

浅齿轮齿根激光冲击强化 试验和仿真研究

李晨鹭¹, 解丽静¹, 程冠华¹, 梁国祥²

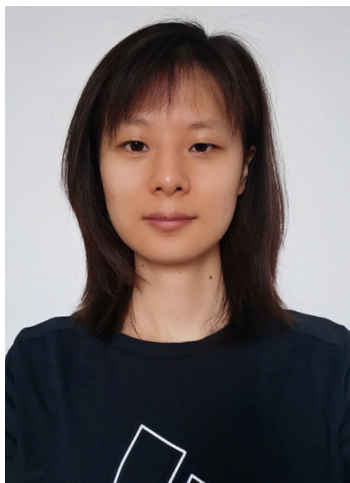
(1. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081;

2. 山西柴油机工业有限责任公司, 大同 037000)

[摘要] 为探究激光冲击强化对高强度钢齿轮齿根表面及内部残余应力的影响,使用 ABAQUS 软件对齿轮齿根进行了激光冲击强化模拟仿真,并通过试验对该仿真模型进行了验证。结果表明,所建立的齿轮齿根激光冲击强化有限元模型可以较好地预测实际激光冲击强化结果,准确揭示激光冲击强化作用规律。同时,根据残余应力分布情况可知,激光冲击强化可使高强度钢齿轮齿根产生明显的残余压应力层,但不同方向残余压应力分布略有不同,平行于齿根路径方向的平均残余压应力大于垂直于齿根路径方向的平均残余压应力。

关键词: 高强度钢;激光冲击强化;齿轮齿根;有限元仿真;残余应力

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.13.047



李晨鹭

硕士研究生,主要从事激光冲击强化、材料微动疲劳性能的研究。

齿轮作为一种常见的传动机械元件,广泛应用于各种机械设备中,其所用材料多为高强度钢,具有传动准确、效率高、结构紧凑等诸多优点。但在其工作服役过程中,齿

根部位长期受到交变弯曲应力作用,这是导致其发生疲劳断齿失效的主要原因。

激光冲击强化是一种新兴的表面强化技术,不仅能够使在靶材表面形成残余压应力层,还能使表层材料晶粒细化甚至纳米化,提高金属表面耐磨性和抗疲劳性能^[1]。目前,针对激光冲击强化的研究主要集中在激光束、约束层、吸收层等方面,且大多数研究的靶材模型为基础样块,在工程应用方面具有明显的局限性。本文以高强度钢的齿轮为研究对象,对齿轮实体进行有限元建模和激光冲击强化试验,并对齿轮齿根表面及内部残余应力的变化进行对比分析,为实际激光冲击强化工艺参数的优化提供指导。

有限元分析

1 激光冲击强化理论分析

激光冲击强化过程,应力波作

用时间较短,约为几十 ns,导致靶材的应变率高达 $10^5 \sim 10^7/s$ 。考虑到激光强化过程中应变率对于材料特性的影响,选择 Johnson-Cook 本构模型对材料进行描述,该模型在应变率较高的情况下得到广泛应用,例如高速冲击、爆炸冲击等^[2]。同时,由于激光冲击强化的过程是瞬时完成的,作用时间只有几十 ns 并且在整个强化过程中约束层的水流可以作为冷却液,因此在进行有限元仿真模拟时需忽略温度的影响^[3],故将 Johnson-Cook 本构方程进行简化得到如下更为准确的本构关系表达式:

$$\bar{\sigma} = (A + B\bar{\epsilon}^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \quad (1)$$

式中, $\bar{\sigma}$ 为等效塑性应力; A 为材料的初始屈服应力; B 为材料的应变强化参数; $\bar{\epsilon}$ 为材料的等效塑性应变; n 为

材料的硬化指数; C 为材料应变率强化系数; $\dot{\epsilon}$ 为材料的等效塑性应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为材料的参考应变率。

本文研究所用靶材材料为 18Cr2Ni4WA, 涉及的相关参数分别为: A 为 1010MPa, B 为 1409MPa, C 为 0.04, n 为 0.67, $\dot{\epsilon}_0$ 为 1/s。

