

引文格式: 郭敏智, 邓明明, 姜婷婷, 等. 9310 钢螺旋锥齿轮喷丸强化残余应力场计算仿真研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(8): 110-116.

GUO Minzhi, DENG Mingming, JIANG Tingting, et al. Numerical research of shot peening residual stress field for 9310 steel spiral bevel gear[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(8): 110-116.

9310 钢螺旋锥齿轮喷丸强化残余应力场计算仿真研究*

郭敏智¹, 邓明明^{1,2}, 姜婷婷², 刘景琳², 唐进元²

(1. 中国航发中传机械有限公司, 长沙 410200;

2. 中南大学高性能复杂制造国家重点实验室, 长沙 410083)

[摘要] 喷丸加工诱导零件表面产生残余压应力场以提高零件疲劳寿命,是螺旋锥齿轮的关键强化工艺。为准确计算喷丸后齿面残余应力场,基于离散元与有限元耦合的方法提出一种螺旋锥齿轮喷丸工艺计算仿真模型。模型计算结果与试验结果误差在 10% 以内,表明模型可准确预测齿面残余应力分布。基于该模型,以 AISI 9310 材料螺旋锥齿轮为研究对象,探讨了喷丸工艺参数与残余应力场特征参数的关联规律。研究发现,本文所用工艺参数加工:(1) 喷丸工艺主要影响轮齿表层 50 μm 内的残余应力场;(2) 喷丸覆盖率为 200% 时,弹丸直径和速度的改变,对表面残余压应力影响较小;(3) 当弹丸速度和直径提高时,靶板表层最大残余压应力值和最大残余压应力深度都得到明显提高,其中最大残余压应力值可提高到 -1251.5 MPa ,最大残余压应力深度可提高到 40 μm 。本文建立的残余应力计算模型为螺旋锥齿轮的喷丸工艺参数优选提供了计算工具与方法,把依赖试错迭代的工艺方法上升到可计算、可预测的层面。

关键词: 螺旋锥齿轮; 喷丸强化; 残余应力; 离散元方法; 有限元方法

Numerical Research of Shot Peening Residual Stress Field for 9310 Steel Spiral Bevel Gear

GUO Minzhi¹, DENG Mingming^{1,2}, JIANG Tingting², LIU Jinglin², TANG Jinyuan²

(1. AECC Zhongchuan Transmission Machinery Co., Ltd., Changsha 410200, China;

2. State Key Laboratory of High-Performance Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China)

[ABSTRACT] As a key process for spiral bevel gears, shot peening process induces residual compressive stress field on parts surface and improve their fatigue strength. In order to accurately calculate the residual stress field of the tooth surface after shot peening, we established a simulation model for the shot peening process of spiral bevel gears, which based on the coupling of discrete element method and finite element method. The errors between the simulated results and the experimental results are within 10%, which means the model can predict the residual stress distribution well. The correlation law between the shot peening process parameters and the residual stress distribution of AISI 9310 spiral bevel gear is investigated. The results show that under the processing parameters used in this paper, shot peening mainly affects the residual stress field from the surface of the target to a depth of 50 μm . When the coverage is 200%, the increase of shot diameter and velocity works little on the surface residual compressive stress. The maximum residual compressive stress will increase to -1251.5 MPa and the depth of maximum residual compressive stress increases to 40 μm with the increase of shot velocity and diameter. The residual stress calculation model established in this paper provides a tool for the optimization of shot peening parameters of spiral bevel gears, and makes the process calculable and predictable instead of the trial-and-error method.

Keywords: Spiral bevel gear; Shot peening; Residual stresses; Discrete element method; Finite element method

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.08.110

* 基金项目: 国防基础科研计划资助(JCKY2020213B006); 国家科技重大专项(2019-VII-0017-0158)。

高性能齿轮是重要的机械基础件,工况多为高速重载^[1]。为提高齿轮疲劳寿命,优化齿轮服役性能,一般在全流程制造末端加入喷丸工序^[2-4]。喷丸强化利用高速弹丸冲击零件表面,使工件受喷表面发生不均匀塑性变形,诱导残余压应力产生^[5]。较好的残余应力分布可提高齿轮的接触疲劳强度、弯曲疲劳强度、抗胶合能力,从而改善零件服役性能^[6-7]。

采用喷丸工艺提高齿轮疲劳强度,需充分发挥喷丸强化因素影响效果,即最大程度提高残余压应力值。因此,了解喷丸后齿面残余应力分布与工艺参数关联规律,优化喷丸工艺参数是提高齿轮服役性能的关键^[8]。生产中利用试验摸索进行工艺编制,需耗费大量的时间和精力,开展喷丸工艺仿真研究可以节约资源,为工业制造提供指导。

