

doi:10.16576/j.ISSN.1007-4414.2024.06.009

锂电池涂布机主辊磨削静力仿真*

邹 胜, 江正贤, 刘文可, 曹稚英, 文 涛

(惠州市赢合科技有限公司, 广东 惠州 516025)

摘要: 在对锂电池涂布机主辊进行磨削加工时, 磨削力对主辊辊面挠度的影响较大, 为研究主辊结构、磨削深度、磨削位置对主辊挠度的影响, 该文采用理论公式计算了磨床磨削主辊时主辊受到的磨削力, 然后运用 ANSYS 有限元仿真软件对穿轴式、空心式两种主辊进行了静力仿真, 并比较了两种主辊辊面的挠度变化, 最后重点研究了不同磨削深度、不同磨削位置对空心式主辊挠度的影响。在磨削深度一定的条件下磨削主辊不同位置时, 主辊左侧辊面 z 方向挠度近似满足二次曲线关系。其研究结果对主辊结构设计和磨削工艺改善有一定的指导意义。

关键词: 锂电池涂布机主辊; 磨削力; 静力仿真; 辊面挠度

中图分类号: TG58

文献标识码: A

文章编号: 1007-4414(2024)06-0031-04

Static Simulation of Main Roller Grinding in Lithium Battery Coating Machine

ZOU Sheng, JIANG Zheng-xian, LIU Wen-ke, CAO Zhi-ying, WEN Tao

(Huizhou Yinghe Technology Co., Ltd, Huizhou 516025, Guangdong, China)

Abstract: When grinding the main roller of a lithium battery coating machine, the grinding force has a significant impact on the deflection of the main roller surface. In order to study the influence of the main roller structure, grinding depth and grinding position on the deflection of the main roller, the theoretical formula was used to calculate the grinding force applied to the main roller during grinding by a grinder. Then, the ANSYS finite element simulation software was used to perform static simulation on two types of main rollers, namely, shaft-through type and hollow type, to compare the deflection changes of the two types of main rollers. Finally, the influence of different grinding depths and different grinding positions on the deflection of the hollow type main roller was emphatically studied. When the grinding depth is constant, the deflection of the left roller surface in Z direction of the main roller approximately satisfies a quadratic curve relationship when grinding at different positions of the main roller. The research results have certain guiding significance for the structural design and grinding process of the main roller.

Key words: main roller of lithium battery coating machine; grinding force; static simulation; deflection of roller surface

0 引言

磨削加工是机械制造过程中的重要加工工艺, 其直接影响着零件的加工精度和加工质量。在锂电池生产过程中, 供料系统通过定量螺杆泵将混合均匀后的浆料送入涂布机的挤压模头, 挤压模头利用压力将浆料从模头狭缝中挤出^[1], 在主辊的转动下, 浆料会连续涂覆在箔材上。而主辊的加工精度和表面质量会影响涂布的均匀性, 所以主辊加工的最后一道磨削工序尤为重要。而且市场对高速、高精度涂布技术的要求越来越高, 对锂电池涂布机主辊的加工精度要求也越来越高。由于主辊结构是圆柱状, 因此对主辊的磨削属于外圆磨削。外圆磨削是最基本的、也是应用最广泛的磨削工艺, 广大科技工作者对外圆磨削都有深入研究。刘伟等^[2]以 TC4 钛合金为研究对象进行了高速外圆磨削实验, 分析了外圆磨削工艺参数对工件表面完整性的影响规律; 马少奇^[3]对 18CrNiMo7-6

钢进行了外圆磨削试验, 研究了磨削参数对磨削力、表面完整性主要指标(残余应力和粗糙度)的影响; 朱浩阳等^[4]研究了外圆纵向磨削(工件转速、磨削深度和纵向进给速度)对 18CrNiMo7-6 钢表面粗糙度和表层残余应力的影响。目前, 关于外圆磨削时磨削力对工件挠度的影响研究较少, 故有必要研究磨削过程中锂电池涂布机主辊的挠度变化。笔者运用 ANSYS 有限元仿真软件对空心式主辊进行了不同磨削深度、不同磨削位置的磨削静力仿真, 得出了主辊辊面挠度的变化规律。所得结论对主辊结构设计和磨削工艺改善有一定的应用参考作用。

