

砂带磨削静态接触理论建模与有限元仿真

李建勇,程继发,樊文刚,吕洪宾

(北京交通大学 机械与电子控制工程学院,北京 100044)

摘 要:针对砂带表面磨粒与工件微观静态接触行为问题,提取了砂带表面形貌特征并重建,基于赫兹接触理论建立了包含打磨压力、压入深度、磨粒刃端曲率半径、攻角等参量的静态接触理论模型,研究了磨粒与工件表面接触区域和接触应力分布规律.通过有限元仿真对不同打磨压力下的接触应力、接触面积和压入深度进行了分析和模型验证.结果表明:在一定误差范围内仿真值与理论值吻合,验证了理论模型的正确性和有效性;磨粒与工件表面接触应力、接触面积和压入深度随打磨压力的增大而增大并于 250 N 时趋于稳定,同样接触磨粒数目逐渐增多并趋于稳定.

关键词:砂带磨削;磨粒;微观接触;有限元仿真

中图分类号:TG74.2 **文献标志码:**A

Theory modeling and finite element simulation of belt grinding static contact

LI Jianyong, CHENG Jifa, FAN Wengang, LYU Hongbin

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The problem of the micro-static contact behavior between the abrasive grains and the workpiece, the surface features of the abrasive belt are collected and reconstructed. Based on the Hertzian contact theory, a theoretical model involving parameters of grinding pressure, indentation depth, grains' lip-end curvature radius and attack angle is established to illustrate the static contact behavior. The distribution rule of the contact area and the contact stress between the abrasive grains and the workpiece surface is obtained. Then, the finite element simulation is conducted to validate the theoretical model through analyzing contact stress, contact area and indentation depth under different grinding pressure. The results show that the simulated values are in good agreement with the theoretical values within a limited error range, which prove the correctness and the validity of the theoretical model. It can be seen that the contact stress, the contact area and the indentation depth increase along with the growth of grinding pressure and become stable when it reaches 250 N. Meanwhile, the number of contact abrasive grains also gradually increases and stabilizes.

Keywords: belt grinding; grain; microscopic contact; finite element simulation

收稿日期:2018-04-15
基金项目:国家自然科学基金(51505025);中央高校基本科研业务费专项资金(2017JBM043)
Foundation items: National Natural Science Foundation of China(51505025); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2017JBM043)
第一作者:李建勇(1962—),男,北京市人,教授,博士,博士生导师.研究方向为钢轨打磨技术与装备. email: jyli@bjtu.edu.cn.
引用格式:李建勇,程继发,樊文刚,等.砂带磨削静态接触理论建模与有限元仿真[J].北京交通大学学报,2018,42(6):125—130.
LI Jianyong, CHENG Jifa, FAN Wengang, et al. Theory modeling and finite element simulation of belt grinding static contact[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(6): 125—130. (in Chinese)

砂带磨削是砂带表面有效接触磨粒对工件表面进行大量重复微量切削的过程,具有高效磨削、冷态磨削、弹性磨削等优点^[1],砂带表面磨粒形状、磨粒间距、磨粒密度和磨粒出刃高度将直接影响磨粒与工件表面的接触区域和接触应力的分布、有效接触磨粒数以及磨粒切削受力,进而对砂带磨削力、材料去除率、工件表面质量和砂带磨损产生影响^[2].