现有喷丸残余应力预测模型主要基于有限元方法。Miao等^[9]建立了与实际喷丸过程相近的随机多弹丸有限元模型,因此被广泛应用。基于此,李源等^[10]利用Python语言编写了ABAQUS子程序,模拟多弹丸随机入射Q235钢板的过程,结果表明多弹丸模型模拟的残余压应力峰值和试验结果很接近。Bagherifard等^[11]利用试验对仿真结果进行了验证,并研究了部分工艺参数(如喷丸速度和弹丸尺寸等)与喷丸后残余应力的关系。目前喷丸工艺仿真模型主要针对平面或圆柱面试样,无需考虑弹丸之间的碰撞。但对于螺旋锥齿轮而言,其复杂曲面使弹丸间碰撞概率大大提高,弹丸碰撞成为仿真模型中必须考虑的因素。基于离散元的方法建立模型,可计算弹丸从喷嘴口到齿面的运动过程。结合离散元和有限元方法计算螺旋锥齿轮喷丸工艺强化效果,提高了仿真结果计算的准确性^[12],受到广泛使用。

本文通过建立螺旋锥齿轮的喷丸工艺仿真模型,计算喷丸后轮齿齿面表层残余应力分布状态。对比喷丸试验结果与仿真结果,以验证仿真计算准确性。基于该仿真模型,研究喷丸时间、弹丸速度、弹丸直径与喷丸后齿面残余压应力场的关联规律。

1 喷丸工艺试验

1.1 试验样件

喷丸样件为某型号螺旋锥齿轮,材料为AISI 9310高强度合金钢,齿部经渗碳淬火处理。齿面为喷丸强化的重要区域,其表面至0.56 mm深度内,硬度均高于60HRC。

1.2 试验参数

试验采用MP1000Ti型号数控喷丸机开展。弹丸类型采用ASH110(55~62HRC),喷丸强度为0.178~0.228 mmA,覆盖率200%、喷嘴角度17°、空气压力0.25 MPa、

移动速度70 mm/min、喷丸时间144 s。对齿根、凸面、凹面分别进行强化,喷嘴与目标表面垂直,且距离150 mm,齿轮转台转速30 r/min,弹丸流量5 kg/min。

1.3 残余应力测量

对齿面进行残余应力测量,测量点位置如图1所示,a、b、c均位于齿面节锥线上,依次为齿宽的四分点,a靠近轮齿大端。为得到齿轮表层残余应力场,沿齿面法向对轮齿进行电解抛光,电解抛光深度由白光干涉仪测量得到。

利用加拿大Proto公司的X射线衍射仪测量齿面残余应力。管电压25 kV,管电流5 mA,X射线管Cr_K-Alpha,光圈直径1 mm,波长2.291 Å,曝光时间3 s,曝光次数7,最大 β 角20°。测试照片如图2所示。电解抛光所用仪器为8818-V3型号电解抛光仪,设置电压40 V,流量8,抛光时间3 s,抛光电流2.8~3 A。

2 仿真模型建立

由于螺旋锥齿轮曲面复杂,弹丸在齿面附近易发生相互碰撞,从而影响弹丸实际冲击速度及次数。为提高计算准确度,本文基于离散元及有限元耦合的方法建立喷丸工艺仿真模型,计算螺旋锥齿轮喷丸后齿面表层残余应力分布,计算流程如图3所示。建立螺旋锥齿轮喷丸离散元模型,获取齿面弹丸冲击速度矢量、单位面积冲击次数。将离散元计算结果作为输入,结合喷丸前齿面三维粗糙度、残余应力场、齿轮及弹丸材料模型,建立有限元模型,计算喷丸后轮齿表层残余应力场,分析喷丸时间、弹丸速度、弹丸直径等对喷丸后齿面残余应力场的影响。

2.1 离散元模型

2.1.1 模型建立

利用EDEM仿真软件设置离散元模型,模拟弹丸从喷嘴到齿面的过程。

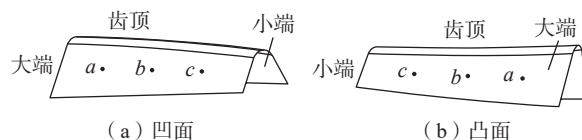


图1 残余应力测量点(a、b、c)位置示意图

Fig.1 Location diagram of residual stress measuring points (a, b and c)



图2 残余应力测试示意图

Fig.2 Measurement of residual stresses

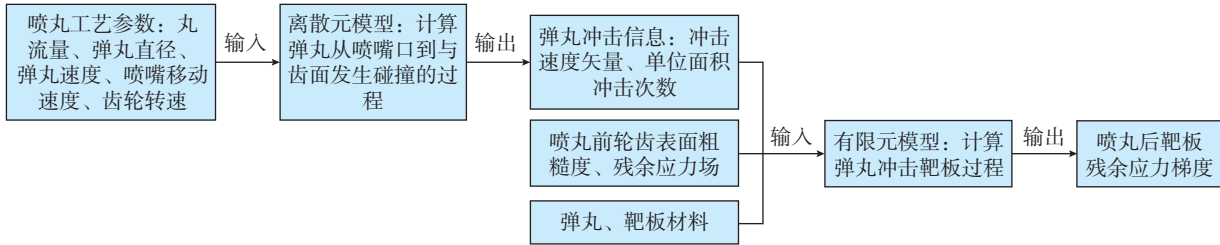


图3 离散元与有限元耦合计算模型流程图

Fig.3 Modeling diagram of coupling of discrete element method and finite element method