1 磨削力介绍及理论计算

1.1 磨削力

磨削加工是指用磨具去除工件上多余材料的加工方法, 通常采用砂轮对工件进行磨削。在一般外圆磨削情况下, 将磨削力(作用于砂轮与工件之间的

* 收稿日期: 2024-02-28

作者简介: 邹 胜(1990-), 男, 湖北孝感人, 硕士研究生, 中级工程师, 研究方向: 锂电设备结构、流体仿真及优化。

力)分解为互相垂直的三个分力,如图1所示。 F_t 为切向磨削力(砂轮转动的切线方向); F_n 为法向磨削力(砂轮和工件接触面的法线方向); F_a 为轴向磨削力(纵向进给方向)。切向磨削力 F_t 是确定磨床电动机功率的主要参数;法向磨削力 F_n 作用于砂轮的切入方向,其压向工件,使砂轮轴和工件发生变形,从而加速砂轮钝化,进而直接影响工件精度和加工表面质量;轴向磨削力 F_a 数值很小,一般不考虑^[5]。

在磨削加工中,法向磨削力的数值大于切向磨削力,其比值 $F_n/F_t \approx 1.5 \sim 4$,锂电池涂布机主辊材质是40Cr,属于合金钢,材质与GCr15类似,取 $F_n/F_t \approx 2.7$ 。

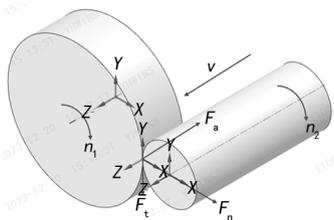


图1 外圆磨削力

1.2 磨削力计算

根据锂电池涂布机主辊的结构特点,采用纵向外圆磨削。磨床型号为MK 1 380×4 000,粗磨时工作台移动速度为1 m/min,精磨时工作台移动速度为0.33 m/min,砂轮使用的是铬刚玉磨料,砂轮直径为900 mm,砂轮宽度为80 mm,砂轮粒度为80 L,砂轮转速为400~600 r/min,主辊转速为10~15 r/min。车间磨床磨削主辊现场示意图如图2所示。

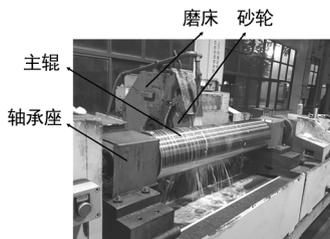


图2 车间磨床磨削主辊现场示意图

为了磨削主辊预留辊面余量,使其达到设计精度,主辊与砂轮做相对运动,分别为主辊的圆周运动、砂轮的横向进给运动、砂轮的旋转运动、砂轮的纵向运动。主辊加工后圆度或圆柱度超差是磨削加工中容易出现的主要问题。影响主辊磨削精度的因素较多,主要有定位基准因素、机床精度因素、砂轮因素等。影响磨削力大小的因素有很多,主要因素有工件材料、磨削用量、砂轮的特性与修整等。在车间一般磨削一根主辊需要8 h左右,且磨削后的主辊表面质量要求较高,辊面与轴承位的圆跳动 $\leq 1 \mu\text{m}$,光洁度

