

喷丸数值模拟中一种高效方法

陈晟¹, 丁腾飞¹, 张朝阳², 高建永², 付婧颐¹, 鲁世红¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016;
2. 山东开泰抛丸机械股份有限公司, 山东 滨州 256217)

摘要: **目的** 从减小分析步时间的角度出发, 调整弹丸随机分布间距, 研究提高模拟计算效率的方法。**方法** 以 SAE1070 弹簧钢为研究对象, 在 S230 弹丸速度为 40 m/s 条件下, 分析弹丸间垂直间距、水平间距和弹丸冲击方式对模拟结果的影响。**结果** 在不考虑弹丸间相互作用的前提下, 有限元模拟中弹丸间可存在重叠, 只要弹丸垂直间距大于 0.07 mm, 水平间距大于 0.4 mm, 弹丸随机生成模拟得到的诱导应力分布、塑性应变分布、粗糙度的结果在小偏差范围内收敛, 与弹丸间无重叠的模拟结果相近。在满足弹丸间距阈值的前提下, 采用同时冲击和顺序冲击方式得到的诱导应力分布在压应力部分区域存在一定偏差, 但应力分布曲线整体较为接近, 同时冲击的计算时间缩短了约 90%。在此基础上, 确定合适的弹丸分布, 在不同弹丸直径、速度下进行阿尔门试片喷丸模拟, 通过对比阿尔门强度值论证了模拟方法的有效性。**结论** 这种按层分布同时冲击, 并在满足间距阈值的前提下尽可能减小间距的弹丸设置方法, 保证了模拟精度, 提高了计算效率, 为数值模拟的应用提供了优化计算成本的新思路。

关键词: 喷丸; 数值模拟; SAE 1070; 弹丸间距; 诱导应力

中图分类号: TG176 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)08-0458-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.08.042

An Efficient Approach in Numerical Simulation of Shot Peening

CHEN Sheng¹, DING Teng-fei¹, ZHANG Chao-yang², GAO Jian-yong², FU Jing-yi¹, LU Shi-hong¹

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Shandong Kaitai Shot Blasting Machinery Share Co., Ltd., Shandong Binzhou 256217, China)

ABSTRACT: Shot peening is a mechanical surface enhancement process widely used in the automotive and aerospace industry. The residual stress, as the main response parameter, plays an important role in improving the fatigue life of components. Compared with the costly and time-consuming experimental measurement, numerical simulation provides great convenience for the research of residual stress state, revealing mechanism and process optimization. Among them, the random multi-shot model can truly reflect the shot peening process, but it often faces the problem of high calculation cost, which limits the application of related technical methods. The shot peening model was established in Abaqus/Explicit in this paper. Therefore, from the perspective of increasing the spatial distribution density of shots to reduce the analysis step time, the distance and distribution

收稿日期: 2022-08-10; 修订日期: 2022-11-22

Received: 2022-08-10; Revised: 2022-11-22

作者简介: 陈晟 (1997—), 男, 硕士研究生。

Biography: CHEN Sheng (1997-), Male, Postgraduate.

通讯作者: 鲁世红 (1964—), 女, 博士。

Corresponding author: LU Shi-hong (1964-), Female, Doctor.

引文格式: 陈晟, 丁腾飞, 张朝阳, 等. 喷丸数值模拟中一种高效方法[J]. 表面技术, 2023, 52(8): 458-465.

CHEN Sheng, DING Teng-fei, ZHANG Chao-yang, et al. An Efficient Approach in Numerical Simulation of Shot Peening [J]. Surface Technology, 2023, 52(8): 458-465.

mode of random shots were adjusted to study a simulation method that not only improved the calculation efficiency but also took into account the accuracy.

Taking SAE1070 spring steel as the research object, the velocity of S230 shots was 40 m/s and the number of shots was 150 (not reaching full coverage). The shots were distributed in layers, and eight groups of different vertical distances between layers (0, 0.005, 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.3 and 0.6 mm) and six groups of different horizontal distances of shots in the same layer (>0.1 , >0.2 , >0.3 , >0.4 , >0.5 and >0.6 mm) were set respectively. Then, the effects of vertical distances and horizontal distances between shots on simulation results were analyzed. On this basis, the simultaneous impact and sequential impact of 150 and 300 shots were simulated, and the effect of shots impact mode on simulation results was analyzed. Then, according to the above research scheme, the distribution mode of shots was determined under different diameters and velocities, and a 1/4 Almen strip model based on real size was established. In the simulation, the number of shots was accumulated by data transfer between models, and an implicit solver was used to calculate the arc height of the spring-back strips under different numbers of shots, and the Almen intensity was obtained. Finally, the results achieved by the present approach were compared with those obtained in the literature.

The results showed that, without considering the interaction between the shots, the shots could overlap in the finite element simulation, as long as the vertical distance was larger than 0.07 mm and the horizontal distance was larger than 0.4 mm, the results of induced stress distribution, plastic strain distribution and roughness obtained by simulation tended to be consistent, and under the premise of meeting the shots distance threshold, the results of induced stress distribution obtained by simultaneous impact and sequential impact were almost the same. Moreover, the calculation time was shortened by about 90%, which meant that it was more efficient to simulate the stress distribution of shot peening by simultaneous impact. Shot peening simulations of Almen strips demonstrated that Almen intensity obtained by the present approach matched much better with the literature. In addition, the results showed that the greater the kinetic energy of the same kind of shots, the less number of shots needed to reach the saturation point, and high coverage had no significant effect on the arc height.