根据 1.2 节工艺参数设置模型参数,几何模型如图 4 所示。为提取轮齿表面目标位置冲击信息,利用 Hypermesh 软件对轮齿表面进行网格划分。在模型中,导入齿面单元作为齿轮模型,设置喷嘴分别垂直于齿轮的齿根、凸面、凹面,且距离目标表面 150 mm,并沿齿宽方向进行移动。弹丸初始速度由经验公式 (1) 确定^[13]。

$$v = \frac{163.5P}{1.53q_m + 10P} + \frac{295P}{0.598d + P} + 48.3P \quad (1)$$

式中, d 为弹丸直径, mm; q_m 为丸流量, kg/min; P 为喷嘴气压, MPa。

2.1.2 数据提取与处理

利用 EDEM 软件导出计算结果,并利用单元编号判断冲击点位置,筛选出齿面节锥线上四等分点处的冲击,进行数据处理。

(1) 冲击速度矢量。

由于齿轮为曲面,各位置与弹丸束的夹角不同,且有限元模型中靶板为齿面上的局部区域。因此,需将弹丸的绝对速度转换为齿面单元与弹丸的相对速度。

如图 5 所示,曲面 $OABC$ 为齿面上某一区域,划分为网格后简化为四边形 $OABC$ 。以 O 为坐标原点, OA 为 x' 轴, OC 为 y' 轴,根据空间坐标系右手法则确定 z' 轴,建立笛卡尔坐标系。其坐标轴的单位向量在大地坐标系中表示为 $\vec{ox}(x_1, y_1, z_1), \vec{oy}(x_2, y_2, z_2), \vec{oz}(x_3, y_3, z_3)$ 。在大地坐标系中,弹丸 i 的速度矢量表示为 $v_i(x_i, y_i, z_i, 0)$,在新坐标系中表示为 $v'_i(x'_i, y'_i, z'_i, 0)$ 。根据转轴变换原理得^[14]

$$v'_i = v_i \cdot \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & 0 \\ y_1 & y_2 & y_3 & 0 \\ z_1 & z_2 & z_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2) 冲击次数。

当实际喷丸时间为 t_1 时,利用式 (3) 计算目标位置的单位面积冲击次数 n 。

$$n = \frac{n_1}{S_1} \times \frac{t_1}{t_{dem}} \quad (3)$$

式中, n_1 为该单元与弹丸发生的冲击次数; S_1 为该单元

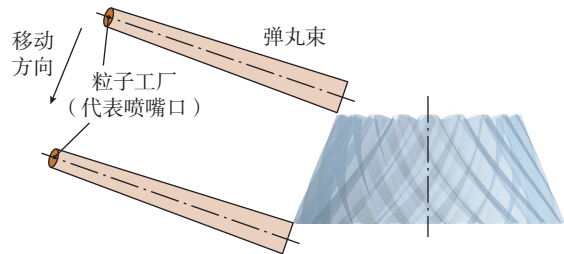


图4 DEM 几何模型示意图

Fig.4 Schematic view of DEM geometry

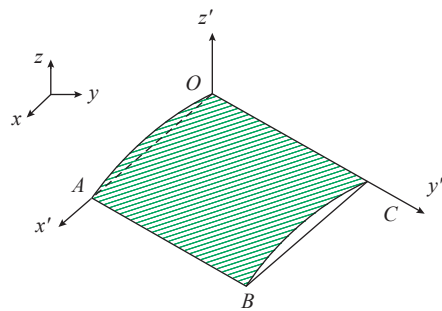


图5 弹丸速度场坐标系变化示意图

Fig.5 Diagram of coordinate system of shot velocity changes

面积; t_{dem} 为 EDEM 模型计算时间。

2.2 有限元模型

基于 ABAQUS/CAE 商业有限元软件建立有限元模型,计算喷丸后轮齿齿面的残余应力场^[15]。

2.2.1 网格划分及边界条件

弹丸直径为 0.3 mm,单元类型为 C3D8R^[16]。靶板尺寸如图 6 所示,除无限单元体网格外,靶板尺寸为 1 mm × 1 mm × 0.5 mm,单元类型为 C3D8R,在该区域内设置预定义场,以喷丸前齿面残余应力实测值作为模型的初始残余应力。其中区域 I 用于限制弹丸冲击中心点位置和提取残余应力计算结果。区域 I 和区域 II 为网格细化部分,单元尺寸均为 10 μm × 10 μm × 10 μm。区域 III 为有限元网格由细到粗的过渡区。区域 IV 的网格类型为无限单元体 CIN3D8,用于消除应力波在靶板边界的反射^[17]。

