烧结机台车起拱力学行为分析及控制

吴学兵[1]，卢兴福[1,2]，刘相佩[1]
(1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；2. 国家烧结球团装备系统工程技术研究中心，湖南 长沙，410205)

摘要： 针对烧结机运行过程中，台车起拱导致烧结系统能耗高、物耗高的问题，本文以分析台车起拱的力学行为特性为基础，建立台车起拱力学模型，获得台车起拱的临界条件；通过ADAMS动力学仿真获得了台车与星轮的相互作用力，揭示了传统星轮齿板齿形设计导致台车起拱的原因，并结合生产实际证明了台车起拱模型的准确性；在此基础上，提出了星轮齿板齿形的修正方法，大大减少了尾部星轮与台车之间的作用力，达到了减小起拱甚至消除起拱的目的，从而为烧结机的节能降耗提供支撑。

关键词： 烧结机；台车；起拱；力学分析；齿形修正
中图分类号： TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2022)05－0008－05
doi： 10.13403/j.sjqt.2022.05.064

Mechanical behavior analysis and control of sintering machine trolley arch camber

WU Xuebing[1], LU Xingfu[1,2], LIU Xiangpei[1]
(1. *Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha* 410205, *Hunan, China*; 2. *National Engineering Technology Research Center of Sintering and Pelleting Equipment System, Changsha*, 410205, *Hunan, China*)

Abstract: Aiming at the problem of high energy consumption and high material consumption of the sintering system caused by the trolley arch camber during the operation of the sintering machine, a mechanical model of the trolley arch camber is established based on the analysis of the mechanical behavior characteristics of the trolley arch camber, and the critical condition of the trolley is obtained; the interaction force between the trolley and the star wheel is obtained through ADAMS dynamic simulation, and the cause of the trolley arch camber caused by the tooth profile design of the traditional star gear is revealed, while the trolley arch camber model is proved in combination with the actual production. On this basis, the tooth profile correction method of the star wheel tooth plate is proposed, which greatly reduces the acting force between the tail star wheel and the trolley, and the purpose of reducing or even eliminating the arch camber is achieved, so as to provide support for energy saving and consumption reduction of the sintering machine.

Key words: sintering machine; trolley; arch camber; mechanical analysis; profile modification

烧结机是烧结工艺的核心设备，其漏风率直接影响烧结矿的产、质量，决定着系统的能耗与物耗。烧结机作为可移动的化学反应器，其产生漏风的原因主要有：① 保证设备正常运行的预留间隙；② 设备运行时磨损、变形导致的间隙[1-2]。烧结机在运行过程中，台车由尾部弯道进入水平回程道时会出现后轮脱离轨道面向上抬起，且脱离齿廓时来不及摆平就被后

收稿日期：2021－11－25；修回日期：2021－12－28
基金项目：国家重点研发计划专项资助项目(2017YFB0304300&2017YFB0304301)
作者简介：吴学兵(1981—)，男，高级工程师，从事烧结球团装备技术开发。
通信作者：卢兴福(1986—)，男，博士，高级工程师，从事烧结球团装备以及大型机械设备力学行为分析与研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

台车顶住形成呈逐渐减小的锯齿形台车列向机头方向运动，从而形成起拱(图 1)，最大高度达 60 mm 以上，从而使台车端面产生异常磨损与变形，加大了漏风间隙，增大了烧结机漏风率[3-4]。针对此问题，国内外相关研究人员进行了大量研究工作，白明华等[5-6]分析了台车起拱的各种原因，并从星轮齿数、齿板齿形、弯道曲线等角度提出了理论上的控制方法。刘克俭等[7-8]从力学角度通过理论与仿真分析了台车起拱原因。李国权等[9]分析引起台车起拱的原因，提出了更换尾部星轮齿板、调整弯道与齿板间隙、调整水平轨道“压轨”等解决方案。邓勇等[10]提出减小机尾曲轨内外轨间距、提高安装精度等措施可有效消除台车在曲轨处受到的切向力，从而减少起拱。上述研究分析了台车产生起拱的原因，并采用多种方法来减少或者消除起拱，但均未分析其产生起拱所需作用力的根源以及齿板齿形对作用力的影响。本文以分析台车起拱的力学行为特征为基础，建立了台车起拱力学模型，获得了台车起拱的临界条件，并通过 ADAMS 动力学仿真分析齿板齿形对台车起拱作用力的影响，最后在此条件上提出了齿板齿形的优化修正方法，以期达到台车小起拱甚至无起拱的目的。