目前,国内外对基于砂带真实形貌特征的研究相对较少.王文玺等^[3]通过获得砂带表面磨粒密度、磨粒出刃高度及顶锥角等评价参数,从宏观整体到局部磨粒对表面形貌特征完成了定性和定量评价.张叠等^[4]分析了 ZrO_2 工程陶瓷进行砂带磨削加工过程中,砂带粒度和磨削用量的不同对磨削加工效率、工件表面质量的影响规律.黄云等^[5]基于单位面积内每颗磨粒所受正压力相等的假设,推导了磨粒最大划痕深度与材料硬度、所受正压力、锥顶角大小和有效磨粒粒度的关系.刘伟等^[6]选用截角八面体模拟了砂带表面金刚石磨粒,并且基于 Johnson-Holmquist ceramic 硬脆材料本构模型,采用有限元网格法进行单颗磨粒直线磨削仿真.Mezghani 等^[7]运用分水岭切割算法对砂带表面磨粒信息进行提取,获得磨粒密度、平均出刃高度和磨粒平均顶锥角 3 个评价指标,并以此描述砂带表面形貌特征.Zhao 等^[8]以单个球形模型为基础推导了 3 个材料变形阶段对应的接触面积和压力.Zhang 等^[9]提出一种基于神经网络的砂带磨削接触力分布的计算方法.Khellouki 等^[10]研究了砂带磨损和磨削工艺参数对工件表面粗糙度的影响规律,指出平均接触压力和有效接触磨粒数为工艺参数中的关键因子.

上述文献主要是对砂带表面磨粒进行宏观假设描述和接触分析,未对真实参数特征的砂带表面磨粒微观接触进行分析.本文作者从真实参数特征磨粒的角度出发,对砂带磨削静态接触理论建模深入研究,首先对砂带表面形貌特征进行提取并重建,建立磨粒与工件表面静态接触理论模型,研究接触区域、接触应力分布规律;进而对不同打磨压力下的接触应力、接触区域和压入深度进行有限元仿真,仿真值和理论计算对比分析验证理论模型的正确性和有效性.

1 砂带表面形貌特征提取与重建

砂带采用“静电植砂”工艺,将破碎机碾压后制得的针状磨粒大体均匀地植在砂带表面,因植砂过程中磨粒发生尖端放电效应而使绝大部分磨粒刃尖朝上,从而使外露的磨粒更接近于球顶圆锥模型,对

于单颗磨粒 i ,由刃端曲率半径 R_i 和攻角 α_i 2 个参数描述的简化模型如图 1 所示.

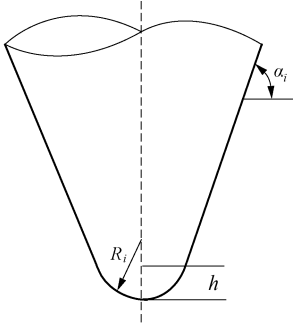


图 1 单颗磨粒形貌示意图

Fig.1 Single abrasive morphology

磨粒顶端球形压力工作表面的最大深度为

$$h = R_i (1 - \cos \alpha_i) \tag{1}$$

通过基于白光共聚焦原理的三维表面形貌轮廓仪可以测得砂带表面磨粒分布三维点云数据,三维表面形貌轮廓仪如图 2 所示,并通过 Matlab 软件将三维点云数据生成三维曲面如图 3 所示.

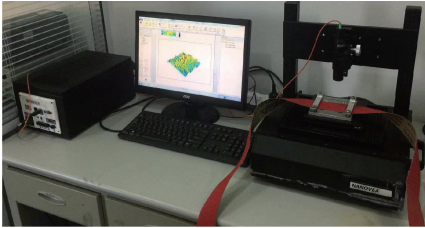


图 2 三维表面形貌轮廓仪

Fig.2 Three-dimensional surface topography meter

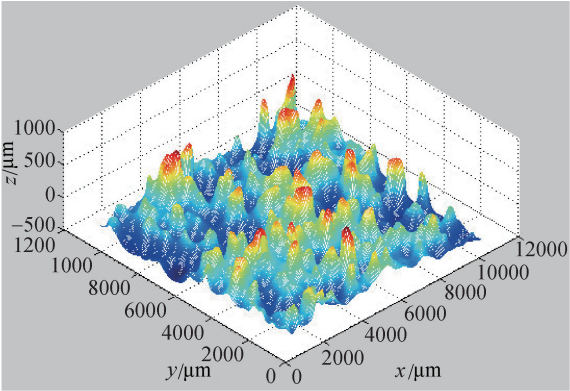


图 3 三维曲面示意图

Fig 3 Three-dimensional surface diagram

由图 3 可知,三维坐标点 (x, y, z) 处的磨粒高度为 z ,通过比较相邻八点高度得高度差^[1]