在准确选取靶材本构的基础上, 为保证激光冲击强化仿真模拟的准确性, 还需对激光冲击波压力进行理论分析。

激光冲击波压力转换计算采用当今国际上最通用的 Fabbro 激光压力波转换模型^[5]。具体计算参数与冲击试验保持一致: 脉冲能量 30J, 光斑直径 4mm, 脉冲宽度 15ns。峰值压力与激光参数之间的函数关系式为:

$$P_{\max} = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{ZI} \quad (2)$$

式中, α 为激光作用下内能转化成热能的系数, 一般取 0.1~0.15; I 为激光功率密度, GW/cm^2 ; 靶材 18Cr2Ni4WA 的声阻抗为 $Z_1 = 4.34 \times 10^6 \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$; 约束层水的声阻抗为 $Z_2 = 2.39 \times 10^6 \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$; 合成声阻抗为 $Z = 4.53 \times 10^6 \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ^[6]。将相关参数代入方程, 最终计算得到激光功率密度为 $14.33 \text{GW}/\text{cm}^2$, 激光冲击强化冲击波压力最大值为 4.5GPa。

激光冲击波压力在空间上的分布选取高斯分布, 分布计算式为^[7]:

$$P(r, t) = P(t) \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2R^2}\right) \quad (3)$$

式中, $P(t)$ 为压力波随时间变化函数; $\exp\left(-\frac{r^2}{2R^2}\right)$ 为压力波在空间上的分布函数; r 为激光冲击范围内任意一点到作用中心的距离。

激光压力波关于时间分布的特性, 根据相关研究^[8-9], 本文仿真模型压力波持续作用时间取 3 倍激光脉宽, 压力波上升与衰减时间分布采用

“急升缓降”模型, 得到的激光冲击强化压力波时间分布模型如图 1 所示。

2 分析步设置

整个激光冲击强化模拟分析过程主要由动态冲击和静态回弹两部分组成, 分别采用 ABAQUS/Explicit 和 ABAQUS/Standard 两个不同的求解器进行分析求解。图 2 为激光冲击强化仿真模拟过程中靶材内部 4 种能量的变化曲线, 可以看出在激光冲击产生的压力波作用下, 外力总功中的部分能量, 由于靶材的弹塑性变形而转换成材料内部的动能以及内能, 在动态分析时间达到 5000ns 后, 材料内部塑性变形稳定, 黏性耗散能逐渐增加导致动能及内能开始逐渐减小, 最终部分的内能转换成材料弹塑性变形能储存起来, 而动能最终趋向于 0, 因此本文以 5000ns 为动态分

析的求解时间。而后将 ABAQUS/Explicit 模块中的冲击仿真结果传递至 ABAQUS/Standard 模块, 进行靶材静态回弹过程模拟。

3 有限元模型

激光冲击强化的齿轮实体模数 $m=4$, 齿数 $z=54$, 利用 Pro E 软件进行实体齿轮建模, 对整体齿轮进行裁剪得到仅有双齿的模型, 如图 3 所示。

将双齿模型导入 ABAQUS 软件中, 由于双齿模型为对称结构, 故只选择一个齿加半个宽度齿根的对称模型, 如图 4 所示。为了更贴合实际加工状态, 单齿模型下部采用无限元网格 (CIN3D8), 避免压力波在边界处产生反射; 模型上部有限元部分网格类型选择 8 个结点的六面体三维减缩积分单元 (C3D8R), 由于强化过程只是在齿轮的齿根部进行, 因此

