

TC4 钛合金激光焊接应力变形有限元分析

Finite Element Analysis of Laser Welding Residual Stress and Distortion in Welded Joints of TC4 Titanium Alloy

何小东¹, 张建勋², 巩水利³, 冯耀荣¹

(1 中国石油天然气集团公司 管材研究所, 西安 710065;

2 西安交通大学 材料科学与工程学院, 西安 710049;

3 北京航空工艺制造研究所, 北京 100024)

HE Xiao-dong¹, ZHANG Jian-xun², GONG Shui-li³, FENG Yao-rong¹

(1 Tubular Goods Research Center of China

National Petroleum Corporation, Xi an 710065, China;

2 School of Material Science and Engineering,

Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China;

3 Beijing Aeronautical Manufacturing Technology

Research Institute, Beijing 100024, China)

摘要: 基于 ANSYS 有限元分析软件, 采用三维移动热源, 对 TC4 钛合金激光焊接残余应力和变形进行了数值模拟和实验研究。结果表明: 钛合金激光焊接产生很大的纵向残余应力, 而横向残余应力较小。激光焊接线能量增加时, 纵向残余应力拉伸区域变宽, 峰值应力降低; 而横向残余应力随线能量的增加而升高。在临界焊透规范以上焊接时, 随焊接线能量的增大, 角变形随之而减小, 而横向收缩变形增大。焊件被完全穿透时, 线能量对角变形的影响作用降低。钛合金激光焊接变形和残余应力实验结果与数值计算结果吻合性较好。通过焊缝金相实验分析了焊接残余应力和变形与线能量的内在关系。

关键词: 钛合金; 激光焊接; 焊接残余应力; 焊接变形; 有限元分析

中图分类号: TG404 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2005) 08-0039-04

Abstract: The laser beam welding residual stress and distortion of titanium alloy were investigated by numerical simulation and experimental tests. The finite element calculations were performed using the ANSYS software. The laser beam was modeled as three-dimensional moving heat source. The results showed that the prodigious longitudinal stress was produced in the welded joints, nevertheless the transverse stress were lower correspondingly. When the heat input increased, the region of tensile of longitudinal stress widened out and its peak value fell, but the magnitude of transverse stress became larger. When the heat input of laser welding exceeded the critical penetration process, with the increase of energy input the angular distortion decreased, but the magnitude of transverse shrinkage increased. As the welding specimens were fully penetrated, the effects of heat input on the angular distortion weakened. Experimental tests were carried out to measure the angular distortion and the distributions of residual stresses in welded joints. The calculated values were in good agreement with experimental measurements. Moreover, the internal relationships of residual stress, deformation and heat input were further investigated by metallographic section of weld.

Key words: titanium alloy; laser beam welding; welding residual stress; welding distortion; finite element analysis

与传统的弧焊、固相焊、感应钎焊等相比, 高能束焊接如激光焊、电子束焊等具有能量密度高、焊接速度快的特点, 所以热输入低、焊接变形小, 在工业制造中得到越来越多的应用。在激光焊接过程中, 能量密度很高的激光束作用于工件上很窄的区域, 使材

料局部熔化、汽化, 从而形成“小孔效应”, 并随激光束移动在热源后面熔化的高温金属冷却形成焊缝。由于激光焊接温度高、梯度大, 焊件受热极不均匀, 必然会产生焊接变形和残余应力。焊接残余应力对焊接结构的脆性断裂、疲劳断裂、应力腐蚀等具有重要的

影响。对于精密制造而言，很小的激光焊接变形也将破坏结构的完整性。

实验测试和数值模拟是研究焊接残余应力和变形的两种常用方法。日本学者北侧彰一等^[1]对 304 奥氏体不锈钢的激光焊接变形进行了实验研究，得到了一些有价值的结论。何小东，张建勋，等^[2]采用小孔释放法对钛合金激光焊接残余应力分布进行了较为深入研究，其研究结果具有一定的工程实际意义。然而对于焊接残余应力的实验测试具有很大的局限性：采用无损方法，只能测到焊接结构表面的应力状态；即使采用破坏形方法，三维残余应力场也是难以精确描述的。因此，采用有限元方法解决焊接残余应力和变形问题引起了许多研究者的重视。尽管有限元分析在一定程度上已成功地用于传统的焊接工艺数值模拟，但对激光焊接和电子束焊接等先进的焊接工艺进行数值模拟方面有限元技术还处于初步阶段，国内外研究者正在进行一些探索研究^[3-5]。