$\leq 0.2 \text{ Ra}$,圆柱度 $\leq 3 \mu\text{m}$ 。在磨削外圆时,磨削力可由以下公式进行计算^[6]:

$$F_n = LF_n' \quad (1)$$

$$F_n' = K\pi^\varepsilon [c_1]^\gamma [v_w]^{e-1} [v_s]^{1-2\varepsilon} [v_r]^\varepsilon [d_w] \times [d_s/(d_w + d_s)]^{1-\varepsilon} \quad (2)$$

$$Z_w' = a_p v_w = v_r d_w \pi \quad (3)$$

$$v_s = d_s \pi n_1 \quad (4)$$

$$v_w = d_w \pi n_2 \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} [(1+n) + \alpha(1+n)] \quad (6)$$

$$\gamma = \beta(1-n) \quad (7)$$

$$0 \leq \gamma \leq 1, 0.5 \leq \varepsilon \leq 1 \quad (8)$$

$$0 < \alpha < \frac{2}{3}, \frac{1}{2} < \beta < \frac{2}{3} \quad (9)$$

式中: F_n' 为单位宽度法向磨削力,N; K 为磨削系统刚度, N/mm^2 ; L 为砂轮宽度,mm; c_1 为与磨刃密度有关的系数; v_w 为工件速度,m/s; n_2 为工件转速,r/min; v_s 为砂轮速度,m/s; n_1 为砂轮转速,r/min; v_r 为砂轮进给速度,m/s; d_w 为工件直径,mm; d_s 为砂轮直径,mm; Z_w' 为单位宽度金属切除率; a_p 为磨削深度,mm; α 和 β 与磨刃在砂轮圆周表面上的分布有关。

取 $n=0.5$, $\alpha=0.5$, $\beta=0.6$,则 $\varepsilon=0.875$, $\gamma=0.3$ 。由于主辊材质是40Cr,取 $K=2\ 000 \text{ N}/\text{mm}^2$, $L=80 \text{ mm}$, $c_1=4\ 420 \text{ mm}^{-3}$, $n_2=15 \text{ r}/\text{min}$, $n_1=600 \text{ r}/\text{min}$, $d_w=295 \text{ mm}$, $d_s=900 \text{ mm}$, $a_p=0.008 \text{ mm}$,代入上式得: $F_n'=23\ 085 \text{ N}$, $F_n=1\ 846.8 \text{ N}$ 。

根据 $F_n/F_t \approx 2.7$ 计算得出切向磨削力 $F_t=684 \text{ N}$ 。由上述磨削力计算方法可得到不同磨削深度对应的法向磨削力和切向磨削力大小,结果如表1所列。

表1 磨削深度对应的磨削力

磨削深度/ μm	法向磨削力/N	切向磨削力/N
2	549	203
4	1 007	373
6	1 435.9	531.8
8	1 846.8	684

2 主辊有限元模型建立及边界条件设置

2.1 有限元模型的建立

文中所使用的主辊组件主要由主辊、角接触球轴承、轴承座和马达组成,主辊在两个轴承座之间,马达安置在轴承座一端,为主辊转动提供动力。轴承选用B7220-C,马达采用的品牌是科尔摩根,型号为CH092C-11-2105,质量为41.3 kg。锂电池涂布机模头涂布现场情况如图3所示。

在运用SolidWorks对涂布机主辊进行三维建模

时,由于实际的主辊组件零件较多,为了保证该模型的求解速度和精度,需要对模型进行简化处理,忽略对主辊刚度和强度影响很小的细小特征,如圆孔、圆角、倒角、螺纹等。主辊表面采用镀铬加丝处理,以增强主辊的耐腐蚀性能、抗氧化性能,而轴承座进行调质(HB255)热处理。主辊组件各零件材质属性如表2所列。使用 MultiZone、六面体和四面体法对主辊组件模型进行网格划分,其中主辊外壁采用 MultiZone 法划分网格,对主辊芯轴倒圆角处细化网格,对砂轮与主辊接触区域网格进行局部加密。网格单元总数为 426 555 个,节点总数为 848 191 个。

表 2 主辊组件材质属性

零件	材质	密度 /(kg/m ³)	弹性模量 /GPa	泊松比	屈服强度 /MPa
主辊、轴承座	40Cr	7 850	215	0.278	785
轴承	GCr15	7 850	207	0.3	518.42
其它零件	S45C	7 890	209	0.269	355