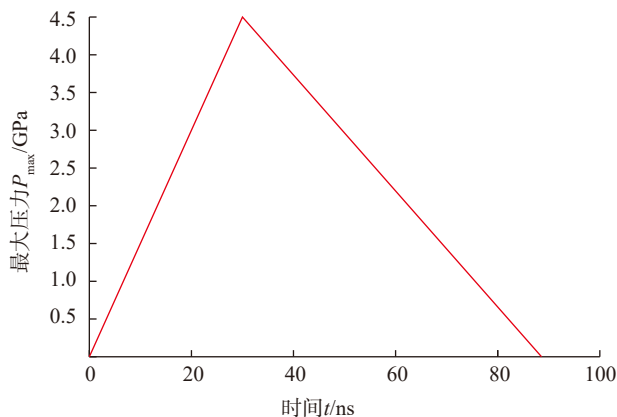


图1 压力波时间特性分布模型
Fig.1 Temporal pressure profile

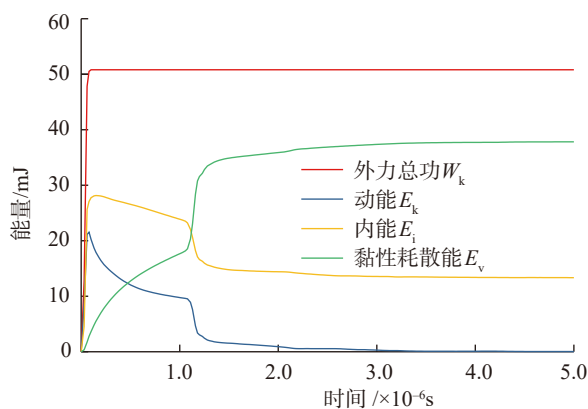


图2 靶材内部能量变化曲线
Fig.2 Energy-time variation curve

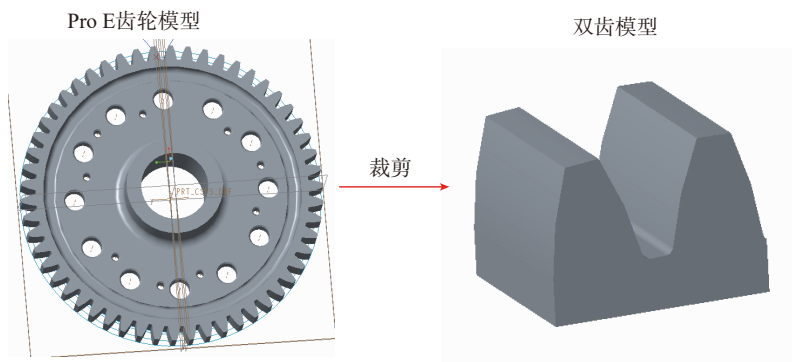


图3 齿轮三维模型
Fig.3 Gear 3D model

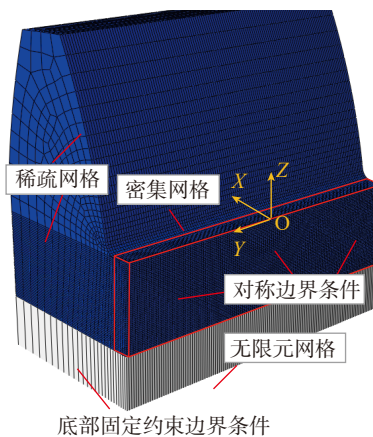


图4 齿根三维有限元模型
Fig.4 Schematic illustration of 3D gear root FEM simulation

在划分网格时只需将齿根处网格进行细化,横向网格大小为 $150\mu\text{m}$,纵向层深方向网格大小为 $100\mu\text{m}$,避免“残余应力空洞^[10]”现象的产生,其他部分则划分较疏网格以节约计算成本及时间。模型底部设置固定边界条件,侧面设置对称边界条件,选择相对中间部分进行搭接率为 50% 的 7 点连续激光冲击,具体强化路径如图 5 所示。

