

遗传算法在 C/C 复合材料等温 CVI 工艺参数优化中的应用

Application of Genetic Algorithm in Optimize the Parameters of Isothermal CVI Process for Carbon/Carbon Composites

姜开宇¹, 李贺军², 王敏杰¹ (1 大连理工大学模具研究所,

大连 116024; 2 西北工业大学 C/C 复合材料研究所, 西安 710072)

JIANG Kai-yu¹, LI He-jun², WANG Min-jie¹ (1 Institute of Die & Mould,

Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2 Institute of C/C Composite, Northwest Polytechnical University, Xi an 710072, China)

摘要: 阐述了采用基于遗传算法的数值优化技术对等温 CVI 工艺参数进行优化的方法和过程, 并对 2D C/C 复合材料的 ICVI 工艺参数进行了优化。结果表明, 该技术有助于降低实验成本, 提高碳基、陶瓷基复合材料的制备效率和质量。

关键词: 化学气相渗透; C/C 复合材料; 遗传算法; 优化

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2002) 10-0033-03

Abstract: The numerical optimization technology based on genetic algorithms was elaborated. The parameters of isothermal Chemical Vapor Infiltration (CVI) process for C/C composite were optimized. The efficiency of the algorithm was also discussed. The results indicate that this technology is very helpful for reducing experiment cost and improving the producing efficiency and quality of C/C composite.

Key words: chemical vapor infiltration; C/C composite; genetic algorithm; optimization

采用 CVI 工艺制备 C/C 复合材料时, 温度、前驱体气体的浓度等工艺参数对工艺效果有着举足轻重的影响。合理地选择工艺参数, 可在较短时间内制备出具有较高密度和较好密度均匀性的 C/C 制件, 从而可提高产品质量, 降低制备成本^[1,2]。由于根据现有的数学方法和实验手段很难找出沉积温度、反应气浓度等工艺参数与预制体密度均匀性、沉积时间的直接函数关系, 目前的数值模拟技术可以较好地反映 CVI 的工艺过程和主要工艺参数对该过程的影响, 但要想用传统的优化方法对 CVI 工艺参数进行优化并找出全局的最优解是非常困难的。从目前公开发行的资料中看, 还没有人成功地采用数值方法对 CVI 的工艺参数进行优化。而遗传算法具有黑箱式结构, 有很强的通用性而且能够找出全局的最优解^[3,4], 其特点使采用遗传算法对 CVI 工艺参数进行优化成为可能。我们在 CVI 工艺过程数值模拟的基础上, 首次采用遗传算法通过计算机对 CVI 工艺参数进行优化。采用该项技术一方面可以缩短研发周期, 另一方面可以使工艺优化的成本降至最低限度。

本工作详细讨论基于遗传算法的参数优化的具体实现过程及其效果。

1 优化对象的描述

为便于研究, 我们以工艺参数较少的圆盘状 C/C 复合材料制件的等温 CVI 工艺(ICVI 工艺) 为优化对象。其主要参数为沉积温度 T 和反应气浓度 C 。优化的目标是: 通过对 T 和 C 的优化, 使得预制体的密度均匀性最好, 整体密度达到最大且沉积时间尽可能短。

1.1 适应度函数的确定

由优化目标可知, 对 ICVI 工艺进行优化, 主要要达到三个目的: (1) 密度均匀性最大 ($F_{\rho \max}$); (2) 预制体整体密度达到最大 (ρ_{\max}); (3) 沉积时间最短 (t_{\min})。对于本研究对象, 可将预制体沿轴向划分成 n 个单元, 参见图 1, 设各单元的密度为 ρ_i , 则密度均匀性可表示为:

$$F_{\rho} = \min (\rho_i) / \max (\rho_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

预制体整体密度可表示为: $\rho = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i$ 其中: 单元密度

