

doi: 10.7690/bgzdh.2013.08.012

基于能流界面参数的氧化铝溶出过程节能优化

陈君^{1,2}, 唐秀明¹, 宋彦坡³(1. 湖南科技大学信息与电气工程学院, 湖南湘潭 411201; 2. 中南大学信息科学与工程学院, 长沙, 410083;
3. 中南大学能源科学与工程学院, 长沙, 410083)

摘要: 针对氧化铝生产过程中能耗过高的问题, 提出一种基于能流界面参数的节能降耗单元优化方法。该方法利用分层递阶控制理论, 从界面参数分析入手, 确定相邻工序之间、同一工序内相邻生产单元之间以及同一生产单元的相邻设备之间的能流界面, 通过分析能流界面参数与生产全过程能耗指标之间的关系, 提出以能流界面参数为约束, 整个生产过程能耗最小为目标的操作参数优化算法, 并进行分析检验。检验结果证明: 该方法提高了系统火用效率, 减少了系统火用损失, 实现了各生产单元优化匹配、协调运行、整个流程的节能降耗。

关键词: 能流界面参数; 溶出工序; 参数优化; 节能降耗

中图分类号: TP273⁺.5 **文献标志码:** A

Alumina Digestion Process Energy Optimization Based on Energy Flow Interface Parameter

Chen Jun^{1,2}, Tang Xiuming¹, Song Yanpo³(1. School of Information & Electrical Engineering, Hunan University of Science & Technology, Xiangtan 411201, China;
2. School of Information Science & Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
3. School of Energy Science & Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: For the large energy consumption during the alumina procedure, an energy-saving and cost-reducing optimization method based on the energy flow interface is proposed. Using Hierarchical intelligence control theory, the method given out the energy flow interface between two adjacent process steps, two units in one process step, two equipments in one unit by analyzing interface parameters. After studying the relationship of interface parameters and energy loss index, put forwards an optimization algorithm which take minimizing the energy loss as the objective function and the interface parameters of energy flow as constrains, and carried out simulation examinations. The results show that the algorithm improve system energy efficiency and reduce energy loss, achieve optimization matching of different process units, production coordinated, and energy saving of entire process.

Key words: energy plow interface parameter; dissolving process; parameter optimization; energy saving and consumption reducing

0 引言

拜尔法是现代生产氧化铝的主要方法, 生产氧化铝的能耗费用占总生产成本的 40%左右, 其中溶出工序的能耗约占整个过程能耗的 46%左右(每生产 1 t 氧化铝大约需要消耗 5.3~5.6 GJ 的热量)^[1-2], 目前对溶出过程的节能研究主要是以机理分析^[3]为基础, 开展过程节能研究, 因此在保持过程工艺不变的前提下, 研究溶出工序的节能降耗对增产增效具有重要意义^[4]。同时, 对实现铝工业“十二五”发展专项规划到 2015 年力争完成氧化铝综合能耗降到 500 kg 标煤/t^[5], 给溶出过程节能减排提出了新的要求。

基于此, 笔者针对溶出过程的特点, 根据分层

递阶控制理论, 对工序流程的生产工艺条件和生产的技术经济指标要求及生产过程全流程进行火用分析, 并提出基于能流界面参数的节能降耗单元优化方法, 实现单元级能耗优化分析, 最终达到整个生产流程的节能目的。

1 拜尔法介绍

拜尔法是现代生产氧化铝的主要方法。某厂的拜尔法生产氧化铝双流法溶出系统流程如图 1 所示, 原矿浆流和碱液流经过多级预热, 混合后送入 12 级溶出器溶出, 溶出物为铝酸钠溶液, 溶出后的矿浆经 10 级自蒸发, 产生的二次蒸汽用于矿浆和碱液的预热。整个工艺流程连续, 各工序前后紧密相连, 变量间严重耦合的现象, 溶出过程的建模和操

