

基于 MDO 方法的车用三效催化转化器设计优化

刘孟祥^{1,2} 刘湘玲³ 龚金科³

1. 湖南涉外经济学院,长沙,410205
2. 中南大学,长沙,410083
3. 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室,长沙,410082

摘要:以车用三效催化转化器(TWC)的转化效率、压力损失、质量以及抗热冲击性能为目标函数,建立了 TWC 多学科设计优化(MDO)模型。在充分考虑各学科之间的耦合效应基础上,通过采用自适应混沌优化算法与 VB 编程对 MDO 模型进行求解。优化结果表明,压力损失减少 6.99%,质量减少 11.68%,位移变形减少 20.91%,TWC 转化效率提高 5.42%。试验证明该方法用于 TWC 是有效的。

关键词:三效催化转化器;多学科设计优化;混沌算法;排放控制;发动机

中图分类号:TK4

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.01.006

Design Optimization of Vehicle Three-Way Catalytic Converter Based on MDO Method

Liu Mengxiang^{1,2} Liu Xiangling³ Gong Jinke³

1. Hunan International Economics University, Changsha, 410205
2. Central South University, Changsha, 410083
3. State Key Laboratory Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, 410082

Abstract: A MDO model of TWC was firstly established by using TWC conversion efficiency, pressure loss, mass and thermal shock resistance as the objective function and the MDO model was solved on the basis of taking full account of the coupling effects among various disciplines by using self-adaptive chaos algorithm and VB (visual basic) programming. The optimization results show that pressure loss reduces 6.99%, mass reduces 11.68%, displacement deformation reduces 20.91% and the conversion efficiency improves 5.42%. The tests prove that MDO in TWC is effective.

Key words: three-way catalytic converter (TWC); multidisciplinary design optimization (MDO); chaos algorithm; emission control; engine

0 引言

多学科设计优化 (multidisciplinary design optimization, MDO)^[1-2] 是一种以学科为基础,将系统分解,根据学科间相互耦合关系,运用特定的框架协调和控制子系统,从而获得系统的全局最优解的设计方法。该方法运用了并行设计技术,可缩短设计周期,提高产品的竞争力。

当前,多学科设计优化是飞行器设计方法研究的一个最新、最活跃的领域。Sobieszcanski—Sobieski^[3-4] 提出了复杂耦合系统的全灵敏度方程分析方法和子空间优化方法。Renaud^[5] 将并行子空间优化方法应用于机械构件的设计,取得了满意的结果。Sellar 等^[6] 将并行子空间优化方法应用于通用航空飞机和旋翼机初步设计问题,提高了找到全局最优解的概率;Bolebaum^[7] 引入专家系统处理设计变量在各个子空间的分配与设计变量的变化范围,提高了设计的自动化程度;Moore 等^[8] 利用协作优化方法研究可重复使用运载器的初步设计问题,不仅实现了并行通信,而且

能发现更好的设计方案。

相对而言,国内多学科设计优化技术的研究还处于刚刚起步的阶段。文献[9-10]采用并行子空间设计方法进行了无人机的设计;陈琪峰等^[11] 研究了异步并行的分布式协同进化 MDO 算法,并将其应用在飞行器设计中;谷良贤等^[12-13] 对协同优化算法的计算特性及其在飞行器设计中的应用作了研究。另外还有一些相关论文对 MDO 的理论进行了探讨^[14-15],目前尚未发现 MDO 在车用三效催化转化器 (three-way catalytic converter, TWC) 设计中的应用。

多学科设计优化主要包括系统分析、系统数学建模、面向设计分析、系统分解、近似技术、实验设计、系统敏感性分析及优化算法。

1 MDO 总体思想

车用 TWC 多学科设计优化的总体思想是集成各学科知识,应用有效的设计、优化策略和分布式计算机网络系统来组织与管理整个 TWC 优化设计过程,通过充分利用各学科之间的相互作用所产生的协同效应获得 TWC 整体最优设计结果。

