

基于 Lyapunov 指数刻画短路过渡 GMAW 的稳定性

曹 彪, 向远鹏, 曾 敏, 黄石生

(华南理工大学 机械工程学院, 广州 510641)



曹 彪

摘 要: 基于不同焊接速度下短路过渡熔化极二氧化碳气体保护电弧焊的焊接电流时间序列, 利用 Takens 相空间重构技术和 Lyapunov 指数的 Wolf 算法, 分析评估了焊接系统的最大 Lyapunov 指数。结果表明, 当焊接过程的稳定程度较高时, 最大 Lyapunov 指数较小; 而当系统处于不稳定状态、状态变动迅速时, 最大 Lyapunov 指数相应较大; 因此最大 Lyapunov 指数和焊接过程稳定性成负相关关系, 可以将其作为刻画短路过渡熔化极二氧化碳气体保护电弧焊稳定性的一种新的量化指标。

关键词: 二氧化碳熔化极气体保护电弧焊; 焊接电流; Lyapunov 指数

中图分类号: TG4 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2008)12-0005-03

0 序 言

混沌是非线性系统中一种非常普遍的现象, 但是直到 1963 年 Lorenz 在气象学研究中首次使用混沌动力学概念之后, 现实系统中的混沌现象才为人们广泛注意。短路过渡二氧化碳气保护焊(CO₂ GMAW-S)过程的混沌行为特征于最近才被揭示出来^[1]。因为焊接电流时间演化的非线性本质, 所以诸如分形维数、测度熵、Lyapunov 指数谱之类的混沌特征参数可被用作研究 CO₂ GMAW-S 系统的有力工具。特别是在过去数十年中 Lyapunov 指数一直是科学研究的热点, 并已广泛应用于生物医学、非线性电子学和机械工程等工程实践中^[2-4], 然而目前在焊接领域的应用还很少见^[5]。Lyapunov 指数是对系统吸引子动力学行为或时间演化性质的一种测度, 并提供对系统所产生信号的混沌本质和程度的定量评估。文中通过探查 CO₂ GMAW-S 系统的最大 Lyapunov 指数, 旨在获得不同焊接速度下焊接过程稳定性和系统最大 Lyapunov 指数之间的定量关系。

1 算 法

1.1 相空间重构

相空间重构是计算 Lyapunov 指数等系统动力学行为混沌不变量的首要前提, 根据 Takens 延迟坐标技术^[6], 从时间序列 $x_i, i = 1, 2, \dots, N$ 重构 m 维相空

间中的点 X_i 的坐标为

$$X_i = (x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}),$$
$$i = 1, 2, \dots, N - (m-1)\tau \quad (1)$$

式中: m 为嵌入维数, τ 为延迟时间。

1.2 延迟时间

延迟时间 τ 的选择应确保重构吸引子与原始吸引子拓扑等价。如果 τ 选得太小, 将导致重构矢量近似相同, 并且每一矢量包含大量冗余信息。另一方面 τ 选得太大, 将导致重构矢量的坐标分量之间互不相关。而对于混沌系统固有的蝴蝶效应, 极小的初始状态误差将随时间被指数放大, 以至于过大的延迟将导致信号与自身完全失去关联, 所以 τ 的选择应确保重构矢量坐标之间最大程度相互独立, 而其动力学关系仍旧得以完整保留。目前文献中有几种方法用来确定延迟时间: 自相关函数法、互信息法和 C-C 法^[7]。自相关函数法采用矢量坐标自相关函数的第一个零点(或下降至初值的 $1/e, 1-1/e$)时的时间, 然而尽管此法计算简便, 但因其仅仅表达了信号与自身在一定时间延迟下的线性关系, 因此用于确定非线性系统的时间延迟就可能导致错误。互信息法测量的是变量之间广义的相关性, 因此比较适合于非线性系统, 但计算过程冗长复杂。C-C 法本质上是一种统计方法, 比互信息法对数据量要求小, 计算简单, 而且结果与互信息法基本一致, 因此采用 C-C 法确定 τ 。