$$\Delta z(k, l) = z_i(k, l) - z(s, r) \tag{2}$$

式中: s 和 r 表示磨粒 i 周围的 8 个磨粒处的横、纵坐标值, $z(s, r)$ 为磨粒 i 周围的 8 个磨粒的高度; s 取 $k-1, k, k+1$; r 取 $l-1, l, l+1$; k 和 l 为磨粒 i 处的横、纵坐标.

如果所有的 $\Delta z(k, l) > 0$, 则 $z_i(k, l)$ 被标记为砂带表面磨粒顶点(“+”), 通过 Matlab 标记砂带表面磨粒顶点如图 4 所示。

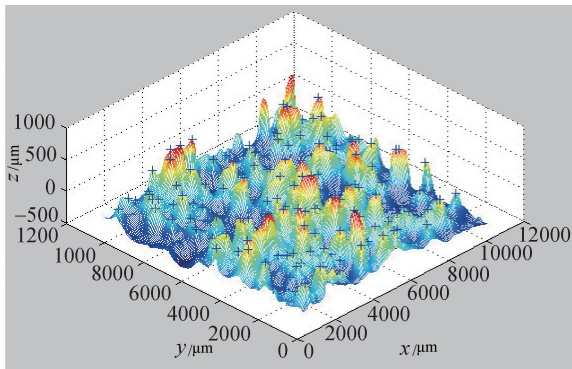


图 4 磨粒顶点分布示意图

Fig.4 Abrasive grains vertex distribution diagram

对于磨粒球顶表面, 磨粒 i 分别沿坐标系 x 、 y 方向的刃端曲率半径分别为^[1]

$$R_{ix}(k, l) = (180(\Delta x)^2) / (2z_{k-3, l} - 27z_{k-2, l} + 270z_{k-1, l} - 490z_{k, l} + 270z_{k+1, l} - 27z_{k+2, l} + z_{k+3, l}) \quad (3)$$

$$R_{iy}(k, l) = (180(\Delta y)^2) / (2z_{k, l-3} - 27z_{k, l-2} + 270z_{k, l-1} - 490z_{k, l} + 270z_{k, l+1} - 27z_{k, l+2} + z_{k, l+3}) \quad (4)$$

式中: Δx 、 Δy 分别为沿坐标系 x 、 y 方向的采样间距, 磨粒 i 的刃端曲率半径为

$$R_i = (R_{ix} + R_{iy})^{1/2} \quad (5)$$

磨粒攻角沿 x 、 y 方向的分量分别为

$$\tan \alpha_{ix} = d_i / a_{ix} \quad (6)$$

$$\tan \alpha_{iy} = d_i / a_{iy} \quad (7)$$

式中: d_i 为磨粒压入深度; a_{ix} 、 a_{iy} 分别为磨粒沿 x 、 y 方向接触半径, 则攻角为

$$\alpha_i = (\alpha_{ix} + \alpha_{iy}) / 2 \quad (8)$$

由图 4 可知, 全局坐标系 (x, y, z) 下磨粒顶点分布, 通过空间坐标变换求得局部坐标系 (x_i, y_i, z_i) 下磨粒分布模型, 局部坐标系如图 5 所示。图 5 中 (x_0, y_0, z_0) 是全局坐标系下磨粒底面中心点处的三维坐标; (x_1, y_1, z_1) 是全局坐标系下磨粒上任一点处的三维坐标; (x_2, y_2, z_2) 是局部坐标系下磨粒上任一点处的三维坐标点。