车用 TWC 分级 MDO 结构由车用 TWC 总体级、部件级(载体、扩张锥管)以及零件级(速度场、

收稿日期:2011-10-08

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(11JJ6036);湖南省科技攻关计划(湘科计(2002)87号);湖南省“十二五”车辆工程重点建设学科项目(湘教发[2011]76号);湖南省教育厅科学研究项目(10C0907)

温度场、浓度场、应力场)组成,如图 1 所示。

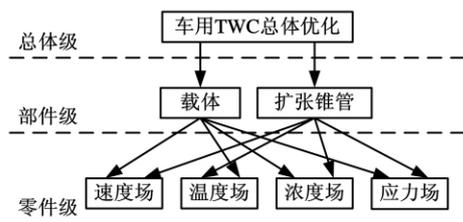


图 1 车用 TWC 分级 MDO 结构

车用 TWC 多学科设计优化的总体目标是使转化效率高、压力损失低、质量轻与抗热冲击性能好。

总体级、部件级及零件级的关系:总体级目标向部件分配指标,以与部件指标一致为约束条件;部件级以与总体级分配指标相差最小为设计优化目标,在满足部件级的约束条件下,向所属各零件分配指标;零件级以与部件级分配指标相差最小为优化设计目标,通过调整零件的几何、结构尺寸,使零件级各学科满足约束条件。通过三级优化,使零件级、部件级与总体级设计目标达成一致协调,并找到综合最优的设计方案。

2 车用 TWC 多学科设计优化模型

2.1 MDO 优化模型

考虑到车用 TWC 的转化效率、压力损失、抗冲击性能、质量、结构与形状、材料性能等因素,根据 MDO 总体思想,设计了车用 TWC 多学科设计优化过程,如图 2 所示。

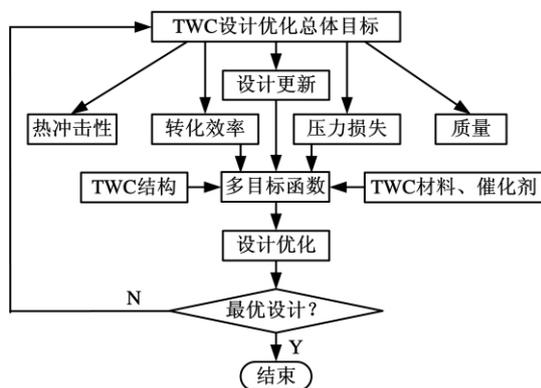


图 2 车用 TWC 多学科设计优化过程

车用 TWC 多学科设计优化问题可描述为

$$\min f(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \sum_{i=1}^4 W_i f_i(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) / f_{i0}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } g_i(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \leq 0 \quad i = 1, 2, 3, 4$$

其中, $f_i(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 、 $f_{i0}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 分别为转化效率、压力损失、质量及抗热冲击性能的目标函数及其对应的初始值; $g_i(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 为功能函数,是优化问题的约束条件; \mathbf{X} 为设计变量, $\mathbf{X} = [X_1 \ X_2 \ \dots \ X_9]^T$; \mathbf{Y} 为状态变量, $\mathbf{Y} = [Y_1 \ Y_2 \ \dots \ Y_k]^T$, $k = 1, 2, \dots, 6$, 视具体目标

函数而定; W_i 分别表示转化效率、压力损失、质量及抗热冲击性能目标函数在总体目标规划中的加权系数, $W_1 + W_2 + W_3 + W_4 = 1$ 。

2.2 MDO 目标函数设计

2.2.1 转化效率目标函数

三效催化转化器的转化效率^[16]是衡量 CO、NO_x 和 HC 转化程度的主要性能指标,其优化设计变量 X_1 包括载体开口率 ϵ 、Pt 和 Rh 质量比 π 、孔壁厚 δ (mm)、椭圆率 β 、载体长度 z (mm)、载体截面长短轴半径 a 和 b (mm)、入口扩张管锥角 θ (°)、入口扩张管直径 d (mm)。状态变量 Y_1 包括载体温度 T_s (K)、排气温度 T_g (K)、排气速度 u_g (m/s)、载体孔密度 ρ_L (cpi)。转化效率目标函数可设计为