本研究采用移动热源模型，利用大型有限元分析软件 ANSYS，对 TC4 钛合金激光焊接应力变形进行了三维有限元分析研究，并通过实验测试了焊接残余应力和变形，证实了有限元分析结果。

1 有限元模型

1.1 温度场分析模型

焊接温度场分析是焊接应力变形数值模拟的基础。温度场分析和应力变形分析采用间接耦合方式，即先进行激光焊接温度场分析，再将每一步温度场分析结果作为应力变形分析的初始条件。

研究对象为 TC4 钛合金平板对焊，试板尺寸为 200mm × 100mm × 4.0mm。焊接工艺参数如表 1 所示，试样编号分别为 LW1，LW2 和 LW3。图 1 为三维有限元网格模型，厚度方向为四层单元，在焊缝附近采用加密网格，单元总数为 2190，节点数为 2460。

为了模拟激光深熔焊接的“小孔效应”这一显著

表 1 TC4 激光焊接工艺参数
Table 1 Laser welding parameters of TC4 titanium alloy

Specimen	Welding parameter				
	Laser power / W	Welding speed / (m · min ⁻¹)	Defocusing distance / mm	Flux of rear shielding gas / (L · min ⁻¹)	Flux of dragging cover shielding gas/ (L · min ⁻¹)
LW1	2700	1.4	- 0.5	23	28
LW2	2700	1.0	- 0.5	23	28
LW3	2700	0.7	- 0.5	23	28

特点，采用的三维移动热源模型^[6]如下：

$$Q(r,z) = \frac{9P}{\pi r_{0z0}^2} \exp(-3\frac{r^2}{r_0^2} - 3\frac{z}{z_0}) \tag{1}$$

式中：激光作用有效半径 r_0 和能量深度 z_0 为能量密度下降到峰值的 5% 处的值； r 为距热源中心的距离，

$r = \sqrt{(x - Vt)^2 + y^2}$ ，式中的 x, y 为 t 时刻热源中心的坐标； V 为焊接速度； t 为焊接时间； z 为当前能量作用深度； P 为激光有效功率；考虑到光路中四级反射镜和一级聚焦镜对激光能量的损失，以及材料表面对激光的反射作用，本研究中激光功率的有效系数取为 0.77。

模型初始温度为室温 20℃。采用总的换热系数 β 模拟对流和辐射换热^[7]。但考虑到钛合金激光焊接时保护气体的强制对流影响，通过多次数值计算表明，总的换热系数取 $\beta + 350$ 比较符合实际焊接条件。

1.2 力学模型

热分析完成后转换单元类型，进行应力变形分析。参考温度设为室温 20℃，计算中考虑了材料力学

性能的温度相关性。为了模拟自由焊接时的残余应力和变形，同时又要保证有限元模型不产生刚体位移，使求解过程稳定而不发散，对有限元模型在起始焊接位置的节点 O 上施加 X, Y, Z 方向的约束，在焊缝中心截面的底边 OA 的节点上施加 Z 方向约束。在焊缝中心截面处，随温度降低逐步施加移动对称约束，以模拟冷却焊缝金属的约束作用。有限元分析的材料性能参数见文献 [8]，800℃ 以上所需的参数由 ANSYS 外推。

