

喷丸除锈过程及效果的数值模拟研究

黄河, 杨帆, 高玉魁

(同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092)

摘要: **目的** 模拟研究喷丸除锈工艺的过程和处理效果, 为优化工艺参数提供指引。 **方法** 以建筑用低碳钢及其锈蚀产物为研究对象, 利用单元去除技术和周期性胞元方法建立有限元模型, 模拟多个丸粒随机撞击和氧化层去除的过程, 并与文献中的实验数据进行了对比验证, 从氧化层去除速率、去除后的表面粗糙度和表层残余应力三个角度分析喷丸除锈工艺的效果。 **结果** 提高除锈效果可从增大丸粒入射速度和丸粒直径来入手, 氧化层越厚喷丸除锈处理的时间越长。 **结论** 喷丸除锈工艺能有效去除锈蚀层, 同时改善表面粗糙度和引入残余压应力, 具有较广的应用前景。有限元模拟能为该工艺优化提供便捷的研究途径。

关键词: 喷丸; 除锈; 有限元模拟; 单元去除; 残余应力场

中图分类号: U671.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)11-0194-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.11.030

Numerical Simulations on Process and Effectiveness of Rust Removal by Shot Blasting

HUANG He, YANG Fan, GAO Yu-kui

(School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate into the process and effectiveness of rust removal technique by shot blasting based on numerical simulations so as to direct the optimization of technological parameters. While low-carbon steel for building and its corrosion products were taken as the object of study, finite element (FE) models were established by utilizing the element removal technique and periodic cell algorithm, so as to simulate the rust removal process for the mild steel under the random impact of various shots. The simulations were validated by comparing the results with the experimental data in literatures. The effectiveness of the shot blasting in rust removal was examined in terms of rust removing rate, residual stress distribution and surface roughness. The effectiveness of shot blasting treatment was improved by increasing kinetic energy of the impinging shots, i.e. the incident velocity and shot diameter. Longer shot blasting treatment was required to remove the rust for thicker oxide layer. Shot blasting is an efficient technique to remove the rust coating, improve the surface roughness and introduce the compressive residual stress. Hence it has promising application prospect. FE simulation is a useful tool to provide flexible study approach for optimizing the process.

收稿日期: 2016-05-14; 修订日期: 2016-08-01

Received: 2016-05-14; Revised: 2016-08-01

基金项目: 上海市教委科研创新项目 (15zz018); 中央高校基本科研业务费专项资金 (20143401)

Fund: Supported by the Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission (15zz018), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (20143401)

作者简介: 黄河 (1993—), 男, 研究方向固体力学

Biography: HUANG He (1993—), Male, Research focus: solid mechanics.

通讯作者: 杨帆 (1980—), 男, 副教授, 主要研究方向为固体力学。

Corresponding author: YANG Fan (1980—), Male, Associate professor, Research focus: solid mechanics.

KEY WORDS: shot blasting; rust removal; finite element; element removal; residual stress

喷丸除锈是利用压缩空气或旋转离心力(后一种一般叫抛丸,本文不作严格区分)来加速硬质丸粒,使其高速撞击在金属表面,利用撞击力和摩擦力来去除金属表面氧化层和其他污染物的表面处理方法^[1-2]。其工质可以是金属弹丸,也可以是砂砾(后者一般称为喷砂除锈,这里不作区分而统一称作喷丸除锈)。喷丸除锈可以实现几个目的:1)提高工件的美观程度。喷丸除锈能清除表面锈蚀及其他污染,提高工件的光洁度,得到均匀一致的显露金属本色的表面。2)提高工件与涂料、镀料的结合力。喷丸除锈能形成致密表面,并得到一定的表面粗糙度^[3],有助于表面与涂料、镀料的结合,所以往往作为表面防腐和表面喷涂处理前的必要工序,比如桥梁钢结构防腐处理前先进行喷丸(或喷砂)除锈处理^[4]。3)提高工件疲劳寿命^[5]。喷丸除锈通过大量弹丸的撞击,能在金属表层引入具有一定分布的残余压应力,有利于抑制裂纹在表面的萌生和扩展,从而提高工件的疲劳寿命。此外,喷丸形成的表面凸凹轮廓还能起到存储润滑油,改善润滑条件的作用。

文献[4,6]指出,实际工程中评判喷丸除锈工艺的效果,首先,直观地体现在去除氧化层,即清洁度。一般采取国际标准 SIS055900 对清洁度划分为 Sa1、Sa2、Sa2.5 以及 Sa3,其中 Sa3 为最高级的清理级别,对应的氧化层去除率在 99%以上;Sa2.5 为比较彻底的清理级别,氧化层去除率大约为 95%;Sa2 和 Sa1 对表面清洁程度的要求依次递减。参照这个标准,本研究采用了介于 Sa3 与 Sa2.5 之间的 96%的氧化层去除率作为评判表面清洁度达标的标准。其次,喷丸除锈处理后,金属表面需满足一定的粗糙度以增加对后续防锈层的附着力,对于不同用途的钢制品,对粗糙度的要求不同。从 1997 年建造的虎门大桥到 2003 年建造的卢浦大桥,对于清洁度的要求都在 Sa2.5 以上,然而对粗糙度的要求从 30~40 μm 提升到了 70~100 μm ^[4]。