This approach of setting shots with simultaneous impact by layer distribution and reducing the distance between shots on the premise of satisfying the distance threshold improves the calculation efficiency, ensures the simulation accuracy of the stress state, is suitable for the simulation of shot peening and deformation of the slightly larger target, and provides a new idea to optimize the calculation cost for the application of numerical simulation.

KEY WORDS: shot peening; numerical simulation; SAE 1070; shot distance; induced stress

喷丸是一种广泛应用于航空、高铁机车和汽车工业的表面处理工艺。通过高速弹丸冲击金属表面,引入有益的表面残余压应力分布和冷作硬化层,抑制初始疲劳裂纹的萌生和扩展,从而延长零件的疲劳寿命,提高服役性能^[1]。此外,在航空航天领域,壁板类结构件的有效成形方面,这一技术也发挥着独特优势^[2-3]。数值模拟技术是研究喷丸这项复杂工艺强有力的工具,在揭示喷丸机理、优化工艺、降低研究成本等方面起到重要作用。弹丸的建模是模拟研究的关键之一,研究表明,相比于规则弹丸及少弹丸模型,多弹丸随机分布的有限元模型提高了模拟精度^[4]。随着数值模拟技术的发展,新方法不断涌现,光滑粒子流体动力学法(SPH)与有限元(FEM)耦合^[5-6]、离散元(DEM)与有限元耦合^[7-8]等方法也被应用到喷丸模拟中。研究趋势说明,弹丸与靶体建模同实际情况更接近,越逼真显然更受欢迎,能更精确且全面地反映相关响应参数与喷丸参数间的关系,但考虑到计算成本相关技术的应用仍需改善,尤其涉及尺寸稍大结构,目前仍多采用理论与小尺寸模型结合的

分析方法^[9-12]有一定局限性。单纯地在有限元软件中进行大量弹丸冲击大尺寸靶体的模拟,必然付出高昂的计算代价,甚至陷入难以运行的困境。文中模拟喷丸所采用的Abaqus/Explicit动力学分析,分析步时间是决定计算时长的重要因素,取决于最末颗弹丸与被冲击工件的距离,因此弹丸分布对计算时间有重大影响^[13]。研究弹丸分布方式对喷丸响应参数的影响规律,并合理利用是突破高计算成本这一瓶颈的关键。文中首先探究弹丸不同分布方式的模拟结果,寻求能有效提升计算效率,并兼顾一定计算精度的模拟方法。在此基础上,模拟阿尔门试片喷丸强化,分析弹丸直径、速度、覆盖率与弧高值的关系,并通过对比阿尔门强度值验证该方法的可行性,为数值模拟提供优化计算成本的新思路。

1 弹丸分布研究

1.1 喷丸有限元模型建立

在Abaqus中建立喷丸模型,靶体依据标准阿尔

门试片材质为 SAE1070 弹簧钢, 为表征高应变率下的材料特性, 采用 Johnson-Cook 材料本构模型, 相关材料性能及本构模型参数见表 1^[14]。靶体建模如图 1 所示, 长、宽均为 3 mm, 高为 1.29 mm。靶体受喷局部区域细化网格尺寸为 0.02 mm, 小于弹丸直径的

1/10, 以确保计算精度^[15]。主体采用 C3D8R 单元进行离散, 四侧面由无限单元 (CIN3D8) 包围, 防止该小模型中反射应力波干扰。弹丸球心落于区域 2 内, 中心区域 1 为参数分析计算区域。靶体底面约束 Z 方向位移, 底面 4 边设置为固定约束。

表 1 SAE 1070 材料性能及本构模型参数
Tab.1 Material properties and constitutive model parameters of SAE 1070

Mechanical properties			$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Johnson-Cook constants			n	m
Material	E/GPa	μ		A	B	C		
SAE 1070	205	0.29	7 800	1 408	600.8	0.013 4	0.234	0

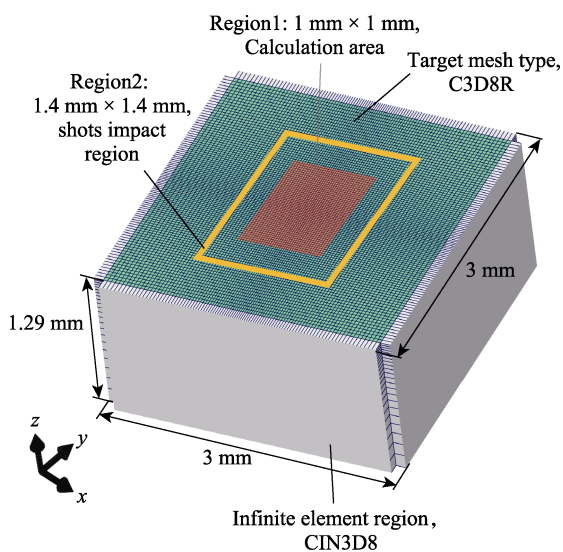


图 1 靶体有限元模型
Fig.1 FE model of target

1.2 应力场、PEEQ 分布、粗糙度 Ra 、覆盖率计算

应力场和 PEEQ (累积塑性应变) 计算, 在靶体中心计算区域内, 分别沿深度方向提取每层节点水平方向应力, PEEQ 的平均值, 作为靶体内部诱导应力场和 PEEQ 分布。粗糙度 Ra 根据计算区域表面节点坐标值计算。