$$f_1(\mathbf{X}_1, \mathbf{Y}_1) = \min \left[\left(1 - \frac{c_o^{(j)}(\mathbf{X}_1, \mathbf{Y}_1)}{c_i^{(j)}(\mathbf{X}_1, \mathbf{Y}_1)} \right) \exp \left(-k_m^{(j)} G_a(\mathbf{X}_1, \mathbf{Y}_1) \frac{z}{u_g} \right) - \frac{c_o^{(j)}(\mathbf{X}_1, \mathbf{Y}_1)}{c_i^{(j)}(\mathbf{X}_1, \mathbf{Y}_1)} \right] \quad (2)$$

式中,上标 $j = 1, 2, 3$, 分别表示 CO、NO_x 和 HC; $G_a(\mathbf{X}_1, \mathbf{Y}_1)$ 为载体的几何表面积, m^2/m^3 ; $c_o^{(j)}(\mathbf{X}_1, \mathbf{Y}_1)$ 、 $c_i^{(j)}(\mathbf{X}_1, \mathbf{Y}_1)$ 分别为出口、入口截面上成分 j 的平均浓度, mol/m^3 ; $k_m^{(j)}$ 为成分 j 的传质系数, m/s 。

2.2.2 压力损失目标函数

压力损失^[17-18]是三效催化转化器的主要性能指标,影响发动机动力性和经济性,其优化设计变量 $X_2 = X_1$; 状态变量 Y_2 包括载体温度 T_s 、排气温度 T_g 、排气速度 u_g 、入口扩张管截面处排气速度 u_{g0} (m/s)。其目标函数可设计为

$$f_2(\mathbf{X}_2, \mathbf{Y}_2) = \sum \frac{Re(\mathbf{X}_2, \mathbf{Y}_2) \lambda(\mathbf{X}_2, \mathbf{Y}_2)}{2} \frac{\mu l u_g^2}{d_H^2(\mathbf{X}_2, \mathbf{Y}_2)} + \sum \xi(\mathbf{X}_2, \mathbf{Y}_2) \frac{\rho u_g^2}{2} \quad (3)$$

式中, $\lambda(\mathbf{X}_2, \mathbf{Y}_2)$ 为沿程损失系数, $\lambda(\mathbf{X}_2, \mathbf{Y}_2) = 0.3164 Re^{-0.25}(\mathbf{X}_2, \mathbf{Y}_2)$; $Re(\mathbf{X}_2, \mathbf{Y}_2)$ 为雷诺数; ρ 为气流密度, kg/m^3 ; μ 为排气的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; l 为管段长度, m ; $d_H(\mathbf{X}_2, \mathbf{Y}_2)$ 为孔道的水力直径, m ; $\xi(\mathbf{X}_2, \mathbf{Y}_2)$ 为局部损失系数。

2.2.3 质量目标函数

TWC 形状复杂,整体质量可由各部件质量累加得到,其优化设计变量 $X_3 = X_1$, Y_3 不包括任何状态变量,质量目标函数设计为

$$f_3(\mathbf{X}_3, \mathbf{Y}_3) = \sum_{j=1}^N m_j(\mathbf{X}_3, \mathbf{Y}_3) \quad (4)$$

式中, $m_j(\mathbf{X}_3, \mathbf{Y}_3)$ 为第 j 个部件的质量函数。

2.2.4 抗热冲击性能目标函数

三效催化转化器必须有足够的强度才能抵抗热冲击变形^[19],结构的位移变形可反映 TWC 抗

热冲击性能,其优化设计变量 $X_4 = X_1$; 状态变量 Y_4 包括载体温度 T_s 、排气温度 T_g 、排气速度 u_g 、载体孔密度 ρ_L 、载体所受应力 σ (MPa), 载体应变 ζ 。其目标函数可设计为