尽管喷丸除锈工艺在工业界得到了广泛应用,但关于其机理的研究还很不足。已有一些关于喷丸除锈的文献,如谢孟华^[4]研究了钢桥表面的喷砂除锈,赵晓运^[7]、唐和平^[8]、王有力^[9]报导了抛丸除锈在车辆及其零件上的应用,许宏高^[10]总结了船体

抛丸除锈。但这些文献多集中在设备和工艺^[11],或是丸粒材料的选择^[12],关于除锈机理的文献非常少。由于缺乏对除锈效果与各影响参数之间关系的定量认识,工程中一般采用经验方法来控制工艺参数,这种现状限制了喷丸除锈工艺的进一步提高和推广。研究喷丸除锈机理,弄清各参数对除锈效果的定量影响具有重要意义。然而喷丸除锈过程涉及很多参数^[13-14],包括材料参数(如金属和氧化层的力学性能、氧化层和下层金属间的界面强度、摩擦系数等)、过程参数(如氧化层厚度、入射角度、流量、温度、湿度等)、工质参数(如弹丸大小、形状、硬度、入射速度等)。这些参数往往相互影响、共同作用,使得通过实验方法来探究各个参数的作用变得费时而困难。数值模拟方法能将某一个参数的影响隔离出来并单独进行分析,因此在研究复杂过程的机理时有较强优势。

目前,有限元模拟喷丸除锈工艺有以下几个问题需要克服。首先,受限于计算量,有限元模拟实际喷丸中的大量弹丸的撞击比较困难。其次,除锈过程涉及材料的去除,而传统有限元处理的是质量守恒的连续体。再次,喷丸过程中,丸粒的撞击位置是随机的,需要在有限元模型中体现。本文基于有限元模拟对喷丸除锈工艺进行了研究,基于周期性胞元方法,用一个较小的模型来模拟大范围靶材区域,从而节约了计算量,并采用材料生死技术模拟氧化层的逐步去除,使得模拟含大量丸粒随机撞击的喷丸除锈过程成为可能。据笔者的文献调研,喷丸除锈的数值模拟尚属首次。

本研究从以下三个方面提高数值模拟的可信度:1)采用权威文献中的参数进行模拟或推算,如丸粒大小、入射速度、氧化层材料属性等;2)通过和文献中的结论进行定性比较,确保模拟所得各项结果在趋势上正确;3)采用和文献中实验完全相同的参数进行模拟,定量比较模拟结果和实验数据是否一致。

1 有限元模型

采用 ABAQUS 6.14 版本建立三维有限元模型,基于 Explicit 显式模块求解靶材在丸粒撞击下

的动态响应。在本研究中,模拟靶材时,通过构造一个小的周期胞元来代表一个大的区域,胞元四周采用周期性边界条件,其周期性是通过线性多项式约束(*EQUATION)耦合两相对边界上的对应节点的自由度来实现,这种周期胞元除了节省计算量,还能够方便模拟丸粒倾斜入射和撞击点随机的情况^[15—17]。胞元底面采取固定边界条件约束位移。根据文献[18],对铁锈这种脆性材料,垂直入射造成的侵蚀最快,故本文丸粒入射方向与表面垂直。网格划分后,模型及边界条件如图 1a 所示,其中图中叉号点显示是丸粒中心点的位置。为了模拟丸粒随机撞击,丸粒的初始位置 x 、 y 坐标采用随机数生成, z 坐标均匀错开使得相邻两次撞击间隔时间为 $3\ \mu\text{s}$ 。模型中施加的质量比例阻尼和刚度比例阻尼分别为:

$$\alpha = \frac{1}{H} \sqrt{\frac{2E}{\rho}}, \quad \beta = 2 \times 10^{-9} \text{ s} \quad (1)$$