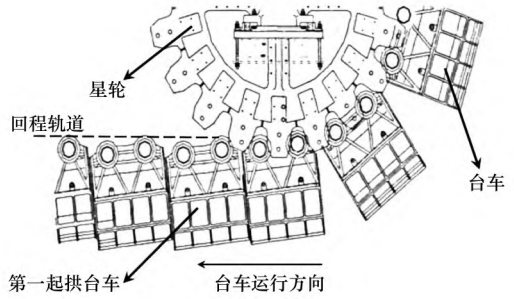


图 1　台车起拱

Fig. 1　Arching of trolley

1　台车起拱力学分析

1.1　台车起拱力学模型

台车从尾部星轮转入水平轨道运行过程中，其卡轮与尾部星轮相啮合，并受到尾部星轮对其的推力作用，是回程水平轨道发生起拱的第一辆台车，此时台车后轮与水平轨道分离抬起。当这辆后车轮抬起的台车与星轮脱离啮合时，其后面的台车运动过来与当前台车相互接触，导致其后轮不能落下，以这种姿态运动的台车成列运行后，便形成起拱。本文以起拱的第一辆台车为研究对象，其受力分析如图 2 所示。图 2 中，A 点和 B 点分别为台车车轮与轨道的接触点，并以 B 点作为基准，其逆时针方向的力矩:

$$M_1 = RF_T + (L_b - R)F_2 + bF_{NA} + F_{T-1}(b + r) \tag{1}$$

顺时针方向的力矩:

$$M_2 = W\frac{b}{2} + F_{1-2}\left(\frac{L-b}{2}\right) + M_B + M_A \tag{2}$$

式中：F_T 为尾部星轮对台车的推力，N；R 为台车车轮半径，mm；L_b 为力臂，即 F_2 与台车前轮之间的距离，mm；F_2 为第二辆台车对第一辆台车的作用力，N；b 为台车车轮之间的距离，mm；F_{NA}为 A 点车轮支持力，N；F_{T-1}为尾部星轮与车轮的摩擦力，N；r 为台车卡轮半径，mm；W 为台车自重，N；F_{1-2}为第二辆台车对第一辆台车的摩擦力，N；M_B 为车轮滚动摩擦力矩，Nmm；M_A 为车轮滚动摩擦力矩，Nmm。

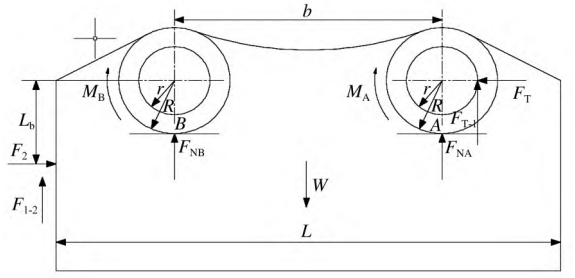


图 2　台车受力分析

Fig. 2　Force analysis of trolley

由于两力矩不平衡:

$$M_2 \leqslant M_1 \tag{3}$$

便产生了台车起拱。当式(3)取等号时为台车起拱的临界条件，此时 $F_{NA}=0$、$M_A=0$，从而得到台车关于 B 点的平衡方程:

$$BF_T + (L_b - R)F_2 + F_{T-1}(b + r) = W\frac{b}{2} + F_{1-2}\left(\frac{L-b}{2}\right) + M_B \tag{4}$$

返程水平轨道上台车为空台车，其运行阻力:

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$F_f = 1.25W\left(\frac{\delta}{R}+\frac{\mu_1 r}{R}\right) \quad (5)$$