喷丸覆盖率是指弹丸轰击形成的凹坑对表面的覆盖程度, 弹丸冲击区域产生较大塑性变形, 文中依据表面节点 PEEQ 值判断靶体表面弹坑覆盖情况^[16]。根据相同参数下单弹丸模型弹坑边缘 PEEQ 结果, 例如设定 PEEQ 临界值为 0.03, 在 Abaqus 后处理中将 PEEQ 云图值大于 0.03 设为黑色, 其余为白色, 处理得到表征弹丸覆盖情况的二值图像。采用 Python OpenCV 库提取图像中黑色像素点个数, 其值与图像总像素点个数的比值即为所预测的喷丸覆盖率。通常覆盖率达到 98% 就视为完全覆盖, 超过 100% 覆盖率按弹丸数倍率计算^[17]。

1.3 弹丸垂直间距的影响

弹丸选用 S230 铸钢丸, 名义直径为 0.6 mm, 密

度为 $7\,800\text{ kg/m}^3$, 速度为 40 m/s , 冲击角度为 90° 。喷丸过程中, 与工件相比, 弹丸的变形很小, 可以忽略不计, 因此将弹丸设置为刚体。为减小模型数据量, 文中采用离散刚体半球壳建模, 参考点位于球心, 并设置相应的单元质量。弹丸与靶体设定为硬接触, 摩擦系数为 0.2。此外, Abaqus/Explicit 计算采用自定义时间增量, 不考虑弹丸间相互作用。弹丸采用 Python 前处理生成共 150 颗, 在 z 方向按层分布, 同层弹丸 z 坐标一致, 共 25 层, 每层 6 颗弹丸。层内弹丸各自随机分布, 水平间距大于 0.6 mm, 即水平面内无重叠。设置 8 组不同层间距 D 分别为 0、0.005、0.01、0.03、0.05、0.07、0.3、0.6 mm。其中, 层间距 0.6 mm 可近似弹丸无重叠的实际工况, 不同组间同层各弹丸水平面内坐标一致, 部分模型参照图 2。弹丸按层分布可增加层间弹丸重叠的可能性, 突出间距的影响作用, 此外可减小弹丸束高度缩短计算时间。其中 4 组仿真应力云图如图 3 所示, 应力影响区域主要位于靶体中心部分区域, 除层间距为 0 mm 的应力云图差别较大外, 图上其余 3 组应力云图相似。此外, 可发现层间距为 0.07、0.6 mm 云图图例的对应值相近, 靶体应力分布有随层间距增大而收敛的趋势。