式中: H 为模型的特征长度,这里取靶材胞元高度; ρ 为靶材密度。根据文献[15—16],本文采用的间隔时间和阻尼系数能够很好地衰减丸粒撞击引起的振动,保证了结果的精确。当丸粒撞击点靠近胞元边界时,接触区域可能超出了胞元边界,为了应对这种情况,对每个距离边界小于 $0.5R$ (R 为丸粒半径)的入射丸粒,在对应周期边界外引入镜像丸粒,镜像丸粒的自由度耦合于原丸粒,而质量与转动惯量设为零(实际模拟中为避免计算不稳定,取一极小量),通过镜像丸粒和原丸粒与胞元表面同时发生接触,来模拟丸粒与周期胞元所代表的无穷大靶材表面的相互作用,如图 1b 所示。为了模拟氧化层材料的逐步消除过程,需要考虑新暴露的氧化层表面与后续入射丸粒间的相互作用,故定义了氧化层单元内部表面与丸粒的接触以及内部表面的自接触。所有丸粒与氧化层表面之间的接触摩擦系数取为 0.3,文献[19—20]指出这一摩擦系数不会对结果造成过大影响。靶材胞元的长宽均取 $2R$,高度为 $5R$,根据文献[19],该厚度已足够忽略底部边界对表层结果造成的干扰。表层氧化层厚度取 $0.1\sim 0.3\ \text{mm}$ ^[21]。喷丸的速度取 $30\sim 90\ \text{m/s}$ 。本研究编写了 MATLAB 程序来生成 ABAQUS 的输入 inp 文件,可以通过更改参数来自动生成离散模型的 inp 文件,方便参数化模拟。

模型的离散采用 8 节点减缩积分实体单元(C3D8R)来划分网格,靠近表面部分进行网格细化,

权衡计算量和去除统计精度,单元尺寸在 x 、 y 方向上取 $R/15$,在 z 方向上取 $R/20$ 。根据文献[22—23],除锈效率采用单位质量丸粒所去除的氧化层质量来表征,即公式(2)。

$$\text{去除效率} = \frac{\text{累积去除的氧化层质量}}{\text{累积入射的丸粒质量}} \quad (2)$$

利用 ABAQUS 的单元生死功能来模拟氧化层的去除,当一个单元的状态达到消除临界值时将该单元从模型中去除,即认为其不再具有抵抗应力的能力,以此来模拟氧化层从基体上逐步清除的过程。

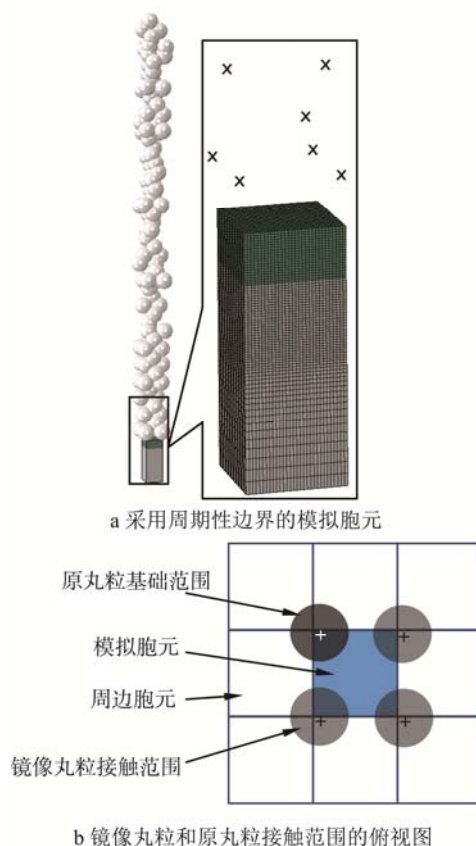


图 1 有限元模型

Fig.1 FE model: a) simulated RVE (representative volume element) using periodic boundary condition, b) top view illustrating the contact regions

对于模型中的材料,靶材基体是建筑中广泛应用的低碳钢,密度为 $7800\ \text{kg/m}^3$,弹性模量为 $200\ \text{GPa}$,泊松比为 0.3,屈服应力为 $1120\ \text{MPa}$,应变率相关性遵循 Premack 和 Douglas^[24]的比例变换原则,具体应变硬化曲线和应变率相关性数据依据文献[25]。喷丸材料采用硬质铸钢,密度为 $7800\ \text{kg/m}^3$,将丸粒模拟为刚性小球。

钢铁锈蚀氧化物往往由 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 FeOOH

等成分组成,此外还含有 Cr、Cu 等元素及大量非晶相,属于组成复杂、性质不固定的混合物,其力学性质的参数在文献中出现较少并且差异极大,本研究以文献[26—27]为根据,取铁锈密度 4345 kg/m^3 ,弹性模量为 6 GPa 。模拟除锈的关键是选用合适的单元去除准则,由于喷丸是一个典型的动态过程,可以选用动态剪切破坏准则,引入损伤变量 ω ,定义为:

$$\omega = \frac{\sum \Delta \bar{\varepsilon}^{\text{pl}}}{\bar{\varepsilon}_f^{\text{pl}}} \quad (3)$$

式中: $\Delta \bar{\varepsilon}^{\text{pl}} = \sqrt{\frac{2}{3} \Delta \varepsilon^{\text{pl}} : \Delta \varepsilon^{\text{pl}}}$ 为每一计算步的等效塑性应变增量;