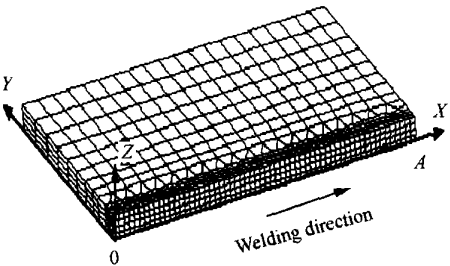


图 1 有限元模型
Fig. 1 Finite element model

2 结果及分析

2.1 TC4 钛合金激光焊接温度场模拟

在 $P = 2.7\text{ kW}$, $V = 0.7\text{ m/min}$, $t = 5.71\text{ s}$ 时, TC4 钛合金激光焊接温度场分布和热循环曲线的有限元计算结果如图2所示。A (0.05, 0, 0), B (0.05, 0.0025, 0), C (0.05, 0.005, 0), D (0.05, 0.01, 0) 分别代表在垂直焊缝方向截面上不同节点的热循环曲线。从图2可以看出, 在焊接过程中焊缝附近的温度梯度极大, 而且温度很高, 可以达到材料的沸点。在热源中心前半部温度梯度较大, 后半部温度梯度小, 且愈向后愈小。这表明随着热源的移动, 热源后面的熔化金属开始冷却凝固, 逐渐形成焊缝, 并恢复弹性, 对后冷却的焊缝金属产生拘束作用。相邻的节点经历不同的加热和冷却过程, 一些节点已处于冷却阶段(收缩), 而另一些节点却处于加热阶段(膨胀), 从而产生残余应力和变形。虽然激光焊接很快, 但仍能在较短的时间内形成准稳态的焊接温度场。准态温度场随激光束的移动而移动, 在热源后面形成长椭圆形的等温线。

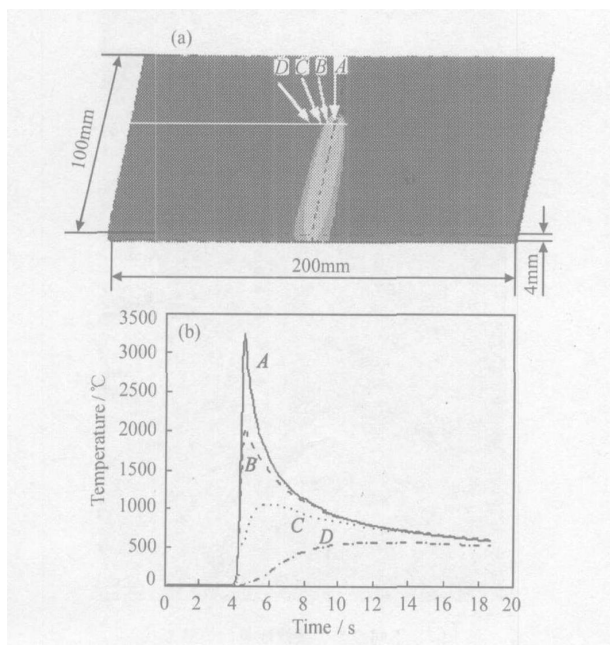


图2 TC4 钛合金激光焊接温度场 (a) 和热循环曲线 (b)
Fig. 2 Temperature distribution (a) and history curves (b) of TC4 titanium alloy by laser welding

2.2 TC4 钛合金激光焊接应力变形模拟

图3是TC4 钛合金激光焊接线能量对残余应力的影响。由图3可知, 在激光功率不变的情况下, 随焊接速度减小(线能量 E 增大), 纵向残余应力峰值降低, 而横向残余应力增大。这是因为在临界焊接规范(工件刚被焊透)时, 焊接线能量相对较小, 热输入较

低, 因而形成的焊缝和塑性区宽度也相对较窄, 从而导致纵向残余应力的拉应力分布在较窄区域, 但其峰值较大。

图4是激光焊接工艺对焊接变形的影响。可以看出, 在临界焊透规范时, 焊接角变形(用 Z 向位移表示)较大, 而横向收缩变形(用 Y 向位移表示)却较小; 当焊接线能量增大时, 焊接试件被穿透, 焊接角变形减小, 横向收缩变形增大。再进一步增加焊接线能量时, 焊接角变形较小, 而且基本上不再增加, 但横向变形增大幅度较大。

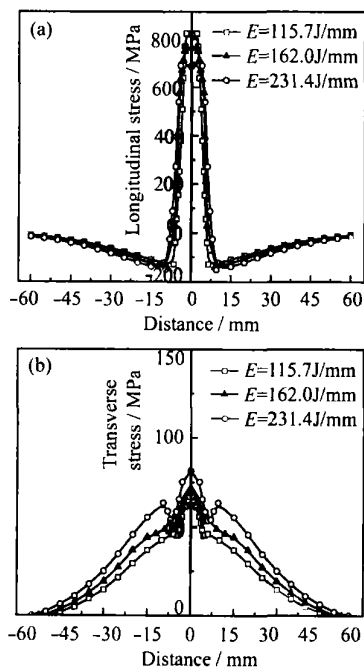


图3 激光焊接线能量对残余应力的影响
(a) 纵向残余应力; (b) 横向残余应力

Fig. 3 Effect of heat input on residual stress
(a) longitudinal stress; (b) transverse stress

