

基于 FEM-DEM 的空心稳定杆内壁喷丸仿真分析

任旭东¹, 汪舟^{1,2}, 卢伟³, 罗素晖³, 王晓丽^{1,2}, 邓小云³,
刘浩均³, 郑世祺¹, 张旭¹

(1. 武汉理工大学 a. 汽车工程学院 b. 现代汽车零部件湖北省重点实验室, 武汉 430070; 2. 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 武汉 430070; 3. 广州华德汽车弹簧有限公司, 广州 511339)

摘要: **目的** 建立有限元-离散元耦合的喷丸模型, 研究喷丸参数对空心稳定杆内壁残余应力场的影响规律。**方法** 基于 ABAQUS 有限元分析软件和“先整体后局部”的建模方法, 建立 26MnB5 钢空心稳定杆全段和局部 FEM-DEM 喷丸模型, 并对模型进行残余应力验证。通过局部喷丸模型研究弹丸撞击角度、速度、表面覆盖率和喷丸流量对稳定杆第 4 弯折处内壁残余应力场分布的影响规律。**结果** 残余应力场分布的实验值与仿真值的误差在 7% 以内, 验证了模型的准确性。随着弹丸撞击角度的增大, 最大残余应力和残余压应力层深也会随之增大, 并在 60° 后达到饱和; 当弹丸速度为 80 m/s 和 100 m/s 且弹丸数量为 1:1 时, 表面残余应力和最大残余应力分别约为 -926 MPa 和 -1 309 MPa; 随着弹丸覆盖率的增大, 表面残余应力和最大残余应力均增大, 但增幅变缓, 在覆盖率为 200% 后基本达到饱和; 随着喷丸流量的增大, 表面残余应力和最大残余应力先增大后减小, 在 1.2 kg/min 时达到最大值, 分别约为 -649 MPa 和 -1 049 MPa。**结论** 基于 FEM-DEM 的空心稳定杆内壁喷丸模型能够很好地预测残余应力场的分布, 该研究为空心稳定杆内壁喷丸工艺的数值模拟提供了研究思路和理论支持。

关键词: 空心稳定杆喷丸; FEM-DEM 耦合仿真; 模型简化; 喷丸参数; 残余应力分布

中图分类号: TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)01-0410-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.01.042

FEM-DEM Simulation on Inner Wall Shot Peening of Hollow Stabilizer Bar

REN Xu-dong¹, WANG Zhou^{1,2}, LU Wei³, LUO Su-hui³, WANG Xiao-li^{1,2},
DENG Xiao-yun³, LIU Hao-jun³, ZHENG Shi-qi¹, ZHANG Xu¹

(1. a. School of Automotive Engineering, b. Hubei Key Laboratory of Modern Automotive Components, Wuhan University of Technology, Hubei 430070, China; 2. Hubei Collaborative Innovation Center of Automobile Parts Technology, Wuhan 430070, China; 3. Guangzhou Huade Automotive Spring Co., Ltd., Guangzhou 511339, China)

收稿日期: 2022-07-22; 修订日期: 2022-09-08

Received: 2022-07-22; Revised: 2022-09-08

基金项目: 校企合作项目 (20211h0038)

Fund: School-Enterprise Cooperation Project (20211h0038)

作者简介: 任旭东 (1996—), 男, 硕士, 主要研究方向为汽车轻量化、多物理场耦合仿真。

Biography: REN Xu-dong (1996-), Male, Master, Research focus: lightweight of automobile, multiphysics coupling simulation.

通讯作者: 汪舟 (1981—), 男, 副教授, 主要研究方向为汽车轻量化、汽车零部件先进制造、多物理场耦合仿真。

Corresponding author: WANG Zhou (1981-), Male, Associate professor, Research focus: lightweight of automobile, advanced manufacturing of auto parts, multiphysics coupling simulation.

引文格式: 任旭东, 汪舟, 卢伟, 等. 基于 FEM-DEM 的空心稳定杆内壁喷丸仿真分析[J]. 表面技术, 2023, 52(1): 410-420.

REN Xu-dong, WANG Zhou, LU Wei, et al. FEM-DEM Simulation on Inner Wall Shot Peening of Hollow Stabilizer Bar[J]. Surface Technology, 2023, 52(1): 410-420.

ABSTRACT: The transverse stabilizer bar is the key safety part in the suspension system of automobile. As a typical component affected by fatigue force, its performance is very important for driver's comfort, safety and handling stability in driving. Therefore, improving the fatigue performance of the stabilizer bar is very important to extend and reduce the service time and failure risk of the stabilizer bar. As a mechanical surface strengthening method widely used in industrial production, shot peening has become an essential process in the production process of stabilizer bar because of its obvious effect on fatigue life improvement.

The work aims to establish a shot peening model for coupling finite element and discrete element to study the effect law of shot peening parameters on the residual stress field on inner wall of hollow stabilizer bar. Therefore, 26MnB5 hollow stabilizer bar was taken as the research object. Firstly, the fatigue life of the hollow stabilizer bar was tested. The results showed that the fourth bend was the part of the stabilizer bar prone to fatigue fracture. The crack initiation point at the fracture was located in the inner wall of the fourth bend of the stabilizer bar. Therefore, in order to improve the fatigue life of the stabilizer bar, the inner wall of the stabilizer bar should be strengthened by shot peening, especially the surface modification of the inner wall at the fourth bend of the stabilizer bar. Stabilizer bar was built based on FEM-DEM coupling approach shot peening model, with the "first whole, after local" simulation method, first through the stabilizer bar segment model shot velocity distribution in the fourth bend, then through the fourth bend specific region of the stabilizer bar model to study the effect of shot peening parameters on the residual stress distribution. The residual stress distribution of the SP model was verified.

The results showed that the errors between the experimental and the simulated value of residual stress field distribution was less than 7%, which verified the accuracy of the SP model. With the increment of impact angle of shot, the values of maximum residual stress and compressive residual stress layer depth also increased, and reached saturation after 60°. Therefore, in the actual shot peening process, the impact angle of the shot should be greater than 60°. When the shot velocity was 80 m/s and 100 m/s and the number of shots was 1 : 1, the values of surface residual stress and maximum residual stress were about -926 MPa and -1 309 MPa, respectively. With the increment of shot coverage, the values of surface residual stress and maximum residual stress increased but the increment rate slowed down. When the shot coverage was larger than 200%, these two values kept nearly unchanged. As the coverage continued to increase, it was difficult to produce further plastic deformation, and the distribution of residual stress tended to be stable along the layer depth. With the increment of shot mass flow, the values of surface residual stress and maximum residual stress increased first and then decreased, and reached the maximum value at 1.2 kg/min, which was about -649 MPa and -1 049 MPa, respectively. The SP model based on FEM-DEM can well predict the distribution of residual stress field. The research results provide research ideas and theoretical support for the inner wall SP process of hollow stabilizer bar.