$\bar{\varepsilon}_f^{\text{pl}}$ 为临界破坏塑性应变。单元所有积分点的 ω 都达到 1 时认为该单元破坏。由于铁锈的临界破坏应力应变很难直接测得,采用文献[27]中的临界断裂强度因子来推断,根据公式:

$$\sigma_c = \frac{K_c}{\sqrt{\pi a}} \quad (4)$$

式中: K_c 为临界断裂强度因子,取 $2.69 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; a 为裂纹长度,铁锈材料中的微缺陷尺寸与组成它的颗粒有关^[26],取 $a=3.6 \text{ } \mu\text{m}$,估算得到临界破坏应力 $\sigma_c=802 \text{ MPa}$ 。由于铁锈属于脆性材料,塑性区极短,取临界破坏塑性应变为 0.001,结合 Mises 塑性模型即可确定铁锈单元的去除准则。

随着喷丸处理的进行,靶材温度可能会升高。该温升产生于摩擦和塑形变形等能量耗散机制造成的产热。刘鹏安等人^[28]分析和测量了喷丸过程中的温度变化,得出金属靶材中的温度升高最大值为 6.35° 。该温升对铁锈和钢材的力学性能影响有限,因此,本研究忽略了喷丸过程中的温升对结果的影响。

由于已有文献中鲜有对喷丸除锈效率和除锈后靶材中残余应力的定量描述,本文从表面粗糙度角度对有限元模型进行验证。根据文献[6],采用 1.2 mm 直径的钢质弹丸对钢材表面进行除锈,表面粗糙度 R_a 达到 $40 \text{ } \mu\text{m}$,对应的初始喷射速度为 77.9 m/s 。本文采用和文献相同的参数进行模拟,考虑到喷射距离的影响,入射速度取为 70 m/s ,统计得到表面粗糙度随时间变化结果如图 2 所示。可以看出,表面粗糙度经过波动,最终值为 $38.16 \text{ } \mu\text{m}$,非常接近文献中的实验值 $40 \text{ } \mu\text{m}$ 。据此可认为本文的有限元模型符合实际情况。

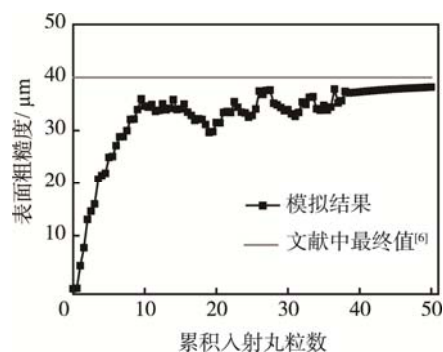


图 2 表面粗糙度随时间变化曲线

Fig. 2 Surface roughness during the shot blast treatment

2 结果与讨论

本文从三个方面评估除锈效果:1) 累积消除单元体积,2) 去除氧化层后的表面粗糙度,3) 基体中的最终残余应力分布。利用 ABAQUS 的后处理接口进行软件的二次开发,编写 ABAQUS/PYTHON 脚本程序统计每一时刻的消除体积、残余应力分布和表面粗糙度。其中统计残余应力时对每一深度取所有对应积分点的平均值,这样所得到的残余应力分布具有统计学上的平均意义。表面粗糙度采取公式(5)所示的轮廓算术平均偏差 R_a 来衡量:

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_N |z_i - \bar{z}| \quad (5)$$

式中: N 为统计的表面节点数; z_i 为节点 z 坐标, \bar{z} 为其平均值。通过参数化模拟,讨论了丸粒入射速度、丸粒大小、氧化层厚度对除锈效果的影响。

2.1 入射速度的影响

为研究喷丸入射速度的影响,速度范围取 $30 \sim 90 \text{ m/s}$,并以 10 m/s 为间隔进行试验,其他参数固定为:喷丸数目 50 个且随机生成,喷丸直径 0.4 mm (对应 SAE 标准^[29]中 S110 型),氧化层厚度 0.2 mm 。图 3 显示了 50 m/s 入射速度下氧化层逐步消除的构型演化,从中可以看到应力分布变化规律。初始时,应力主要集中在氧化层区域,随着氧化层被大量消除和未氧化基体表面被暴露于外,基体中的残余应力才有明显增加。另外,氧化层去除伴随着碎屑的产生,这可由弹性体接触的 Hertz 理论来解释,由于最大剪应力出现在亚表面,故下层单元先达到破坏使得表层单元脱离成为碎屑。图

4 比较了氧化层消去体积随处理时间的变化曲线, 可知入射速度越大, 氧化层去除得越快。另外, 可看到在氧化层接近完全去除 (96%除锈比例) 之前的大部分时间内, 累积去除体积随累积入射丸粒数近似成线性变化, 即除锈处理过程中的除锈效率基本不变。表 1 列出了初始线性段的除锈效率, 96%除锈比例对应的累积喷丸数和最终表面粗糙度, 这里及后文中的除锈效率由图 4 中线性阶段的拟合直线斜率获得, 可知入射速度越大, 氧化层去除得越快, 最终表面的粗糙度越大。