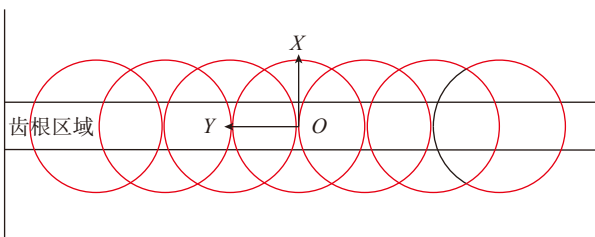


图5 齿根激光冲击强化路径示意图
Fig.5 Specific shock path of gear root

试验验证

1 材料与试样

激光冲击强化试验所用材料为高强度合金渗碳钢(18Cr2Ni4WA),其化学成分含量如表 1 所示。强化试验所用齿轮(模数为 4,齿数为 54)如图 6 所示,经过回火及渗碳处理(渗碳层深度为 0.75mm),金相组织为针状马氏体,如图 7 所示。

2 强化试验及残余应力检测

试验所用激光器由航空工业制造院提供,型号为 Gaia R-1064,激光光斑直径 4mm,脉冲能量 30J,脉宽为 15ns,波长为 1064nm,激光冲击频率为 1Hz。在此基础上对齿轮沿齿根方向进行搭接率为 50% 的 7 点连续冲击强化。为检测冲击区域的残余应力分布情况,采用 X 射线无损检测方法。测量设备为爱思

表1 18Cr2Ni4WA 高强度钢化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 18Cr2Ni4WA strength steel

C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
0.13~0.19	0.17~0.37	0.30~0.60	1.35~1.65	4.00~4.50	≤ 0.025	≤ 0.025

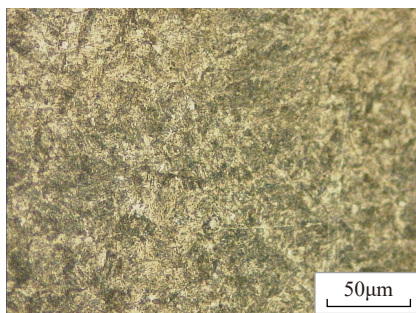


图6 齿轮实体
Fig.6 Actual gear model



图7 金相组织
Fig.7 Metallographical structure

特应力技术公司生产的 X-350A 型 X 射线应力测定仪,所用 X 射线靶材为与钢相匹配的 Cr 靶,衍射晶面为(211),X 光管高压为 20kV,电流

5mA,准直管直径为 2mm;选用 4 站 ψ 角的测量方式,衍射峰峰值角度在 155° 左右, 2θ 高角选为 162° ,底角选为 148° ,测量方法选用侧倾固定 ψ

法。测量方向选择平行于齿根路径和垂直于齿根路径两个方向。具体测量点位置分布如图8所示。

结果与讨论

1 仿真结果

图9~12分别为齿根激光冲击强化仿真模拟结果云图及其相应的残余应力分布曲线。图9、10为X轴(S_{11})方向及Y轴(S_{22})方向的残余应力云图,图11、12分别为齿根表面不同方向残余应力分布曲线和齿根层深不同方向残余应力分布曲线。由仿真结果云图可以看出,经过7点的连续激光冲击强化后,在强化区域形成一定深度的残余压应力层,最大残余压应力值在 S_{11} 方向上为-988.6MPa,在 S_{22} 方向上为-1036MPa;从表面残余应力分布曲线中可以看出,在激光光斑作用范围内 S_{11} 方向平均残余压应力值小于 S_{22} 方向的,其中 S_{11} 方向平均残余应力值为-640.6MPa, S_{22} 方向为-904.8MPa;从深度方向残余应力分布曲线中可以看出,最大残余压应力值出现在冲击表面, S_{11} 方向及 S_{22} 方向残余应力层深度分别为0.46mm和1.02mm。因此对于此齿根部分的激光冲击强化,沿X轴方向的平均残余压应力绝对值及残余压应力层深度均小于沿Y轴方向。

2 试验结果与仿真结果对比

图13、14为齿轮齿根7点连续激光冲击强化后,表面 S_{11} 方向及 S_{22} 方向上,试验所测9个数据点与仿真模拟结果对比曲线。可以看出,冲击表面上两个方向的仿真模拟残余压应力值均稍大于试验所测值, S_{11} 方向上仿真模拟最大残余压应力值为-904MPa,试验所测最大值为-643MPa, S_{22} 方向上仿真模拟最大残余压应力值为-1036MPa,试验所测最大值为-925MPa。无论是仿真模拟结果还是试验结果, S_{22} 方