KEY WORDS: shot peening for hollow stabilizer bar; FEM-DEM coupling simulation; model simplification; SP parameters; residual stress distribution

汽车横向稳定杆通过自身的扭曲变形产生扭矩来稳定车身,它是汽车独立悬架上的重要安全件之一^[1]。通常汽车横向稳定杆分为实心稳定杆和空心稳定杆,随着汽车轻量化进程的不断深入,空心稳定杆的应用越来越广泛。空心稳定杆与实心稳定杆相比,质量减轻了 30%~40%,因此采用空心管制作稳定杆的比例在近 10 年来逐渐增加^[2]。稳定杆作为汽车悬架上典型受疲劳作用力影响的部件,其性能直接影响汽车行驶过程中的舒适性、安全性和操纵稳定性等重要性能指标^[3-5],因此改善稳定杆的疲劳性能对延长和降低稳定杆服役时间和失效风险极为关键。

喷丸是一种在工业上广泛应用的机械表面强化方法,该方法对稳定杆疲劳寿命的提升效果较明显,因此成为稳定杆生产过程中必不可少的工艺环节。在喷丸强化过程中,通过大量高速喷射的弹丸撞击受喷

零件表面,使得零件表面产生塑性变形,从而在零件表层获得对疲劳性能和疲劳寿命有利的残余压应力场和微观组织结构^[6-7]。随着计算机技术的飞速发展,运用数值模拟方法对喷丸工艺过程进行建模仿真,并通过仿真与实验相结合来研究喷丸参数对受喷零件残余应力场和材料组织结构的影响成为一种有效的研究手段^[8-10]。早期的喷丸有限元仿真技术,如 Mori 等^[11]、Schiffner 等^[12]利用有限元法建立的规则轴对称结构的多弹丸模型,通过与单弹丸模型进行比较,证实了简化弹丸撞击喷丸模型的有效性。随后, Miao 等^[13]结合 Matlab 程序和 Ansys 预处理器建立了三维随机弹丸模型,使得喷丸模型实现了从规则弹丸撞击向随机弹丸撞击的转变。Gangaraj 等^[14]对比了规则弹丸模型和随机弹丸模型,得出后者在喷丸残余应力预测上更符合实际的结论。由于这些有限元法对于模拟

喷丸过程中大量弹丸的运动情况具有一定的局限性,因此近几年采用离散元法及有限元-离散元耦合方法来模拟喷丸过程成为主流^[15-17]。Han等^[18]利用离散元法建立了弹丸模型,然后开发了一种并行FEM-DEM耦合方法,模拟了有限次数的喷丸过程。Bhuvanaraghan等^[19]将有限元与离散元喷丸模型相结合,获得了准确的残余应力和塑性应变预测值。Murugaratnam等^[20]利用FEM-DEM耦合的喷丸模型,对喷丸参数进行了研究,确定了喷丸角度、初始速度、质量流量对残余应力的影响。Rousseau等^[21]利用FEM-DEM耦合模型研究了超声喷丸过程中焊缝数量对喷丸表面的影响,结果表明,受喷区域的深度随着弹丸数量的增加而减小。

刘阳等^[22]研究发现,空心稳定杆最易出现疲劳断裂失效的部位为杆臂与杆身连接的弯折处。Senapathi等^[23]采用ABAQUS/Fe-Safe对稳定杆裂纹萌生的位置和疲劳寿命作了预测,也得到了与前者相同的结论。图1为文中采用空心稳定杆的疲劳试验结果,可以看出杆身与杆臂连接的第4弯折处为易发生断裂的危险部位。采用喷丸强化技术对空心稳定杆内壁进行表面改性,重点改善稳定杆第4弯折处的表面性能,以提高稳定杆的疲劳寿命。由于空心稳定杆管口喷丸工艺参数无法直接对第4弯折处的残余应力场进行预测,因此文中提出“先整体后局部”的建模方法,基于有限元软件ABAQUS建立稳定杆喷丸FEM-DEM耦合模型。具体来说,首先通过稳定杆全段喷丸仿真结果得到空心稳定杆不同弯折处弹丸速度分布;再提取第4弯折处的喷丸参数进行局部建模,得到不同喷丸工艺参数下稳定杆第4弯折处内壁受喷后残余应力分布。通过FEM-DEM联合仿真量化空心稳定杆喷丸工艺参数与残余应力场分布的关系,拟为稳定杆内壁喷丸工艺参数优化提供数值支撑和科学依据。

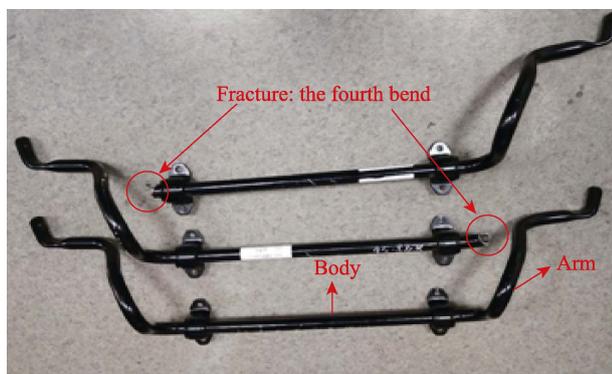


图1 空心稳定杆疲劳试验结果
Fig.1 Fatigue test result of hollow stabilizer bar

1 空心稳定杆内壁喷丸强化模型的建立

1.1 稳定杆喷丸材料模型

研究材料为调质26MnB5钢空心稳定杆,来自广州华德汽车弹簧有限公司。26MnB5钢被广泛应用于汽车零件的生产,包括稳定杆、驱动器和齿轮轴等^[24]。26MnB5钢的热处理工艺:加热至950℃后,经PAG淬火液淬火,淬火后进行300℃低温回火,并保温30min。空心稳定杆材料26MnB5钢的化学成分如表1所示。

这里的喷丸材料模型综合考虑了弹丸撞击过程中工件表面不规则的弹塑性循环加载及高应变速率条件下加工硬化的作用,采用Johnson-Cook模型作为工件材料的本构模型,见式(1)。

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

式中: σ 为等效应力; A 、 B 、 C 分别为材料的初始屈服强度、应变硬化系数和应变率敏感系数; ε 、 $\dot{\varepsilon}_p$ 和 $\dot{\varepsilon}_0$ 分别为等效塑性应变、等效塑性应变率和参考塑性应变率; n 、 m 分别为应变硬化指数和温度敏感性系数; \hat{T}^m 为当前状态下材料的温度参数,此模型中取 $\hat{T}^m=0$ 。

26MnB5钢的材料特性参数如表2所示。其中, ρ 为材料的密度, E 、 ν 分别为材料的弹性模量与泊松比; A 、 B 、 n 、 m 、 C 均为Johnson-Cook模型中的材料参数。弹丸选取高强度CCW- $\phi 0.8$ mm/G3高碳钢丝切丸。采用普通弹塑性模型,弹丸材料的特性参数如表3所示。

1.2 稳定杆全段喷丸强化弹丸速度分布模型

稳定杆全段喷丸强化工艺采用气动式喷丸,在稳定杆管口将弹丸喷射进稳定杆。为了得到稳定杆全段喷丸强化过程中不同部位的弹丸速度分布,首先采用FEM-DEM耦合模型对空心稳定杆整体喷丸进行仿真,然后提取弹丸在每个部位的速度分布,稳定杆整体模型的建立分为以下3个步骤。

1) 将图1所示的空心稳定杆通过UG建模软件进行建模,将稳定杆整体模型导入ABAQUS中。稳定杆整体喷丸FEM-DEM耦合模型如图2所示。稳定杆材料本构模型采用Johnson-Cook材料模型。稳定杆整体采用缩减积分六面体单元(C3D8R),单元尺寸为2mm×2mm×2mm,稳定杆整体模型单元数量

表1 空心稳定杆材料26MnB5钢的化学成分^[24]

Tab.1 Chemical composition of 26MnB5 steel for hollow stabilizer bar^[24]

Chemical element	C	Si	Mn	P	S	Al	N	Cr	Ti	B
Mass fraction/%	0.279	0.211	1.23	0.019	0.005	0.049	0	0.121	0.027	0.004

表 2 26MnB5 钢材料特性参数^[24]
Tab.2 Material characteristic parameters of 26MnB5 steel^[24]

E/GPa	ν	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	A/MPa	B/MPa	n	m	C
206	0.3	7 850	1 100	1 052	1.1	0.35	0.013

表 3 弹丸材料的特性参数
Tab.3 Characteristic parameters of shot material

E/GPa	ν	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Φ/mm
206	0.27	7 800	0.8