1.3 嵌入维数

嵌入维数 m 太小, 不能展开系统原始吸引子的真实结构; 而 m 太大则重构相空间冗余维数上充斥噪声, 两者均降低对混沌不变特征量的准确评估。

m 的确定主要有关联函数法、奇异值法、虚假近邻点法以及 Cao 法^[8]。由于 Cao 法对数据量要求不高,抗噪力强,计算高效,除延迟时间外不含其它任何主观参数,因此采用 Cao 法确定嵌入维数 m 。

1.4 Lyapunov 指数

Lyapunov 指数的轨道跟踪算法^[9]如下。
利用 Takens 延迟坐标技术重构相空间,重构矢量为 $\{x(t), x(t+\tau), \cdots, x(t+(m-1)\tau)\}$, 搜索基准轨道基点初始位置 $\{x(t_0), x(t_0+\tau), \cdots, x(t_0+(m-1)\tau)\}$ 的相邻轨道的最近邻点,计算两点之间的欧氏距离为 $L(t_0)$ 。经过一段时间到达时刻 t_1 , $L(t_0)$ 演化为 $L'(t_1)$ 。此时寻找一替代点,使其与演化后基点的距离 $L(t_1)$ 最小,并且 $L'(t_1), L(t_1)$ 对应矢量之间的夹角小于某一预设阈值。如此重复,直至基点演化至基准轨道终点,从而最大 Lyapunov 指数 λ_1 为

$$\lambda_1 = \frac{1}{t_M - t_0} \sum_{k=1}^M \log_2 \frac{L'(t_k)}{L(t_{k-1})}$$

(2)

式中: M 为总的替代步数。

2 试 验

使用 Panasonic YD350GR3HGE 焊机在 4.5 mm

厚低碳钢板(Q235)上进行短路过渡 CO₂ 焊平铺试验,填充材料为 $\phi 1.2$ mm 的 H08Mn2SiA 焊丝,保护气体为纯度 99.9% 的二氧化碳,焊接电流 $I_a=150$ A,电弧电压 18 V,气体流量 18 L/min,焊丝干伸长 10 mm。依次调节焊接速度 v_w 为 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 和 60 cm/min。采集焊接电流,评估系统最大 Lyapunov 指数 λ_1 ,并考察 λ_1 与焊接过程稳定性的关系。利用 NI 数据采集卡 DAQ PCI-6221,以采样频率 10 kHz 对焊接电流 I_a 实时采样 20 s。从全部 20 s 采样值中随机截取 8 000 个数据点用于计算焊接系统的最大 Lyapunov 指数 λ_1 。

3 结果与分析

作为示例,图 1 示出 v_w 分别为 30, 40, 50 和 60 cm/min 时最大 Lyapunov 指数 λ_1 随替代步数 M 的收敛过程,这是对 GMAW 焊接电流 I_a 实时采样 20 s,随机截取 8 000 个数据点,计算的最大 Lyapunov 指数 λ_1 。表 1 列出不同 v_w 下时间延迟 τ ,嵌入维数 m 和 λ_1 及其标准差 $\sigma(\lambda_1)$ 。

试验表明,当焊接速度 $v_w \leq 35$ cm/min 时,单位长度焊缝上的熔敷金属量增加,熔化金属流向熔池前方; v_w 过低时,不仅降低生产率,而且容易烧穿母