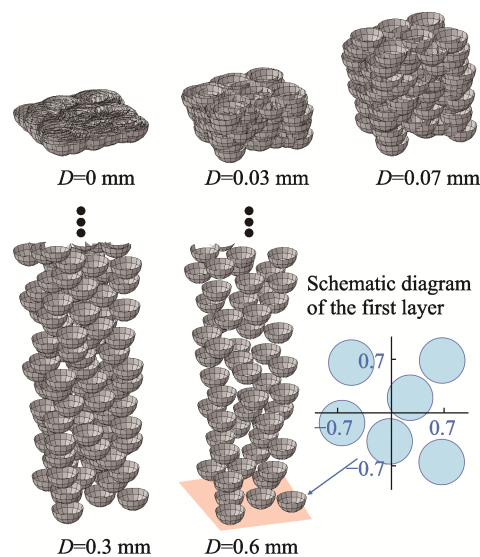


图 2 不同层间距下弹丸分布
Fig.2 Shots distribution under different layer distance

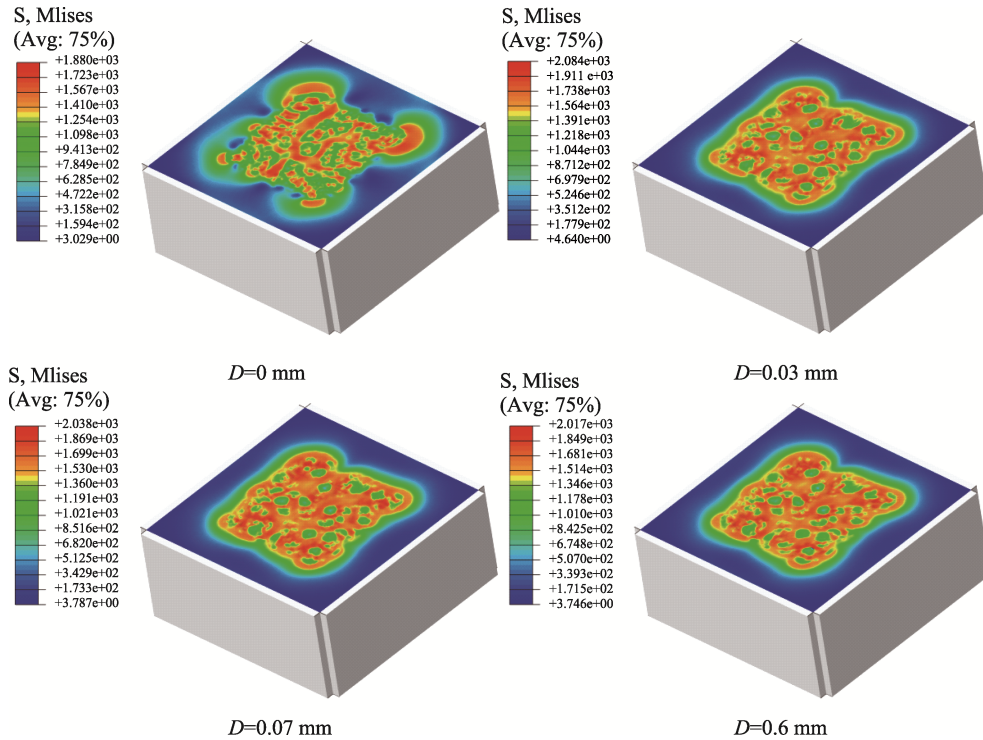


图 3 不同层间距下的应力云图

Fig.3 Stress contours under different layer distance

诱导应力计算结果如图 4 所示。除层间距为 0 (所有弹丸同时冲击) 时, 应力分布差异明显, 其余各组应力分布趋势大致相同。当层间距大于 0.05 mm 时, 残余压应力层深度、表面残余压应力和最大残余压应力呈现出稳定的趋势, 应力曲线上拉应力部分几乎重合, 其中应力值偏差最大的压应力区域相同深度附近对应节点应力值的最大偏差不超过 30 MPa, 应力分布整体趋于一致, 其中后 4 组表面压应力均值为 $-1\ 093.45$ MPa, 最大压应力均值为 $-1\ 382.34$ MPa。PEEQ、覆盖率、粗糙度 Ra 值也呈现类似结果, 随着层间距大于 0.05 mm 逐渐趋于一致。PEEQ 分布如图 5 所示。各组覆盖率分别为: 51.74%、70.62%、70.18%、69.53%、66.87%、67.07%、67.05%、67.09%。 Ra 值分别为: 2.57、3.41、3.29、3.21、2.99、2.995、2.999、2.996 μm 。除层间距为 0 外, 层间距过小得到的最大压应力值及 PEEQ 值均比稳定的结果要大, 覆盖率和 Ra 值也均偏大, 且随层间距的增大整体呈减小趋势, 后趋于稳定。说明在当前模拟参数下, 层间距过小致使材料在相邻 2 次弹丸冲击内弹性回复时间不足, 导致塑性变形程度更剧烈。层间距大于 0.05 mm 后, 对相关模拟结果的影响并不显著。相比层间距为 0.6 mm, 层间距为 0.05 mm 时的计算时间缩短约 90%。

1.4 水平间距的影响

同样生成 150 颗弹丸, 设置 6 组不同水平间距, 分别为大于 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 mm。弹丸按层分布, 各组第一层弹丸分布如图 6 所示。每层弹

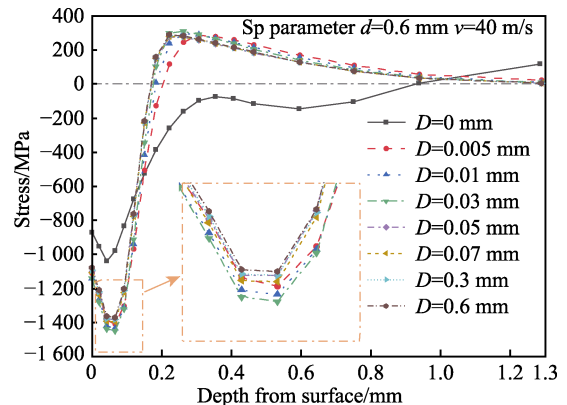


图 4 不同弹丸层间距下的应力分布

Fig.4 Stress distribution under different layer distance of shots

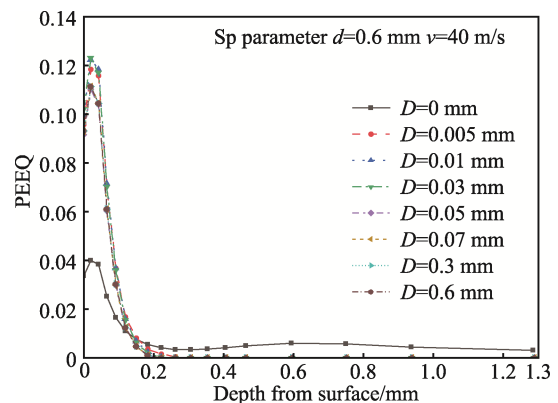


图 5 不同弹丸层间距下的 PEEQ 分布

Fig.5 PEEQ distribution under different layer distance of shots

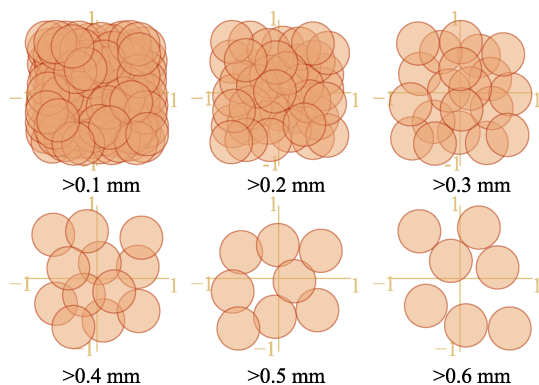


图6 不同水平间距下的弹丸分布

Fig.6 Schematic diagram of shots distribution under different horizontal distance of shots

丸均在确保间距的条件下随机生成直到无法增加,不同组的层内弹丸数量不同,由于弹丸总数相同,因此弹丸层数不同,均设置层间距为 0.07 mm,层数越少,计算时间越短。