2.2 边界条件设置

在 ANSYS Workbench 中将模型零部件的接触类型设置为 Bonded,即接触面之间不存在切向的相对滑动或法向的相对分离。对轴承座垫板底部固定支撑约束,施加竖直向下的重力加速度,大小为 9.81 m/s²,根据磨削深度确定切向磨削力和法向磨削力,具体数值参照表 1。边界条件设置如图 4 所示。

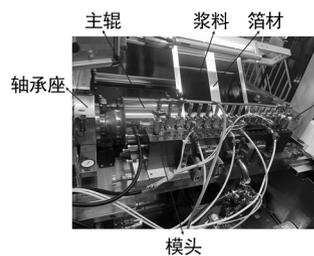


图 3 模头涂布现场示意图

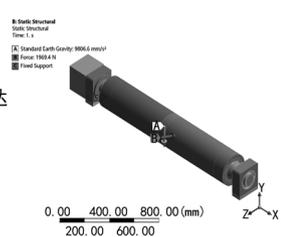


图 4 主辊边界条件(磨削深度 8 μm)

3 主辊磨削过程静力学仿真

3.1 不同芯轴结构对主辊挠度的影响

穿轴式主辊和空心式主辊的外径和内径都一样,只是主辊芯轴结构不同。穿轴式主辊的芯轴两端是一体的,而空心式主辊两端的芯轴是分开的,两端独立支撑主辊。空心式主辊芯轴结构支撑段长度为 50 mm,主辊外径 295 mm,内径 230 mm,辊面幅宽为 1 650 mm。穿轴式主辊、空心式主辊结构剖面图如图 5、6 所示。由于浆料是从模头唇口 z 方向涂覆在基材上,主辊辊面 z 方向变形会影响涂布的均匀性,故在磨削主辊时重点关注左侧(磨削辊面一侧)辊面 z