图 5 比较了最终基体中残余应力的分布, 可见最大残余压应力和压应力深度都随喷丸速度的增大而增大, 从而得出速度越大除锈效果越好的结论。这可解释为速度越大, 入射丸粒具有的动能越大, 能够带动消除的氧化层的质量越多, 产生的表面粗糙度和残余应力也越大。但从图 5 可看到, 入射速度进一步增大会使表面残余压应力减小, 这可

归因于弹塑性变形的非线性和非均匀性^[30], 同时过大入射速度还会造成成本增加、表面损伤和变形过大等副作用, 所以实际处理应选择合适入射速度。

2.2 丸粒尺寸的影响

根据 SAE 标准研究了四种丸粒尺寸 S110、S170、S230、S330, 每种丸粒直径取标准中 0.5% 筛网和 20%筛网的平均值。速度取 50 m/s, 弹丸数目为 50, 氧化层厚度为 0.2 mm。由于对不同丸粒尺寸所建立的胞元模型的大小不同, 对应的氧化层的总体积也不同, 因此直接比较不同丸粒模型的消去体积是不合适的, 需采用氧化层去除比例来评估除锈效果。图 6 比较了不同丸粒大小情况的除锈比例变化曲线, 表 2 比较了除锈效率、96%除锈比例对应的累积喷丸数和表面粗糙度。可以看到丸粒越大, 曲线斜率越陡, 达到氧化层全部去除的时间也越短, 但是不同丸粒的除锈效率差别不大。从表 2

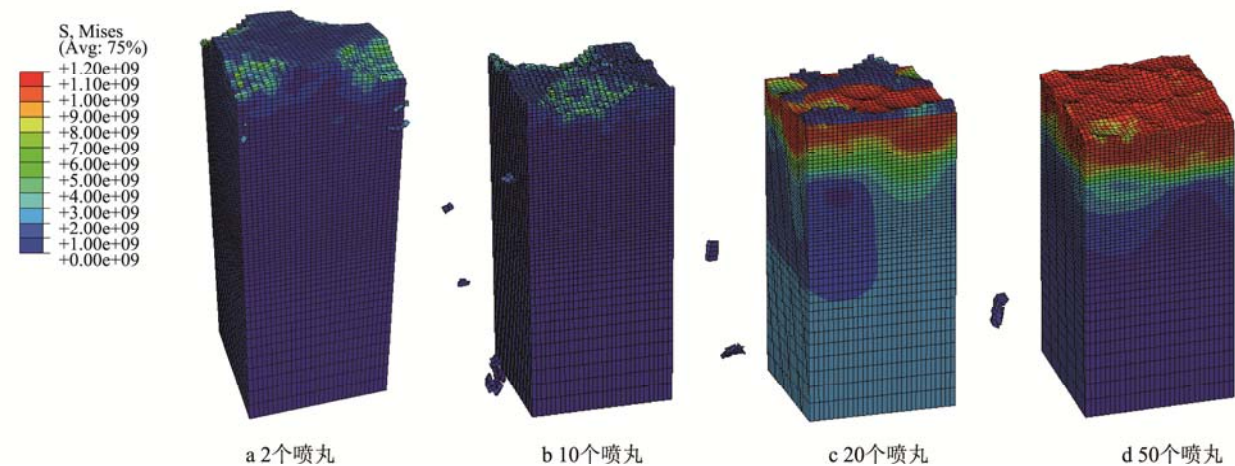


图 3 模拟构型随喷丸处理时间的演化
Fig.3 Evolution of the FE configurations with the shot blast treatment

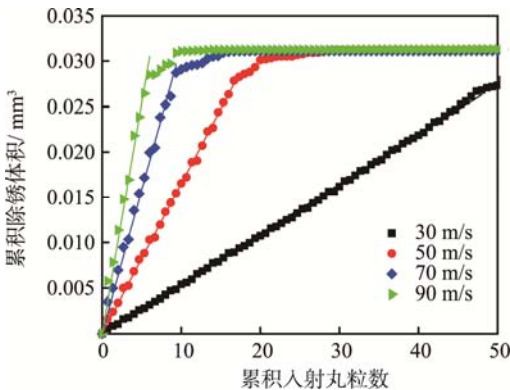


图 4 不同入射速度下氧化层的累积消去体积变化曲线
Fig.4 Variation of the accumulated eroded volume under different impinging velocities

表 1 入射速度对除锈效果的影响
Tab.1 Effect of impinging velocity on the treatment effectiveness

速度/(m·s ⁻¹)	除锈效率	96%消去率对应 喷丸数	表面粗 糙度/μm
30	0.0164		0.55
40	0.0311	39	3.12
50	0.0486	25	4.19
60	0.0704	17	5.15
70	0.0945	15	6.26
80	0.1203	13	7.53
90	0.1516	9	8.84

还可看到，最终表面粗糙度随丸粒的增大而增大。图 7 比较了不同丸粒大小对应的残余应力分布图，随着丸粒尺寸的增大，残余压应力的深度增大，但最大残余压应力值几乎不变，表面残余应力反而略有减小。