为 23 822; 通过离散元法中的粒子生成器功能建立弹丸喷口面, 共生成了 18 个 SFM3D4R 单元。对稳定杆两端约束 6 个自由度, 即在稳定杆两端面进行完全固定约束。稳定杆外径为 24 mm, 内径为 16 mm, 喷口直径为 16 mm, 与稳定杆端口保持平行, 以保证弹丸相对于端口表面垂直入射。设定喷口与端口的距离为 4 mm, 使弹丸相对于端口表面垂直入射。

2) 提交分析生成的 input 文件, 利用 Python 语言重新编写 input 文件, 基于广州华德公司实际内壁喷丸工艺参数, 设置弹丸的数量为 4 000 粒, 直径为

0.8 mm, 初始速度为 60 m/s, 喷丸流量为 1.2 kg/min, 以及其他弹丸材料模型参数。根据熊天伦等^[25]的研究, 定义弹丸与内壁表面的接触为硬接触, 选用 Hertz 接触理论定义弹丸之间的接触。

3) 提交 input 文件进行有限元计算, 输出稳定杆整体喷丸仿真结果。稳定杆第 4 弯折处弹丸的速度分布如图 3 所示, 可以看出, 第 4 弯折处的弹丸速度普遍分布在 20 000~30 000 mm/s 区间, 这也与后文对该部位速度分布的统计结果一致。

提取仿真结果, 选取弹丸处于目标部位处的即时帧数, 提取该帧数下的弹丸速度, 得到弹丸流在稳定杆 4 个弯折处的速度分布情况, 如图 4 所示。

文中重点关注稳定杆在第 4 弯折处受到的应力, 该部位速度分布在 25~35 m/s 的弹丸数量占总弹丸数量的约 50.9%, 速度分布在 15~25 m/s 的弹丸占比约为 46.1%。在后续稳定杆局部喷丸建模中, 为了减少喷丸模型的计算时间, 在局部喷丸模型中赋予弹丸 2 个速度来代表第 4 弯折处弹丸的冲击情况, 2 个速度分别为 20、30 m/s, 弹丸数量的比例约为 1:1, 其他速度的弹丸占比很小, 其影响可忽略不计。

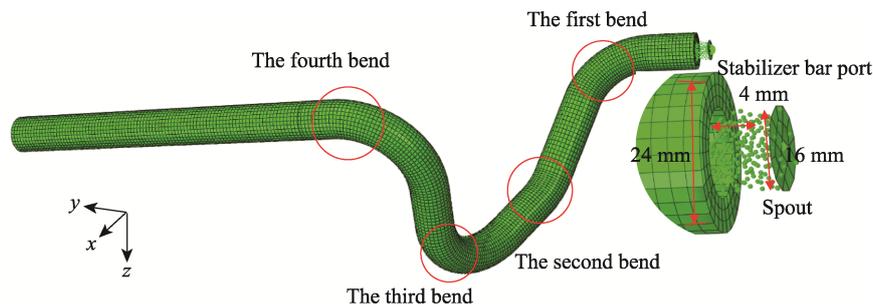


图 2 稳定杆整体喷丸 FEM-DEM 耦合模型
Fig.2 FEM-DEM coupling model of integral shot peening of stabilizer bar

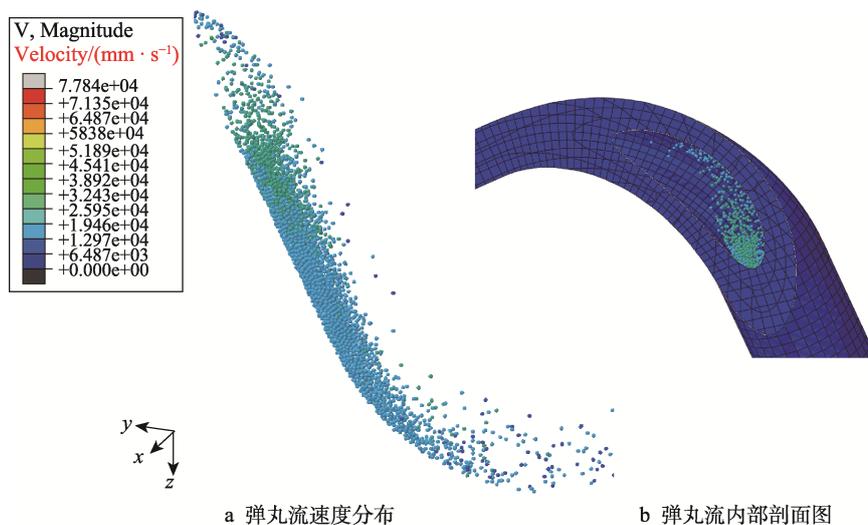


图 3 稳定杆第 4 弯折处弹丸流瞬时状态
Fig.3 Instantaneous state of shot flow of the fourth bend area of stabilizer bar: a) schematic diagram of shot velocity distribution; b) internal section of shot flow

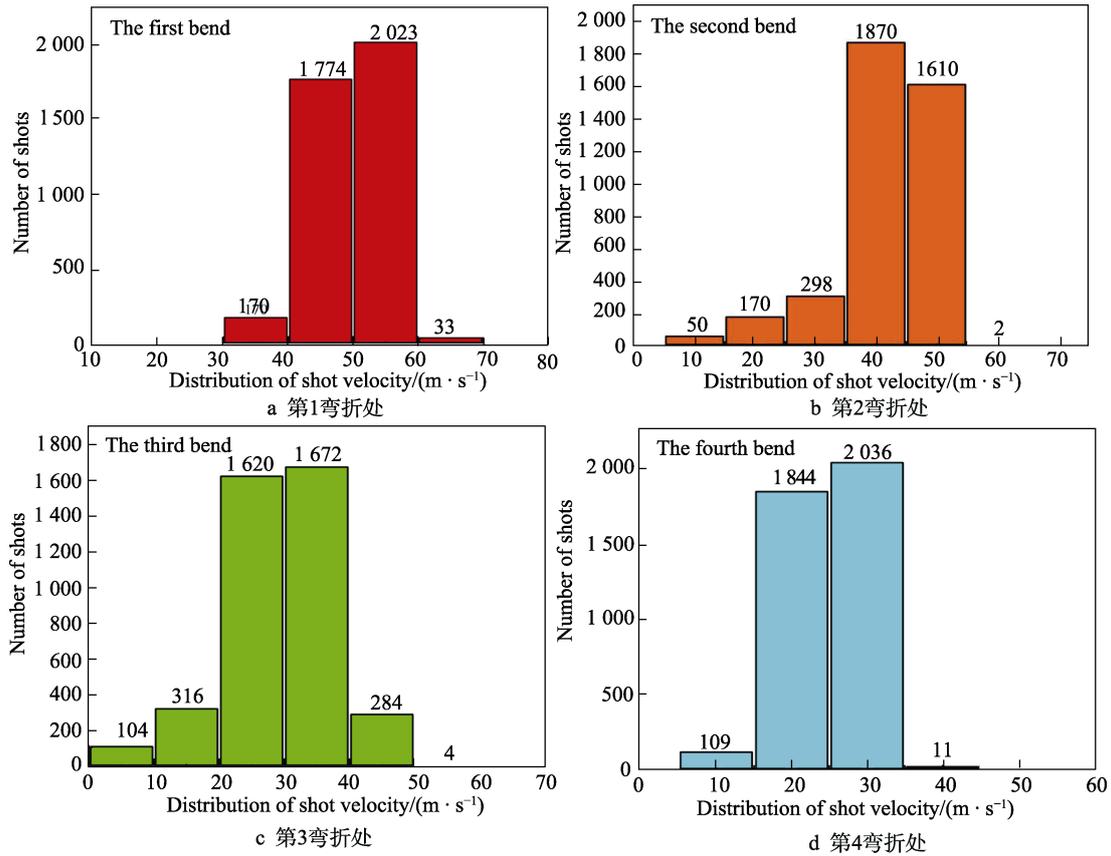


图4 稳定杆4个弯折处区域的弹丸速度分布

Fig.4 Schematic diagram of shot velocity distribution at different areas of stabilizer bar: a) the first bend area; b) the second bend area; c) the third bend area; d) the fourth bend area