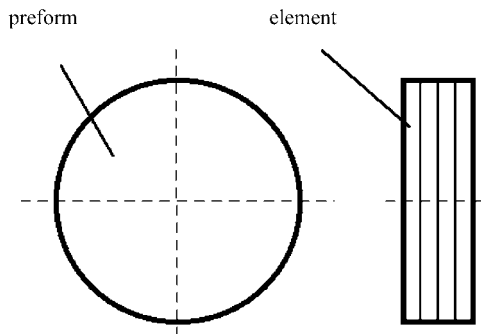


图1 C/C复合材料预制体示意图
Fig.1 Preform of C/C composites

ρ_i , 沉积时间 t 均与参数 T, C 有关。因此这是一个多目标优化问题。为便于优化, 需要将其转化为单目标问题。根据优化对象的特点, 本研究将密度均匀性作为主要优化目标, 目标 (2), (3) 可化为约束条件。转化后的优化目标可描述为: 在约束 $\rho > \rho_0, t < t_0$ 的作用范围内, 预制体的密度均匀性 F_ρ 达到最大。其中 ρ_0 为一确定的预制体整体密度值, 取 $\rho_0 = 1.7 \text{ g/cm}^3$; t_0 为确定的沉积时间, 取 $t_0 = 400 \text{ h}$ 。

则该优化问题的数学表述为:

$$\begin{cases} f(T, C) & \text{Max} \\ g_1(T, C) & > 0 \\ g_2(T, C) & > 0 \end{cases} \quad (2)$$

由式 (1) 和式 (2), 将广义目标函数构造如下形式:

$$ff(T, C) = \frac{1}{\Phi(T, C)} f(T, C) \quad (3)$$

式中惩罚因子 $\theta > 0$; 惩罚函数 $\Phi(T, C)$ 可定义为:

$$\Phi(T, C) = \alpha_1 \min\{0, g_1(T, C)\} + \alpha_2 \min\{0, g_2(T, C)\} + 1 \quad (4)$$

上式中 α_1, α_2 为修正系数。为使惩罚函数的两项数量级一致, 取 $0 \sim 100$ 之间的随机整数作为 α , 取 $0 \sim 1$ 之间的随机实数作为 α_e 。

采用遗传算法对本研究对象进行优化时, 适应度值由式 (3) 来确定。式 (3) 即为适应度函数。需要指出的是, 式 (3) 中的 $f(T, C)$, $\Phi(T, C)$ 项尽管与参数 T, C 有关, 但在本问题中很难用明确的函数表达式来描述它们和 T, C 之间的关系。由于遗传算法具有黑箱式结构的特性, 因此只要解决了输入 (参数编码) 和输出 (适应度) 的问题, 就可以对目标进行优化, 而不用考虑输入和输出之间的关系。利用我们编制的 ICVI 模拟程序^[5,6], 可以很方便的求出参数 T, C 所构成的空间中, 任意一点的 $f(T, C)$, $g_1(T, C)$ 和 $g_2(T, C)$ 值。当该点处于约束作用域之外时, $\Phi(T, C)$ 产生大于 1 的惩罚, 使适应度值减小; 当该点处于约束作用域内时, $\Phi(T, C) = 1$ 该点的适应度值不变。

1.2 参数的编码

为提高优化效率, 采用实数编码技术对上述参数进行编码^[7]。取解空间内的任意一点 (T_0, C_0) , 将温度 T_0 按映射法则 $\alpha(T_0)$ 映射为 $0 \sim 10000$ 之间的四位整数 (记为 $\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4$), 反应气浓度 C_0 按映射法则 $\beta(C_0)$ 映射为 $0 \sim 100$ 之间的两位整数 (记为 $\beta_1\beta_2$)。将二者合并, 得一长度为 6 的字符串 $\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4\beta_1\beta_2$, 此字符串即为遗传算法的一个个体。在优化的初始阶段, 首先要根据编码法则生成数量为 N 的一组个体, 构成初始群体。

表 1 为由随机函数法生成的 ICVI 初始群体编码列表, 群体规模 $N = 10$ 。

表 1 ICVI 初始群体编码列表

Table 1 Code of initial population of ICVI

个体	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编码	095045	087358	103660	089153	100165	084390	089299	091438	104339	093894