3 实验对比及讨论

3.1 实验结果与有限元分析对比

激光焊接残余应力测试采用工程中应用广泛的小孔释放法。实验在常温下进行, 采用BE120-2CA-K电阻应变计及相应胶水贴片, 钻孔直径为1.5 mm。残余应力测试使用的设备为: CCZ-1 型磁力测钻台、CM-1A-10 型数字静态应变仪、数据采集及处理的计算机、装夹工作台。用百分表(精度为0.01 mm)和水平工作台对焊接角变形进行了测量。

图5和图6是TC4 钛合金激光焊接残余应力和变形的测试值与有限元分析的比较。结果表明, 数值计算和实验结果具有相当的吻合性, 说明建立的有限元模型是有效的, 能够较为准确地模拟激光焊接过

程。但是, 计算结果和实验结果也存在误差, 除测试误差因素外, 主要原因在于: (1) 由于计算条件限制, 在焊缝附近的有限元网格较粗, 计算的焊缝形状与实际有差别; (2) 有限元模型的约束边界条件与实际焊接和冷却过程中的约束存在差异; (3) 在穿透焊接时, 焊件自身的质量对角变形有很大影响, 而有限元模型中并没有考虑重力的作用。

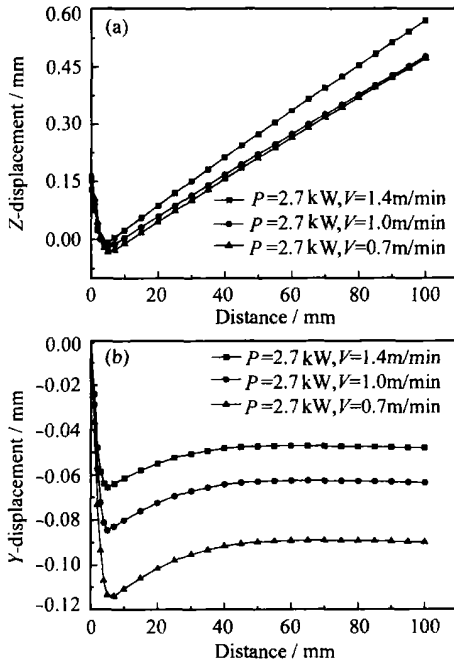


图4 激光焊接线能量对焊接变形的影响

(a) Z向位移; (b) Y向位移

Fig. 4 Effect of heat input on welding deformation

(a) Z-displacement; (b) Y-displacement

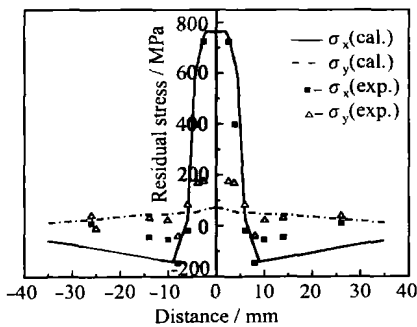


图5 残余应力计算与实验值比较

Fig. 5 Comparison of calculated and experimentally measured residual stress

3.2 讨论

从前面的数值模拟和实验结果可以看出, 对于激光焊接残余应力, 线能量增加, 焊缝变宽, 塑性区宽度增大, 拉应力分布区域变宽, 从而使纵向残余应力峰值降低^[8,9]; 但横向残余应力随线能量增大而增大。

在临界焊透规范以上焊接时, 角变形随焊接线能量的增大而减小。当试件被完全穿透时, 激光焊接的线能量对角变形的影响作用降低。这主要与钛合金激光焊接焊缝形状有关。随线能量增加, 焊缝形状由“钉子”形或“酒杯”形变为“H”形, 如图7所示, 焊接试板在重力和夹具夹持作用下, 角变形减小。