模型中对靶板底面进行完全固定。弹丸与靶板之间的接触关系为 Surface to Surface,法向行为定义为“硬”

接触,切向行为定义为罚摩擦,摩擦系数设置为 0.2^[18]。

2.2.2 材料模型

弹丸设置为弹塑性体,采用各向同性本构模型,弹丸参数设置为杨氏模量 $E=210$ GPa,泊松比 $\mu=0.3$,密度 $\rho=7800$ kg/m³,屈服强度 $\sigma_s=1400$ MPa。靶体材料为 9310 渗碳淬火钢,材料参数设置为杨氏模量 $E=210$ GPa,泊松比 $\mu=0.3$,密度 $\rho=7800$ kg/m³,塑性应力应变曲线采用 Johnson-Cook 模型,其基本模型如式(4)和(5)所示,参数由 Hopkinson 压杆试验获得,分别为 $A=1234.38$, $B=881$, $C=0.018$, $n=0.238$, $m=0.686$ 。为防止应力波振荡^[19],设置靶板材料阻尼 $\alpha=6 \times 10^6$ s⁻¹。

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) (1 - (T^*)^m) \quad (4)$$

$$T^* = \frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \quad (5)$$

式中, A 、 B 、 n 、 C 、 m 为材料物理特性参数,由压杆试验结果拟合得到; A 为参考应变率下的屈服强度; B 为应变硬化系数; n 为应变硬化指数; C 为应变率硬化系数; m 为温度软化指数; ε 为试验应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; T 为试验温度; T_{melt} 为材料的熔点(9310 合金钢的熔点为 1510 °C); T_{room} 为参考温度,值为 25 °C。

2.2.3 弹丸冲击信息

弹丸冲击角度、速度、次数由 2.1.2 节计算结果确定。根据 ASH110 型号弹丸尺寸标准,设置弹丸为球形,直径为 0.3 mm。考虑实际情况下弹丸冲击位置随机分布,仿真中利用 Python 语言编程,采用 Random 函数产生随机位置,弹丸冲击中心点均在图 6 所示的区域 I 内。

3 结果与讨论

3.1 仿真与试验结果对比

为验证仿真模型准确性,在所建立的喷丸工艺仿真模型中,设置与试验相同的工艺参数。图 7 为喷丸后凸面 b 点实测和仿真三维形貌。根据式(6)计算三维粗

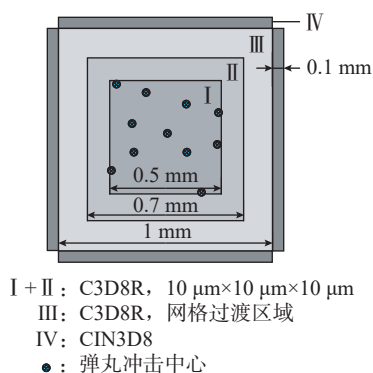


Fig.6 Schematic view of impact model geometry

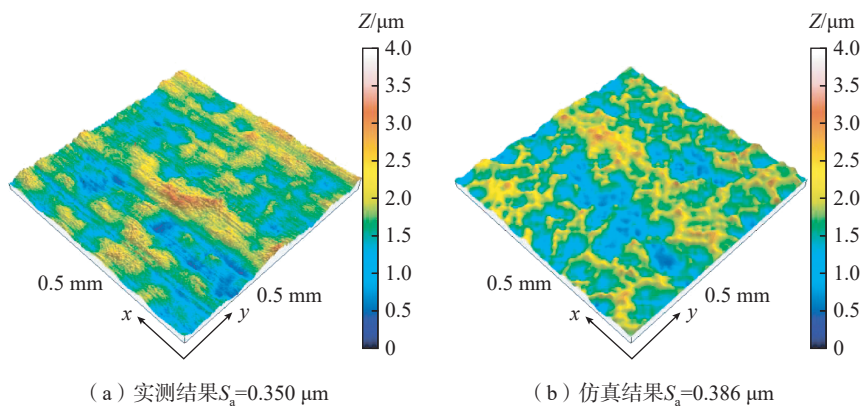


图 7 喷丸后齿面三维形貌

Fig.7 Three-dimensional surface topography of tooth flank after shot peening

糙度 S_a 值,实测值为 0.35 μm,仿真计算结果 0.386 μm,误差 10.3%。其中,在 x 、 y 方向,仿真结果分辨率低于实测结果,原因在于实测数据的采样间距为 0.5 μm,有限元模型的靶板网格尺寸为 10 μm × 10 μm。