诱导应力、PEEQ 计算结果分别如图 7、8 所示。粗糙度 Ra 值分别为: 1.91、2.58、2.96、2.96、3.16、3.05 μm 。不同组间弹丸分布完全不同,但结果表明,当弹丸水平间距大于 0.4 mm 时,相关计算值仍基本趋于一致。最大压应力及 PEEQ 值、 Ra 值随水平间距增大整体呈增大趋势后趋于稳定。其中后 3 组应力曲线对应节点应力值偏差基本在 40 MPa 内,表面压应力均值为 -1 144.35 MPa,最大压应力均值为 -1 414.17 MPa,能发现稳定后的平均应力与粗糙度的结果与上层层间距模拟稳定后的结果也相当接近。至此可说明,当弹丸按层分布且间距控制合理即大于某阈值,就能获得相近的模拟计算结果,且不同弹丸分布对模拟结果的影响不显著。相比水平间距为大于 0.6 mm,大于 0.4 mm 的计算时间缩短约 50%。

1.5 冲击方式的影响

上述模型中,层内弹丸均同时冲击靶材表面,因此建立随机顺序冲击弹丸分布(每次仅 1 颗弹丸与靶

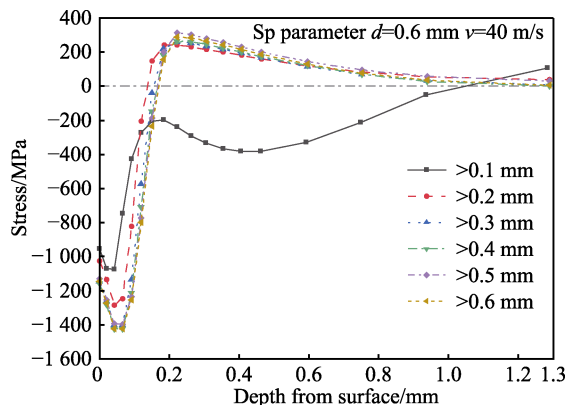


图7 不同弹丸水平间距下的应力分布

Fig.7 Stress distribution under different horizontal distance of shots

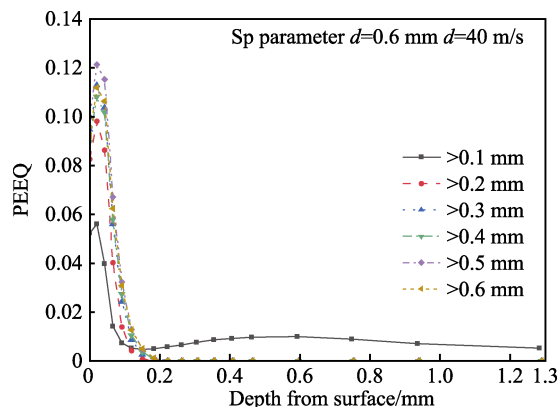


图8 不同弹丸水平间距下的 PEEQ 分布

Fig.8 PEEQ distribution under different horizontal distance of shots

体接触),分析冲击方式对模拟结果的影响。同时冲击设置层内弹丸中心距为大于 0.4 mm,层间距为 0.07 mm。顺序冲击设置弹丸 z 向间距为 0.07 mm。分别在 150、300 颗弹丸下进行模拟,其中 300 颗弹丸下覆盖率大于 100%。额外进行 150 颗弹丸无重叠下(水平、垂直间距均大于 0.6 mm)顺序和同时冲击近似模拟实际工况,各组弹丸各自随机生成。诱导应力计算结果如图 9 所示。很明显,在 2 种不同冲击方式下,按上文结论调整的弹丸分布的应力结果与弹丸间无重叠的结果基本一致,进一步说明了调整的弹丸分布模拟结果的可靠性,因此接下来的分析仅根据调整后的弹丸分布模拟结果展开。根据应力曲线可发现,同时冲击的近表层压应力稍大,而此后顺序冲击的压应力更大,应力值的较大偏差出现在最大压应力至转变为拉应力部分位置,基本不超过 200 MPa,拉应力部分偏差较小,应力分布曲线整体较为接近。另外,150、300 颗弹丸下同时冲击的 PEEQ 最大值分别为 0.108、0.264, Ra 值分别为 2.96、3.66 μm 。顺序冲击的 PEEQ 最大值分别为 0.203、0.416, Ra 值分别为 3.65、3.94 μm 。由此可以发现,这 2 种极端冲击方式下,顺序冲击的表面变形程度会更大。此外,

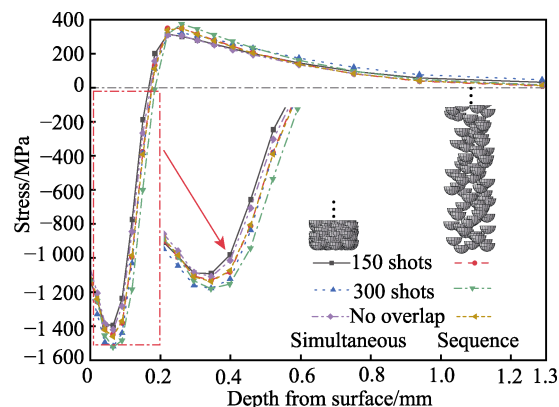


图9 同时冲击与顺序冲击在 150、300 颗弹丸下的应力分布

Fig.9 Stress distribution of simultaneous impact and sequential impact under 150 and 300 shots