收稿日期: 2013-02-08; 修回日期: 2013-03-18

基金项目: 资助国家自然科学基金青年项目(61105080); 国家自然科学基金重点项目(61134006); 湖南省自然科学基金青年项目(11JJ4057); 湖南省教育厅资助项目(10C0696)

作者简介: 陈君(1977—), 男, 湖南人, 博士, 讲师, 从事智能决策、工业过程优化决策与控制研究。

作参数^[4]的优化调整困难，且难于保证整个过程运行最优状态。

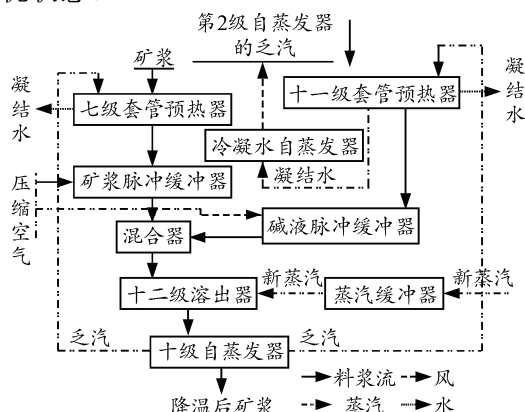


图 1 拜尔法生产氧化铝双流法溶出流程示意图

2 界面参数的工业过程单元优化

工业过程优化追求的是整体全局性的最优化目标而非局部效果，但优化措施(控制手段)往往在局部生产单元实施，由于生产单元间相互影响，局部优化和整体优化之间须保持协调，否则会存在矛盾。例如降低某单元过程的能耗可能会引起其他单元能耗的大幅提高，从而增加整个过程的能耗，全局优化无法执行，局部优化难以奏效，这是复杂工业过程优化领域的难题之一，文献[6-7]指出：分层递阶控制是解决复杂大规模系统控制问题的有效途径。

2.1 分层递阶控制理论

分层递阶控制是在研究学习控制系统基础上，从工程控制论出发，总结人工智能与自适应控制、自学习控制和自组织控制的关系后而逐渐形成的^[8]，其结构分为：组织级、协调级、控制级。按分层递阶控制的思想可以将大规模的优化控制任务分解为多个不同层次的局部任务，根据控制任务设计多个局部控制层，各局部控制层对相应的控制任务负责，即工业过程从整体和细节 2 个角度描述。整体上看，工业过程的基本功能是将原料转变为产品，从细节上看，工业过程往往包含了多个单元过程，同一级单元过程互不重叠，单元过程间通过物流和能流界面衔接，如图 2 所示。最终的控制在各单元环节实现。以氧化铝拜尔法生产工艺为例，从整体上看也是一个原料(原矿)到产品(氧化铝)的转化过程，从细节上看，整个工艺过程可分为 6 大工序(磨矿、溶出、沉降分离和赤泥洗涤、分解、蒸发、焙烧)，而多数工序又可划分为多个子工序，如溶出工序可分为碱液预热段、矿浆预热段、混合段、溶

出段、自蒸发段等，各子工序还可做进一步细分。要维持整个过程的平稳运行，各子工序之间，在优化时需要保持一定的约束，进而提出界面参数。

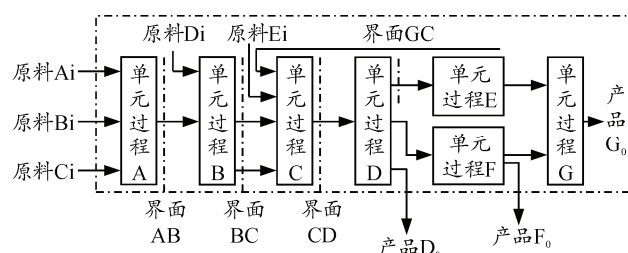


图 2 划分的界面复杂工业过程的整体结构模型

2.2 界面参数的过程优化问题建立

定义 1(界面) 同级(同层次)相邻单元过程间的衔接面，各单元过程通过界面对其他单元过程产生影响，从而影响整个生产过程。如图 2 中，界面 AB、界面 CD。

定义 2(界面参数) 各单元过程通过在界面之间的传递参数(界面物质流、能量流的传输参数和物态参数等)既反映了上一单元过程的输出状况，又反映了下一单元过程的输入状况，即界面参数反映了单元过程间的相互联系和影响。