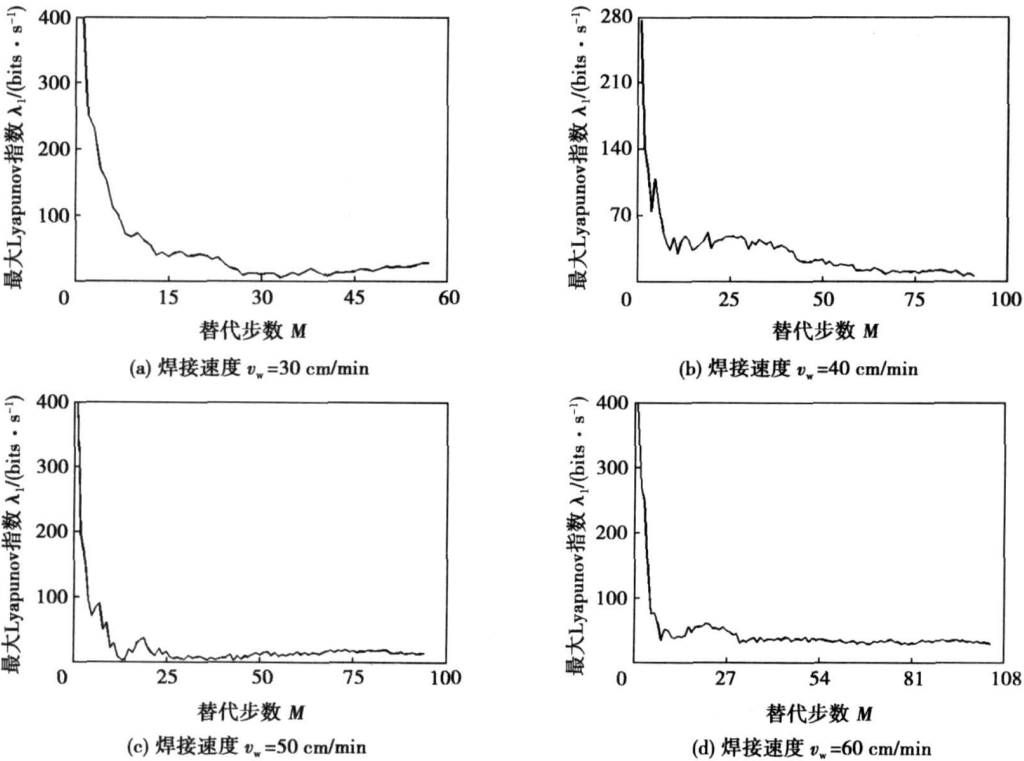


图 1 在不同焊接速度 v_w 时最大 Lyapunov 指数 λ_1 替代步数 M 曲线
Fig. 1 The largest Lyapunov exponent λ_1 vs replacement steps M at different welding speed v_w

表 1 不同焊接速度 v_w 下时间延迟 τ 、嵌入维数 m 和最大 Lyapunov 指数 λ_1 及其标准差 $\sigma(\lambda_1)$

Table 1 Delay time τ , embedding dimension m , largest Lyapunov exponent λ_1 and its standard deviation $\sigma(\lambda_1)$ at different welding speeds v_w

焊接速度 $v_w / (\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$	时间延迟 τ	嵌入维数 m	最大 Lyapunov 指数 $\lambda_1 / (\text{bits} \cdot \text{s}^{-1})$	最大 Lyapunov 指数标准差 $\sigma(\lambda_1) / (\text{bits} \cdot \text{s}^{-1})$
25	5	6	34.141 7	1.234 6
30	6	5	22.162 2	3.812 8
35	6	6	17.283 0	1.653 2
40	5	5	5.287 7	2.504 6
45	5	7	7.097 3	1.793 7
50	5	5	14.068 8	0.848 2
55	5	7	23.804 3	1.780 4
60	6	6	31.448 1	1.725 6

材, 焊接变形过大。此时电弧在液体金属表面, 而非母材表面燃烧。电弧冲击熔池, 导致有效熔深降低, 焊道加宽, 而且容易发生未熔合、满溢和未焊透, 焊缝组织粗大, 焊接过程波动明显, 焊缝质量较差。当 $40 \text{ cm/min} \leq v_w \leq 45 \text{ cm/min}$ 时, 焊接过程平稳, 飞溅较少, 焊缝质量较好。随着 v_w 增加, 单位长度焊缝上由电弧传递给母材的热量上升, 这是因为电弧直接作用于母材。但当焊接速度 $v_w \geq 50 \text{ cm/min}$ 时, 单位长度焊缝上向母材过渡的热量减少, 仅靠近母材表面的金属熔化, 故母材熔化量先增后减。再提高 v_w 时则产生咬边, 原因是 v_w 过大时熔化金属不足以填充电弧所熔化的路径和熔池金属在液体表面张力作用下向焊缝中心聚集的结果。当 v_w 更高时, 由于液体金属熔池较长而容易发生失稳, 导致驼峰焊道, 此时由于热量输入不足, 焊道横截面太小, 熔池边缘金属被等离子流吹走, 致使焊缝两侧咬边, 而且 CO_2 气体向后拖, 保护效果恶化, 焊缝金属往往产生气孔、裂纹和夹渣。熔滴过渡过程极不稳定, 形成不规则焊道。