方向变形及挠度。主辊受自身重力作用而下垂,在竖直方向(y 方向)会产生一定的挠度,也会影响浆料涂布的均匀性。

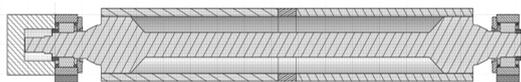


图 5 穿轴式主辊结构剖面图

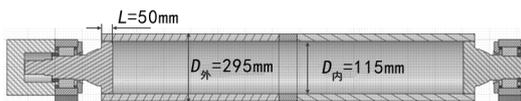


图 6 空心式主辊结构剖面图

运用 ANSYS 软件对穿轴式、空心式两种主辊进行静力仿真,结果如图 7~12 所示。

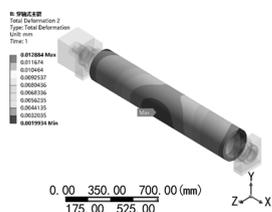


图 7 穿轴式主辊辊面整体变形

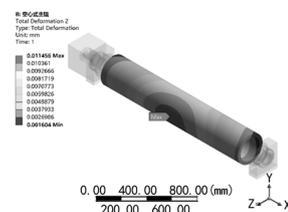


图 8 空心式主辊辊面整体变形

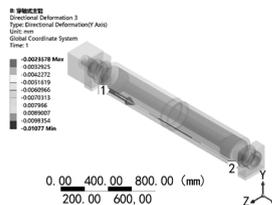


图 9 穿轴式主辊下辊面 y 方向变形

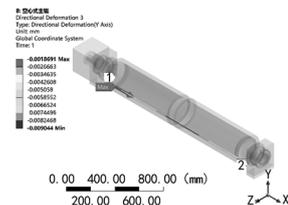


图 10 空心式主辊下辊面 y 方向变形

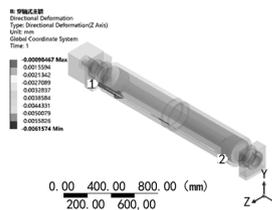


图 11 穿轴式主辊左侧辊面 z 方向变形

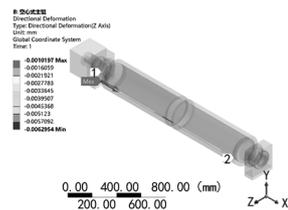


图 12 空心式主辊左侧辊面 z 方向变形

由图 7、8 结果可知,在磨削主辊中间位置、磨削深度为 8 μm 时,穿轴式主辊辊面整体变形最大值(12.88 μm)比空心式主辊(11.46 μm)要大,最大变形位置都在磨削区域;由图 9、10 可知,穿轴式主辊下辊面 y 方向变形最大值比空心式主辊大,下辊面 y 方向挠度(下辊面 y 方向变形最大值-下辊面 y 方向变形最小值)比空心式主辊大;由图 11、12 可知,穿轴式

主辊左侧辊面 z 方向变形最大值、挠度与空心式主辊变化很小。两种主辊辊面最大变形及挠度如表 3 所列。穿轴式主辊和空心式主辊最大等效应力分别为 8.84 MPa、4.88 MPa, 主辊材料为 40Cr, 屈服强度为 785 MPa, 安全系数取 1.5(根据机械设计中对于静载荷中的塑性材料安全系数取 1.2~2.5), 许用应力为 523.33 MPa, 主辊最大应力远小于许用应力, 两种主辊结构强度均符合设计要求, 其中空心式主辊最大等效应力更小。因为主辊穿轴式设计增加了其质量, 而主辊竖直方向变形主要是由重力引起, 故空心式主辊结构更优。后续采用空心式主辊进行仿真分析。

表 3 不同芯轴结构主辊辊面最大变形及挠度

参数	穿轴式	空心式
磨削深度/ μm	8	8
下辊面 y 方向变形最大值/ μm	10.77	9.04
左侧辊面 z 方向变形最大值/ μm	6.16	6.3
下辊面 y 方向挠度/ μm	8.41	7.17
左侧辊面 z 方向挠度/ μm	5.18	5.28

3.2 不同磨削深度对空心式主辊挠度的影响

砂轮磨削深度指每次磨削操作中砂轮切削的材料厚度或高度, 它直接影响磨削速率、工件表面质量和砂轮的使用寿命。不同的工件材料对砂轮磨削深度的要求不同, 通常硬度较高的材料需要较小的磨削深度, 而较软的材料可以使用较大的磨削深度。根据主辊磨削工艺要求, 进给精磨 2 μm , 进给半精磨 8 μm , 在磨削深度分别为 2 μm 、4 μm 、6 μm 、8 μm 时, 设置对应的法向磨削力和切向磨削力, 仿真比较空心式主辊辊面挠度变化情况。结果如图 13 所示。由图 13 可知, 在对主辊中间位置磨削时, 随着磨削深度的增大, 主辊下辊面 y 方向挠度和左侧辊面 z 方向挠度逐渐增大。磨削力对下辊面 y 方向挠度影响较小, 而对左侧辊面 z 方向挠度影响较大, 故后面只考虑左侧辊面 z 方向挠度。

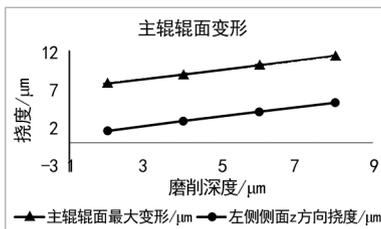


图 13 空心式主辊辊面挠度

3.3 不同磨削位置对空心式主辊挠度的影响

在磨削主辊时, 从主辊左端到右端, 每间隔 330 mm 取一个打磨位置, 共取 5 个位置, 如图 14 所示。

在磨削深度一定的情况下, 从空心式主辊打磨位置 1~5 进行仿真, 结果如图 15 所示。由图 15 可知, 左侧辊面 z 方向挠度先增大后减小, 在正中间位置挠度值达到最大, 近似满足二次曲线关系。在磨削深度为 6 μm 时, 打磨位置与主辊辊面挠度近似满足如下二次曲线关系: $y = -4.7357x^2 + 7.8866x + 0.8142$ (拟合相关系数为 0.9993, 接近 1), 其中 y 为主辊左侧辊面 z 方向挠度, x 为打磨位置, 如图 16 所示。