1.3 稳定杆特定区域喷丸 FEM-DEM 耦合模型

为了得到弹丸撞击后第4弯折处残余应力的分布情况，运用 ABAQUS 软件对稳定杆第4弯折处进行局部建模。稳定杆第4弯折处喷丸模型示意图如图5所示，其中第4弯折处的壁厚为4 mm，曲率半径为50 mm，弯曲角度为45°。由于稳定杆内壁弹丸撞击的主要区域为弯折处中心，因此对中心接触区域网格作细化处理。Frijia 等^[26]研究了受喷零件喷丸区域单元尺寸与仿真残余应力之间的关系，得到了最小单

元的尺寸应至少小于 1/10 弹丸直径，才能保证残余应力符合实际的结论，因此文中局部模型接触区域网格单元尺寸设为 0.08 mm。第4弯折处喷丸模型接触区域的面积为 12 mm×12 mm，在其他区域布置渐变网格，最小为 0.08 mm，最大为 2 mm，共 247 626 个 C3D8R 单元。第4弯折处局部模型尺寸和网格示意图如图 5a 所示。根据 1.2 节得出的第4弯折处弹丸速度分布设置双喷口粒子生成器，设定喷射速度为 20 m/s 和 30 m/s 的组合弹丸，数量比例为 1 : 1。喷口单元示意图如图 5b 所示。稳定杆第4弯折处喷丸 FEM-DEM 耦合模型仿真结果如图 6 所示。

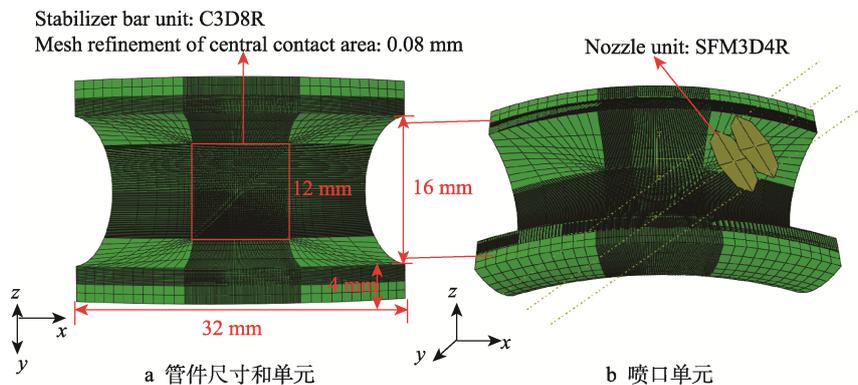


图5 稳定杆第4弯折处喷丸模型示意图

Fig.5 Schematic diagram of shot peening model at the fourth bend of stabilizer bar: a) pipe fitting size and unit; b) nozzle unit

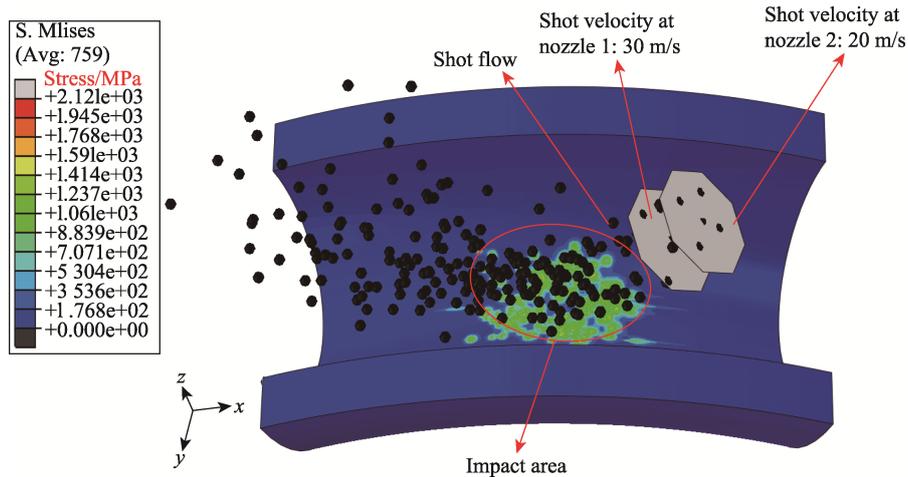


图 6 稳定杆第 4 弯折处喷丸仿真结果示意图

Fig.6 Schematic diagram of shot peening simulation results at the fourth bend of stabilizer bar

通过分析图 6 可知, 弹丸流从 1、2 等 2 个喷嘴喷出, 撞击内壁后在表层和次表层形成了残余压应力场。利用 Python 程序对稳定杆内壁的残余应力进行提取, 根据接触区域的网格密度为 0.08 mm, 采取逐层提取的方式, 共提取了 25 层, 即距离稳定杆内壁表面深度 0~2 mm 的残余应力。

2 喷丸强化实验与模型验证

2.1 空心稳定杆内壁喷丸工艺

采用广州华德自行研发的喷丸强化设备对 26MnB5 空心稳定杆进行内壁喷丸强化处理, 空心稳定杆内壁喷丸强化设备示意图如图 7 所示。喷丸强化工艺流程: 首先把经热处理空心杆固定在专用夹具上, 然后调整喷丸机的喷嘴位置, 使其正对着空心杆的管口, 通过把喷嘴伸入稳定杆, 以保证弹丸能够从管口处完全射入稳定杆中。在设定喷丸工艺相关工艺参数后进行喷丸强化处理, 大量弹丸由喷嘴喷出后, 撞击空心杆内壁表面, 形成了残余压应力场。用于与仿真验证模型进行对比的空心稳定杆内壁喷丸工艺参数如表 4 所示, 数据来自广州华德汽车弹簧有限公司。

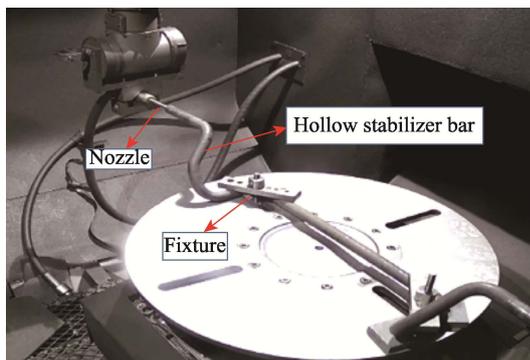


图 7 空心稳定杆内壁喷丸强化设备示意图

Fig.7 Schematic diagram of shot peening strengthening equipment for inner wall of hollow stabilizer bar

表 4 用于与仿真验证模型进行对比的空心稳定杆内壁喷丸工艺参数

Tab.4 Process parameters of shot peening on the inner wall of hollow stabilizer bar compared with the simulation verification model

Shot peening flow/(kg·min ⁻¹)	Shot diameter/mm	Shot peening pressure/MPa	Shot peening time/s
1.2	0.8	0.45	3

在实际喷丸强化过程中, 弹丸的喷射速度通常通过调节空压机产生的空气压力进行控制。在文中的仿真模型中, 弹丸的初始速度根据 Klemenz 博士等^[27]在实验中总结得到的经验公式计算获得, 见式 (2)。

$$v = \frac{16.35 \times p}{1.53 \times m + p} + \frac{29.50 \times p}{0.598 \times d + p} + 4.83 \times p \quad (2)$$

式中: v 为弹丸射出的初始速度, m/s; m 为喷丸流量, kg/min; d 为弹丸直径, mm; p 为喷丸进气压力。将表 4 中的参数代入式 (2), 可以得到与仿真验证模型进行对比的喷丸初始速度约为 60 m/s。