300 颗弹丸下, 同时冲击的计算时间相比顺序冲击缩短约 90%。

以上对弹丸分布的模拟研究表明, 在文中喷丸参数下模拟的弹丸间可存在重叠。当弹丸的数量、速度、冲击方式相同, 弹丸间距必须控制在合理范围, 有限元计算结果才能趋于一致。因为实际喷丸过程中弹丸分布会给予靶体变形, 回弹一定的时间和空间, 弹丸不能过度重叠, 弹丸间距的阈值可能与弹丸能量相关。利用上述结果设置弹丸分布可极大提高计算效率。当弹丸数量相同时, 顺序冲击与同时冲击方式应力分布结果相近, 但粗糙度 Ra 、PEEQ 值存在一定差异, 可推测诱导应力分布主要与弹丸束能量相关, 冲击方式更多影响靶体表面塑性变形程度。尽管实际弹丸冲击方式十分复杂, 可近似认为介于同时冲击和顺序冲击间, 为 2 种极端冲击过程的复杂组合, 且 2 种极端冲击方式的应力结果较为接近, 那么可认为 2 种极端冲击过程的复杂组合的应力结果可近似等效为单一冲击方式的应力结果, 因此可采用弹丸同时冲击方式模拟喷丸强化后的诱导应力分布更加便捷高效。

2 模拟方法应用及验证

2.1 阿尔门试片建模

在 Abaqus 中模拟 A 型阿尔门试片喷丸强化及变形, A 型试片^[18]尺寸为 76 mm×19 mm×1.29 mm, 材料为 SAE1070。建模时采用 1/4 模型, 设置 x 、 y 方向面的对称边界条件。参考实际试片固定方式(通过 4 个圆形螺钉紧固在阿尔门试片座上)试片底面约束 z 向位移, 螺钉紧固区域及右侧边缘设置全约束, 如图 10a 所示。为便于网格划分, 1/4 模型尺寸设为 37.76 mm×9.44 mm×1.29 mm, 表面网格尺寸为 0.04 mm。为减少单元数量, 提高计算效率, 进行过渡网格划分。单元类型为 C3D8R, 单元总数为 960 756。

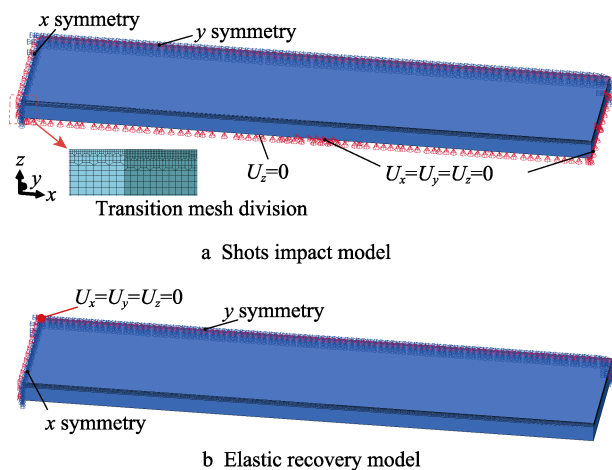


图 10 阿尔门试片喷丸强化有限元模型

Fig.10 FE model of Almen strips shot peening: a) shots impact model; b) elastic recovery model

弹性回复模型保持结构尺寸及网格不变, 仅改变边界条件如图 10b 所示, 设置 x 、 y 方向面的对称边界条件, 并在上表面端点处添加固定约束。

2.2 喷丸强化及变形模拟

弧高值通常表示为与时间的关系, 在工业中通常控制弹丸流量为定值, 可认为弹丸数量与喷丸时间成正比, 建立弹丸数量与弧高值及其他喷丸响应参数间的关系。为获得大量不同弹丸数量下的模拟结果, 采用 initial state 功能实现模型间数据的传递, 每个后续模型在保留前次模型建模信息及数据前提下进行 4 000 颗弹丸喷丸模拟, 实现弹丸数量的累加, 如图 11 所示。喷丸强化产生的变形主要与应力分布相关, 因此设置弹丸按层分布, 间距依据上文研究方案确定, 单次 4 000 颗弹丸模拟时长约 30 min。将 Abaqus/Explicit 动力学分析的整体应力分布结果作为初始应力场导入 Abaqus/Standard 分析进行变形回复模拟, 模拟弹丸选用 s230、s170。

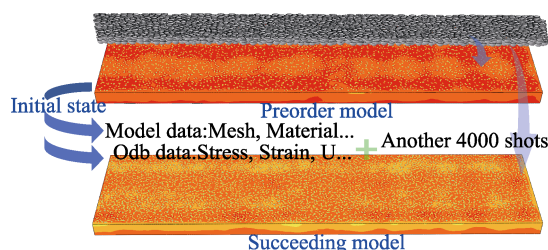


图 11 模型间数据传递

Fig.11 Schematic diagram of data transfer between models

图 12 展示了速度为 40 m/s 时模型中心截面处局部的应力分布情况。可以发现, 随着弹丸数量的增加, 覆盖率逐渐增大, 诱导应力分布更均匀, 近表层应力等值线更加平滑, 表面拉应力区域逐渐减少, 且 S230 弹丸影响深度更大, 压应力峰值更高。进行变形回复模拟后, 不同喷丸条件下的弧高值及其拟合曲线如图 13 所示, 并标注了饱和点和完全覆盖点。弧高值测量参考 SAE J442^[19]、SAE J443^[20], 测量区域位于试片中心 31.75 mm 区域内。弧高拟合函数^[21]表示为式 (1), 其中 N 为弹丸数量, 其余均为拟合参数。完全覆盖点根据覆盖率拟合函数见式 (2), 求得达到 98% 覆盖率所需弹丸数, 其中 A 为拟合参数。结果显示, 弧高值将随弹丸速度、弹丸数量增大而增大, 并且随弹丸数量增大增幅逐渐减小。根据 S230、S170 弹丸对比可知, 弹丸直径对弧高值影响显著。同种弹丸速度越大, 饱和弧高值越大, 且达到饱和点所需弹丸数量越少, 也许是因为弹丸能量越大, 靶体内残余应力收敛并趋于稳定越快。比较弧高饱和点和完全覆盖点可知, 弧高饱和点弹丸数量小于完全覆盖所需的弹丸数量, 可能是因为在当前参数下, 接近完全覆盖靶体内残余应力的变化已不显著, 且饱和强度的计算遵循