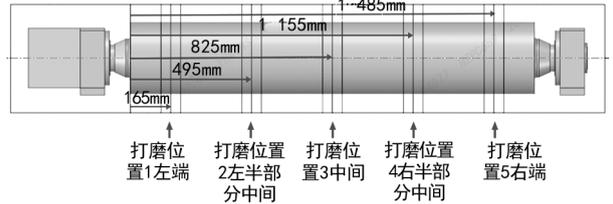


图 14 空心式主辊磨削位置

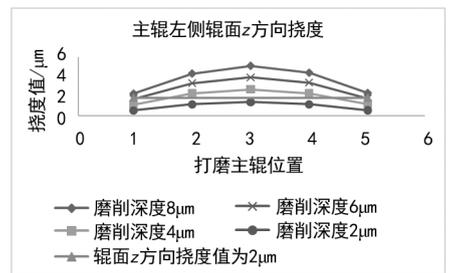


图 15 磨削深度对主辊左侧辊面 z 方向挠度影响

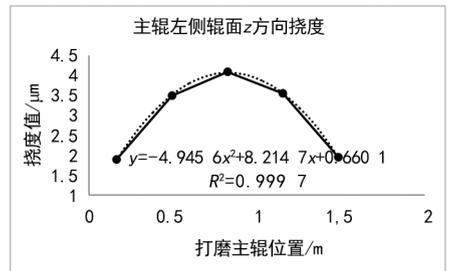


图 16 磨削深度 6 μm 时主辊左侧辊面 z 方向挠度影响

在磨削位置一定的情况下, 随着磨削深度的增大, 左侧辊面 z 方向挠度也逐渐增大。当主辊左侧辊面 z 方向挠度保持在 2 μm 时, 打磨位置 2、3、4 的挠度值要求磨削深度在 2~4 μm 之间, 而打磨位置 1、5 的挠度值要求磨削深度在 6~8 μm 之间, 这可指导主辊磨削加工。

4 结语

文中根据理论公式计算了不同磨削深度下主辊受到的磨削力, 并运用 ANSYS 软件对穿轴式、空心式两种主辊进行了静力仿真, 由仿真结果可知, 主辊空心式设计结构更优。在磨削位置一定时, 随着磨削深度的增大, 空心式主辊左侧辊面 z 方向挠度也逐渐增

(下转第 40 页)

图16是上颈部扭矩的对比。在0.050 s之前有限元曲线与实物接近。0.050~0.100 s之间有限元曲线平稳上升,而实物曲线经历了先迅速上升到0.060 s附近峰值、又下降到0.090 s附近谷值、再重新上升的一个过程,曲线走势不同。实物试验在这个过程中,假人头部刚接触头枕时受到头枕的阻碍而轻微正向扭转,对应了0.060 s附近的峰值;然后头部跟着头枕一起向后变形过程中在惯性作用下产生反向扭转,对应了0.090 s附近的谷值,有限元分析未能模拟出这个现象。有限元曲线在0.100 s之后重新落入了实物曲线的范围内,峰值和走势与实物接近。两者的相关系数为0.859,拟合度较为良好。

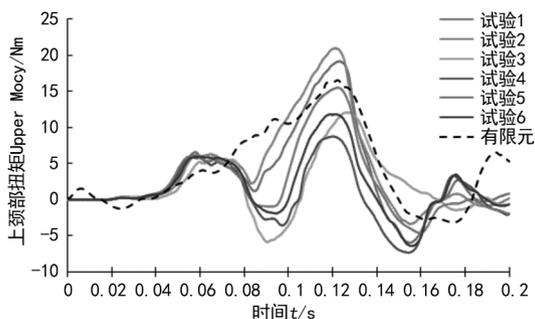


图16 有限元分析与实物试验的上颈部扭矩对比

有限元模型虽然在曲线上与实物存在差异,但是整体趋势一致、拟合度均较高,最终的分值与实物结果十分接近。文中所建立的有限元模型确实能够提供一较为准确的预测,与实物试验的拟合度良好。有限元分析结果与实物试验互相验证,证明了优化方案的有效性。