通过 Matlab 软件对重建后的砂带表面磨粒三维点云数据进行处理, 生成系统能够识别的数据文件, 并进行砂带形貌曲面建模, 如图 6 所示。

由图 6 可知, 在保留磨粒高度、刃端曲率半径、攻角等主要特征参数后, 重建后的磨粒为球顶圆锥, 符合简化模型。基于 Pro/Engineer 三维建模软件, 将曲面转化为三维实体模型如图 7 所示。

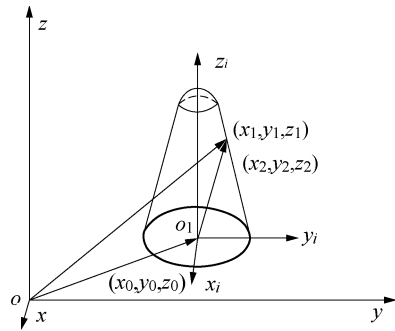


图 5 磨粒三维坐标变换示意图

Fig.5 Three-dimensional coordinate transformation of abrasive grains

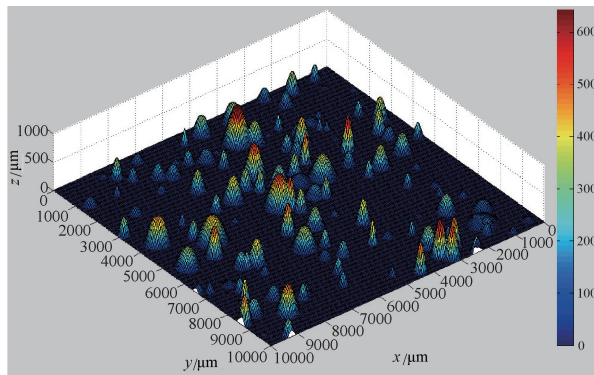


图 6 提取特征后砂带表面形貌

Fig.6 Surface morphology of the abrasive belt after its feature extraction

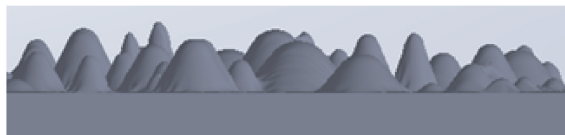


图 7 真实参数特征的砂带表面形貌

Fig.7 Real parametric characteristics of the abrasive belt surface morphology

2 磨粒与工件接触理论模型

假设以砂带表面作为 z 轴原点, 距离工件表面高度 h_0 , 施加打磨压力 F_n 见图 8, 所有高度 $z > h_0$ 的磨粒都与工件表面接触, 高度为 z_i 的磨粒 i 压入工件表面深度为

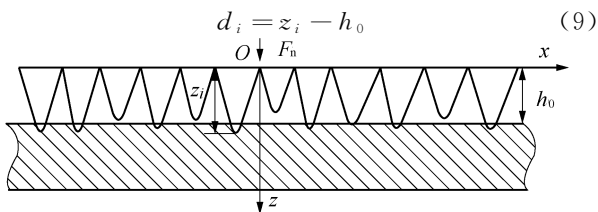


图 8 砂带表面磨粒与工件横截面接触示意图

Fig.8 Cross-sectional contact diagram of abrasive grains on the belt and workpiece

当磨粒压入工件表面深度较小时,即满足条件: $d_i \leq h$,这时仅磨粒顶端球形与工件表面接触;如果 $d_i > h$,这时磨粒锥形表面与工件表面接触.

2.1 磨粒顶端球形接触模型

如果接触应力 $P \leq Y$ (屈服极限),接触表面发生弹性变形,根据赫兹接触理论,磨粒弹性接触作用力、面积分别为^[11]

$$F_s = \frac{4}{3} E^* R_i^{1/2} d^{3/2} \tag{10}$$

$$A_s = \pi a_i^2 = \pi d R_i \tag{11}$$

式中: d 是磨粒弹性压入深度; a_i 为磨粒接触半径; E^* 为等效弹性模量,可得

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \tag{12}$$

式中: E_1 、 E_2 分别为磨粒和工件的弹性模量; ν_1 、 ν_2 为对应泊松比.则弹性接触应力为

$$P_s = F_s / A_s = 0.4 E^* \sqrt{d / R_i} \tag{13}$$

如果 $Y < P \leq H$ (材料硬度),接触表面开始发生弹塑性接触^[12],磨粒弹塑性压入深度为

$$d_1 = (0.92 \frac{H}{E^*})^2 R_i \tag{14}$$

式中: H 为塑性接触应力.