2 进化过程

初始群体是遗传和迭代的基础, 优化过程中所产生的各代群体都是由初始群体经复制、交换、突变等方式逐步进化而成的。

2.1 复制

个体是否被复制的依据是其适应度的大小, 适应度大者被复制, 小者被淘汰, 使新群体中的个体总数和原来群体相同。对于 ICVI 工艺的优化问题, 其个体

适应度值的分布离散性非常强。这种离散性使得在进行复制操作时, 个别适应度很高的个体, 会连续多次被复制; 对于适应度很低的个体, 会过早被舍弃。这种不正常的取舍会把遗传算法的搜索引向误区, 过早地收敛于局部最优解。为克服这种缺陷, 需要采用适应度缩放技术, 将适应度函数按下式进行变换, 使所有个体的适应度值具有相同的数量级:

$$f(T, C) = 10 - \log(ff(T, C)) \quad (5)$$

上式中 $f(T, C)$ 为变换后的适应度函数。

2.2 交换和突变

在遗传算法中, 交换是产生新个体的主要手段。它仿照生物学中杂交的原理, 将两个个体(染色体)的部分字符(基因)互相交换。

在选择交换个体时, 采用赌盘选择法^[4], 根据所确定的交换概率 P_c , 选取 $P_c \cdot N$ 个个体, 进行两两交换。通过交换, 使子代的字符串不同于亲代, 使群体的性态具有多样性, 拓展了搜索的范围。

突变是遗传算法中产生新个体的另一种方法, 它对个体中某一位编码进行补运算, 以产生新的个体。

经过复制、交换和突变, 原初始群体进化为一个新的群体。

3 优化结果分析

图 2~4 分别为初始种群个体数量 $N = 20$ 时, 第 1 代、第 15 代、第 30 代群体各个体的适应度分布图。第 1 代群体是随机生成的初始群体, 因而其适应度的分布表现出很强的随机性。除个别个体外(12 号、14 号个体), 大部分个体的适应度均较低。遗传进行到第 15 代时, 随着劣质个体逐步被淘汰, 优良个体经过复制、交换等操作派生出性能较好的新个体, 其适应度较初始群体有大幅度的提高。到了第 30 代, 各个体的适应度已差别不大, 算法基本上已收敛。此时个体数量尽管还是 20, 但个体的编码实际上只有两个, 即 085473 和 085073。由图 4 可知, 个体 085073 的适应度要高于 085473, 因而可以认为 085073 为最优个体。根据逆映射法则 $\alpha^{-1}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$ 和 $\beta^{-1}(\beta_1, \beta_2)$ 将两段字符串还原成 T^* 和 C^* , 即可得最优的工艺参数值。

图 5 为采用不同的工艺参数对 2D C/C 复合材料沉积 400h 后所测得的制件内部孔隙率分布曲线。曲线表明, 通过对工艺参数的优化, C/C 复合材料预制体的密度均匀性有明显的提高。