在喷丸模型中, 对喷丸表面不同覆盖率的描述必须把实际覆盖率转换为撞击弹丸的数量进行处理。Kirk D 博士^[28]提出了一种基于 Avrami 方程预测喷丸零件表面覆盖率的理论模型。该模型假设所有弹丸以相同速度随机撞击目标靶板, 并且产生相同尺寸的表面凹坑, 该模型经简化后的表达式见式 (3)。

$$C(n) = \left[1 - \exp\left(-\frac{\pi \bar{r}^2 n}{S}\right) \right] \times 100\% \quad (3)$$

式中: $C(n)$ 为覆盖率; n 为弹丸数量; \bar{r} 为弹坑半径; S 为喷丸区域的面积。由式 (3) 可计算指定喷丸工艺参数下不同覆盖率下所需的弹丸数量。

2.2 残余应力测量

实验中采用的残余应力测量设备为 Xstress 3000 G3 X 射线应力分析仪。采用 Cr 靶-K α 射线, 衍射晶面为 Fe(211)晶面, 测试方法为侧倾衍射几何法。由

于X射线对金属的穿透深度通常只能达到10~20 μm 。为了表征残余应力沿层深方向的分布,采用DC30-2A电解抛光机对切割后取下的不同弯折处稳定杆试件内表面进行电解剥层。为了保证与仿真结果对比的实际残余应力的准确性,检测了2组以表4为喷丸工艺参数的稳定杆试件第4弯折处内壁部位的残余应力。2组试件每层电解的抛光深度为15 μm ,共抛光10层,最大检测深度为0.15 mm。各层的残余应力检测点均位于试件内壁的顶点处。

2.3 模型验证

为了验证所建喷丸模型预测稳定杆第4弯折处残余应力的准确性,将模型仿真预测的残余应力与以表4中的喷丸参数喷丸后的实验残余应力进行对比。稳定杆第4弯折处喷丸模型设定的2个弹丸速度分别为20 m/s和30 m/s,其弹丸数量比例为1:1。根据式(3)计算出在该12 mm \times 12 mm的接触区域100%覆盖率所需要的弹丸总数量为520。根据严宏志等^[29]的研究成果,弹丸垂直撞击工件时(喷丸角度=90°)能够获得理想的残余应力分布,但在稳定杆内壁喷丸强化生产工艺中,绝大多数弹丸撞击工件的角度往往不是90°。由此,根据FEM-EM喷丸模型稳定杆第4弯折处弹丸撞击角度统计结果,设置局部模型所有弹丸撞击角度为75°,目的是最大限度地提升计算效率,同时保证与实际撞击情况相符。利用Python脚本对稳定杆第4弯折处目标区域的残余应力进行逐层提取,并计算得到稳定杆内壁残余应力沿深度方向的值。稳定杆第4弯折处残余应力沿层深分布仿真与实验结果对比如图8所示,其中横坐标为稳定杆应力沿内壁表面向内部的深度,纵坐标为x方向上的残余应力。

从图8可以看出,在残余应力变化趋势方面,仿真值与2组实验值保持一致。随着深度的增加,残余

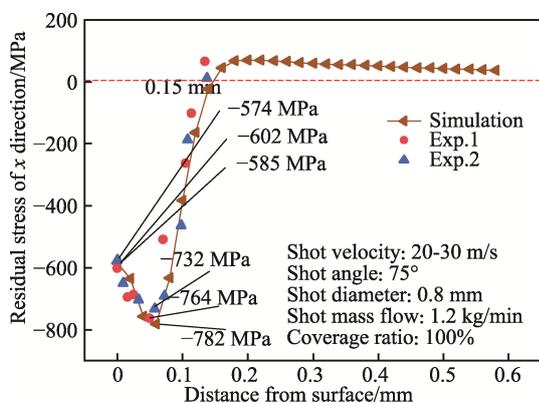


图8 稳定杆第4弯折处残余应力沿层深分布仿真与实验结果对比

Fig.8 Comparison between the simulated and experimental residual stress distribution in depth at the fourth bend of stabilizer bar

压应力都呈现先增大后减小的趋势。为了准确地描述喷丸后的残余应力场(CFRS)分布,通常定义4个特征参量,包括表面残余应力($\sigma_{\text{Surf}}^{\text{RS}}$)、最大残余应力($\sigma_{\text{max}}^{\text{RS}}$)、最大残余压应力层深(δ_{max})和残余压应力层深(δ_0)。具体来说,在稳定杆第4弯折处的仿真和实验表面残余应力分别约为-585、-602、-574 MPa,仿真值相对于2组实验值的误差分别约为3%和1.9%。仿真和实验的最大残余应力分别约为-782、-764、-732 MPa,仿真值相对于2组实验值的误差分别约为2.3%和6.4%。最大残余压应力层深的仿真值与实验值均在约60 μm 的区域达到最大值,而残余压应力层深的仿真值与实验值都在约120 μm 附近。通过对比实验与仿真残余应力场4个特征参量可以看出,文中建立的FEM-DEM空心稳定杆喷丸模型在空心杆内壁残余应力方面具有较好的预测能力,模型所采用的“先整体后局部”的建模方法能够准确地预测空心稳定杆内壁某一特定部位表面的残余应力分布。

3 结果与分析

3.1 弹丸撞击角度对残余应力的影响

通过2.3节对比稳定杆第4弯折处仿真和实验残余应力沿层深的分布情况,证实所建立的局部喷丸FEM-DEM模型能够有效预测空心杆内壁喷丸残余应力分布。由此,以下对弹丸撞击角度、速度、覆盖率和喷丸流量等4个喷丸参数对残余应力分布的影响分别进行讨论。在弹丸撞击角度对残余应力场的影响分析中,设定弹丸速度为20 m/s和30 m/s的数量比为1:1(共520粒弹丸),弹丸直径为0.8 mm,弹丸流量为1.2 kg/min,撞击角度分别选取30°、45°、60°、75°、90°。由于弹丸撞击角度较小时,残余应力在平行于撞击方向投影(x方向)和垂直于撞击方向投影(y方向)上的分布具有较大的差异,因此需要分别分析x和y方向上残余应力的分布。不同弹丸撞击角度下稳定杆第4弯折处x方向和y方向残余应力沿层深的分布仿真结果如图9a-b所示。

根据结果可知,在x方向上,随着弹丸撞击角度从30°增至45°,表面残余应力从约-472 MPa增至约-494 MPa,然后随着角度的增大,表面残余应力开始减小,最终减至约-394 MPa,相比最大值减小了约20.2%。弹丸以30°撞击时产生的最大残余压应力约为-670 MPa,在撞击角度增至60°后,最大残余应力基本保持稳定,约为-840 MPa,增大了约25.4%。最大残余压应力层深在30°下撞击时约为40 μm ,在撞击角度增大到60°后,层深基本保持稳定,约为85 μm ,增大了112.5%。残余压应力层深在30°撞击时约为120 μm ,当角度大于75°后,层深基本保持不变,约