式中：δ 为车轮与轨道之间的摩擦系数；μ_1 为轴承摩擦系数。

此时有：

$$F_2 = F_T - F_f \quad (6)$$

将 $F_{T-1}=\mu_2 F_T$，$F_{1-2}=\mu_3 F_2$，$M_B=\delta(W-F_{T-1}-F_{1-2})$ 代入式(4)，得到台车起拱的临界推力值：

$$F_T = \frac{\left(\frac{b}{2}+\delta\right)W+1.25W\left(\frac{\delta}{R}+\frac{\mu_1 r}{R}\right)\left(L_b-R-\frac{L-b}{2}\mu_3+\delta\mu_3\right)}{L_b+\mu_2(b+r+\delta)-\frac{L-b}{2}\mu_3+\delta\mu_3} \quad (7)$$

式中：μ_2 为星轮与卡轮之间摩擦系数；μ_3 为台车端面之间摩擦系数。

以某厂 360 m^2 烧结机为例(其相关参数如表1)，计算获得台车起拱的临界推力值 F_T = 157 kN，此时，控制尾部星轮对台车的推力 F_T 小于 157 kN，可消除返程水平轨道台车列的起拱。

表 1 360 m^2 烧结机相关参数

Table 1 Related parameters of the 360 m^2 sintering machine

b/mm	R/mm	r/mm	δ	μ_1	μ_2	μ_3	L_b/mm	L/mm	W/N
760	180	122.5	0.05	0.002 4	0.05	0.15	240	1 500	94 500

1.2 台车起拱表征及测量方法

台车起拱量是表征起拱严重程度的评价指标(图3)，现场一般采用工具尺进行测量(图4)。尾部星轮对台车的推力越大，起拱量越大。

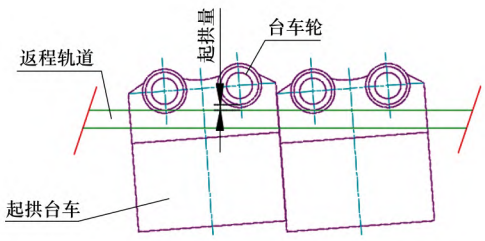


图 3 起拱量示意

Fig. 3 The value of arching

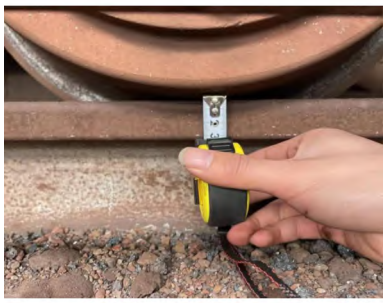


图 4 起拱测量示意

Fig. 4 Arching measure

2 尾部星轮与台车作用力分析

2.1 传统尾部星轮齿板齿形设计方法

尾部星轮对台车的推力大小主要受齿形的影响，传统尾部星轮齿板齿形的设计如图5所示。由图5可知，传统尾部星轮齿板齿形含外圆 D_1、节圆 D_3、分界圆 D_4、卡轮圆 D_5、齿弧曲线 R_1 和 R_2 以及过渡曲线 r_1 和 r_2。齿弧曲线 R_2 的圆心在节圆 D_3 上，并与齿弧曲线 R_1 相切，其半径大于齿弧曲线 R_1 的半径。齿弧曲线 R_2 和齿弧曲线 R_1 交点所在圆为分界圆 D_4，其直径为外圆 D_1 的 1/1.11。过渡曲线 r_2 与齿弧曲线 R_1 相切，半径小于过渡曲线 r_1 的半径。过渡曲线 r_1 与齿弧曲线 R_2、卡轮圆 D_5 相切，卡轮圆 D_5 的圆心所在圆与节圆 D_3、分界圆 D_4 同心。根据此方法设计出的尾部星轮齿板比较“肥大”，以 360 m^2 烧结机为例，其设计参数如表2所示。

2.2 烧结机运行过程动力学仿真

尾部星轮与台车之间的相互作用力采用传统计算方法无法准确求解，ADAMS 动力学仿真能准确模拟烧结机运行过程中，运动与力之间的相互作用关系[4,7]。针对表2参数所示的 360 m^2 烧结机，采用 Solidworks 软件建立其三维模型导入到 ADAMS 中进行仿真分析，结果如图6所示。在不影响仿真结果的基础上，将台车数量减少，模型中包括1个头部弯道、1个头部星轮，1个尾部弯道、1个尾部星轮，19辆台车、1个施

