响区发生了静态再结晶. 由于距焊缝区越远受热影响越小, 故热影响区平均晶粒尺寸在接近焊缝区时较大, 在接近母材区时较小. 焊缝区、热影响区和母材区均未生成显微裂纹.

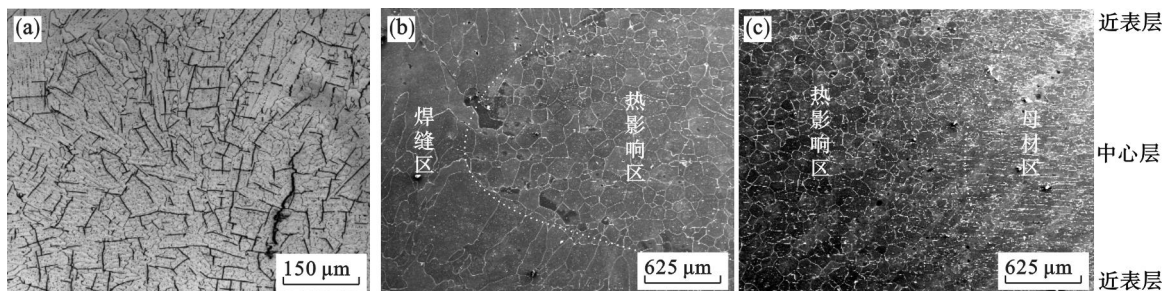


图 2 TIG 和 MIG 焊接头的显微组织

Fig. 2 Microstructure of the TIG and MIG welding joint

(a)—TIG 焊; (b)—MIG 焊; (c)—MIG 焊.

2.2 MIG 焊接头的力学性能

图 3 给出了 MIG 焊接头拉伸样品宏观形貌、拉伸应力-应变曲线和硬度分布. 断口位于焊缝区, 这是因为焊缝区纯铁焊丝和母材的熔合会显著降低硅浓度, 从而降低了焊缝区的强度, 使拉伸变形过程中焊缝区成为最薄弱区域. Fe-6.5% Si 合金热轧板在 300°C 具有较高的强度和较好的塑性, 屈服强度约为 600 MPa , 延伸率约为 21% [8], 由图 3c 可知, Fe-6.5% Si 合金焊缝区塑性明显弱于母材, 在 300°C 下变形时发生脆性断裂, 在 500°C 下变形时为典型的塑性变形, 可发生明显的颈缩, 断裂延伸率约为 5.5% , 屈服和抗拉强度

分别为 225 和 280 MPa . 由图 3d 可知, 接头的硬度分布明显不均匀, 距焊缝中心越远硬度越大, 焊缝中心附近硬度在 $235 \sim 310 \text{ HV}$ 之间, 热影响区硬度约为 400 HV , 母材区硬度约为 420 HV . 焊缝区较低的硅含量和热影响区的再结晶是这两个区域硬度降低的主要原因. 此外, 焊缝区中沿板厚方向硬度存在明显的梯度分布, 热影响区和母材区硬度分布较均匀. 在焊缝区, L0.1 层的硬度约为 235 HV , L0.5 层的硬度约为 310 HV , 结合图 2b 中焊缝区与热影响区的边界形状可知, 越靠近表层焊缝区体积越大, 熔化过程中硅浓度被稀释的区域越大, 从而导致表层附近硬度最低.