基于界面参数约束单元过程优化问题可描述为：

$$\begin{aligned} \min_{X_{Lic}^{opt}} J_{Li}^{opt} &= f_{Li}(X_{Lic}^{opt}, X_{F(i-1)}, X_{Lio}) \\ \text{s.t. } G_{Li}(\dot{X}_{Lic}^{opt}, \dot{X}_{Lio}, X_{Lic}^{opt}, X_{Lio}) &= 0 \\ X_{F(i+1)c} &= H_{Li}(\dot{X}_{Lic}, \dot{X}_{Lio}, X_{Lic}, X_{Lio}) \quad (1) \\ X_{F(i+1)cmin} &< X_{F(i+1)c} < X_{F(i+1)cmax} \\ X_{Licmin}^{opt} &< X_{Lic}^{opt} < X_{Licmax}^{opt} \end{aligned}$$

其中： X_{Lic}^{opt} 为单元过程的优化问题的可控参数； $X_{F(i-1)}$ 为上游界面主要参数，对本单元过程而言是可测但不可控的； X_{Lio} 为单元过程的其他可测但不可控的状态参数， $X_{F(i-1)}$ 、 X_{Lio} 共同构成优化问题的条件变量； J_{Li}^{opt} 为第 i 个单元过程的优化问题的目标变量； $G_{Li}(\dot{X}_{Lic}, \dot{X}_{Lio}, X_{Lic}^{opt}, X_{Lio})=0$ 是基于物理、化学和热力学定理，用于描述单元过程特性的模型方程(组)； H_{Li} 为下游关键参数 $X_{F(i+1)}$ 与相关条件参数关系的泛函数； $X_{F(i+1)cmin} < X_{F(i+1)c} < X_{F(i+1)cmax}$ 为下游界面参数的优化范围。

由于工业过程复杂性，经过分层递阶思想划分的单元过程优化方程与全流程较容易，但是方程中由机理分析得出的 f_{Li} 、 H_{Li} 、 G_{Li} 等函数形式还是

很复杂。对上述求解往往还需要采用一些智能方法。

3 双流法溶出过程的节能优化

经以上分析可知，氧化铝双流法溶出过程是一典型的具有分层递阶控制特点的复杂工业过程，其预热单元(套管预热器)、混合单元、溶出单元(溶出器)和自蒸发单元(自蒸发器)等 4 个单元及相关生产设备的状态都相互影响，单元过程与设备(或局部)状态的变化都可能影响全局溶出过程的整体运行状态。为了实现整体全局性的最优化目标，达到节能降耗的目的，就需要确定相邻单元之间以及同一生产单元的相邻设备之间的能流界面参数影响，以生产单元之间和生产单元内部各设备之间工作状态的优化匹配、协调运行和能流界面参数为约束，以整个溶出过程能耗最小化为目标，运用微粒群算法对单元级界面参数进行优化。

3.1 氧化铝双流法溶出过程能流界面参数的确定

1) 预热单元参数对系统和混合单元生产影响。

双流法溶出预热单元分为 11 级碱液预热段和七级矿浆预热段，预热单元入口界面参数为矿浆初温、矿浆流量、碱液初温、碱液流量、10 级自蒸发器的出口乏汽温度、9 级自蒸发器的出口乏汽温度。预热单元出口界面参数为碱液 11 级温度、碱液流量、矿浆 7 级温度。界面参数如图 3。