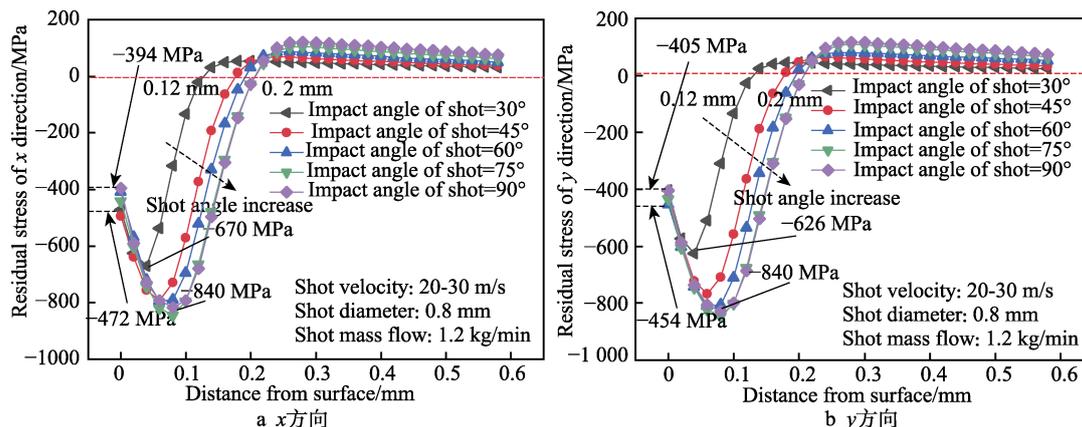


图 9 弹丸在 5 种撞击角度下稳定杆第 4 弯折处残余应力沿层深分布的仿真结果
Fig.9 Simulation results of residual stress distribution in depth at the fourth bend of stabilizer bar under five impact angles of shot: a) x-direction; b) y-direction

为 $200\ \mu\text{m}$, 增大了约 66.7%。在 y 方向上, 在撞击角度大于 60° 时较 x 方向的数值基本保持不变, 但以 30° 和 45° 撞击时表面残余应力较 x 方向的值分别减小了约 14.2% 和 13.4%, 最大残余压应力较 x 方向的值分别减小了约 6.6% 和 3.2%。出现这一现象的原因是弹丸在以一定角度撞击内壁表面时, 会产生垂直于表面和平行于表面的 2 个分量, 弹丸撞击的角度越小, 与平行分量相同方向上的残余应力就会越大, 相反与平行分量垂直方向上的残余应力则越小。对于喷丸工艺的强化效果来说, 最大残余应力和残余压应力深度为最重要的 2 个参量^[30], 在弹丸撞击角度大于 60° 时, 这 2 个值在 x 和 y 方向上都具有较高的水平。在实际喷丸工艺中, 应尽量保证弹丸的撞击角度大于 60° 。

3.2 弹丸速度对残余应力的影响

由于稳定杆第 4 弯折处弹丸速度主要由 2 种速度组成, 因此在弹丸速度对残余应力场的影响分析中, 选取弹丸直径为 $0.8\ \text{mm}$, 弹丸流量为 $1.2\ \text{kg}/\text{min}$, 弹丸撞击角度为 75° , 喷丸覆盖率为 100%。这里根据式 (2), 在弹丸流量和直径一定的情况下, 通过改变喷丸进气压力 p 来控制弹丸速度。调节喷丸进气压力, 使弹丸速度分别为 10、20 m/s, 20、30 m/s, 40、60 m/s, 60、80 m/s, 80、100 m/s 的 2 种速度的组合弹丸撞击稳定杆第 4 弯折处, 2 种速度弹丸数量比均为 1:1 (弹丸总数为 520 粒)。5 种弹丸组合速度下稳定杆第 4 弯折处 y 方向残余应力沿层深分布的仿真结果如图 10 所示。

从图 10 可以看出, 表面残余应力和最大残余应力会随着弹丸速度的增长而增大, 但这 2 个值的增长并非呈线性趋势。随着弹丸速度的增大, 这 2 个值的增幅变缓。当组合弹丸速度从 10 m/s 和 20 m/s 增至 80 m/s 和 100 m/s 时, 表面残余应力从约 $-451\ \text{MPa}$ 增至约 $-926\ \text{MPa}$, 增大了约 105%; 最大残余应力从约 $-459\ \text{MPa}$ 增至约 $-1\ 309\ \text{MPa}$, 增大了约 185%。在速度达到 40 m/s 和 60 m/s 后, 表面和最大残余应力

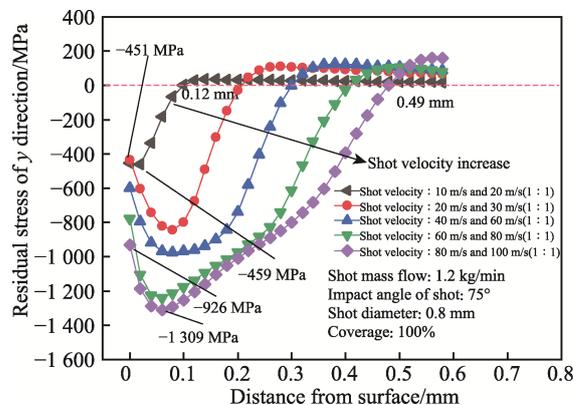


图 10 5 种弹丸组合速度下稳定杆第 4 弯折处 y 方向残余应力沿层深分布的仿真结果
Fig.10 Simulation results of y -direction residual stress distribution in depth at the fourth bend of stabilizer bar under five combined velocities of shot

的增长幅度呈减小的趋势。具体来说, 从 40 m/s 和 60 m/s 的速度增至 60 m/s 和 80 m/s 时, 表面残余应力和最大残余应力分别从约 $-600\ \text{MPa}$ 和 $-976\ \text{MPa}$ 增至 $-778\ \text{MPa}$ 和 $-1\ 240\ \text{MPa}$, 增长幅度约为 30% 和 27%; 从 60 m/s 和 80 m/s 的速度增至 80 m/s 和 100 m/s 时, 表面残余应力和最大残余应力的增幅约为 19.4% 和 5.6%, 分别下降了约 10.6% 和 21.4%。这表明随着弹丸速度的增大, 这 2 个值会沿着深度方向逐渐趋于饱和状态, 不再随着弹丸速度的增大而发生明显的变化, 这一点也与之之前伍刚^[31]的研究成果类似。同时过大的弹丸速度也会引入较大的表面粗糙度, 导致应力集中系数过大, 这会有害于稳定杆的疲劳性能, 因此应将弹丸速度控制在 60~100 m/s 范围内。

3.3 弹丸覆盖率对残余应力场的影响

为了探究弹丸不同覆盖率对内壁残余应力分布的影响, 选取弹丸速度为 20 m/s 和 30 m/s, 弹丸数量的比例为 1:1, 弹丸直径为 $0.8\ \text{mm}$, 弹丸流量为 $1.2\ \text{kg}/\text{min}$, 撞击角度为 75° 。根据式 (3) 计算出覆

盖率分别为 50%、100%、200%、300%、400% 时所需的弹丸总数分别约为 230、520、1 140、1 720、2 080，基于稳定杆第 4 弯折处喷丸模型开展了研究。5 种弹丸覆盖率下稳定杆第 4 弯折处 y 方向残余应力沿层深分布的仿真结果如图 11 所示。

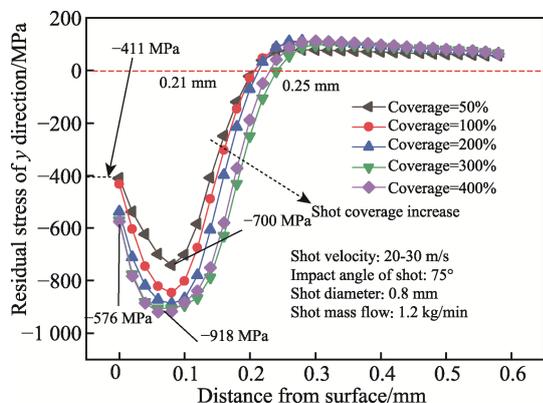


图 11 5 种弹丸覆盖率下稳定杆第 4 弯折处 y 方向残余应力沿层深分布的仿真结果

Fig. 11 Simulation results of y -direction residual stress distribution in depth at the fourth bend of stabilizer bar under five coverage rates of shot