$$S_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i| \quad (6)$$

式中, n 为数据点个数; Z_i 为第 i 个节点的高度值。

对比喷丸后实测与仿真计算的轮齿表面齿高方向残余应力值,如表 1 所示。其中, a 、 b 、 c 点位置与图 1 标注一致。结果表明,轮齿各点的表面残余应力均在 -800~880 MPa 之间,计算误差在 6% 以内。图 8 展示了凸面、凹面 b 点的实测与仿真计算的残余应力沿深度方向的分布,其中 σ_x 为齿宽方向残余应力; σ_y 为齿高方向残余应力。喷丸处理后,轮齿凸面、凹面残余应力变化趋势一致,凹面残余压应力值略大于凸面。且齿宽方向残余应力和齿高方向分布相近,表面残余应力约为 -800~850 MPa,最大残余压应力值在 1200~1300 MPa 之间,深度约为 20~30 μm。统计轮齿表面残余压应力和最大残余压应力值,如表 2 所示,实测值与仿真结果误差均小于 10%,证明该仿真模型可准确预测螺旋锥齿轮喷丸后的轮齿表层残余应力场。

3.2 喷丸时间影响

喷丸覆盖率受丸流量和喷丸时间影响,丸流量和喷丸时间的增加都会提高弹丸冲击次数,增加喷丸覆盖率。本文主要研究喷丸时间对残余应力场的影响,结果如图 9 所示。基于 Miao 等^[9]的方法,对喷丸覆盖率进行了计算。

在弹丸初始速度为 40 m/s 的条件下,喷丸时间达到 72 s 时,弹丸冲击次数为 360 个/mm²,喷丸覆盖率达到 98%,即满覆盖率^[11]。当喷丸时间为 144 s 时,覆盖率为 200%。随着喷丸时间的增加:(1)靶板表面残余压应力升高,当喷丸时间达到 72 s 后,逐渐稳定在 800 MPa 左右;(2)10 μm 处残余压应力呈现逐渐升高的趋势,并

在喷丸时间达到 96 s 后稳定,约为 1000 MPa; (3) 20 μm 处残余压应力持续提高,在 72 s 后,20 μm 处残余压应

表 1 试验与仿真计算的轮齿表面齿高方向残余应力对比
Table 1 Measured and simulated surface residual stress along direction of tooth height

项目	凸面测量点			凹面测量点		
	a	b	c	a	b	c
试验值 /MPa	-818.3	-805.3	-814.2	-879.1	-849.7	-836.7
仿真值 /MPa	-823.4	-824.2	-834.6	-843.1	-837.9	-831.3
误差 /%	0.6	2.3	2.5	4.1	1.4	0.6

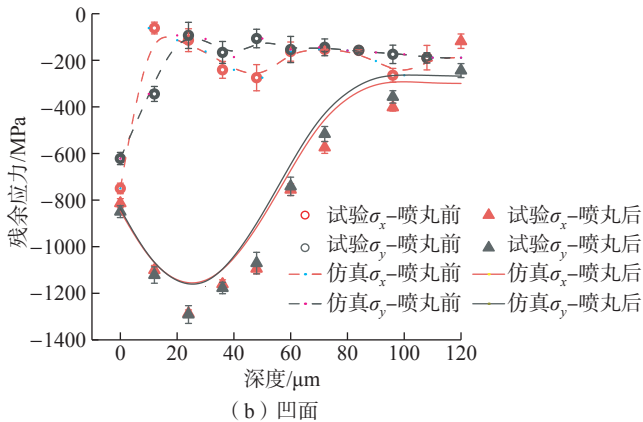
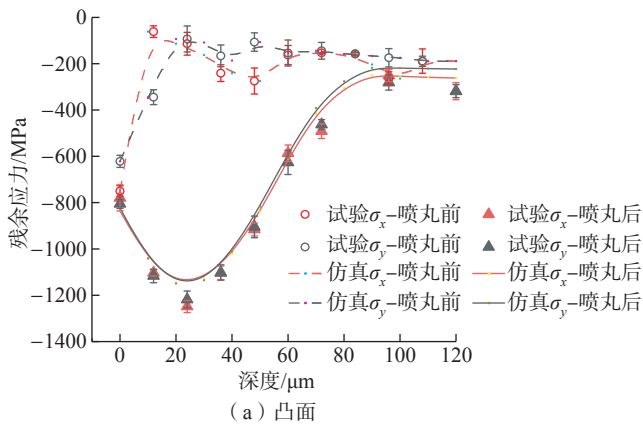


图 8 凸面、凹面 b 点的试验与仿真计算残余应力场对比
Fig.8 Measured and simulated residual stress distribution of point b in convex and concave

表 2 凸面、凹面 b 点试验与仿真计算残余应力结果对比
Table 2 Measured and simulated residual stress values of point b in convex and concave