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

加在头部轨道的固定副、与台车相关的 95 个 3D 接触、2 个旋转副、一个移动副、一个运动驱动。

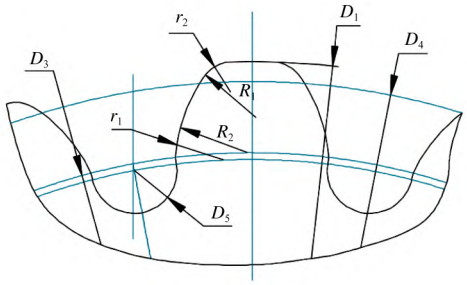


图 5　传统星轮齿板齿形

Fig. 5　Traditional gear profile of star wheel

表 2　360 m^2 烧结机传统星轮齿板齿形设计参数

Table 2　Design parameters of traditional star wheel gear profile for the 360 m^2 sintering machine　　mm

D_1	D_3	D_4	R_1	R_2	r_1	r_2
4 756	4 136	4 284. 7	250	510	120	50

注：表中的 D、R、r 分别代表对应圆的直径、弧长与半径。

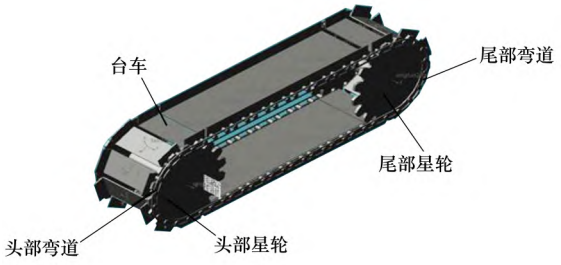
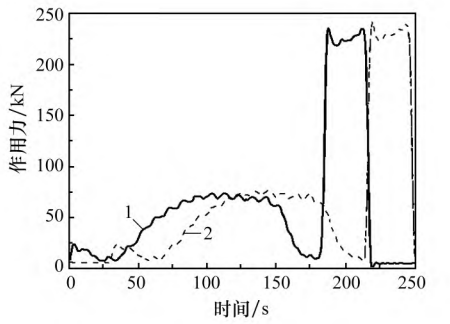


图 6　仿真模型

Fig. 6　The simulation model

通过仿真获取尾部星轮与相邻台车之间的相互作用力如图 7 所示。从图 7 中可知，星轮对台车的作用力是有周期性的，即台车在尾部弯道时，对星轮的作用力是逐渐增大后又减小，在回程道上达到峰值（230 kN），并在峰值左右波动。很显然，回程道上尾部星轮对台车的作用力超过台车起拱的临界推力值 157 kN，从而使台车出现起拱，这与生产实际相符，如图 8 所示，证明了台车起拱模型的准确性，且其最大起拱量达 50 ~ 60 mm，这严重影响了设备的连续稳定运行。



1—前台车与星轮作用力；2—后台车与星轮作用力。

图 7　传统尾部星轮与相邻台车之间的相互作用力

Fig. 7　Interaction force between adjacent trolley and conventional tail star wheel



图 8　现场起拱

Fig. 8　The arching of conventional gear profile

3　星轮齿板齿形修正方法

通过以上的分析，本文针对传统星轮齿板齿形设计方法容易导致台车起拱的问题进行了齿形优化，形成了星轮齿板齿形修正方法（图 9），即在传统齿板齿形设计方法的基础上，保持节圆 D_3、分界圆 D_4、卡轮圆 D_5 的圆心所在圆的直径不变，将齿板上的外圆 D_1 直径减小，并做一个与节圆 D_3 同心、直径小于节圆 D_3 的辅助圆，齿弧曲线 R_2 的圆心在辅助圆上，同时半径 R_2 增大，过齿弧曲线 R_2 的圆心与齿弧曲线 R_2、分界圆 D_4 的交点做辅助线，齿弧