弹塑性接触应力、面积分别为^[13]:

$$P_e = H (1 - 0.6 \frac{\ln d_2 - \ln d}{\ln d_2 - \ln d_1}) \tag{15}$$

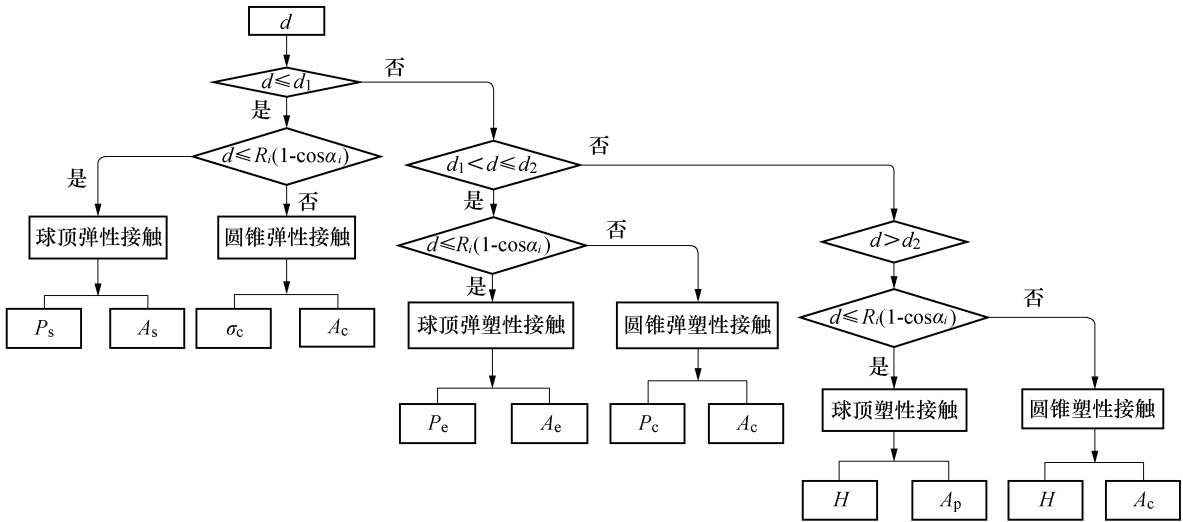


图 9 磨粒与工件接触理论计算流程图

Fig.9 Flow chart for calculating the contact theory of abrasive grains and workpiece

3 有限元仿真验证

采用 Abaqus 有限元软件建立砂带与工件之间的三维仿真模型,陶瓷磨粒与工件材料物理特性参数如表 1 所示,失效准则参数 $D_1 \sim D_5$ 分别取 0.05,

$$A_e = \pi R_i d_1 [1 - 2 (\frac{d - d_1}{d_2 - d_1})^3 + 3 (\frac{d - d_1}{d_2 - d_1})^2] \tag{16}$$

式中: d_2 为磨粒完全塑性压入深度.