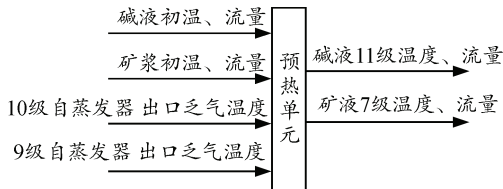


图 3 双流法溶出过程预热单元界面参数

2) 混合单元及溶出单元界面参数分析。

混合单元的主要目的是使碱液和矿浆充分混合形成混合矿浆流，预热单元的出口温度越高，混合单元的出口温度也越高，而预热单元的出口流量对混合单元同样产生影响。混合单元的出口界面参数为混合浆出口温度、出口流量。界面参数如图 4。

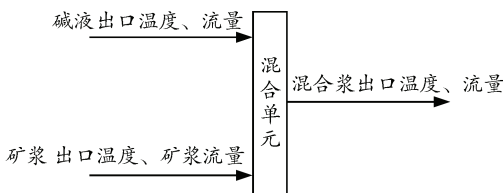


图 4 双流法溶出过程混合单元界面参数

溶出单元的过热新蒸汽耗量越低，系统火用效率越低，而由于溶出单元使用保温停留溶出工艺，

因此溶出单元流量是固定值。界面参数如图 5。

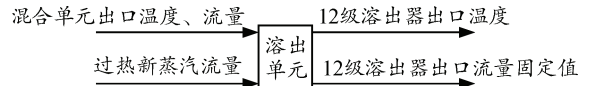


图 5 双流法溶出过程溶出单元界面参数

3) 自蒸发单元界面参数分析。

自蒸发单元的入口界面参数为溶出单元出口温度与出口流量，出口界面参数为出口温度、出口流量及 10 级二次乏汽温度。10 级二次乏汽温度与预热单元初温及流量存在耦合关系。界面参数如图 6。

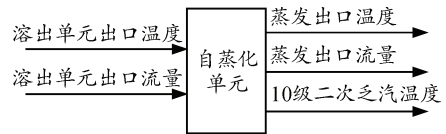


图 6 双流法溶出过程自蒸发单元界面参数

3.2 氧化铝双流法溶出过程节能优化

随着能源问题的日益严峻，人们节能降耗的意识不断提高，能量分析理论与方法研究取得了长足的发展^[9]。火用分析是 20 世纪 70 年代发展起来的一种新的能量分析方法，它将热力学第一定律和第二定律结合起来，从能的数量和质量两方面分析能量的利用情况，更完整、更具体地衡量工艺过程的热力学完善程度。

文献[10-11]从能源利用的角度，对氧化铝溶出生产工序中双流法各单元环节进行了详细的热分析方法火用分析。在此基础上，笔者结合各单元的火用分析的成果，确定以整个溶出过程的整体溶出的火用损最小为目标函数，各单元之界面参数为约束，求出对溶出过程的可控参数(碱液初温、矿浆初温、碱液流量、矿浆流量、过热新蒸汽流量等操作工艺参数)的优化，最终使用整个系统的达到节能降耗的目的。

1) 溶出过程的系统总火用损如图 7 所示。

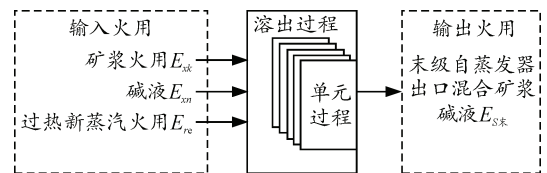


图 7 溶出过程的系统火用损结构

系统的输入火用 $E_{x\lambda}$ 包括矿浆火用 E_{xk} 、碱液火用 E_m 和过热新蒸汽火用 E_{re} ，其表达式为

$$E_{x\lambda} = E_{xk} + E_m + E_{re} \quad (2)$$

系统的输出火用 $E_{x\text{出}}$ 为末级自蒸发器出口混合矿浆流的火用 $E_{s\text{末}}$ ：

$$E_{\text{出}} = E_{\text{末}} \quad (3)$$

系统的总火用损失为：

$$E_{\text{总}} = E_{\text{入}} - E_{\text{出}} = E_{\text{sk}} + E_{\text{xn}} + E_{\text{re}} - E_{\text{末}} \quad (4)$$