项目	凸面				凹面			
	σ_{xs}	σ_{xm}	σ_{ys}	σ_{ym}	σ_{xs}	σ_{xm}	σ_{ys}	σ_{ym}
试验值 /MPa	-826.8	-1248.5	-805.3	-1218.2	-813.4	-1286.6	-849.7	-1291.2
仿真值 /MPa	-838.7	-1145.0	-824.2	-1148.9	-847.1	-1161.0	-837.9	-1169.18
误差 /%	1.4	8.3	2.3	5.7	4.1	9.8	1.4	9.5

注: σ_{xs} 、 σ_{xm} 指齿宽方向的表面残余压应力和最大残余压应力; σ_{ys} 、 σ_{ym} 指齿高方向的表面残余压应力和最大残余压应力。

力高于 10 μm 处,表明最大残余压应力深度由 10 μm 提高至 20 μm。这表明,提高喷丸时间,会有效增加材料次表层残余压应力值,提高最大残余压应力层深。

3.3 弹丸速度影响

由式(3)可知,弹丸初始速度由喷嘴气压、丸流量、弹丸直径确定,其中喷嘴气压为主要因素^[20]。喷嘴气压的提升,会使弹丸速度明显增加,提高喷丸强度。

参考 Nordin 等^[21]的试验弹丸速度范围设置弹丸初始速度,残余应力计算结果如图 10 所示,云图如图 11 所示。结果表明,弹丸速度由 30 m/s 提高至 40 m/s、

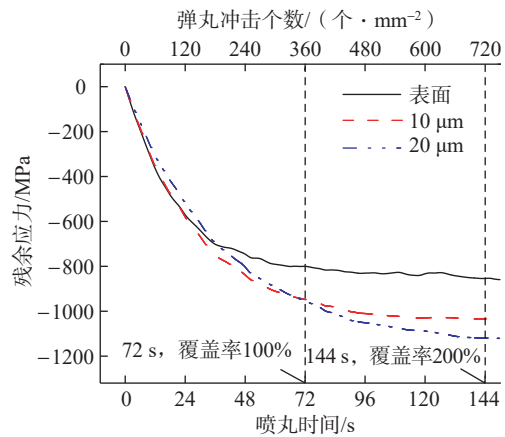


图 9 喷丸时间对残余应力结果的影响
Fig.9 Influence of shot peening time on residual stress results

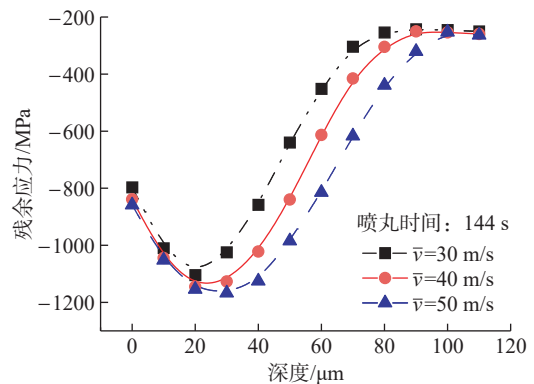


图 10 弹丸速度对残余应力结果的影响
Fig.10 Influence of shot velocity on residual stress results

50 m/s 时,喷丸诱导的残余压应力提高,表面残余压应力值变化较小,最大残余压应力值分别为 -1104.7 MPa、-1144.9 MPa、-1167.3 MPa,最大残余压应力深度分别为 20 μm、25 μm、30 μm。结果表明,随着弹丸速度的提高,靶板表面残余压应力值变化不大,但最大残余压应力值、最大残余压应力深度会不断提高。

3.4 弹丸直径影响

计算不同弹丸直径冲击下的残余应力场如图 12 和 13 所示。其中弹丸直径根据 SAE 标准设置,采用 ASH70、ASH110、ASH170 类型弹丸,表 3 展示了各类型弹丸与其直径的对应关系。结果表明,弹丸直径提高时,表面残余应力值变化较小,但会明显提高最大残余压应力值和最大残余压应力深度。当弹丸直径由 0.18 mm 提高至 0.30 mm 和 0.42 mm 时,表面残余压应力均在

-760~840 MPa 之间,最大残余压应力值由 -893.6 MPa 提高至 -1145.0 MPa 和 -1251.5 MPa,最大残余压应力深度由 10 μm 提高至 30 μm 和 40 μm。但弹丸直径提高会增加齿轮表面粗糙度。其原因在于当弹丸直径较高时,弹丸动能增加,与齿面冲击时,材料塑性应变增加,从而增大弹坑半径,会使齿轮表面粗糙度明显提高。