3 结语

文中根据C-NCAP 2024版的鞭打试验规则对某座椅总成进行测试,得分为3.72分。根据测试结果分析出NIC与上颈部扭矩的失分原因。基于试验状态建立了有限元模型,得到计算结果为3.57分,有限元分析结果与实物试验结果相近,可以以此为基础进

行优化方案的研究。

根据实物试验的分析结果,为了改善NIC和上颈部扭矩得分制定了3个优化方案:①上肩部区域靠背发泡厚度从背面减小10 mm;②头枕杆材料由ZSTE340改为B340;③头后间隙由32.6 mm改为26.5 mm。按照此方案更新有限元模型,得到计算结果为4.08分,与初始方案相比总得分提升了14%。NIC和上颈部扭矩得分均得到改善。

按照优化方案制造批量样件并进行了6次实物试验,实物试验的结果平均为4.20分,整体体现了良好的稳定性。对比实物试验之间的曲线可知,影响总分波动的主要评价指标仍是NIC和上颈部扭矩。将有限元分析和实物试验的结果放在一起对比,不仅得分接近,而且失分点完全相同,得分分布规律一致。胸部加速度和头部加速度曲线在NIC峰值时间范围内都与实物接近,对NIC最大值的模拟偏差并不大;上颈部扭矩曲线整体处在实物曲线的波动范围之内。有限元分析结果曲线变化趋势与实物试验大致相同,仅在一些细节上存在差异。结果表明,基于有限元计算分析的优化方案通过实物试验也得到了验证,证明了其有效性,且与有限元结果一致。

参考文献:

- [1] 胡远志,胡源源,刘西,等.基于LS-DYNA的某座椅鞭打性能分析和优化[J].重庆理工大学学报(自然科学),2017(6):8-14.
- [2] Ivancic P C. Cervical neural space narrowing during simulated rear crashes with anti-whiplash systems[J].European Spine Journal, 2012(21):879-886.
- [3] Siegmund G P, Winkelstein B A, Ivancic P C, et al. The anatomy and biomechanics of acute and chronic whiplash injury[J].Traffic Injury Prevention, 2009, 10(2):101-112.
- [4] 张爱法,李志,娄磊,等.鞭打试验中NIC的两种典型失效模式分析[J].汽车实用技术,2023,48(23):145-149.
- [5] 李永攀,赵海英,沈军,等.某车型座椅鞭打性能改进[J].汽车零部件,2019(3):35-39.

(上接第34页)

大;在磨削深度一定时,从空心式主辊左端到右端,左侧辊面z方向挠度先增大后减小,近似满足二次曲线关系。其研究结果能反映磨削主辊的一些规律,可作为磨削主辊的理论依据。在实际生产中,涂布机主辊采用空心式结构后,其主辊辊面挠度得到改善,降低了磨削主辊的难度。

参考文献:

- [1] 白自艳.涂布机的挤压模头研究和送料远程监控系统开发[D].西安:长安大学,2019.

- [2] 刘伟,邓朝晖,黄宇岑.TC4钛合金高速外圆磨削表面完整性实验[J].宇航材料工艺,2017,47(4):66-70.
- [3] 马少奇.18CrNiMo7-6钢外圆磨削力及表面完整性研究[D].郑州:郑州大学,2021.
- [4] 朱浩阳,鄧伟,张银霞,等.外圆纵向磨削工艺对18CrNiMo7-6钢表面完整性的影响[J].金刚石与磨料磨具工程,2022,42(3):300-306.
- [5] 邱言龙,李德富.磨工实用技术手册[M].2版.北京:中国电力出版社,2018.
- [6] 任敬心,华定安.磨削原理[M].北京:电子工业出版社,2011.