磨粒弹塑性接触作用力为

$$F_e = A_e P_e \tag{17}$$

如果 $P > H$,接触表面发生完全塑性接触,此时, $d_2 = 54 d_1$,塑性接触面积、作用力分别为^[14]:

$$A_p = \pi a_i^2 = 2 \pi R_i d_2 \tag{18}$$

$$F_p = 2 \pi d_2 R_i H \tag{19}$$

2.2 磨粒圆锥表面接触模型

磨粒与工件表面发生弹性接触时,弹性接触应力、面积为^[14]

$$\sigma_c = 0.2 E^* \tan \alpha_i \tag{20}$$

$$A_s = \pi d^2 \cot^2 \alpha_i \tag{21}$$

此时,磨粒弹性接触作用力为

$$F_c = \sigma_c A_c \tag{22}$$

如果 $Y < P_e \leq H$,接触表面开始发生弹塑性接触,弹塑性压入深度 $d_1 = d$,此时,弹塑性接触面积为 A_c ,弹塑性接触应力为^[14]

$$P_e = \frac{2}{3} (1 + \ln \frac{E^* \tan \alpha_i}{3Y}) \tag{23}$$

如果 $P_e > H$ 时,接触表面发生完全塑性接触,塑性压入深度 $d_2 = 54 d_1$,具体实施流程见图 9.

3.44, -2.12, 0.002, 0.61, 工件材料本构模型参数中屈服极限 A 为 792 Mpa、硬化模量 B 为 510 Mpa、硬化系数 n 为 0.26、应变率敏感指数 C 为 0.014、热软化系数 m 为 1.03 .

表 1 砂带与工件材料特性参数

Tab.1 Parameters of abrasive belt and workpiece material characteristics

属性	弹性模量/GPa	剪切模量/GPa	泊松比	维氏硬度/Mpa	体积模量/Gpa
结构钢	200	76.9	0.30	235	167
陶瓷	350	143.0	0.22	1 500	208

3.1 不同打磨压力下接触应力仿真分析

选取 10 个不同的打磨压力 F_n ，其值分别为 50,100,⋯,500 N,这样压力的分布范围广,趋势观察更加明显,然后分别利用理论模型和仿真模型计算接触区域内最大点接触应力,选取 100、300、500 N 3 个打磨压力值查看有限元应力仿真结果,如图

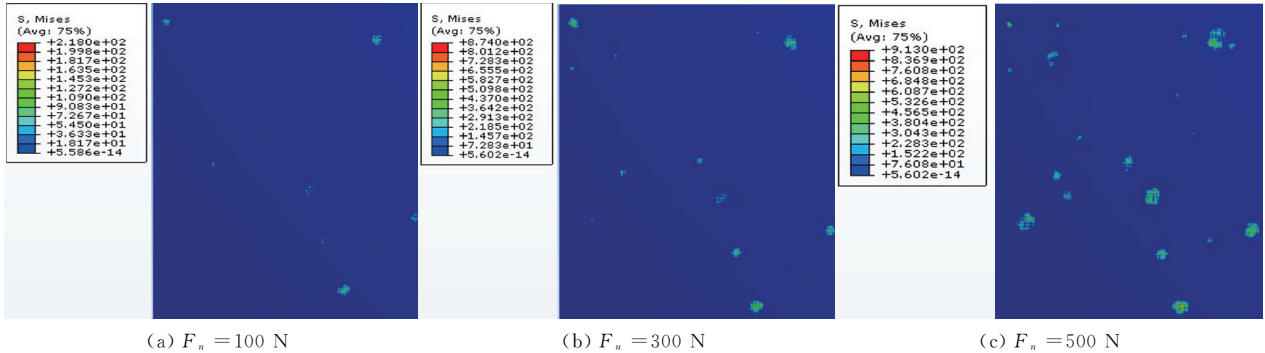


图 10 不同打磨压力下的接触应力仿真结果

Fig.10 Simulation results of contact stress under different grinding pressure

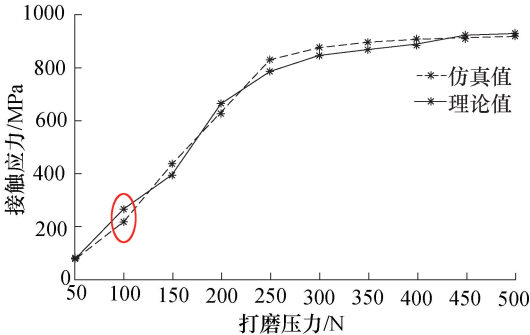


图 11 不同打磨压力的接触应力理论曲线和仿真值

Fig.11 Theoretical curves and simulation values of contact stress under different grinding pressures