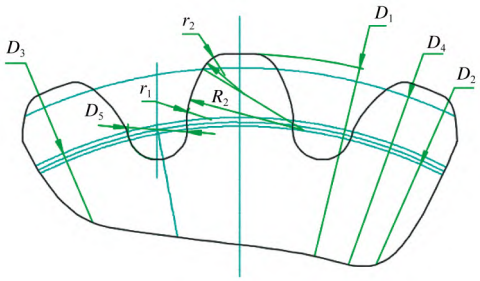


图 9　星轮齿形修正示意

Fig. 9　Gear profile modification of star wheel

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

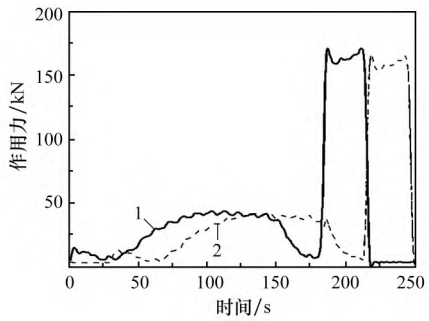
曲线 R_1 的圆心在辅助线上，半径 R_1 减小。在此基础上，进一步将过渡曲线 r_2 半径增大，同时将过渡曲线 r_1 减小。采用此修正方法加工的星轮齿板比传统方法设计的齿板相比显得“瘦小”，表3为360 m^2 烧结机修正后的齿形设计参数。

表3 360 m^2 烧结机星轮齿板修正齿形设计参数

Table 3 Design parameters of modified gear profile for the 360 m^2 sintering machine mm

D_1	D_2	D_3	D_4	R_1	R_2	r_1	r_2
4 725	4 080	4 136	4 284.7	210	580	100	100

对修正后的星轮齿板齿形进行动力学仿真，获得尾部星轮与相邻台车之间的相互作用力如图10所示。对比图7和图10，星轮齿板齿形修正后，星轮与相邻台车之间的相互作用力整体均减小，且峰值在165 kN左右波动，大于台车起拱的临界推力值157 kN，会出现一定起拱，但由于作用力峰值远小于传统设计方法得到齿板齿形，相应的起拱高度大大减小。生产实践证明，该齿板能使台车平稳运行，并使台车少起拱甚至无起拱，且最大起拱量不会超过5 mm（图11）。本齿板齿形修正方法已推广应用到国内外各大钢铁企业的烧结机，如宝钢、韶钢、永钢、湘钢、乌克兰钢铁等，台车起拱现象得到有效控制，运行过程变形间隙减小，使应用企业获得了很好的节能降耗效果。



1—前台车与星轮作用力；2—后台车与星轮作用力。

图10 修正尾部星轮与相邻台车之间的相互作用力

Fig. 10 Interaction force between adjacent trolley and modified tail star wheel



图11 齿形修正后台车起拱情况

Fig. 11 The arching after gear profile modification

4 结 论

（1）根据台车受力分析确定其起拱的力学根源是尾部星轮对台车的推力过大导致，并基于台车受力平衡建立了其起拱力学模型，获得了台车起拱临界推力计算公式，为台车起拱分析提供了理论依据。

（2）台车与星轮的相互作用力呈周期性变化规律，且在尾部弯道进入水平回程道时作用力急剧增大且达到最大峰值，后又急剧回降至正常状态；台车经传统齿板齿形星轮进入水平回程道时作用力达到230 kN，远大于台车起拱临界推力值157 kN，导致烧结机台车最大起拱量达50～60 mm。

（3）通过对某360 m^2 烧结机的传统星轮齿板齿形进行优化仿真，获得了相对“瘦小”的修正齿形，其可将尾部星轮与台车之间的作用力由230 kN降低至165 kN，将起拱量控制在5 mm以下。

参考文献：

[1] 叶恒棣. 钢铁烧结烟气全流程减排技术[M]. 北京：冶金工业出版社，2019.
YE Hengdi. Full-process emission reduction technology of steel sintering flue gas [M]. Beijing: Metallurgical Industy Press, 2019.

[2] 卢兴福，刘克俭，于耀涛，等. 烧结机头尾端部密封技术改进与应用[J]. 烧结球团，2020，45(3)：8－12.
LU Xingfu, LIU Kejian. YU Yaotao. et al. Improvement and application discussion on air-sealing technology of sintering machine [J]. Sintering and pelletizing, 2020, 45(3): 8－12.