4 结论

本文基于离散元与有限元耦合的方法,建立 AISI 9310 钢螺旋锥齿轮的喷丸工艺残余应力场仿真计算模型,探寻喷丸工艺参数与喷丸后齿面残余压应力的关联规律。

(1) 本文所建立的仿真模型对齿面残余应力场的预测误差在 10% 以内,计算结果准确。

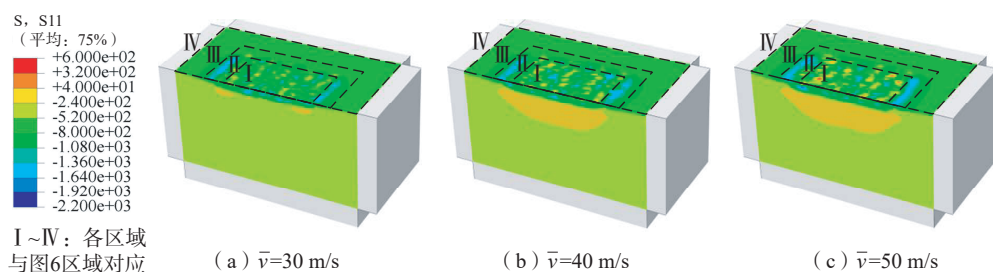


图 11 不同弹丸速度冲击结果云图

Fig.11 Simulated residual stress of target impacted by different shot velocities

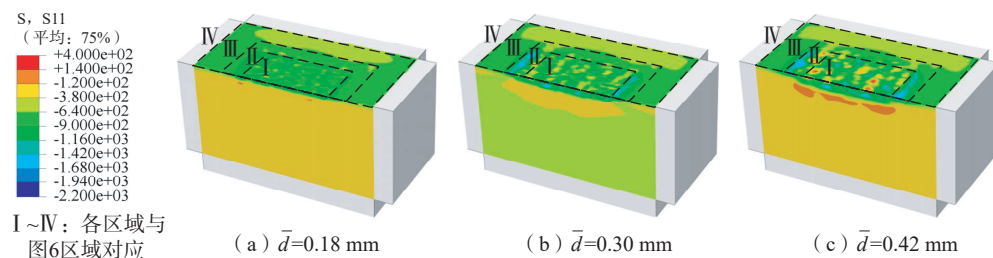


图 12 不同弹丸直径冲击结果云图

Fig.12 Simulated residual stress of target impacted by different shot diameters

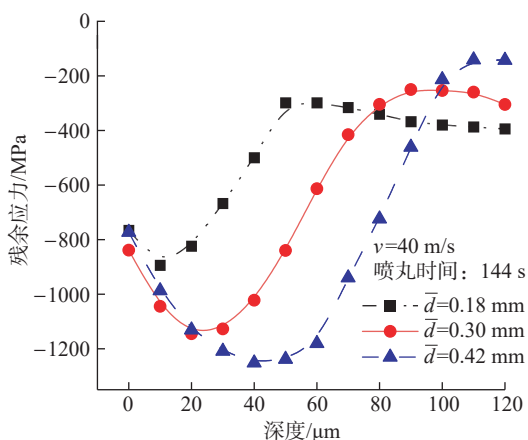


图 13 弹丸直径对靶板表层残余应力的影响

Fig.13 Influence of shot diameter on residual stress results

表 3 不同类型弹丸对应直径及残余应力计算结果

Table 3 Diameter of different types of shots and residual stress calculation results

项目	ASH70	ASH110	ASH170
直径/mm	0.18	0.30	0.42
σ_{xs}/MPa	-766.3	-838.7	-773.0
σ_{xm}/MPa	-893.6	-1145.0	-1251.5
$z_{\text{omx}}/\mu\text{m}$	10	30	40

注: z_{omx} 为齿宽方向最大残余应力值所在深度。

(2) 当喷丸时间为 72 s 时,弹丸冲击个数达到 360 个/mm²,靶板覆盖率达到满覆盖。当喷丸时间继续增加时,靶板表面压应力逐渐稳定在 -800 MPa 左右。

(3) 喷丸工艺主要影响轮齿表面至 50 μm 深度内的残余应力场,深度大于 50 μm 时,残余应力场由喷丸前工艺确定。

(4) 当喷丸覆盖率为 200% 时,弹丸直径和速度的改变对本文所用零件的表面残余压应力影响较小。

(5) 当弹丸初始速度和直径提高时,靶板表面残余压应力值变化较小,靶板表层最大残余压应力值和最大残余压应力深度都得到明显提高,其中最大残余压应力值可提高到 -1251.5 MPa,最大残余压应力深度可提高到 40 μm。

参考文献

[1] 罗诚,冯治恒,丁军鹏,等. 工程机械螺旋锥齿轮喷丸强化工艺及试验研究[J]. 现代制造工程, 2015(3): 7-10.

LUO Cheng, FENG Zhiheng, DING Junpeng, et al. Shot-peening process and experimental study of spiral bevel gear of construction machinery[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2015(3): 7-10.

[2] 栾伟玲,涂善东. 喷丸表面改性技术的研究进展[J]. 中国机械工程, 2005, 16(15): 1405-1409.