3.2 不同打磨压力下压入深度仿真分析

通过仿真求得磨粒最大压入深度与打磨压力的关系,理论计算与仿真获得的压入深度变化曲线见图 12,可以看出,随着打磨压力的增大,压入深度趋于稳定在 70 μm 左右.当 $F_n \leq 200$ N 时,压入深度随打磨压力的增大逐渐增大,同时接触磨粒数目逐渐增多;当 $200 \text{ N} \leq F_n \leq 500$ N 时,随打磨压力的增大,压入深度趋于稳定,同时接触磨粒数目趋于稳定.当 F_n 在 50~200 N 范围内时,理论计算与仿真获得的压入深度值出现较大误差为 13.3%,且误差值在允许的范围 0%~20% 内,仿真值和理论计算

10 所示.

由图 10 知,随着打磨压力的增大,接触应力逐渐增大,同时,接触磨粒数目逐渐增多,接触区域逐渐增大,理论计算与仿真获得的接触应力曲线见图 11.由图可知,随着打磨压力的增大,接触应力趋于稳定在 800 MPa 左右.在打磨压力 $F_n \leq 250$ N 时,随打磨压力 F_n 的增大,接触压力 P 呈现增大趋势,同时有效接触磨粒数目逐渐增多;当 $F_n \geq 250$ N 时,接触压力 P 逐渐趋于稳定.当 F_n 在 50~250 N 范围内时,理论与仿真获得的 P 值出现较大误差为 15%,且误差值在允许的范围 0%~20% 内,故仿真数据与理论计算数据基本吻合.

结果基本吻合.

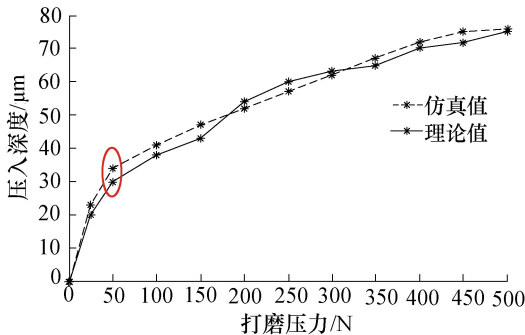


图 12 不同打磨压力的压入深度理论曲线与仿真值

Fig.12 Theoretical curves and simulation values of indentation depth under different grinding pressures

3.3 不同打磨压力下接触面积仿真分析

依据理论模型计算求得砂带表面磨粒与工件接触面积,并通过仿真求得相应打磨压力下磨粒与工件之间的接触面积,理论计算与仿真获得的接触面积变化曲线如图 13 所示.可以看出,随着打磨压力的增大,接触面积趋于稳定在 0.65 mm^2 左右,当打磨压力 $F_n \leq 400$ N 时,接触面积随打磨压力的增大而增大且增加趋势较稳定;当打磨压力 $400 \text{ N} \leq F_n \leq 500$ N 时,接触面积随打磨压力的增大趋于稳

定,同时接触磨粒数目也趋于稳定,当 F_n 在 200~350 N 范围内时,理论与仿真获得的接触面积出现较大误差为 9.3%,且误差值在允许的范围 0%~20%内,仿真值和理论计算结果基本吻合。

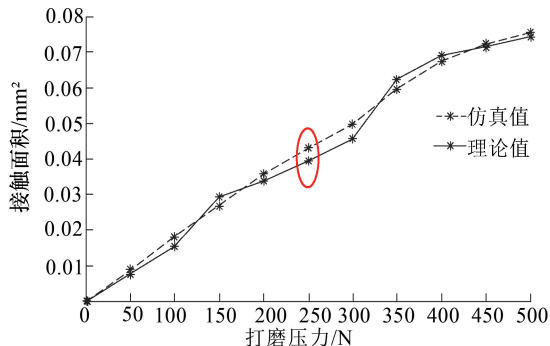


图 13 不同打磨压力的接触面积理论曲线和仿真值

Fig.13 Theoretical curves and simulation values of contact area under different grinding pressures