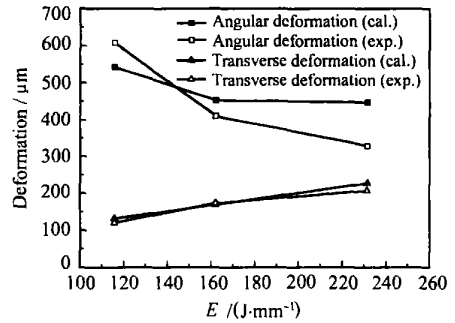


图6 焊接变形计算值与实验值比较

Fig. 6 Comparison of calculated and experimentally measured welding deformation

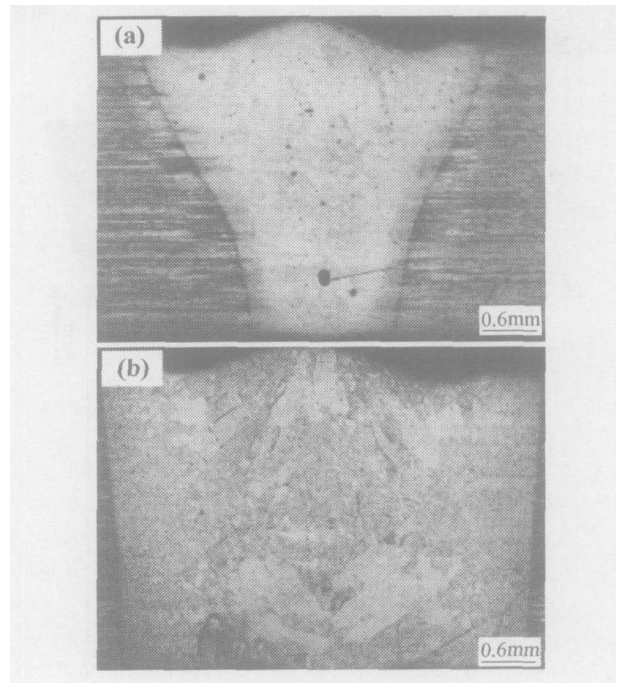


图7 不同激光焊接线能量的焊缝形状

(a) $E = 115.7$ J/mm; (b) $E = 231.4$ J/mm

Fig. 7 Laser welding cross section for different heat input

(a) $E = 115.7$ J/mm; (b) $E = 231.4$ J/mm

为了控制焊接变形, 除了采取其他措施外, 根据工件的精度要求选用合适的激光焊接工艺参数, 从而保证合理的焊缝形状也是一个重要手段。采用真空热处理可以有效地改善激光焊接残余应力^[2]。用焊缝跟踪激光热处理改善残余应力是一种高效率的在线热

(下转第63页)

4 结论

(1) 用原位生成法制备了不锈钢基球状 VC 颗粒增强复合材料。利用正交设计原理, 确定了原位法制备球状 VC 颗粒增强不锈钢基复合材料的最佳工艺为: C 2.4, V 8, Cr 16 (质量分数/%), 反应温度为 1750, 保温时间为 5min。