LUAN Weiling, TU Shandong. Recent trends on surface modification technology of shot peening[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(15): 1405-1409.

[3] 孙艳,罗宏亮. 强化喷丸对渗碳齿轮表面接触疲劳裂纹形成与扩展的影响[J]. 汽车技术, 2009(1): 56-58.

SUN Yan, LUO Hongliang. Influence of strengthening shot peening on formation and extension of fatigue crack in carburized gear surface[J]. Automobile Technology, 2009(1): 56-58.

[4] 朱鹏飞,严宏志,陈志,等. 齿轮齿面喷丸强化研究现状与展望[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 113-131, 140.

ZHU Pengfei, YAN Hongzhi, CHEN Zhi, et al. Research status and prospect of shot peening of gear tooth flanks[J]. Surface Technology, 2020, 49(4): 113-131, 140.

[5] 王仁智. 金属材料的喷丸强化原理及其强化机理综述[J]. 中国表面工程, 2012, 25(6): 1-9.

WANG Renzhi. Overview on the shot peening principle and its strengthening mechanisms for metallic materials[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(6): 1-9.

[6] 邹德志,李骏,徐卉,等. 喷丸强化对齿轮材料弯曲疲劳性能的影响[J]. 汽车工艺与材料, 2020(6): 47-52.

ZOU Dezhi, LI Jun, XU Hui, et al. Effect of shot peening strengthening on gear material bending fatigue performance[J]. Automobile Technology & Material, 2020(6): 47-52.

[7] 冯琴. 喷丸强化提高渗碳齿轮疲劳强度[J]. 金属加工, 2001(12): 32-33.

FENG Qin. Improving fatigue strength of carburized gear by shot peening[J]. Metal Forming, 2001(12): 32-33.

[8] 盖鹏涛,陈福龙,高建勤,等. 喷丸强化对表面完整性影响的研究现状与发展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(20): 16-21.

GAI Pengtao, CHEN Fulong, SHANG Jianqin, et al. Recent situation and development trend of shot peening on surface integrity[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(20): 16-21.

[9] MIAO H Y, LAROSE S, PERRON C, et al. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening[J]. Advances in Engineering Software, 2009, 40(10): 1023-1038.

[10] 李源,雷丽萍,曾攀. 弹丸束喷丸有限元模型数值模拟及试验研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(22): 43-48.

LI Yuan, LEI Liping, ZENG Pan. Shot stream finite element model for shot peening numerical simulation and its experiment study[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(22): 43-48.

[11] BAGHERIFARD S, GHELICHI R, GUAGLIANO M. On the shot peening surface coverage and its assessment by means of finite element simulation: A critical review and some original developments[J]. Applied Surface Science, 2012, 259: 186-194.

[12] MURUGARATNAM K, UTILI S, PETRINIC N. A combined DEM-FEM numerical method for shot peening parameter optimisation[J]. Advances in Engineering Software, 2015, 79: 13-26.

[13] SHEN S P, ATLURI S N. An analytical model for shot-peening induced residual stresses[J]. Computers, Materials and Continua, 2006, 4(2): 75-85.

[14] 蔡国梁,苗宝军,史雪荣. 解析几何教程[M]. 镇江: 江苏大学出版社, 2012.

CAI Guoliang, MIAO Baojun, SHI Xuerong. Analytic geometry tutorial[M]. Zhenjiang: Jiangsu University Press, 2012.

[15] KLEMENZ M, SCHULZE V, ROHR I, et al. Application of the FEM for the prediction of the surface layer characteristics after shot peening[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(8): 4093-4102.

[16] LIN Q J, LIU H J, ZHU C C, et al. Effects of different shot peening parameters on residual stress, surface roughness and cell size[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 398: 126054.

[17] SCHWARZER J, SCHULZE V, VÖHRINGER O. Finite element simulation of shot peening—A method to evaluate the influence of peening parameters on surface characteristics[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2002.

[18] MEGUID S A, SHAGAL G, STRANART J C. 3D FE analysis of peening of strain-rate sensitive materials using multiple impingement model[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27(2): 119-134.

[19] KIM T, LEE H, HYUN H C, et al. Effects of Rayleigh damping, friction and rate-dependency on 3D residual stress simulation of angled shot peening[J]. Materials & Design, 2013, 46: 26-37.

[20] 卢国鑫,王强,陆峰. 300M 钢多弹丸喷丸强化的有限元模拟[J]. 材料保护, 2014, 47(1): 28-30, 43.

LU Guoxin, WANG Qiang, LU Feng. Finite element simulation of multi-shots shot peening of 300M stainless steel[J]. Materials Protection, 2014, 47(1): 28-30, 43.

[21] NORDIN E, ALFREDSSON B. Measuring shot peening media velocity by indent size comparison[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 235: 143-148.

通讯作者: 郭敏智,高级工程师,研究方向为表面工程。

(责编 古京)