4 结论

1)对砂带表面特征进行提取并重建,建立了砂带表面磨粒与工件表面接触理论模型,实现了接触区域和接触应力分布的理论计算。获得了打磨压力、压入深度、磨粒刃端曲率半径、攻角等参量对接触面积和接触应力分布的影响规律。

2)通过 Aaqus 有限元仿真和理论模型计算求得不同打磨压力下磨粒与工件之间接触应力、压入深度与接触面积随打磨压力的变化趋势,当打磨压力达到 250 N 时,接触应力、压入深度、接触面积都趋于稳定,接触应力稳定在 800 Mpa,压入深度稳定在 70 μm ,接触面积稳定在 0.65 mm^2 。

参考文献(Reference):

- [1] JOURANI A, HAGEGE B, BOUVIER S, et al. Influence of abrasive grain geometry on friction coefficient and wear rate in belt finishing[J]. Tribology International, 2013, 59:30-37.
- [2] NGUYEN T A, BUTLER D L. Simulation of precision grinding process, part 1: generation of the grinding wheel surface[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(11):1321-1328.
- [3] 王文玺, 李建勇, 樊文刚, 等. 砂带三维表面形貌特征量化评价方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(12):14-22.
- WANG Wenxi, LI Jianyong, FAN Wengang, et al. Quantitative evaluation method for 3D surface topography of abrasive belt[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2016, 44(12):14-22.

(in Chinese)

- [4] 张叠, 黄云. ZrO_2 工程陶瓷砂带磨削实验及工艺研究[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(12):1966-1970.
- ZHANG Die, HUANG Yun. Experiment and technology of abrasive belt grinding for ZrO_2 engineering ceramics[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(12): 1966-1970. (in Chinese)
- [5] 黄云. 核电高压容器强力高效砂带磨削方法及应用研究[D]. 重庆:重庆大学, 2009.
- HUANG Yun. Research on heavy abrasive belt grinding and its application in machining of nuclear power high pressure vessel[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese)
- [6] 刘伟, 邓朝辉, 万林林, 等. 单颗金刚石磨粒切削氮化硅陶瓷仿真与试验研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(21):191-198.
- LIU Wei, DENG Chaohui, Wan Linlin, et al. Simulation and experiment study for silicon nitride cutting with single diamond grain[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(21):191-198. (in Chinese)
- [7] MEZGHANI S, MANSORI M E. Abrasiveness properties assessment of coated abrasives for precision belt grinding[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 203(5):786-789.
- [8] ZHAO Y, MAIETTA D M, CHANG L. An asperity microcontact model incorporating the transition from elastic deformation to fully plastic flow[J]. Journal of Tribology, 2000, 122(1):86-93.
- [9] ZHANG X, KNEUPNER K, KUHNENK B. A new force distribution calculation model for high-quality production processes[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 27(7):726-732.
- [10] KHELLOUKI A, RECH J, ZAHOUANI H. The effect of abrasive grain's wear and contact conditions on surface texture in belt finishing[J]. Wear, 2007, 263(1/6):81-87.
- [11] JOHNSON K L, KENDALL K, ROBERTS A D. Surface energy and the contact of elastic solids[J]. Proceedings of the Royal Society Y, 1971, 324(1558):301-313.
- [12] QUARRELL A G. The hardness of metals[J]. Nature, 1952, 170(4333):818.
- [13] FRANCIS H A. Phenomenological analysis of plastic spherical indentation[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1976, 98(3): 272-281.
- [14] BRISCOE B J. Contact mechanics[J]. Tribology International, 1985, 19(2):109-110.