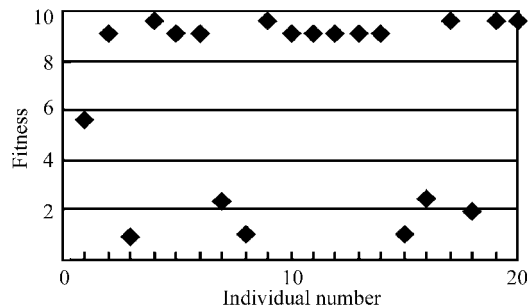


图 3 第 15 代种群的适应度分布

Fig. 3 Fitness value of 15th generation

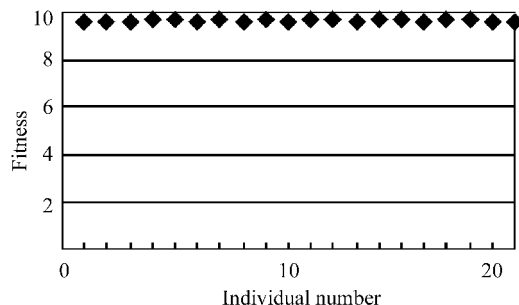


图 4 第 30 代种群适应度分布

Fig. 4 Fitness value of 30th generation

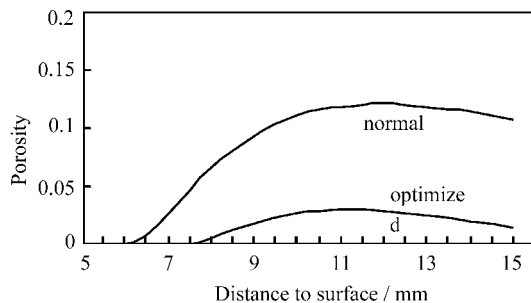


图 5 不同工艺参数下预制体空隙率分布曲线

Fig. 5 Porosity distribution

4 结论

(1) 应用遗传算法优化技术对 CVI 工艺的参数进行优化。该技术与所编写的 CVI 工艺数值模拟程序相结合, 可以方便、高效地优化 ICVI 的工艺参数。

(2) 建立的一套 ICVI 工艺参数种群个体的编码体系和映射规则, 以及针对 ICVI 工艺特点的适应度函数和广义目标函数, 使遗传算法得以在 CVI 优化中应用。

参考文献

- [1] McAllister P, Wolf E E. Simulation of a Multiple Substrate Reactor for Chemical Vapor Infiltration of Pyrolytic Carbon with Carbon-carbon Composites [J]. AICHE Journal 1993, 39 (7): 1196- 1209.

(下转第 47 页)

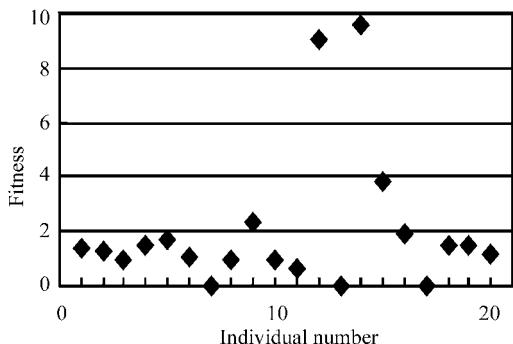


图 2 初始种群的适应度分布

Fig. 2 Fitness value of initial population

6 结束语

大块非晶具有很宽的过冷液相区和很强的非晶形成能力,能在较低冷却速度下获得,制备的工艺较简单。尽管近年来对其成分、成形工艺等进行了一系列研究,但总的来说对大块非晶形成本质的认识还很有限。与成熟的晶态物理相比,它仍处在发展初期,不论是在基础理论,还是微观结构和宏观性能研究方面,还有大量的问题有待解决。

应以凝聚态物理、量子化学、化学键理论和现有材料科学及工程的进展和数据为基础,计算机辅助非晶合金成分设计,用以降低合金临界冷却速率,寻求具有极大玻璃形成能力的大块非晶合金系统。

大块非晶合金已从实验室走向应用,在磁性方面的应用是非晶合金的最主要的应用领域,在机械和化学等方面的应用远未达到原来预期的成绩,还要拓宽大块非晶的应用领域。

参考文献

[1] 王一禾,杨鹰善.非晶态合金[M].北京:冶金工业出版社,1989.

[2] 郭贻诚,王震西.非晶态物理学[M].北京:科学出版社,1984.

[3] F E 卢博斯基主编.柯成,唐与谔,罗阳,何开元译.非晶态金属合金[M].北京:冶金工业出版社,1989.

[4] P Duwez, R H Willens and W Klement. Appl Phys Lett, 1960, 31: 1136.

[5] J H Perepezko and J S Smith. J Non Cryst Solids, 1981, 44: 65.

[6] A Inoue, T Zhang and T Masumoto. Mater Trans, 1989, 30: 965.

[7] A Inoue, T Zhang and T Masumoto. Mater Trans, 1990, 31: 425.

[8] T Zhang, A Inoue and T Masumoto. Mater Trans, 1991, 32: 1005.

[9] X H Lin and W L Johnson. J Appl Phys, 1995, 78: 6514.

[10] S G Kim, A Inoue and T Masumoto. Mater Trans, 1990, 31: 929.

[11] A Takeuchi and A Inoue. Mater Trans, 2000, 41: 1372.