整体溶出的火用损最小为目标函数

$$\begin{aligned} \min F = E_{\text{sk}} + E_{\text{xn}} + E_{\text{re}} - E_{\text{末}} = & \\ & \rho_k V_k C_k (T_{k0} - T_0 - T_0 \ln \frac{T_{k0}}{T_0}) + \\ & \rho_n V_n C_n (T_{n0} - T_0 - T_0 \ln \frac{T_{n0}}{T_0}) + \\ & M_e [h_e - h_0 - T_0 (s_e - s_0)] - \\ & M_{s10} C_{s10} (T_{s10} - T_0 - T_0 \ln \frac{T_{s10}}{T_0}) \end{aligned} \quad (5)$$

2) 约束条件(由各单元的能流参数约束)。

① 物料平衡关系式。

$$M_k + M_n + M_e = M_{s10} + \sum_{i=1}^{10} m_{fi} \quad (6)$$

$$V_n + V_k = 460 \quad (7)$$

② 热平衡关系式。

碱液预热段热平衡式：

$$\eta_{ni} m_{fi} (h_{ei} - h_{ni}) = C_n M_n \Delta t_{n1-i} \quad (i=1, 2, \dots, 9, 10) \quad (8)$$

矿浆预热段热平衡式：

$$\eta_{ki} m_{fi} (h_{ei} - h_{ki}) = C_k M_k \Delta t_{ki} \quad (i=3, 4, \dots, 6, 9) \quad (9)$$

混合段热平衡式：

$$\eta_{kn} (C_n M_n T_{n12} + C_k M_k T_{k8}) = C_{kn} M_{kn} T_{kn} \quad (10)$$

溶出段热平衡式：

$$\eta_{en} (C_{kn} M_{kn} t_{kn} + M_e h_e) = C_{s0} M_{s0} t_{s0} \quad (11)$$

自蒸发段热平衡式：

$$\eta_{si} (C_{s(i-1)} M_{s(i-1)} t_{s(i-1)} - C_{si} M_{si} t_{si}) = m_{fi} h_{ei} \quad (i=1, 2, \dots, 9, 10) \quad (12)$$

其中：

ρ_k, ρ_n ：矿浆、碱液入口物料的密度， kg/m^3 ；

V_k, V_n ：矿浆、碱液入口物料体积流量， m^3/h ；

C_k, C_n, C_{s10} ：矿浆、碱液入口，矿浆流出口混合物的比热容， $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ；

T_{k0}, T_{n0}, T_{s10} ：矿浆、碱液入口物料，矿浆流出口混合物的初始温度， K ；

T_0 ：基准温度， 298.15 K ；

$M_e, M_{s10}, M_k, M_n, M_{fi}$ ：新蒸汽入口，混合矿浆流出口混合物，原矿浆，原碱液入口，第 i 级自蒸发器入口质量， kg ；

h_e, h_0, h_{ei}, h_{oi} ：新蒸汽入口、出口乏汽，自蒸发器入口、出口的比焓， kJ ；

s_e, s_0 ：新蒸汽入口，蒸汽出口乏汽的比熵， $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ；

Δt_{n1-i} ：原碱液经过 i 级预热后温度与初温差， K ；

$\eta_{ni}, \eta_{ki}, \eta_{kn}, \eta_{en}, \eta_{si}$ ：碱液预热器、矿浆预热器、混合器、溶出器、自蒸发器换热系数，分别取 0.95、0.96、0.99、0.99、0.94。

3) 可调操作参数：根据溶出过程生产数据中的工艺指标和工艺操作参数变化范围，将可控变量的值域确定为：

$$\begin{aligned} 318.6 \leq V_n \leq 338.7 \\ 78 \leq t_{n0} \leq 82 \\ 121.3 \leq V_k \leq 141.4 \\ 73 \leq t_{k0} \leq 77 \end{aligned} \quad (13)$$