向残余压应力值总体上大于 S_{11} 方向。分别计算试验所测中间7个数据点(去除两侧强化边缘处的两点)的平均残余压应力值和7个数据点对应范围内仿真预测模型上的残余应力均值可以发现, S_{11} 方向试验平均残余压应力为-595MPa,仿

真平均残余压应力为-683MPa,模型对于 S_{11} 方向残余应力值预测误差约为14.8%;同理得到 S_{22} 方向试验平均残余压应力为-834MPa,仿真平均残余为-953MPa,模型对于 S_{22} 方向残余应力值预测误差约为14.3%。针对预测误差产生的原

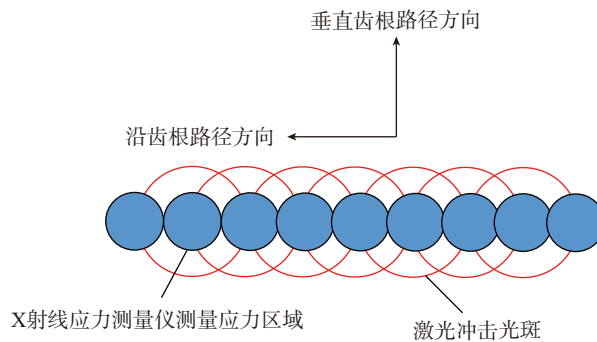


图8 强化件表面应力测量点的选取
Fig.8 Location of measuring points on surface

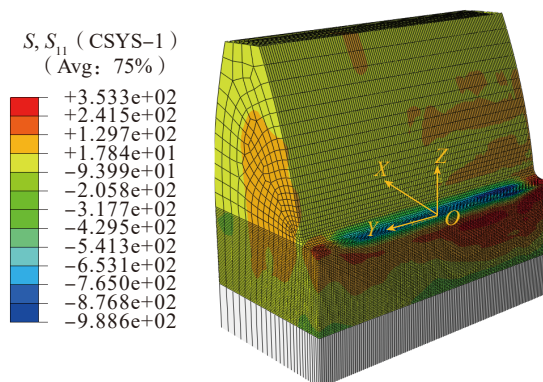


图9 S_{11} 方向残余应力云图
Fig.9 Residual stress in S_{11} direction

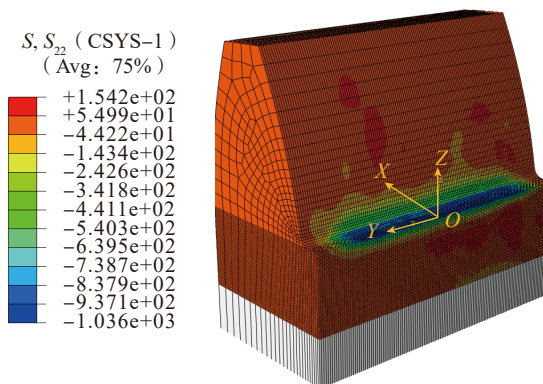


图10 S_{22} 方向残余应力云图
Fig.10 Residual stress in S_{22} direction

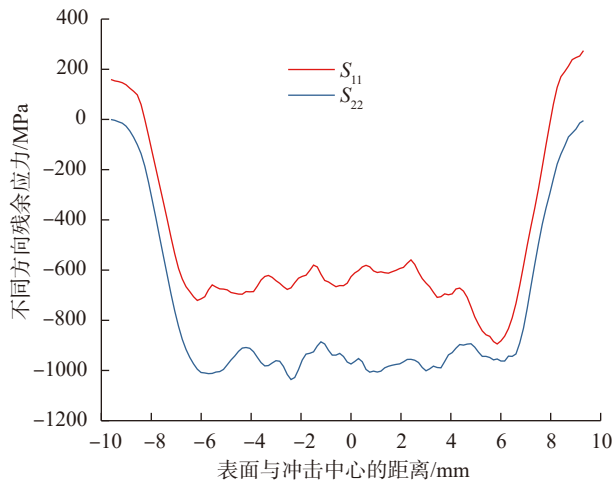


图11 齿根表面不同方向残余应力分布曲线

Fig.11 Residual stress across surface in different direction

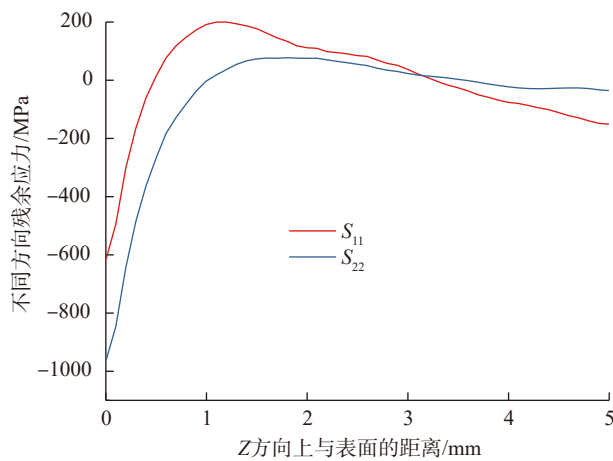
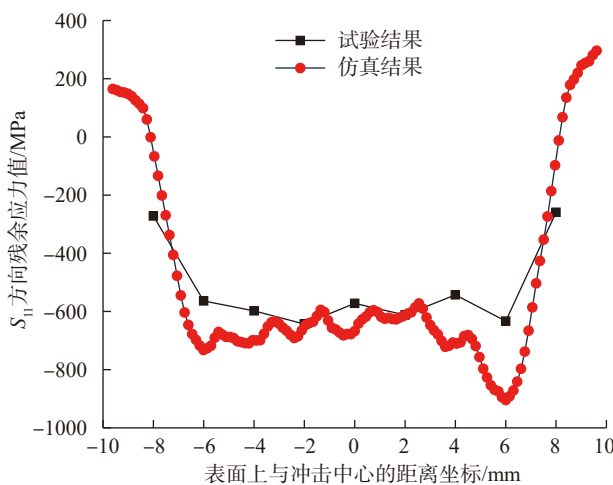


图12 齿根层深不同方向残余应力分布曲线