从图 11 可以看出，表层残余应力在 50% 和 100% 的覆盖率下相差不大，约为 -411 MPa 和 -432 MPa；在 200%、300%、400% 覆盖率下的表面残余应力分别为 -538 、 -569 、 -576 MPa，200% 覆盖率下的表面残余应力比 100% 覆盖率下的表面残余应力增大了约 24.5%，随后随着覆盖率的增大表层残余应力基本无变化。在最大残余压应力方面，弹丸覆盖率为 50%、100%、200%、300%、400% 时的最大残余压应力分别约为 -700 、 -845 、 -888 、 -904 、 -918 MPa。弹丸覆盖率为 200% 的最大残余压应力比 50% 的最大残余压应力增大了 188 MPa，约 26.9%。随着弹丸覆盖率的增加，最大残余压应力的增长呈现逐渐变缓的趋势，覆盖率在大于 200% 后，最大残余压应力无明显增大。在弹丸覆盖率为 300% 和 400% 时，两者的表面残余应力和最大残余压应力仅相差 7 MPa 和 14 MPa，最大残余压应力层深均约为 $70 \mu\text{m}$ ，残余压应力层深分别约为 $242 \mu\text{m}$ 和 $234 \mu\text{m}$ 。这种现象可以归结为覆盖率超过一定值后，喷丸强化产生了硬化现象，随着覆盖率的增加，难以产生进一步的塑性变形，残余应力沿层深的分布趋于稳定。

3.4 喷丸流量对残余应力的影响

在以往对喷丸强化的仿真研究中，喷丸流量往往作为一个综合参数给定。在实际生产中，喷丸流量是一个主要的工艺参数，由于 ABAQUS 在 2016 版本后新增的 DEM 功能能够对弹丸流量单独进行设置，因此这里选取喷丸流量参数单独展开分析。在喷丸流量对残余应力场的影响分析中，设定弹丸速度为 50 m/s 和 60 m/s 的弹丸数量比为 1:1（共 520 粒弹丸），撞

击角度为 75° ，弹丸直径为 0.8 mm，流量分别选取 0.6、1.2、1.8、2.4、3.0 kg/min。在 5 种喷丸流量下稳定杆第 4 弯折处 y 方向残余应力沿层深分布的仿真结果如图 12 所示。

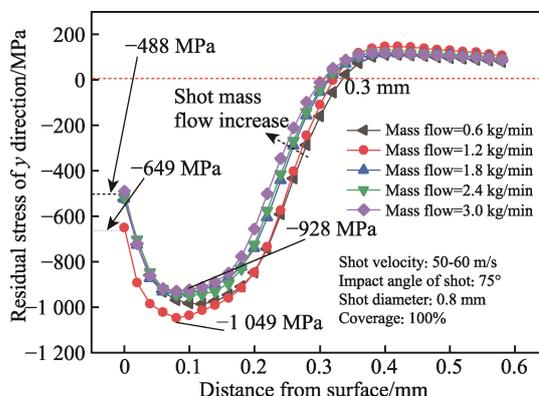


图 12 5 种喷丸流量下稳定杆第 4 弯折处 y 方向残余应力沿层深分布的仿真结果。

Fig. 12 Simulation results of y -direction residual stress distribution in depth at the fourth bend of stabilizer bar under five shot peening mass flows

从图 12 中可以看出，随着喷丸流量的增大，表面和最大残余应力均呈现出先增大后减小的趋势。在喷丸流量为 0.6 kg/min 时，表面残余应力和最大残余应力约为 -530 MPa 和 -985 MPa。表面残余应力和最大残余应力在喷丸流量为 1.2 kg/min 时达到最大值，分别约为 -649 MPa 和 $-1 049$ MPa。表面残余应力和最大残余应力在 3.0 kg/min 时最小，分别约为 -488 MPa 和 -928 MPa，相对于最大值分别减小了约 24.8% 和 12.9%。出现这一现象的原因：在较小喷丸流量下，随着流量的增大，单位时间内击打在内壁表面的弹丸数量增多，撞击次数增多，所以最大残余压应力呈现先增大的趋势；当流量增至一定程度时，单位时间内射出的弹丸过多，弹丸在撞击内壁表面前会先相互碰撞，从而耗散了部分动能，导致弹丸撞击内壁的能量减小，使得表面残余应力反而减小，最终呈现出最大残余压应力减小的趋势。在 5 个不同喷丸流量下，最大残余压应力层深均约为 $90 \mu\text{m}$ ，残余压应力层深均约为 $300 \mu\text{m}$ 。这也可以看出，不同喷丸流量对于残余压应力层深的影响不大。

4 结论

基于 FEM-DEM 耦合的方法，建立了空心稳定杆内壁喷丸模型用以预测稳定杆内壁局部区域受喷后残余应力值分布。文中提出“先整体后局部”的建模方法，首先通过整体建模得到了空心稳定杆不同弯折处的弹丸速度分布，然后采用局部建模的方法得到了空心稳定杆第 4 弯折处喷丸后的残余应力分布。在此基础上，重点分析了多组喷丸工艺参数对空心稳定杆第 4 弯折处表层区域残余应力的影响规律，主要结

论如下。

1) 弹丸撞击角度会影响残余应力场分布, 当撞击角度大于 60° 时, 最大残余应力和残余压应力深度值在 x 和 y 2 个方向上的数值基本达到饱和, 分别约为 -840 MPa 和 $200 \mu\text{m}$ 。

2) 随着弹丸撞击速度的增大, 表层残余应力和最大残余压应力都呈现持续增长的趋势, 但增幅变缓。在撞击速度为 80 m/s 和 100 m/s 时, 表层残余应力和最大残余压应力分别约为 -926 MPa 和 -1309 MPa。

3) 在覆盖率超过 200% 后, 喷丸强化出现了硬化现象。随着覆盖率的增加, 难以产生进一步的塑性变形, 残余应力沿层深分布趋于稳定。

4) 随着喷丸流量的增大, 表面和最大残余应力值均呈现先增大后减小的趋势。在喷丸流量为 1.2 kg/min 时, 表层残余应力和最大残余压应力达到最大值, 分别约为 -649 MPa 和 -1065 MPa。在喷丸流量为 3.0 kg/min 时, 表层残余应力和最大残余压应力达到最小值, 分别约为 -488 MPa 和 -928 MPa, 相对于最大值分别减小了约 24.8% 和 12.9% 。

参考文献:

- [1] 喻川, 胡伟, 张建武, 等. 荣威 750FCV 前横向稳定杆结构的轻量化[J]. 机械设计与研究, 2010, 26(3): 121-124.
YU Chuan, HU Wei, ZHANG Jian-wu, et al. Structural Lightweight Study on Front Antiroll Bar of Roewe 750 FCV[J]. Machine Design & Research, 2010, 26(3): 121-124.
- [2] 王伟, 王海艳, 熊朝恩. 空心稳定杆的优化设计[J]. 汽车实用技术, 2018(3): 106-109.
WANG Wei, WANG Hai-yan, XIONG Chao-en. Optimum Design of Hollow Stabilizer Bar[J]. Automobile Applied Technology, 2018(3): 106-109.
- [3] BAYRAKCEKEN H, TASGETIREN S. Fracture of an Automobile Anti-Roll Bar[J]. Engineering Failure Analysis, 2006, 13(5): 732-738.
- [4] WITTEK A M, GAŠKA D, ŁAZARZ B, et al. Effect of Shot Peening on the Fatigue Strength of Automotive Tubular Stabilizer Bars DC 218[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2016, 61(4): 1963-1968.
- [5] 戚士兵. 基于损伤容限法的汽车稳定杆疲劳特性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012: 16-28.
QI Shi-bing. The Research on the Fatigue Character of Automotive Stabilizer Bar Based on Damification Tolerance Design[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012: 16-28.
- [6] 方博武. 受控喷丸与残余应力理论[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1991: 1-4.
FANG Bo-wu. Controlled Shot Peening and Residual Stress Theory[M]. Jinan: Shandong Science & Technology Press, 1991: 1-4.
- [7] SCURACCHIO B G, LIMA N B D. Role of Residual Stresses Induced by Double Peening on Fatigue Durability of Automotive Leaf Springs[J]. Materials & Design, 2013, 47: 672-676.
- [8] DEGUCHI T, MOURI M, HARA J, et al. Fatigue Strength Improvement for Ship Structures by Ultrasonic Peening[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2012, 17(3): 360-369.
- [9] WANG Cheng, WANG L, WANG X G, et al. Numerical Study of Grain Refinement Induced by Severe Shot Peening[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 146-147: 280-294.
- [10] CHEN J S, DESAI D A, HEYNS S P, et al. Literature Review of Numerical Simulation and Optimisation of the Shot Peening Process[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11(3): 168781401881827.
- [11] MORI K, OSAKADA K. Finite Element Analysis of Peening Process with Plasticity Deforming Shot[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1994, 45(1/2/3/4): 607-612.
- [12] SCHIFFNER K, et al. Simulation of Residual Stresses by Shot Peening[J]. Computers & Structures, 1999, 72(1/2/3): 329-340.
- [13] MIAO H, LAROSE H. 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.
- [14] GANGARAJ S, GUAGLIANO M. An Approach to Relate Shot Peening Finite Element Simulation to the Actual Coverage[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 243: 39-45.
- [15] EDWARD A B, HEYNS P. Shot Peening Modeling and Simulation for RCS Assessment[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 7: 172-177.
- [16] 洪滔, 王志伟, 袁巨龙. 喷丸强化过程的有限元和离散元模拟[J]. 中国机械工程, 2008, 19(11): 1321-1325.
HONG Tao, WANG Zhi-wei, YUAN Ju-long. Numerical Simulation of Shot Peening Process Using Finite Element and Discrete Element Method[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(11): 1321-1325.
- [17] MARINI M. A New Challenge in the DEM/FEM Simulation of the Shot Peening Process: The Residual Stress Field at a Sharp Edge[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 169: 105327.
- [18] HAN K, OWEN D R J, PERIC D. Combined Finite/Discrete Element and Explicit/Implicit Simulations of Peen Forming Process[J]. Engineering Computations, 2002, 19(1): 92-118.
- [19] BHUVARAGHAN B, SRINIVASAN S. Shot Peening Simulation Using Discrete and Finite Element Methods[J]. Advances in Engineering Software, 2010, 41(12): 1266-1276.
- [20] MURUGARATNAM K, UTILI M. A Combined DEM-FEM Numerical Method for Shot Peening Parameter Optimisation[J]. Advances in Engineering Software, 2015, 79: 13-26.
- [21] ROUSSEAU T, HOCA T. Effect of Bead Quantity in

- Ultrasonic Shot Peening: Surface Analysis and Numerical Simulations[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 225: 413-420.
- [22] 刘阳, 汪永国, 崔磊, 等. 34MnB5 钢汽车空心稳定杆疲劳失效分析[J]. *科技视界*, 2020(28): 95-96.
LIU Yang, WANG Yong-guo, CUI Lei, et al. Fatigue Failure Analysis of 34MnB5 Steel Automobile Hollow Stabilizer Bar[J]. *Science & Technology Vision*, 2020(28): 95-96.
- [23] SENAPATHI P, SHAMASUNDAR S, VENUGOPALA RAO G, et al. Endurance Testing and FE Analysis of Four Wheeler Automobile Stabilizer Bar[C]// SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, 2009: 10-21.
- [24] 朱继东, 于丹, 韦习成, 等. 喷丸强化对 26MnB5 钢组织和力学性能的影响[J]. *热处理技术与装备*, 2018, 39(4): 6-11.
ZHU Ji-dong, YU Dan, WEI Xi-cheng, et al. Effect of Stress Peening on Mechanical Properties and Microstructure of 26MnB5 Steel[J]. *Heat Treatment Technology and Equipment*, 2018, 39(4): 6-11.
- [25] 熊天伦, 鲁录义. FEM-DEM 耦合模型在 ABAQUS 中的实现[C]// 中国力学大会暨庆祝中国力学学会成立 60 周年大会论文集, 2017: 378-391.
XIONG Tian-lun, LU Lu-yi. Implementation of FEM-DEM Coupling Model in ABAQUS[C]// Chinese Mechanics Congress and Proceedings of the Congress celebrating the 60th Anniversary of Chinese Mechanics Society, 2017: 378-391.
- [26] FRIJA M, HASSINE T. Finite Element Modelling of Shot Peening Process: Prediction of the Compressive Residual Stresses, the Plastic Deformations and the Surface Integrity[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 426(1/2): 173-180.
- [27] KLEMENZ M, SCHULZE V, VÖHRINGER O, et al. Finite Element Simulation of the Residual Stress States after Shot Peening[J]. *Materials Science Forum*, 2006, 524-525: 349-354.
- [28] KIRK D. Theoretical Principles of Shot Peening Coverage[J]. *Shot Peener*, 2005, 19(2): 24.
- [29] 严宏志, 伊伟彬, 朱鹏飞, 等. 基于 FEM-DEM 的齿轮钢随机喷丸模型及残余应力仿真研究[J]. *制造业自动化*, 2021, 43(6): 6-11.
YAN Hong-zhi, YI Wei-bin, ZHU Peng-fei, et al. Random Shot Peening Model of Gear Steel Based on Fem-Dem and Residual Stress Simulation[J]. *Manufacturing Automation*, 2021, 43(6): 6-11.
- [30] ZIMMERMANN M, KLEMENZ M, SCHULZE V. Literature Review on Shot Peening Simulation[J]. *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering*, 2010, 3(4): 289.
- [31] 伍刚. 汽车轴用 42CrMo 钢喷丸工艺参数优化及疲劳性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018: 14-29.
WU Gang. Research on Shot Peening Parameters Optimization and Fatigue Properties of 42CrMo Steel for Automobile Shafts[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018: 14-29.

责任编辑: 彭颖

(上接第 371 页)

- [24] 杨贤金, 何菲, 朱胜利, 等. NiTi 形状记忆合金表面氧化膜的成分和结构[J]. *兵器材料科学与工程*, 2002, 25(2): 7-10.
YANG Xian-jin, HE Fei, ZHU Sheng-li, et al. Component and Microstructure of Oxide Film on NiTi Shape Memory Alloy[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2002, 25(2): 7-10.
- [25] 张蕾涛, 刘德鑫, 张伟楠, 等. 钛合金表面激光熔覆涂层的研究进展[J]. *表面技术*, 2020, 49(8): 97-104.
ZHANG Lei-tao, LIU De-xin, ZHANG Wei-qiang, et al. Research Progress of Laser Cladding Coating on Titanium Alloy Surface[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(8): 97-104.
- [26] KIM K S, JEE K K, KIM W C, et al. Effect of Heat Treatment Temperature on Oxidation Behavior in Ni-Ti Alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 481-482: 658-661.

责任编辑: 万长清

(上接第 409 页)

- [31] 王东. 基于阴极平动的游离微珠辅助磨电铸基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
WANG Dong. Basic research on free-beads-polishing-assisted electroforming with orbital movement cathode[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [32] KIMMERLE F M, LEROY R L, VITTORI O. Concentration Profiles in Electrowinning Circuits: I. Current Efficiency[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1981, 128(9): 1864-1869.
- [33] GEORGIADOU M, VEYRET D, SANI R L, et al. Simulation of Shape Evolution during Electrodeposition of Copper in the Presence of Additive[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2001, 148(1): C54.
- [34] ZAHRAEI M, SAIDI M S, SANI M. Numerical Simulation of Electro-Deposition Process Influenced by Force Convection and Migration of Ions[J]. *Journal of Electro-analytical Chemistry*, 2016, 782: 117-124.
- [35] ROY S. Formation of Dual Diffusion Layer by Pulsing Currents[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(4): 1756-1760.

责任编辑: 刘世忠