为了检验基于能流界面参数溶出过程优化的实际效果，笔者确定溶出过程系统评价指标——火用效率 η_e ：

$$\eta_e = \frac{E_{\text{末}}}{E_{\text{sk}} + E_{\text{xn}} + E_{\text{re}}} \quad (14)$$

针对由目标函数式 (5)，约束条件为式 (6)~式 (13) 的优化方程，采用微粒群优化算法^[12]，以可调操作参数优化粒子，得到可调操作参数的优化值如表 1，相应的在优化值下各小单元的火用效率由式 (14) 计算，如表 2。

表 1 优化前后控制参数的比较

参数	$V_n/(\text{m}^3/\text{h})_n$	$t_{n0}/^\circ\text{C}$	$V_k/(\text{m}^3/\text{h})$	$t_{k0}/^\circ\text{C}$	$M_e/(\text{kg}/\text{h})$
原始数据	330	80	130	75	80 000
优化数据	338.6	82	121.4	77	77 696

表 2 优化前后系统各项评价指标的比较

评价指标	优化前	优化后
混合段火用效率/%	97.51	97.69
溶出段火用效率/%	87.29	87.84
系统火用效率/%	30.12	30.6
系统火用损失/GJ	82.5	80.3

可以看出：在产量相同的情况下，通过能流界面能数的约束的优化计算，得到优化后的 V_n 、 V_k 、 M_e 、 t_{n0} 、 t_{k0} 。系统火用效率提高 0.48%，系统火用损失减少 2.2 GJ，单元环节混合段的火用效率提高 0.18%，溶出段的火用效率提高 0.55%。

4 结论

笔者以分层递阶控制理论为指导，从界面参数分析入手，建立了基于界面参数的工业过程优化方程；同时，针对氧化铝溶出过程优化的问题，笔者提出以能流界面参数为约束，全局能耗最小为目标的优化算法。实践结果表明：该方法提高了对能源的利用，保证整个工序过程协调运行，达到整个流

程节能降耗的目的。

参考文献:

[1] 郭恩喜, 张强, 季建稳. 拜尔法生产氧化铝工艺节能降耗的探讨[J]. 有色冶金节能, 2009, 1(4): 23-26.

[2] 蒋洵, 杜善国, 葛成战, 等. 依靠科技进步降低拜尔法生产能耗[J]. 有色冶金节能, 2003, 20(2): 7-8.

[3] 黄捷, 陈利斌. 管道化溶出系统预热级数的模拟优化[J]. 浙江化工, 2012(4): 15-19.

[4] 工业和信息化部. 铝工业“十二五”发展专项规划[M]. 2011.

[5] Havlena V, Lu J. A distributed automation framework for plant-wide control, optimization, scheduling and planning[C]. In: Proceedings of the 16th IFAC World Congress. Prague, Czech: Elsevier, 2005: 80-94.

[6] Tatjewski, P. Advanced control of industrial processes:

structures and algorithms[M]. Springer, 2007: 1-29.

[7] Scattolini, R. Architectures for distributed and hierarchical model predictive control—a review[J]. Journal of Process Control, 2009, 19(5): 723-731.

[8] Saridis G. N, Valavanis K. Mathematical Formulation of the organization level of an intelligent machine[J]. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1986(3): 267-272.

[9] 傅秦生. 能量系统的热力学分析方法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2005.

[10] 陈乔平, 闫红杰, 等. 氧化铝生产过程能耗的火用分析[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(7): 1734-1740.

[11] 彭小奇, 武春阳. 基于火用分析的氧化铝双流法溶出工序的节能[J]. 冶金能源, 2011, 30(4): 10-13.

[12] Zhao, S. Z., et al. Dynamic multi-swarm particle swarm optimizer with harmony search[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(4): 3735-3742.