(2) 通过 SEM, XRD 等测试手段对复合材料的微观组织和相结构进行观察和分析, 证实了在奥氏体不锈钢基体上弥散分布着球状 VC 增强颗粒。

(3) 探讨了浇注温度、保温时间等因素对形成球状 VC 增强颗粒的影响, 对最佳工艺做了实验验证。

(4) 关于化学元素对形成球状 VC 增强颗粒的影响, 本研究仅做了初步分析, 还有待进一步的探讨和实验验证。

参考文献

- [1] 冯可芹, 杨屹, 王一三, 等. 铁基复合材料的制备与展望 [J]. 机械工程材料, 2002, 12 (26): 9– 11.
- [2] PAGOUNIS E LINDROOS V K. Processing and properties of particulate reinforced steel matrix composites [J]. Materials Science and Engineering, 1998, A246: 221– 234.
- [3] KOCZAK M J, PREMKU MAR M K. Emerging technology for the *in-situ* production of MMCs [J]. JOM, 1993, 45 (1): 44– 48.
- [4] 林涛, 殷声, 魏延平. 原位反应在铸造法制备复合材料中的应用 [J]. 材料导报, 2000, 14 (1): 30– 31.
- [5] TSANG H T, CHAO C G and M A C Y. *In situ* fracture observation of a TiC / Ti M MC produced by combustion synthesis [J]. Scripta Materialia, 1996, 35: 8– 13.
- [6] RAGHUNATH C. *In situ* technique for synthesizing Fe-TiC composites [J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1995, 32 (4): 577– 582.
- [7] FRANGE N, LEVIN L, SHNECK, R. et al. Iron-titanium-carbon system microstructure of titanium carbide(TiC_x) of various stoichiometries infiltrated with iron-carbon alloy [J]. Scripta Materialia, 1996, 35 (7): 799– 803.
- [8] 徐文雷, 孙扬善, 丁绍松. VC_p 和 TiC_p 颗粒增强 Fe₃Al 基合金的显微组织和力学性能 [J]. 中国有色金属学报, 2000, 5 (11): 150– 153.
- [9] 锡淦, 雷鹰, 胡克俊. 国外钒的应用概况 [J]. 世界有色金属, 2002, (2): 13– 21.
- [10] 张欣苑, 李凤春, 曾广廷. 液相合成 VC 颗粒增强钢基表面复合材料研究 [J]. 机械工程材料, 1999, 8 (4): 35– 38.
- [11] 徐恒钧, 王兆昌. 冷却速度对 Fe-C-V 合金变质效果的影响 [J]. 热加工工艺, 1997, (4): 21– 24.
- [12] 北京大学数学力学系概率统计组. 正交设计法 [M]. 北京: 石油化学工业出版社, 1976.

料、铸造合金材料等方面的研究。联系地址: 哈尔滨工业大学复合材料研究所 (150001)。

(上接第 42 页)

处理方法, 但需要在工艺上做进一步的研究工作。

4 结论

(1) TC4 钛合金激光焊接在焊缝和熔合线附近产生很高纵向残余应力, 而横向残余应力很小。采用较小线能量进行激光穿透焊接时, 由于焊接塑性区宽度相对较窄, 因此纵向残余应力峰值相对较大。

(2) TC4 钛合金激光焊接变形与焊缝截面形状关系密切。激光焊接线能量较小时, 焊缝呈“钉子”形, 角变形较大, 而横向收缩变形较小; 当完全穿透焊接时, 焊缝形状呈“H”形, 在焊接试件自身重力和夹具的夹持力作用下, 角变形减小, 而横向收缩变形增大。

参考文献

- [1] 北側彰一, 前原健治, 武田慎之助, 等. 304ステンレス鋼のレーザ溶接変形に関する研究 [J]. 溶接学会论文集, 2002, 20 (2): 295– 300. 0
- [2] 何小东, 张建勋, 巩水利, 等. 钛合金薄板激光和钨极氩弧焊余应力测试研究 [J]. 材料工程, 2003, (12): 7– 10.
- [3] 刘敏, 陈士煌, 康继东, 等. 钛合金平板电子束焊接残余应力数值分析 [J]. 航空动力学报, 2001, 16 (1): 63– 66.
- [4] CARMIGNANI C, MARES R, TOSELLI G. Transient finite element analysis of deep penetration laser welding process in a singlepass butt-welded thick steel plate [J]. Computer Methods in Applied Mechanics Engineering, 1999, 179: 197– 214.
- [5] TSIRKAS S A, PAPANIKOS P, KERMANIDIST H. Numerical simulation of the laser welded process in butt-joint specimens [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, (134): 59– 69.
- [6] CHANG W S, NA S J. A study on the prediction of the laser welded shape with varying heat source equations and the thermal distortion of a small structure in micro-joining [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 120: 208– 214.
- [7] KOICHI MASUBUCHI. Analysis of welded structures [M]. England: Pergamon Press Ltd, 1980. 219– 222.
- [8] D 达拉伊. 焊接热效应 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997. 136– 253.
- [9] 中国机械工程学会. 焊接手册第 3 卷 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992. 51– 68.

收稿日期: 2005-01-21; 修订日期: 2005-04-22

作者简介: 何小东 (1970–), 男, 硕士, 主要从事先进材料连接及其力学行为、激光焊接数值模拟及石油管材焊接工艺研究, 联系地址: 陕西省西安市电子二路 32 号中油集团管材研究所 (710065)。

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目 (E0216); 黑龙江科技攻关项目 (GC04A 211)

收稿日期: 2005-01-24; 修订日期: 2005-05-20

作者简介: 姚秀荣 (1964–), 女, 博士研究生, 主要从事铁基复合材