当一个确定性系统的状态演化对初始条件表现出敏感性时, 系统就被认为是混沌的。这意味着源自初始条件邻近的系统状态轨道随着时间历程呈现指数分离。最大 Lyapunov 指数 λ_1 量化了混沌系统未来状态演化的不可预测程度。 λ_1 越大, 说明随着时间推移, 系统的状态差异演变越快, 系统维持稳定态、周期或准周期状态的能力越低, 相应地系统未来状态越难以预测; 相反, λ_1 越小, 说明系统的状态随着时间推移演变越缓慢, 初态差异变化越不明显, 系统维持稳定态、周期或准周期状态的能力越强。当 λ_1 降至零或负值时, 系统即驻留在稳定态、周期或准周期状态。可见 λ_1 可以用来刻画一个物理系统的稳定程度。如果系统的 λ_1 越大, 则该系统状态演化越快, 未来状态越难以预测, 系统状态越不稳

定; 反之, 如果 λ_1 越小, 则该系统的状态越稳定。

物理试验和数值分析清晰地验证了上述规律。不同 v_w 下 λ_1 均为正值表明系统均处于混沌状态, 而当 $v_w = 40 \sim 45 \text{ cm/min}$ 时, 电弧燃烧稳定, 焊接过程平稳, 工艺参数之间匹配, 因此 λ_1 相应较小, λ_1 分别取得最小值 5.287 7 和 7.093 7, 系统混沌程度较低; 相反, 当焊接速度 $v_w \leq 35 \text{ cm/min}$ 或 $v_w \geq 50 \text{ cm/min}$ 时, 焊接过程越来越不稳定, 此时 λ_1 均逐渐上升, 具体来说, 当 v_w 从 25 cm/min 逐渐增加至 40 cm/min 时, 焊接过程由不稳定状态过渡到稳定状态, λ_1 也由 34.141 7 降低至 5.287 7, 而当 v_w 从 45 cm/min 继续增加至 60 cm/min 时, 焊接过程由稳定状态返回到不稳定状态, 相应地 λ_1 也由 7.093 7 上升至 31.448 1。在这些条件下电弧漂移不定, 焊接过程波动异常, 各工艺参数之间失调, 状态随时间演化的无序程度较高, 因此 λ_1 相应较大, 系统混沌程度较高。图 2 给出不同 v_w 下系统最大时 Lyapunov 指数 λ_1 , 其中误差条代表 2 倍 λ_1 标准差 $\sigma(\lambda_1)$, 可见 λ_1 与焊接过程的稳定性成负相关关系。

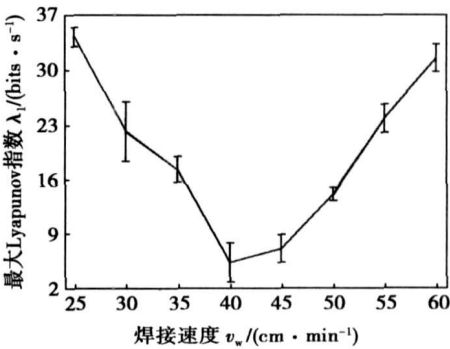


图 2 最大 Lyapunov 指数 λ_1 —焊接速度 v_w 的曲线
Fig. 2 Largest Lyapunov exponent λ_1 vs welding speed v_w
[下转第 16 页]

看出, L/W 越大, 熔池形状沿焊接方向拉长的程度越大, 晶粒的生长方向就越接近垂直于焊缝中心线, 晶粒就越短而直; L/W 越小, 熔池形状越接近圆形, 晶粒的弯曲程度越大, 晶粒就越长而弯。可见, 熔池形状影响了柱状晶的生长方向。

3 结 论

- (1) 通过晶界演化的 GBE 模型能准确地模拟不锈钢焊缝中柱状晶的生长形态, 与试验结果较为吻合。
- (2) 熔池形状和尺寸影响了柱状晶的生长方向。熔池长宽比 L/W 越大, 晶粒的生长方向就越垂直于焊缝中心, 晶粒短而直; L/W 越小, 熔池形状越接近圆形, 晶粒的弯曲程度越大, 晶粒就越长而弯。