Fig.12 Residual stress along depth in different direction

图13 齿根表面 S_{11} 方向残余应力分布曲线Fig.13 Residual stress across surface in S_{11} direction

因,本文认为主要是由于试验所用试样块及齿轮材料内部初始应力并不为0,初始毛坯材料在经过加工以及多种处理方式后在其内部存在着一定的应力,这种应力的存在将对激光冲击强化所产生的残余应力造成影响。虽然本文所用激光冲击强化有限元模型的分析结果不能和试验结果完全相同,但其预测误差均在15%以内,且反映的激光冲击强化规律和试验是吻合的,故此方法可以作为研究激光冲击强化工艺的有效手段。

结论

(1) 通过将仿真结果同试验结果对比分析可知,所建立的齿轮齿根多点激光冲击强化有限元模型可以较好地预测实际激光冲击强化结果,针对强化后不同方向表面残余应力值的预测误差均在15%以内,准确揭示了激光冲击强化作用规律,为后期齿轮齿根强化工艺的优化提供了理论模型。

(2) 试验结果和有限元仿真结果均表明,激光冲击强化可使18Cr2Ni4WA高强度钢齿轮齿根部产生明显的残余压应力层,但不同方向残余压应力分布略有不同,平行于齿根路径方向的平均残余压应力小于垂直于齿根路径方向平均残余压应力。因此,激光冲击强化后的齿轮齿根垂直于齿根路径方向的抗疲劳性能比平行于齿根路径方向更强。

参考文献

[1] ZHANG Y, LU J, LUO K. Laser shock processing of FCC metals[J]. Berlin: Springer, 2013.

[2] 吴俊峰, 邹世坤, 车志刚, 等. 超高应变率激光冲击不同厚度A17050合金的层裂研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(7): 72-77.