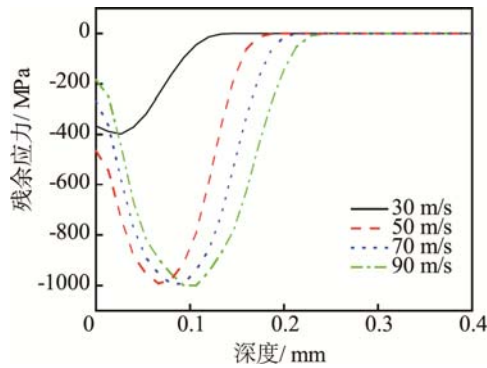


图 5 不同入射速度下的最终残余应力分布
Fig. 5 Final residual stress distribution under different im-
pinging velocities

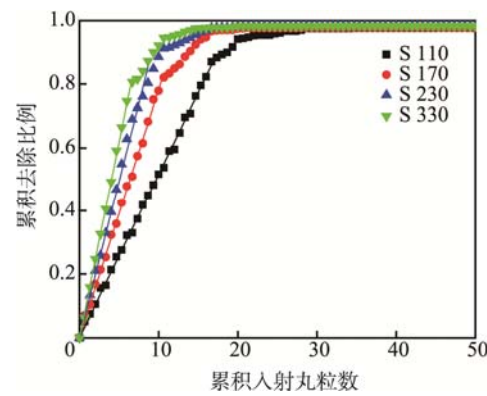


图 6 不同丸粒尺寸对应的累积除锈比例变化曲线
Fig.6 Variation of the ratio of eroded volume for different
shot sizes

表 2 丸粒尺寸对除锈效果的影响
Tab.2 Effect of shot size on the treatment effectiveness

丸粒直径/mm	除锈效率	96%消去率对 应喷丸数	表面粗 糙度/ μm
0.40/S110	0.0486	25	4.19
0.55/S170	0.0498	17	6.44
0.80/S230	0.0471	15	8.69
1.13/S330	0.0471	14	10.8

2.3 氧化层厚度的影响

根据文献[21]，氧化层厚度一般在 0.5 mm 以下，本文取 0.1、0.2、0.3 mm 三种氧化层厚度，并比较了无氧化层情况。取入射速度为 50 m/s 并垂直于表面，喷丸数目 50 个，丸粒直径 0.4 mm。表

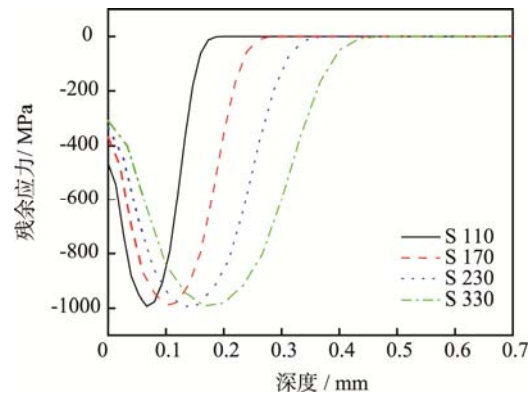


图 7 不同丸粒尺寸对应的最终残余应力分布
Fig.7 Final residual stress distribution for different shot sizes

3 比较了除锈效率、96%除锈比例对应的累积喷丸数、最大残余压应力和表面粗糙度。可以看到，越厚的氧化层因总体积越大，全部去除所需要的处理时间越长。最终残余应力和最终表面粗糙度分布受氧化层厚度的影响较小。图 8 和图 9 分别比较了累积消去体积和基体表面粗糙度随喷丸除锈处理时间的变化。可见开始阶段表面粗糙度的变化很小，当氧化层去除达到较大比例（大约 80%）后，基体表面的粗糙度才开始明显增大，粗糙度最终与无氧化层的情况相近。

表 3 氧化层厚度对除锈效果的影响
Tab.3 Effect of rust thickness on the treatment effectiveness

氧化层厚度 /mm	除锈 效率	96%消去率对 应喷丸数	最大残余 压应力 /MPa	表面粗 糙度/ μm
0.3	0.0476	38	978.4	4.27
0.2	0.0486	25	998.5	4.19
0.1	0.0443	15	990.5	4.27
0.0(无氧层)			984.2	4.19

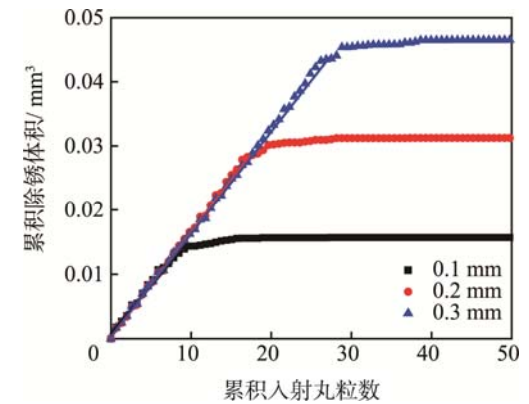


图 8 不同氧化层厚度的累积消去体积变化曲线
Fig.8 Variation of the accumulated eroded volume for differ-
ent rust thicknesses