$$f_4(X_4, Y_4) = \sum_{i=1}^K [F_i(X_4, Y_4) K_i^{-1}(X_4, Y_4)] \quad (5)$$

$$F(X_4, Y_4) = F_T(X_4, Y_4) + F_m(X_4, Y_4) + F_p(X_4, Y_4) \quad (6)$$

$$F_T(X_4, Y_4) = \int_V N^T(X_4, Y_4) p_v(X_4, Y_4) dV$$

$$F_m(X_4, Y_4) = \int_S N^T(X_4, Y_4) p_s(X_4, Y_4) ds$$

$$F_p(X_4, Y_4) = N^T(X_4, Y_4) p(X_4, Y_4)$$

$$N^T(X_4, Y_4) = [N_1 \quad N_2 \quad \dots \quad N_L] \quad (7)$$

$$N_t = \text{diag}(N_t, N_t, N_t) \quad t = 1, 2, \dots, L$$

式中, $F(X_4, Y_4)$ 为因受热冲击而引起的等效载荷矩阵; $K(X_4, Y_4)$ 为结构刚度矩阵; $F_T(X_4, Y_4)$ 为等效体积力矩阵; $F_m(X_4, Y_4)$ 为等效表面力矩阵; $F_p(X_4, Y_4)$ 为等效集中力矩阵; $p_v(X_4, Y_4)$ 、 $p_s(X_4, Y_4)$ 、 $p(X_4, Y_4)$ 分别为因振动而受到的体积力、表面力与集中力; $N^T(X_4, Y_4)$ 为位移形状函数矩阵; N_t 为节点关于 (X_4, Y_4) 的形状函数。

TWC 结构刚度矩阵 $K(X_4, Y_4)$ 可表示为

$$K(X_4, Y_4) = \int_V B^T(X_4, Y_4) C(X_4, Y_4) B(X_4, Y_4) dV \quad (8)$$

$$B^T(X_4, Y_4) = [B_1 \quad B_2 \quad \dots \quad B_L] N(X_4, Y_4) \quad (9)$$

$$B_t = \text{diag}(\partial N_t / \partial x, \partial N_t / \partial y, \partial N_t / \partial z)$$

式中, $B(X_4, Y_4)$ 为位移几何矩阵; $C(X_4, Y_4)$ 为结构阻尼矩阵。

3 车用 TWC 多学科设计优化应用

已知三效催化转化器的基本参数如下: 入口、出口管分别为 $\phi 50\text{mm}$ 、 $\phi 20\text{mm}$ 的圆管, 入口、出口扩张角为 45° , 圆柱形蜂窝陶瓷载体开口率为 0.6836, 排气速度为 5.5m/s, 排气温度为 300K, 孔密度为 400cpi, 孔壁厚为 0.05mm, 孔长为 150mm, 孔宽为 110mm。载体上涂覆的 Pt、Rh 催化剂质量比为 5:1。

3.1 约束条件

优化的约束条件包括 9 个设计约束、6 个状态约束和 4 个目标约束。

(1) 设计变量约束条件。 $\epsilon \in [0.5, 1.0]$; $\beta \in [1.0, 1.5]$; $z \in [45, 55]$; $a \in [40, 150]$; $b \in [30, 140]$; $\delta \in [0.02, 0.15]$; $\pi \in [3, 6]$; $\theta \in [30, 60]$; $d \in [40, 60]$ 。

(2) 状态约束条件。 $T_s \in [500, 800]$; $T_g \in [230, 350]$; $\rho_L \in [350, 450]$; $u_g \in [5.0, 6.0]$; $u_{g0} \in [5.0, 7.0]$; $\sigma \in [10, 25]$ 。

(3) 目标约束条件。转化效率 $\eta \in [80, 100]$; 压力损失 $\Delta p \in [3000, 3500]$ Pa; 质量 $m \in [2.6,$

$3.6]$ kg; 热变形 $\Delta \zeta \in [0.8, 1.5]$ mm。

(4) 入口气体浓度。 $c(\text{CO}) = 1.420\text{mol}/\text{m}^3$; $c(\text{O}_2) = 0.770\text{mol}/\text{m}^3$; $c(\text{C}_3\text{H}_6) = 0.045\text{mol}/\text{m}^3$; $c(\text{NO}) = 0.100\text{mol}/\text{m}^3$ 。