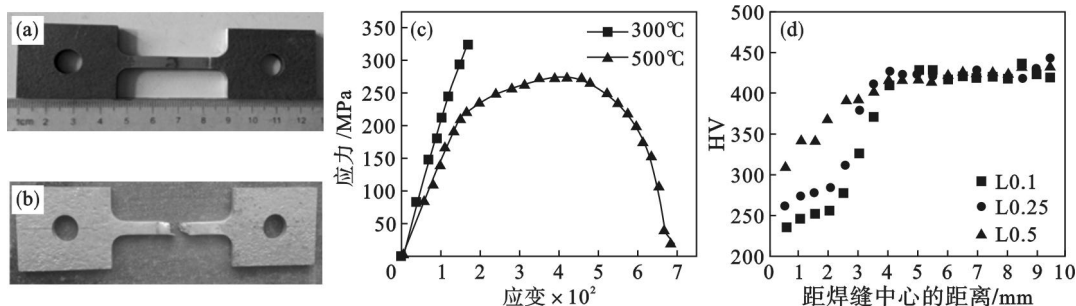


图 3 经 MIG 焊的 Fe-6.5% Si 合金热轧板拉伸样品、应力-应变曲线和硬度分布

Fig. 3 Tensile specimens, stress-strain curves and hardness of Fe-6.5% Si alloy hot bands after MIG welding

(a)—拉伸样品; (b)— 300°C 拉伸样品; (c)—应力-应变曲线; (d)—硬度分布.

图 4a 给出了焊接接头在 300°C 拉伸时断口的总体形貌特征, 由图可知, 接头的断裂方式为典型的脆性断裂, 出现了大量的解理小刻面. 图 4b

是 A 区域的放大, 断口出现了明显的解理台阶 (如 C 区域) 和大量的河流花样, 未发现明显的韧窝. 在硬脆的合金中, 解理台阶通常由解理裂纹与

次生解理相交形成. 图 4c 是 B 区域的放大, 可以更清晰地观察到断口中河流花样的形貌, 显微孔洞和晶界位于河流的上游, 是裂纹源.

图 5 为焊接接头在 500 °C 拉伸断口显微形貌. 断口主要由大量小韧窝和较大韧窝组成, 且在断口左侧能看到颈缩滑移时留下的少量条纹, 故接头表现出较好的塑性, 这与 500 °C 下的拉伸变形数据相吻合. 在断口中存在显微孔洞, 而且从图 5b 和图 5c 可知断口中存在少量河流花样, 这主要是由焊接接头存在缺陷且局部位置成分不均造成. 故 Fe-6.5% Si 合金焊接接头变形时, 将温度从 300 °C 提高到 500 °C 可明显提高韧窝的形核与扩散. 其原因为: 300 °C 拉伸变形时, 高硅钢晶界和晶内均易出现高密度的位错缠结, 加工硬化现象明显; 而将温度提高到 500 °C 时, 虽然晶界仍存在高密度位错, 但晶内位错密度会明显降低, 加工硬化现象大幅减弱^[9].

Fe-6.5% Si 合金的硬脆性主要来自于过高的硅含量, 而微量 C, S 杂质会在凝固的过程中形成强化相, 微量的 O 会诱发环境脆性, 从而进一步降低合金的塑性. 采用工业纯铁为焊丝, 一方

面可稀释焊缝的硅含量, 另一方面尽量少地引入其他杂质, 从而有效地改善了焊接接头组织和力学性能. 由于存在较严重的受热不均, 热影响区通常成为焊接接头的薄弱区域, 在本文采用的 MIG 焊方式下, 在热影响区未出现显微裂纹, 拉伸断口未出现在热影响区, 该区域力学性能良好. 从图 3 可知, 热影响区发生了明显的再结晶和晶粒长大现象, 且靠近焊缝区晶粒长大更明显. 由于再结晶和晶粒长大均为吸热反应, 有利于减小热影响区中由受热不均带来的热应力, 而且再结晶会显著降低缺陷密度, 减少裂纹源, 从而增加了热影响区的抗裂性.

轧制法制造 Fe-6.5% Si 合金的流程中, 在热轧和冷轧之间存在 300 ~ 700 °C 的温轧工序, 从上述对焊接接头力学性能的分析可知, 将温轧温度控制在 500 °C 以上即可实现接头的良好塑性变形. 此外, 虽然接头屈服强度低于母材, 但接头的作用是实现带材在轧制过程的连接, 225 MPa 的屈服强度为轧制张力的调整提供了较宽的工艺参数范围, 故基于本文提供的焊接方法可满足 Fe-6.5% Si 合金热轧板焊接位置的温轧要求.