参考文献:

[1] Yang Z, Elmer J W, Wong J, *et al.* Evolution of titanium arc weldment

macro and microstructures-modeling and real time mapping of phase [J]. *Welding Journal*, 2000, 79(4): 97s-112s.
[2] Shi Y, Chen D, Lei Y, *et al.* HAZ microstructure simulation in welding of a ultra fine grain steel [J]. *Computational Materials Science*, 2004, 31(3-4): 379-388.
[3] Gandin C A, Rappaz M, Tintillier R. 3-Dimensional simulation of the grain formation in investment castings [J]. *Metallurgical Transactions*, 1994, 25A(3): 629-635.
[4] Gandin C A, Rappaz M, Tintillier R. A coupled finite element cellular automaton model for the prediction of dendritic grain structures in solidification process [J]. *Acta Materialia*, 1994, 42(7): 2233-2246.
[5] Bergmann H W, Mayer S. Texture evolution in laser beam welds undergoing the planar solidification model [C] // Cerjak H. *Mathematical Modeling of the Weld Phenomena 4*. London: The Institute of Materials, 1999: 166-183.

作者简介: 赵玉珍, 女, 1974 年出生, 博士, 讲师。主要从事焊接过程数值模拟方面的科研。发表论文 20 余篇。

Email: zhaoyz@mail.tsinghua.edu.cn

[上接第 7 页]

4 结 论

从系统论和非线性角度, 研究了 CO_2 GMAW-S 系统的稳定性和混沌动力学特征量——最大 Lyapunov 指数之间的关系。物理试验和数值分析表明在不同焊接速度下, CO_2 GMAW-S 系统最大 Lyapunov 指数均为正值, 证明焊接过程处于混沌状态。当焊接速度与其它工艺参数之间相互匹配, 焊接过程稳定时, 最大 Lyapunov 指数相对较小; 而当焊接速度过小或过大, 工艺参数之间失调, 过程失稳时, 最大 Lyapunov 指数则相对较大, 因此在不同焊接速度下, 最大 Lyapunov 指数可以用来定量表征 CO_2 GMAW-S 系统的稳定性。

参考文献:

[1] 吕小青, 曹彪, 曾敏, 等. 短路过渡电弧的关联维数分析 [J]. *焊接学报*, 2005, 26(6): 65-68.

[2] 任志军, 田心. 脑电高阶 Lyapunov 指数的估计及其仿真计算 [J]. *中国生物医学工程学报*, 2005, 24(6): 676-680.
[3] 周宇飞, 汪莉丽, 陈军宁. 开关变换器的仿真建模方法及最大 Lyapunov 指数计算 [J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(9): 1925-1928.
[4] 张智海, 郑力, 李志忠, 等. 端铣工艺非线性动力学特性的研究 [J]. *机械工程学报*, 2004, 40(8): 45-48.
[5] 罗震, 单平, 高战蛟, 等. 用 Lyapunov 指数研究点焊位移信号的混沌特性 [J]. 2006, 27(12): 34-37.
[6] Takens F. Detecting strange attractors in turbulence [C] // Rand D, Young L. *Dynamical systems and turbulence: Lecture notes in mathematics*. Berlin: Springer, 1981, 898: 366-381.
[7] Kim H S, Eykholt R, Salas J D. Nonlinear dynamics, delay times, and embedding windows [J]. *Physica D*, 1999, 127: 48-60.
[8] Cao Liangyue. Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series [J]. *Physica D*, 1997, 110: 43-50.
[9] Wolf A, Swift J B, Swinney H L, *et al.* Determining Lyapunov exponents from a time series [J]. *Physica D*, 1985, 16: 285-317.