3.2 设计优化求解

图 3 所示为车用 TWC 设计优化问题的求解过程。 X 表示可被设计者控制的相互独立变量; Z 为固定不变参数; 状态变量 Y 为学科之间的耦合变量, $Y = [y_{12} \quad y_{13} \quad y_{14} \quad y_{21} \quad y_{23} \quad y_{24} \quad y_{31} \quad y_{32} \quad y_{34} \quad y_{41} \quad y_{42} \quad y_{43}]^T$ 。系统的整体性能(功能函数) g_i 则是输入参数 X 和状态变量 Y 的函数。

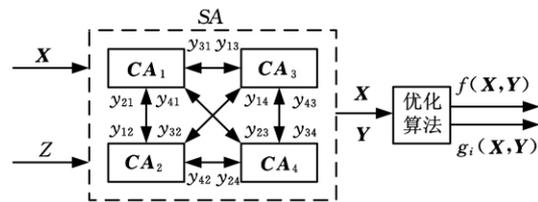


图 3 车用 TWC 多学科设计优化求解过程

通过求解如下的非线性联立方程组得到系统的分析解:

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= [y_{12} \quad y_{13} \quad y_{14}] = CA_1(X, Z, y_{21}, y_{31}, y_{41}) \\ Y_2 &= [y_{21} \quad y_{23} \quad y_{24}] = CA_2(X, Z, y_{12}, y_{32}, y_{42}) \\ Y_3 &= [y_{31} \quad y_{32} \quad y_{34}] = CA_3(X, Z, y_{13}, y_{23}, y_{43}) \\ Y_4 &= [y_{41} \quad y_{42} \quad y_{43}] = CA_4(X, Z, y_{14}, y_{24}, y_{34}) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

通过自编程序对自定的、统一格式的 TWC 参数文件进行操作, 分别生成符合速度场、浓度场、压力场和应力场仿真分析的几何模型文件, 并通过优化平台将不同物理场的仿真分析软件和自编程序进行集成, 从而实现车用三效催化转化器的设计优化。不同物理场的耦合关系以及优化仿真集成的流程如图 4 所示。

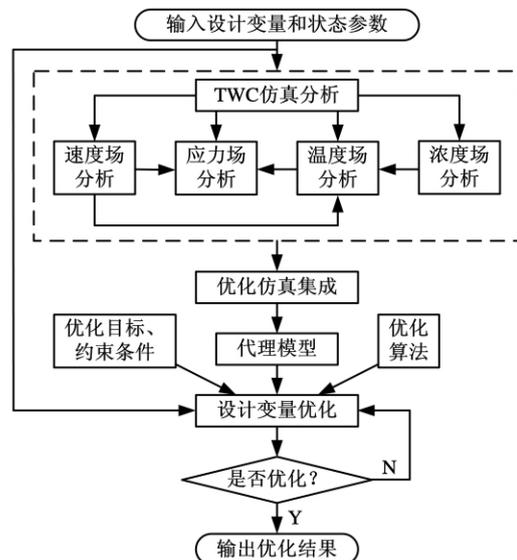


图 4 车用 TWC 多学科设计优化仿真流程

TWC 多学科设计优化变量为 $(X_1, Y_1) \cup (X_2,$

$Y_2) \cup (X_3, Y_3) \cup (X_4, Y_4)$ 。采用自适应混沌优化算法进行求解。该算法包括 6 个步骤:算法初始化、混沌变量在设计变量区间上粗略转化、混沌变量粗迭代搜索、混沌变量搜索区间缩小、混沌变量在设计变量区间上细转化与混沌变量细迭代搜索。各系统的优化通过 VB 软件实现双层并行运算。

3.3 MDO 结果及试验验证

车用三效催化转化器多学科设计优化后的结果如表 1 所示。

表 1 MDO 优化结果

变量	初始值	优化结果	改进程度
$\eta(\%)$	88.5	93.3	5.42%
$\Delta p(\text{Pa})$	3234	3006	-6.99%
$m(\text{kg})$	3.34	2.95	-11.68%
$\Delta \zeta(\text{mm})$	1.53	1.21	-20.91%