(上接第 27 页)

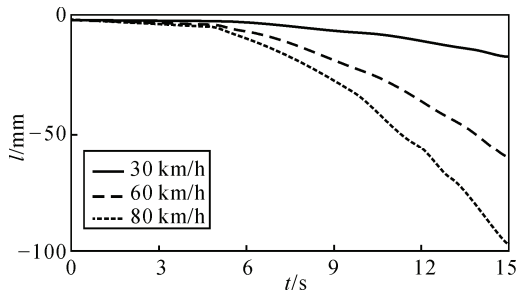


图 6 侧向位移曲线

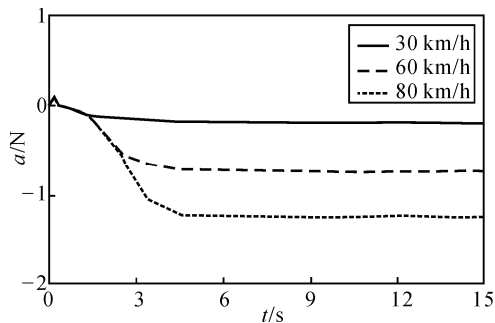


图 7 侧向加速度曲线

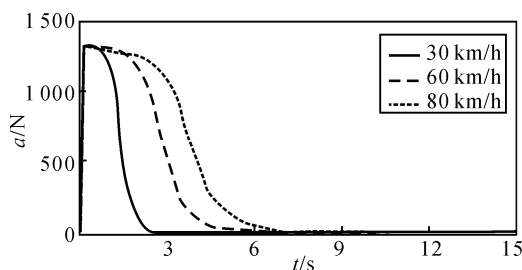


图 8 纵向加速度曲线

由图 6 可见: 仿真到 15 s 时, 以 30 km/h 行驶侧向位移为 18 mm, 以 60 km/h 行驶侧向位移为 60 mm, 以 80 km/h 行驶侧向位移为 96 mm。随着行驶速度的增加, 火炮发生爆胎后的侧向位移也随着增加。

由图 7 可见: 侧向加速度变化较小, 以 30 km/h 行驶侧向加速在 1.5 s 时稳定在 0.1 mm/s², 以 60 km/h 行驶侧向加速度在 2 s 稳定在 0.5 mm/s², 以 80 km/h 行驶侧向加速度在 2 s 稳定在 1.2 mm/s²。随着行驶速度的增加, 火炮发生爆胎后的侧向加速度也随着增加。

由图 8 可见: 爆胎后侧向加速度达到 1 312 mm/s², 以 30 km/h 行驶在 2 s 以后一直为 0, 以 60 km/h 行驶在 5 s 以后一直为 0, 以 80 km/h 行驶在 7 s 以后一直为 0。随着行驶速度的增加, 火炮发生爆胎后的纵向加速度持续时间也随着增加。

4 结论

仿真结果证明: 在较大速度行驶时火炮轮胎发生爆胎, 火炮有较大的侧向位移和纵向加速度。该研究为行驶安全性提供了理论依据。

参考文献:

[1] 毛向东. 牵引火炮海绵轮胎改装充气轮胎仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2003: 12.

[2] 周成, 顾克秋, 卢其辉, 等. 履带式自行火炮发射动力学仿真建模[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(6): 20.

[3] 生龙波, 马吉胜, 李涛, 等. 某型履带车辆紧急制动动力学仿真分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2012(1): 14-17.

[4] 王和毅, 古正气. 汽车轮胎模型研究现状及其发展分析[J]. 橡胶工业, 2005(52): 58-62.

[5] 向涛波, 刘重发, 赵俊, 等. 某型自行火炮行驶平顺性仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2011(10): 220-222.

[6] 黄世伟, 赵传林, 屈玉峰. 半挂运输车脉冲路面输入的平顺性仿真[J]. 机械与电气, 2008(5): 104-105.

[7] 丁金刚, 黄志刚, 严凌, 等. 基于虚拟样机技术的车辆平顺性研究[J]. 计算机仿真, 29(5): 333-337.