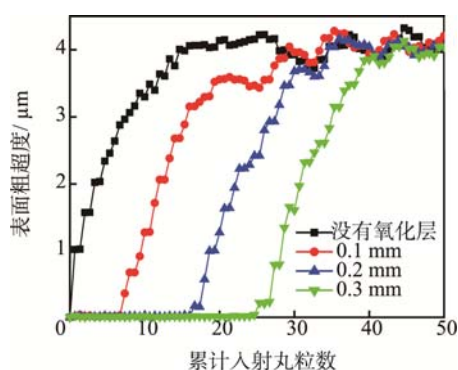


图9 不同氧化层厚度的基体表面粗糙度变化曲线

Fig.9 Variation of the substrate surface roughness for different rust thicknesses

3 结语

利用单元去除技术和周期性胞元方法建立了有限元模型,模拟了喷丸除锈工艺过程,通过对比文献中的粗糙度实验数据使模型得到验证,之后从氧化层去除速率、去除后的表面粗糙度和表层残余应力三个角度,研究了入射速度、丸粒尺寸和氧化层厚度对除锈效果的影响。得出:

1) 增大丸粒入射速度可增大除锈速度、去除后的表面粗糙度和表层残余应力,但过大速度使表面残余压应力减小,同时造成成本增加、表面损伤和变形过大等副作用。

2) 增大丸粒尺寸可增加残余压应力层的深度和除锈后的表面粗糙度,但对除锈效率和最大残余压应力大小的影响不大。

3) 越厚的氧化层需要越长的喷丸除锈处理时间才能达到相同的除锈后的效果。

本文对数值模拟研究喷丸除锈工艺进行了首次尝试,模型还需进一步完善,比如未考虑氧化层与基体结合界面的损伤与分离。本研究表明有限元模拟能为喷丸除锈工艺优化提供便捷的研究途径。

参考文献

[1] 黄世平,李湘.影响喷丸除锈的工艺因素[J].变压器,1994(1):16—19.
HUANG Shi-ping, LI Xiang. Parameters Affecting the Shot Blast Effectiveness[J]. Transformer, 1994(1): 16 —19.
[2] 孙晓华. 喷丸除锈和喷丸硬化[J]. 大连特殊钢, 1991(1): 81—88.
SUN Xiao-hua. Shot Peening for Rust Removal and Surface Strengthening[J]. Dalian Special Steel, 1991 (1): 81—88.

[3] 石新颖. 抛丸过程对铸铁件表面粗糙度的影响因素分析[J]. 铸造, 2013, 62(12): 1241—1243.
SHI Xin-ying. Research of the Influence of Shot Blasting Cleaning on the Surface Roughness of Iron Casting[J]. Foundry, 2013, 62(12): 1241—1243.
[4] 谢孟华. 钢桥面喷砂除锈施工工艺研究[J]. 交通标准化, 2014, 42(9): 100—102.
XIE Meng-hua. Construction Technology of Sandblasting Rust Treatment for Steel Bridge Deck[J]. Transportation Standardization, 2014, 42(9): 100—102.
[5] GAO Y K, WU X R. Experimental Investigation and Fatigue Life Prediction for 7475-T7351 Aluminum Alloy with and without Shot Peening-induced Residual Stresses[J]. Acta Materialia, 2011, 59(9): 3737—3747.
[6] 卞发根, 史贵方. 浅谈影响货车抛丸除锈质量的因素[J]. 机车车辆工艺, 1986(6): 42—47.
BIAN Fa-gen, SHI Gui-fang. Influential Parameters of the Effectiveness of Shot Blast Applied on the Cargo Vehicle[J]. Locomotive Technology, 1986(6): 42—47.
[7] 赵晓运, 张聚才, 李安铭. 抛丸处理在汽车车架上的应用[J]. 表面技术, 2004, 33(4): 58—61.
ZHAO Xiao-yun, ZHANG Ju-cai, LI An-ming. Application of Shot Blasting on Automotive Frame[J]. Surface Technology, 2004, 33(4): 58—61.
[8] 唐和平. 客车车体抛丸除锈质量的控制[J]. 铁道运营技术, 2006, 12(4): 30—34.
TANG He-ping. Quality Control of the Shot Blast Applied on the Passenger Car Body[J]. Railway Operation Technology, 2006, 12(4): 30—34.
[9] 王有力. 浅谈影响铁路车辆配件抛丸除锈质量的因素[J]. 科技论坛, 2013(7): 461.
WANG You-li. Discussions on the Influential Parameters for the Shot Blast Quality for the Railway Vehicles[J]. Technology Forum, 2013(7): 461.
[10] 许宏高. 船体抛丸除锈[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
XU Hong-gao. Shot Blast for Rust Removal on the Ship Body[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1979.
[11] 高志, 卜银剑. 带钢表面氧化层湿式抛丸清理技术[J]. 中国表面工程, 2015, 28(2): 114—120.
GAO Zhi, BU Yin-jian. Wet Shot Blasting Technology for Cleaning Strip Steel Surface Oxide Layer[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(2): 114—120.
[12] 唐欧靖. 钢渣型喷砂除锈材料的研究与应用开发[J]. 宝钢技术, 2015(5): 23—28.
TANG Ou-jing. Research and Development of Blasting Abrasive Made of Steelmaking Slag[J]. Baosteel Technology, 2015(5): 23—28.
[13] 陈光忠, 何志坚, 杨岳. 喷丸强化 AZ91D 镁合金残余应力场的数值模拟及实验研究[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 134—138.
CHEN Guang-zhong, HE Zhi-jian, YANG Yue. Numerical Simulation and Experimental Study of Resi-