经国家汽车质量检验中心(襄樊)测试,经 MOD 方法优化的三效催化转化器与整车匹配后的检测结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,经优化后的三效催化转化器对三种废气的转化效率均在 92% 以上,各项性能指标均满足欧 IV 排放标准限值。由此证明, MDO 方法对于车用三效催化转化器的优化设计有效、合理。

表 2 I 型试验测得的转化结果

检验项目	CO(g/km)	HC(g/km)	NO _x (g/km)
无 TWC	22.0	1.25	1.36
优化后的 TWC	0.77	0.10	0.06
转化效率(%)	96.5	92	95.5

4 结论

(1)通过应用多学科设计优化方法,使车用三效催化转化器压力损失减少 6.99%,质量减少 11.68%,位移变形减少 20.91%,TWC 转化效率提高 5.42%。

(2)多学科设计优化技术是一项有效的优化设计方法,可应用到各学科中。

参考文献:

[1] 郭健. 多学科设计优化技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2001.

[2] 穆雪峰. 多学科设计优化代理模型技术的研究和应用[D]. 南京:南京航空航天大学,2004.

[3] Sobieszczanski—Sobieski J. Sensitivity of Complex Internally Coupled Systems [J]. AIAA Journal, 1990,28(1):153-160.

[4] Sobieszczanski—Sobieski J. Optimization by Decomposition: A Step from Hierarchic to Nonhierarchic System [EB/OL]. [2011-09-03]. <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19890015778-1989015778.pdf>.

[5] Renaud J E. Improved Coordination in Nonhierarchic System Optimization[J]. AIAA Journal,1993, 131(12):2367-2373.

[6] Sellar R S,Batill S M,Renaud J E. Response Surface Based Concurrent Subspace Optimization for Multidisciplinary System Design [C]//34th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, Reno,NV, USA,1996; AIAA-96-0714.

[7] Bolebaum C L. Formal and Heuristic System Decomposition in Structural Optimization[R]. Washington DC: NASA, 1991.

[8] Moore B,Braun R D,Kroo I M. Use of the Collaborative Optimization Architecture for Launch Vehicle [C]//6th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, Bellevue,WA,USA,1996; AIAA-96-4018.

[9] 余雄庆,姚卫星,薛飞,等. 关于多学科设计优化计算框架的探讨[J]. 机械科学与技术,2003,23(3): 286-289.

Yu Xiongqing,Yao Weixing,Xue Fei,et al. A Study on the Requirements for the Framework of Multidisciplinary Design Optimization [J]. Mechanical Science and Technology,2003,23(3):286-289.

[10] 龚春林. 多学科设计优化技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2004.

[11] 陈琪峰,李晓斌,戴金海. 导弹总体参数优化设计的合作协同进化 MDO 算法[J]. 国防科技大学学报,2001,23(5):9-11.

Chen Qifeng,Li Xiaobin,Dai Jinhai. Cooperative Co-evolutionary Multidisciplinary Design Optimization of Missile System[J]. Journal of National University of Defense Technology,2001,23(5):9-11.

[12] 谷良贤,龚春林,宋寒冰. 协作优化方法的计算特性及其应用范围研究[J]. 空间科学学报,2002(增 2):1-5.

Gu Liangxian,Song Hanbing,Gong Chunlin. The Computational Characteristics and Application Scope of Collaborative Optimization [J]. Chinese Journal of Space Science,2002(S2):1-5.

[13] 谷良贤,宋寒冰,龚春林. 协作优化算法在飞行器设计中的应用[J]. 弹箭与制导学报,2002,22(3):92-95.

Gu Liangxian,Song Hanbing,Gong Chunlin. Collaborative Optimization and its Application in the Design of Space Vehicle [J]. Journal of Projectiles,Rockets,Missiles and Guidance,2002,22(3):92-95.

[14] 胡峪,李为吉. 飞机多学科设计的分级优化方法 [J]. 西北工业大学学报,2001,19(1):144-147.