WU Junfeng, ZOU Shikun, CHE Zhigang, et al. Spall of A17050 alloy with different

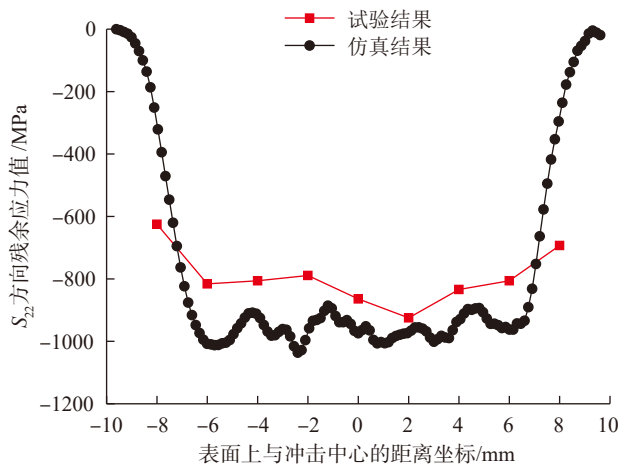


图14 齿根表面 S_{22} 方向残余应力分布曲线
Fig.14 Residual stress across surface in S_{22} direction

thicknesses under ultrahigh strain rate laser shock peening[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(7): 72-77.

[3] HU Y, YAO Z, HU J. 3-D FEM simulation of laser shock processing[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(3): 1426-1435.

[4] LI L, SUN L. Experimental and numerical investigations of crack behavior and life prediction of 18Cr2Ni4WA steel subjected to repeated impact loading[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 65: 11-25.

[5] FABBRO R, FOURNIER J, BALLARD P, et al. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. Journal of Applied Physics, 1990, 68(2):775-784.

[6] 周南, 乔登江. 脉冲束辐照材料动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

ZHOU Nan, QIAO Dengjiang. Materials dynamics under pulse beam radiation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.

[7] ZHANG W, YAO Y L, NOYAN I C. Microscale laser shock peening of thin

films, part 1: experiment, modeling and simulation[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2004, 126(1):10-17.

[8] SINGH G, GRANDHI R V, STARGEL D S. Modeling and parameter design of a laser shock peening process[J]. International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics, 2011, 12: 233-253.

[9] 朱文辉, 李志勇, 周光泉, 等. 用PVDF实时测量激光诱导的冲击波压力[J]. 实验力学, 1997(2):216-220.

ZHU Wenhui, LI Zhiyong, ZHOU Guangquan, et al. Measurement of laser-induced shock waves by PVDF[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1997(2): 216-220.

[10] 程龙. 不同激光冲击工艺参数对40Cr钢表面应力应变影响的模拟试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.

CHENG Long. Simulative and experimental study of 40Cr steel subjected to laser shock peening with different parameters on the stress and strain[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.

通讯作者: 解丽静, 博士, 副教授, 研究方向为先进加工工艺和装备、加工表面强化技术、刀具技术、动力传动系统关键制造技术等, E-mail: rita_xie@163.com。

Experimental and Simulation Study on Laser Shock Peening of Gear Root

LI Chenlu¹, XIE Lijing¹, CHENG Guanhua¹, LIANG Guoxiang²

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Shanxi Diesel Engine Industry Co., Ltd., Datong 037000, China)

[ABSTRACT] To investigate the influence of the laser shock processing (LSP) on the residual stress of the high-strength steel gear root, ABAQUS software is used to simulate the laser shock processing, and the experimental results are analyzed to verify the accuracy of the simulation model. The results show that this model accurately predicts the distribution of the residual stress on the gear root after LSP, and the law of LSP reflected by the simulation is consistent with the experimental results. According to the distribution of the residual stress, it is concluded that laser shock processing introduces near-surface compressive residual stress which varies in different directions. Specifically, the average value of the compressive residual stress along the gear root is larger than that in the vertical direction.

Keywords: High-strength steel; Laser shock processing; Gear root; Finite element simulation; Residual stress

(责编 阳光)