10%法则, 因此计算得到的饱和点出现在完全覆盖前。达到饱和点后, 弧高值的变化趋于缓慢, 因此高覆盖率对弧高值的影响并不显著。

$$Ah(N) = \frac{B}{(C \times N + d)^p} - \frac{B}{d^p} \quad (1)$$

$$C(N) = 100\% \times (1 - e^{-A \times N}) \quad (2)$$

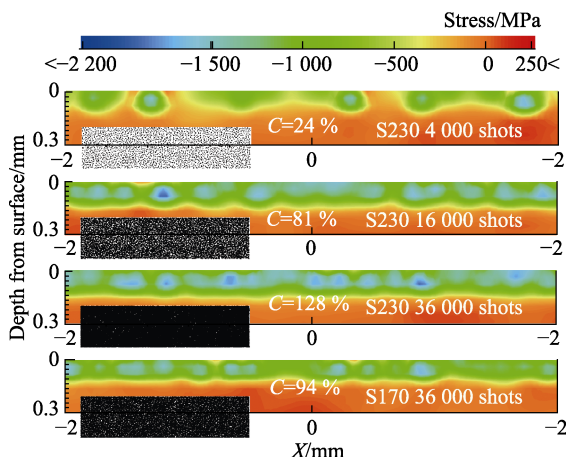


图 12 不同参数下中心截面局部应力云图

Fig.12 Stress contour of central section under different parameters

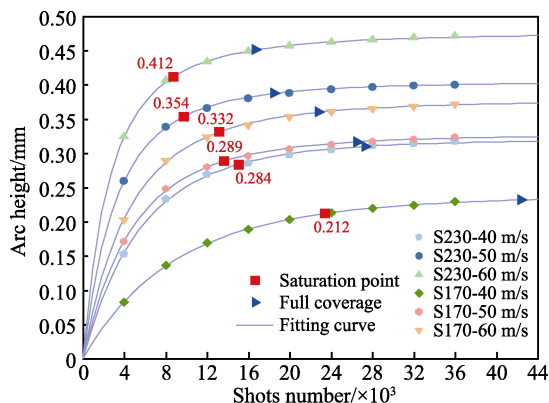


图 13 不同速度和弹丸数量下的阿尔门试片弧高曲线

Fig.13 Arc height curve of Almen strips at different speeds and shots number

2.3 有限元模型验证

为了验证该弹丸分布模拟方法的有效性, 将 S170、S230 弹丸在不同速度下模拟得到阿尔门强度值与 Hu 等^[22]、Jebahi 等^[23]、Cao 等^[24]、Atig 等^[25]的研究结果进行对比, 结果如图 14 所示。从整体看, 文中模拟结果与其他相关结果趋势相近, 个别值吻合理想, S170 弹丸模拟结果与实验值吻合较好。由于喷丸工艺中各参数难以完全控制一致, 实验结果间也会存在明显偏差。此外, 相关结果中阿尔门强度测量区域, 拟合函数及数据处理方法的差异均可能导致结果的偏差。因此, 认为该有限元模拟方法能用于喷丸强化及变形的模拟, 证明了该方法的有效性, 有一定

的参考意义。

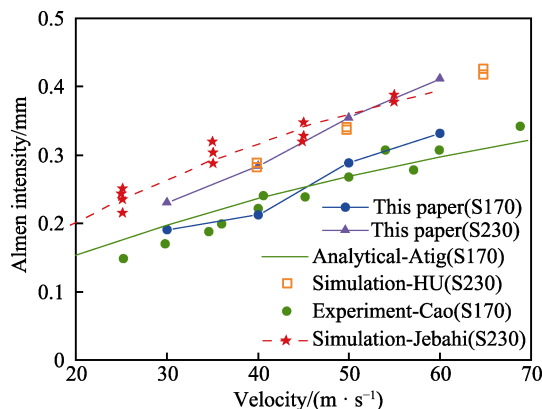


图 14 S170、S230 弹丸不同速度下

阿尔门强度值数据对比

Fig.14 Comparison of Almen intensity data for S170 and S230 shots at different velocity

3 结论

基于文中进行的弹丸分布及冲击方式研究, 以及后续模拟 A 型阿尔门试片喷丸强化的研究, 得出以下结论。

1) 通过有限元模拟大量弹丸下的喷丸强化, 在合适的喷丸参数下, 且不考虑弹丸间相互作用, 保持其余参数相同, 只要设置弹丸间距大于一定阈值, 就能以较小的间距随机布置弹丸, 甚至允许弹丸间存在重叠, 以此在一定的空间内充分多地生成弹丸, 提高模拟的效率, 且不同弹丸分布下应力分布的模拟结果接近, 在文中同时冲击的方式下, PEEQ、粗糙度 R_a 值也将趋于一致。该阈值可能与弹丸能量, 弹丸与靶体材料相关, 有待进一步研究。