作者简介: 曹彪, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士生导师。主要从事焊接电源设备与控制方面的科研和教学工作。发表论文 50 余篇。

Email: meibcao@scut.edu.cn

MAIN TOPICS, ABSTRACTS & KEY WORDS

Arc assisted activating TIG welding process FAN Ding^{1,2}, LIN Tao², HUANG Yong^{1,2}, NIU Shufeng² (1. State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Non-ferrous Metal Alloys, The Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China). p1—4, 32

Abstract: A new activating welding process, arc assisted activating TIG welding (AA-TIG welding), is put forward. The effects of welding parameters on weld penetration and width are studied using SUS304 stainless steel as base metal. The results indicate that the weld penetration of AA-TIG welding can increase above 2 times of that of the traditional TIG welding in the same welding conditions and the weld width reduce dramatically. Using AA-TIG welding process, the 8mm thickness stainless steel can be fully penetrated without making a groove. Welding efficiency is obviously improved. Welding specifications of the assisted arc and common TIG welding have influence on the weld penetration and width of AA-TIG welding.

Key words: stainless steel; AA-TIG welding; carbon dioxide; weld appearance

Stability of CO₂ GMAW with short-circuit transfer based on Lyapunov exponent CAO Biao, XIANG Yuanpeng, ZENG Min, HUANG Shisheng (College of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China). p5—7, 16

Abstract: Based on the experimental time series of welding current produced by carbon dioxide gas metal arc welding (CO₂ GMAW) with short-circuit transfer under different welding speeds, the largest Lyapunov exponents of the welding system are numerically evaluated using Takens' phase space reconstruction technique and the Wolf's algorithm for Lyapunov exponent. The results show that the largest Lyapunov exponent reaches small values when the welding processes approach high steady states. While the system is at the unsteady mode and experiences rapid variation, the largest Lyapunov exponent attains large values. So the largest Lyapunov exponent is negatively correlated with the welding process stability and can be taken as a novel indicator to quantify the process stability of CO₂ GMAW with short-circuit transfer.

Key words: CO₂ GMAW; welding current; Lyapunov exponent

Interphase diffusion-solution zone of Al/Co SONG Yuqiang, LI Shichun, YANG Zeliang (College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China). p8—12

Abstract: By using diffusion couple made by inlaying, the

diffusion-solution zone of Al/Co was researched under different anneal conditions. The microstructure and forming rule were observed and analyzed by means of SEM and EDS, and its forming mechanism was discussed. The results show that the diffusion-solution zone is formed at Al/Co interphase when heating temperature 600 °C and holding time 75 hours, its thickness is 170 μm, and its structure is Al/Co₂Al₉/Co₄Al₁₃/Co₂Al₅/CoAl/Co, the structure being consistent with sequence of each phase in Al/Co binary alloy phase diagram. CoAl phase layer is firstly formed on Co, and other three layers are then formed on CoAl; the Co₄Al₁₃ phase layer and Co₂Al₅ phase layer grow with the opposite direction in "pole pattern", they turn around landscape orientation to grow from root after they have developed definite thickness, and layer 2 and layer 3 intervene in tow; lastly, Co₂Al₅ phase layer is formed at Al/Co₄Al₁₃ interface. The forming of Al/Co diffusion-solution zone resulted from diffusion, dissolve and crystal of Al and Co under the condition of solid phase. The reciprocity of concentration and solubility caused the formation sequence of diffusion-solution zone.

Key words: Al; Co; diffusion welding; interphase; diffusion zone

Microstructure simulation in welding 1Cr18Ni9Ti steel

ZHAO Yuzhen¹, ZHAO Haiyan², SHI Yaowu³ (1. Department of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China). p13—16

Abstract: The growth of columnar grain during the solidification of the 1Cr18Ni9Ti stainless steel weld metal for different welding parameters is simulated using the grain boundary evolution (GBE) modeling method. The shape and the size of the weld pool under different welding parameters are calculated using PHOENICS software. The simulated results show that the growing direction of the columnar grains is dependent on the shape of the weld pool. The straight and short grains tend to grow in direction perpendicular to the weld centerline if the length/width (L/W) of the weld pool is large and the curving and long grains grow toward the welding direction if the L/W ratio is small. The experimental results are found to be in good qualitative agreement with the simulated results.

Key words: grain boundary evolution model; structure simulation; weld solidification; stainless steel

Microstructure of Fe₃Al intermetallic compound produced by plasma cladding ZHU Dongnei^{1,2}, WANG Xibao¹ (1. Beijing Xinghang Mechanical-Electric Equipment Plant, Beijing 100074, China; 2. School of Material Science and Engineering, Tianjin Uni-