[12] D Turnbull. Contemp Phys, 1969, 10: 473.

[13] A Inoue, Y Shinohara and J S Gook. Mater Trans, 1995, 36 (12): 1427- 1433.

[14] Y Kawamura, M Takagi, M Akai and T Imura. Mater Sci Eng, 1988, 98: 449.

[15] A Kato, H Horikiri, A Inoue and T Masumoto. Mater Sci Eng, 1994, A179: 707.

[16] P H Shingu. Mater Sci Eng, 1988, 97: 137.

[17] K Uenishi, et al. Mater. Sci Eng, 1994, A181: 1165.

[18] C F Cline and R W Hopper. Scripta Met, 1997, 11: 1137.

[19] Y Kawamura et al. Mater Sci Eng, 1998, 98: 415.

[20] M Takagi, et al. Mater Sci Eng, 1991, A133: 301.

[21] A Inoue, T Nakamura, N Nishiyama and T Masumoto. Mater Trans, 1992, 33 (10): 937- 945.

[22] A Inoue, T Zhang, N Nishiyama, K Ohba and T Masumoto. Mater Trans, 1993, 34: 1234.

[23] A Inoue, A Kato, T Zhang, S G Kim and T Masumoto. Mater Trans, 1991, 32 (7): 609- 616.

[24] B Rusch, Y J Kim and W L Johnson. J Appl Phys, 1995, 77: 4039.

[25] A Inoue, Y Yokoyama, T Shinohara and T Masumoto. Mater Trans, 1994, 35: 923.

[26] A Inoue and T Zhang. Mater Trans, 1995, 36: 1184.

[27] A Inoue. Mater Sci Eng, 2001, A304-306: 1- 10.

[28] A Inoue. Mater Trans, 1995, 36: 866.

[29] A Gerbert, U Wolff, A John and J Eckert. Scripta mater, 2000, 43: 279- 283.

[30] 马如璋,蒋民华,徐祖雄.功能材料学概论[M].北京:冶金工业出版社,1999,449- 463.

[31] K Lu et al. Scripta Metall Mater, 1990, 24: 2319.

[32] Y Li, H Jones and H A Davies. Scri Metall, 1992, 26: 1371.

[33] K Amiya and A Inoue. Mater Trans, 2000, 41: 1460.

[34] K Amiya and A Inoue. Mater Trans, 2001, 42: 543.

[35] N Cui, B Luan, H K Liu, et al. Journal of Alloys and Compounds, 1995, 55: 263.

[36] 孙俊才,季世军,厉志红.中国有色金属学报,2000,10 (Suppl. 1): 205- 208.

收稿日期: 2001-08-09

作者简介: 熊玉华 (1973-),女,河南信阳人,博士后,主要从事高温合金工艺及机理的研究,联系地址: 清华大学机械工程系 (100084)。

* * * * *

(上接第 35 页)

[2] Savage G. Carbon-carbon Copmpsites [M]. London: Chapman & Hall, 1992: 173- 177.

[3] Buckles B P, Perry F E. Genetic Algorithms[M]. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1992: 77- 85.

[4] Holland J. Sci, Amer, 1992, 6: 44- 50.

[5] Jiang Kaiyu, Li HeJun. Journal of Astronautics, 1999, 4: 104 - 107.

[6] Li Kezhi, Li Hejun, Jiang Kaiyu, Hou Xianghui. Numerical Simulation of Isothermal Chemical Vapor Infiltration Process in Fabrication of Carbon-Carbon Composites by Finite Element Method [J]. Science In China (Series E) 2000, 43 (1): 77- 85.

[7] Srinivas M, Patnaik L M. Genetic Algorithms: A Survey [J]. Computer, 1994, 6: 17- 26.

基金项目: 辽宁省博士启动基金资助项目 (2001102088)

收稿日期: 2001-04-24

作者简介: 姜开宇 (1971-),男,河南洛阳人,大连理工大学机械工程学院讲师,博士,研究方向为复合材料成型工艺模拟与优化,联系地址: 大连理工大学模具研究所 (116024)。