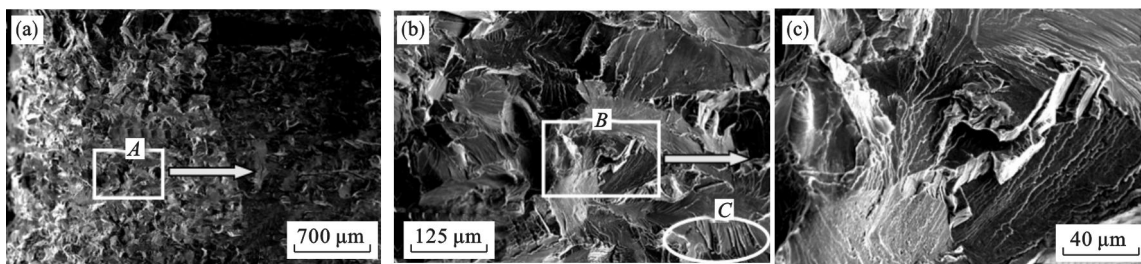


图 4 经 MIG 焊的 Fe-6.5% Si 合金热轧板在 300 °C 下的拉伸断口形貌

Fig. 4 SEM images of fracture surfaces of Fe-6.5% Si alloy hot bands after MIG welding

(a)—断口的低倍形貌; (b)—A 区域的放大; (c)—B 区域的放大.

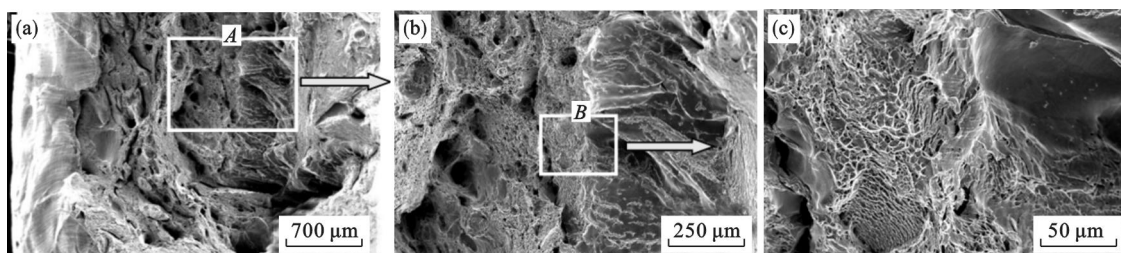


图 5 经 MIG 焊的 Fe-6.5% Si 合金热轧板在 500 °C 下的拉伸断口形貌

Fig. 5 SEM images of fracture surfaces of Fe-6.5% Si alloy hot bands after MIG welding

(a)—断口的低倍形貌; (b)—A 区域的放大; (c)—B 区域的放大.

3 结 论

1) 使用工业纯铁焊丝的 MIG 焊可实现 Fe-6.5% Si 合金热轧板的良好连接, 焊缝表面连续, 鱼鳞纹均匀, 焊缝内无显微裂纹.

2) 采用工业纯铁焊丝的 MIG 焊, 接头在 500 °C 下屈服强度和拉伸延伸率分别为 225 MPa 和 5.5%. 硅浓度稀释是改善焊缝区力学性能的有效方法.

3) 本文通过优化焊接工艺, 实现了可满足 Fe-6.5% Si 合金温轧要求的热轧板连接, 提出

的焊接方法可为 Fe-6.5% Si 合金热轧板的工业化焊接提供理论基础。

参考文献:

- [1] Fu H D, Zhang Z H, Wu X S, et al. Effects of boron on microstructure and mechanical properties of Fe-6.5 wt% Si alloy fabricated by directional solidification [J]. *Intermetallics*, 2013, 35: 67-72.
- [2] Liu J L, Sha Y H, Zhang F, et al. Development of {210} <001> recrystallization texture in Fe-6.5wt% Si thin sheets [J]. *Scripta Materialia*, 2011, 65: 292-295.
- [3] 田万钰, 于捷, 章应霖. 3.25% 硅钢焊接热影响区的组织与脆性的研究[J]. 焊接学报, 1984(1): 50-54.
(Tian Wan-yu, Yu Jie, Zhang Ying-lin. Microstructure and brittle of weld heat affected zone of 3.25% silicon steel[J]. *Transaction of the China Welding Institution*, 1984(1): 50-54.)
- [4] Ruiz D, Yanez T R, Cuello G J, et al. Order in Fe-Si alloys: a neutron diffraction study [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2006, 385(1): 578-580.
- [5] Miyazaki Y, Iwami H, Obara M, et al. Welding method for high silicon electromagnetic steel sheets; JPH06297182 (A) [P]. 1994-10-25.
- [6] 何长树, 王东, 赵刚, 等. Al-12.7Si-0.7Mg 合金交流 TIG 焊接头组织与性能 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(10): 1431-1434.
(He Chang-shu, Wang Dong, Zhao Gang, et al. Microstructure and mechanical properties of Al-12.7Si-0.7Mg alloy joints welded by AC TIG welding [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2011, 32(10): 1431-1434.)
- [7] Kim K N, Pan L M, Lin J P, et al. The effect of boron content on the processing for Fe-6.5wt% Si electrical steel sheets [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, 277(3): 331-336.
- [8] Ros-Yanez T, Ruiz D, Barros J, et al. Study of deformation and aging behaviour of iron-silicon alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 447(1/2): 27-34.
- [9] 王聪, 林栋樑, 单爱党, 等. 热轧退火态 Fe-6.5% Si 合金的力学行为及形变机制 [J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(5): 601-603.
(Wang Cong, Lin Dong-liang, Shan Ai-dang, et al. Mechanical behavior and deformation mechanism of annealed hot-rolled Fe-6.5% Si alloy [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2002, 36(5): 601-603.)

(上接第 18 页)

- [2] Piccard C. Controlling chaotic oscillations in delay differential systems via peak-to-peak maps [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 2001, 48(8): 1032-1037.
- [3] 谢邦荣, 宋劲松. 毁伤元与空中目标的动态交会建模 [J]. 弹箭与制导学报, 2001, 21(4): 52-55, 75.
(Xie Bang-rong, Song Jin-song. The model establishment of the dynamic meeting between kill elements and aerial target [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2001, 21(4): 52-55, 75.)
- [4] 王马法, 李翔宇, 卢芳云, 等. 弹目交会中破片命中点参数计算模型研究 [J]. 弹道学报, 2012, 24(2): 50-54.
(Wang Ma-fa, Li Xiang-yu, Lu Fang-yun, et al. A model of calculating hitting point parameters of fragment in warhead/target encounter [J]. *Journal of Ballistics*, 2012, 24(2): 50-54.)
- [5] Fong R, Ng W, Rice B, et al. Multiple explosively formed penetrator (MEFP) warhead technology development [C]// 19th International Symposium of Ballistics. Interlaken: International Ballistics Committee, 2001: 563-567.
- [6] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large, strains, high strain rates and high temperatures [C]// Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. Hague: International Ballistics Committee, 1983: 541-547.
- [7] Weimann K, Doenngsfeld K, Speck J, et al. Modeling, testing, and analysis of EFP performance as a function of confinement [C]// Proceedings of the 12th International Symposium on Ballistics. San Antonio: International Ballistics Committee, 1990: 532-540.
- [8] Birtea P, Puta M, Ratiu T S, et al. A short proof of chaos in an atmospheric system [J]. *Physics Letters A*, 2002, 300: 189-191.
- [9] Tang K S, Man K F, Zhong G Q, et al. Generating chaos [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 2001, 48(5): 636-641.
- [10] 刘彤. 防空战斗部杀伤威力评估方法研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
(Liu Tong. The lethality assessment method of air-defense missile warhead [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.)
- [11] Fleeman E L. Tactical missile design [M]. Portland: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, 2001.
- [12] Lioyd R M. Conventional warhead systems physics and engineering design [M]. Washington DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, 1998.