2) 在满足弹丸间距阈值前提下, 设置弹丸按层分布不仅可以减小弹丸束的高度, 进一步缩短计算时间, 还能获得同顺序冲击相近的应力分布结果, 但塑性应变, 表面粗糙度值存在差异。可推断诱导应力分布主要与弹丸束能量相关, 弹丸冲击方式影响靶体表面塑性变形情况。仅采用同时冲击方式近似模拟喷丸强化应力分布更加高效。

3) 应用于阿尔门试片喷丸强化模拟, 证明了这种调整弹丸分布的方法适用于稍大尺寸靶体喷丸强化及变形的模拟。阿尔门强度随弹丸直径、弹丸速度的增大而增大。增加弹丸数量即提高覆盖率可增加弧高值, 高覆盖率对弧高值的影响并不显著。同种弹丸, 弹丸冲击能量越大, 阿尔门试片达到饱和点所需的弹丸数量越少。

参考文献:

- [1] GARIÉPY A, MIAO H, LÉVESQUE M. Comprehensive

- Materials Processing[M]. Amsterdam: Elsevier, 2014: 295-329.
- [2] LIU Chuang, ZHAO Zhi-yong, ZHANG Xian-jie, et al. A Progressive Approach to Predict Shot Peening Process Parameters for Forming Integral Panel of Al7050-T7451[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(5): 617-627.
- [3] GARIÉPY A, CYR J, LEVERS A, et al. Potential Applications of Peen Forming Finite Element Modelling[J]. Advances in Engineering Software, 2012, 52: 60-71.
- [4] GANGARAJ S M H, GUAGLIANO M, FARRAHI G H. An Approach to Relate Shot Peening Finite Element Simulation to the Actual Coverage[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 243: 39-45.
- [5] WANG Jian-ming, LIU Fei-hong, YU Feng, et al. Shot Peening Simulation Based on SPH Method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 56(5): 571-578.
- [6] LIU Zhi-hong, XIU Lei, WU Jie-feng, et al. Numerical Simulation on Residual Stress Eliminated by Shot Peening Using SPH Method[J]. Fusion Engineering and Design, 2019, 147: 111231.
- [7] MARINI M, PIONA F, FONTANARI V, et al. 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.
- [8] WANG Cheng-yu, LI Wei-gang, JIANG Jian-jun, et al. An Improved Approach to Direct Simulation of an Actual Almen Shot Peening Intensity Test with a Large Number of Shots[J]. Materials, 2020, 13(22): 5088.
- [9] GUECHICHI H, CASTEX L, BENKHETTAB M. An Analytical Model to Relate Shot Peening Almen Intensity to Shot Velocity[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2013, 41(1): 79-99.
- [10] OHTA T, SATO Y. Numerical Analysis of Peen Forming for High-Strength Aluminum Alloy Plates[J]. Materials Transactions, 2021, 62(6): 846-855.
- [11] MIAO H Y, LAROSE S, PERRON C, et al. Numerical Simulation of the Stress Peen Forming Process and Experimental Validation[J]. Advances in Engineering Software, 2011, 42(11): 963-975.
- [12] XIAO Xu-dong, TONG Xin, LI Yan, et al. Numerical Research on the Effect of Boundary Constraint in Shot Peen Forming[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(8): 3839-3853.
- [13] WANG Zhou, SHI Ming, GAN Jin, et al. The Effects of Shot Distance and Impact Sequence on the Residual Stress Field in Shot Peening Finite Element Model[J]. Metals, 2021, 11(3): 462.
- [14] BHUVARAGHAN B, SRINIVASAN S M, MAFFEO B. Numerical Simulation of Almen Strip Response Due to Random Impacts with Strain-Rate Effects[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2011, 53(6): 417-424.
- [15] HAN K, PERIC' D, OWEN D R J, et al. A Combined Finite/Discrete Element Simulation of Shot Peening Processes-Part II: 3D Interaction Laws[J]. Engineering Computations, 2000, 17(6): 680-702.
- [16] OHTA T, SATO Y. Effect of Saturation Peening on Shape and Residual Stress Distribution after Peen Forming[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(7/8): 4659-4675.
- [17] SAE Standard J2277, Shot Peening Coverage Determination[S].
- [18] YANG Zhao-rui, LEE Y, HE Shang-wen, et al. Analysis of the Influence of High Peening Coverage on Almen Intensity and Residual Compressive Stress[J]. Applied Sciences, 2019, 10(1): 105.
- [19] SAE Standard J442, Test Strip, Holder, and Gage For Shot Peening[S].
- [20] SAE Standard J443, Procedures for Using Standard Shot Peening Almen Test Strip[S].
- [21] 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.
- [22] HU Dian-yin, GAO Ye, MENG Fan-chao, et al. A Unifying Approach in Simulating the Shot Peening Process Using a 3D Random Representative Volume Finite Element Model[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(4): 1592-1602.
- [23] JEBABI M, GAKWAYA A, LÉVESQUE J, et al. Robust Methodology to Simulate Real Shot Peening Process Using Discrete-Continuum Coupling Method[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 107: 21-33.
- [24] CAO W, FATHALLAH R, CASTEX L. Correlation of Almen Arc Height with Residual Stresses in Shot Peening Process[J]. Materials Science and Technology, 1995, 11(9): 967-973.
- [25] ATIG A, BEN SGHAIER R, SEDDIK R, et al. Probabilistic Methodology for Predicting the Dispersion of Residual Stresses and Almen Intensity Considering Shot Peening Process Uncertainties[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(5): 2125-2136.

责任编辑: 刘世忠