Hu Yu,Li Weiji. Exploration of Aircraft Multidisciplinary Design Optimization with Hierarchical Decomposition [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University,2001,19(1):144-147.

基于机械物理法的废旧热固性酚醛树脂回收工艺的试验研究

宋守许 胡 健 石 磊 杨雪峰

合肥工业大学,合肥,230009

摘要:基于机械物理法的基本原理,以废旧热固性酚醛树脂为研究对象,分析其回收机理。采用响应面法中的 Box-Behnken 模式,对回收工艺参数中最主要的三个因素(转速、时间和入料粒径)进行试验优化设计,并建立了多元二次模拟方程。试验结果表明:转速、时间和入料粒径对热固性酚醛树脂降解的显著程度由高到低分别为转速、入料粒径、时间,热固性酚醛树脂降解率最大时的回收工艺参数是转速 2940r/min、时间 95min、入料粒径 0.71mm。

关键词:热固性酚醛树脂;机械物理法;响应面法;回收

中图分类号:X705

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.01.007

Research on Recycling Technology of Waste Thermosetting Phenolic Resins Based on Mechanical Physical Method

Song Shouxu Hu Jian Shi Lei Yang Xuefeng
Hefei University of Technology, Hefei, 230009

Abstract: Based on the fundamental of mechanical physical method, the waste thermosetting phenolic resins was researched and the recovery mechanism was analysed. By using Box-Behnken model of response surface methodology, a series of experiments for optimizing three main factors (speed, time and size) of recovery process parameters were designed and a quadratic polynomial equation model was constructed. The results show that: the order of the important effects of speed, time and size on the degradation of thermosetting phenolic resins is speed>size>time, when the degradation rate is the biggest, the recovery speed, time and size for waste thermosetting phenolic resins recycling are 2940r/min, 95min, and 0.71mm respectively.

Key words: thermosetting phenolic resin; mechanical physical method; response surface methodology; recycling

0 引言

热固性酚醛树脂(thermosetting phenolic resin, PF)是一种以酚类和醛类化合物经过缩聚

反应而制得的一大类合成树脂。热固性酚醛树脂固化前是线形或带支链的,固化后分子链之间形成化学键,成为高度交联的网状结构,不仅不能再熔融,在溶剂中也不能溶解。热固性酚醛树脂以其优良的粘接性、耐热性、阻燃性和绝缘性等特性被广泛应用于工业^[1]。大量的热固性酚醛树脂伴

收稿日期:2011-11-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975074);“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAF11B06)

[15] 范丽,周洪伟,张育林. 飞行器多学科优化设计中基于产品模型的数据集成[J]. 中国空间科学技术,2002(4):51-56.

Fan Li, Zhou Hongwei, Zhang Yulin. Data Integration Based on Product Model for Aircraft Multi-disciplinary Design Optimization [J]. Chinese Space Science and Technology, 2002(4):51-56.

[16] 龚金科. 汽车排放污染及控制[M]. 北京:人民交通出版社,2005.

[17] 龚金科,周立迎,梁昱,等. 三效催化转化器压力损失对发动机性能的影响[J]. 汽车工程,2004,26(4):413-416.

Gong Jinke, Zhou Liying, Liang Yu, et al. A Study on the Effect of Pressure Loss in Three-way Cat-

alytic Converter on Engine Performance[J]. Automotive Engineering, 2004, 26(4):413-416.

[18] 戴莱 J W, 哈里曼 D R F. 流体动力学[M]. 郭子中,译. 北京:北京理工大学出版社,2011.

[19] 刘孟祥. 三效催化转化器高效长寿低排放优化设计理论及方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2008.

(编辑 张 洋)

作者简介:刘孟祥,男,1973年生。湖南涉外经济学院机械工程学院副教授、高级工程师,中南大学能源科学与工程学院博士后研究人员。主要研究方向为汽车排放控制及新能源汽车。刘湘玲,女,1978年生。湖南大学机械与运载工程学院博士研究生。龚金科,男,1954年生。湖南大学机械与运载工程学院教授、博士研究生导师。