（下转第80页）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[7] 王超,岳勇,甄众,等. 烧结烟气脱硝SCR工艺补燃系统节能降碳的探索[J]. 天津冶金,2021,(5):55-59.
WANG Chao,YUE Yong,ZHEN Zhong,et al. An exploration on energy saving and carbon reduction of supplementary combustion system in sintering gas SCR denitration technics [J]. Tianjin Metallurgy,2021,(5):55-59.

[8] 王兆才,刘臣,李继淦,等. 烧结烟气CO_x的生成机理及减排措施[J]. 烧结球团,2021,46(1):15-22.
WANG Zhaocai,LIU Chen,LI Jigan,et al. Generation mechanism and emission reduction measures of CO_x in sintering flue gas [J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(1):15-22.

[9] 周海成,高志芳,龙红明,等. 烧结烟气中NO_x治理技术及发展趋势[J]. 洁净煤技术,2021(5):77-88.
ZHOU Haicheng,GAO Zhifang,LONG Hongming,et al. Governance technology and development trend of NO_x in sintering [J]. Clean Coal Technology,2021(5):77-88.

[10] 朱廷钰. 烧结烟气净化技术[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
ZHU Tingyu. Sintering flue gas purification technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press,2008.

(上接第12页)

[3] 宋良友,许建军. 烧结机台车起拱原因分析及对策[C]//2010年河北省冶金学会炼铁技术暨学术年会论文集. 石家庄:河北省金属学会,2010:335-339.
SONG Liangyou,XU Jianjun. Cause analysis and countermeasures of sintering machine [C]//Annual Meeting of Ironmaking Technology and Academic of Metallurgy Societyof Hebei Province. Shijiazhuang: Metallurgy Societyof Hebei Province,2010:335-339.

[4] 乔红军. 基于虚拟样机技术的带式烧结机动力学仿真[D]. 东北大学,沈阳,2009.
QIAO Hongjun. The dynamic simulation on sintering machine based on virtual prototype technology [D]. Northeastern University,Shenyang,2009.

[5] 白明华,胡国清,邱坤,等. 无起拱烧结机新理论的研究[J]. 机械工程学报,1995,31(6):68-72.
BAO Minghua,HU Guoqing,QIU Kun,et al. New theory of eleminating the suspending of pallets of a sintering machine [J]. Chinese journal of mechanical engineering,1995,31(6):68-72.

[6] 白明华,任素波. 偶数齿烧结机星轮的齿形优化与特性分析[J]. 燕山大学学报,2012,36(1):8-11.
BAI Minghua,REN Subo. Optimization of tooth profile and characteristics analysis of sintering machine with even-number tooth [J]. Journal of Yanshan University,2012,36(1):8-11.

[7] 刘克俭,李文斌,周胜良,等. 带式烧结机台车起拱的力学分析及仿真[J]. 烧结球团,2012,37(2):22-25.
LIU Kejian,LI Wenbin,ZHOU Shengliang,et al. Analysis and simulation of arching mechanics of straight-line sintering machine pallets [J]. Sintering and pelletizing,2012,37(2):22-25.

[8] 李文斌. 带式烧结机尾部回程道台车起拱技术研究及仿真[D]. 湘潭:湘潭大学,2012.
LI Wenbin. Trolley arching technology research and simulation on tail return channel of belt sintering machine [D]. Xiangtan University,Xiangtan,2012.

[9] 李国权,王勤福,李圭文. 烧结机台车起拱原因分析及处理[J]. 烧结球团,2019,44(4):27-30.
LI Guoquan,WANG Qinfu,LI Guiwen. Cause analysis and treatment of sintering machine [J]. Sintering and pelletizing,2019,44(4):27-30.

[10] 邓勇,赖强. 川威烧结机台车起拱现象分析与处理[J]. 四川冶金,2021,43(3):40-42.
DENG yong,LAI Qiang. Analysis and treatment of sintering machine for Chuanwei [J]. Sichuan Metallurgy,2021,43(3):40-42.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net