- dual Stress Field of az91d Magnesium Alloy by Shot Peening[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(2): 134—138.
- [14] MEGUID S A, SHAGAL G, STRANART J C, et al. Three-dimensional Dynamic Finite Element Analysis of Shot-peening Induced Residual Stresses[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 1999, 31: 179—191.
- [15] YANG F, CHEN Z, MEGUID S A. 3D FE Modeling of Oblique Shot Peening Using a New Periodic Cell[J]. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2014, 10: 133—144.
- [16] YANG F, CHEN Z, MEGUID S A. Effect of Initial Surface Finish on Effectiveness of Shot Peening Treatment Using Enhanced Periodic Cell Model[J]. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2015, 11(4): 463—478.
- [17] ZHANG N, YANG F, LI L, et al. Thickness Effect on Particle Erosion Resistance of Thermoplastic Polyurethane Coating on Steel Substrate[J]. *Wear*, 2013, 303(1/2): 49—55.
- [18] DALILI N, EDRISY A, CARRIVEAU R. A Review of Surface Engineering Issues Critical to Wind Turbine Performance[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13: 428—438.
- [19] 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: 119—134.
- [20] KIM T, LEE H, HYUN H, et al. Effects of Rayleigh Damping, Friction and Rate-dependency on 3D Residual Stress Simulation of Angled Shot Peening[J]. *Material & Design*, 2013, 46: 26—37.
- [21] 丁波, 陈其安, 周积智. 清除带钢表面氧化铁皮的清洁技术[C]//第七届中国钢铁年会大会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- DING Bo, CHEN Qi-an, ZHOU Ji-zhi. Clean Processing Technology for Oxide Scale Removal on the Hot Rolled Steel Strip[C]//7th CSM Annual Meeting Proceedings. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- [22] WANG Shun-sen, LIU Guan-wei, MAO Jing-ru, et al. Effects of Coating Thickness, Test Temperature, and Coating Hardness on the Erosion Resistance of Steam Turbine Blades[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2010, 132(2): 022102.
- [23] WANG Yu-fei, YANG Zhen-guo. A Coupled Finite Element and Mesh Free Analysis of Erosive Wear[J]. *Tribology International*, 2009, 42: 373—377.
- [24] PREMACK T, DOUGLAS A S. Three-dimensional Analysis of the Impact Fracture of 4340 Steel[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1995, 32(17): 2793—2812.
- [25] CHEN Z, YANG F, MEGUID S A. Realistic Finite Element Simulations of Arc-height Development in Shot-peened Almen Strips[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the ASME*, 2014, 136(4): 041002.
- [26] OUGLOVA A, BERTHAUD Y, FRANCOIS M, et al. Mechanical Properties of an Iron Oxide Formed by Corrosion in Reinforced Concrete Structures[J]. *Journal De Physique IV*, 2006, 48(12): 3988—4000.
- [27] ZHANG Q C, MA F, WU J S, et al. Mechanical Properties of Native Rust Layer Formed on a Low Alloy Steel Exposed in Marine Atmosphere[J]. *ISIJ International*, 2002, 42(5): 534—539.
- [28] 刘鹏安, 张怀智, 黄鹏波, 等. 弹药表面喷砂除锈理论与试验研究[J]. *表面技术*, 2015, 44(2): 129—133.
- LIU Peng-an, ZHANG Huai-zhi, HUANG Peng-bo, et al. Theoretical and Experimental Research on Sand-blasting for Rust Removal from Ammunition Surface[J]. *Surface Technology*, 2015, 44(2): 12—133.
- [29] J444-2005, Cast Shot and Grit Size Specifications for Peening and Cleaning[S].
- [30] SHIVPURI R, CHENG Xiao-min, MAO Yong-ning. Elasto-plastic Pseudo-dynamic Numerical Model for the Design of Shot Peening Process Parameters[J]. *Materials and Design*, 2009, 30: 3112—3120.