

34CrNiMo6 钢复合喷丸强化的有限元模拟^{*}

梁 若¹, 解丽静¹, 庞思勤¹, 程冠华¹, 张 磊¹, 项俊锋¹, 白 龙², 陈建军²

(1. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100018;

2. 山西柴油机工业有限责任公司, 大同 037000)

[摘要] 为了研究复合喷丸的工艺效果, 利用 ABAQUS 有限元仿真软件进行模拟分析, 建立了 34CrNiMo6 钢随机多弹丸的周期性三维有限元模型。首先对所提出的周期性有限元模型进行周期性验证和试验验证, 然后利用周期性有限元模型对复合喷丸的强化效果、不同喷丸强度对残余应力场的影响进行分析。结果表明: 该周期性三维有限元模型可有效模拟喷丸强化效果; 复合喷丸强化使 34CrNiMo6 钢表面产生的残余应力和最大残余应力均高于单一喷丸产生的, 且表面残余应力分布更加均匀, 但最大残余应力所处深度不变; 复合喷丸可得到更小的表面粗糙度。

关键词: 复合喷丸; 有限元模拟; 残余应力; 34CrNiMo6 钢

Finite Element Simulation of 34CrNiMo6 Steel After Dual Shot Peening

LIANG Ruo¹, XIE Lijing¹, PANG Siqin¹, CHENG Guanhua¹, ZHANG Lei¹, XIANG Junfeng¹, BAI Long²,
CHEN Jianjun²

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100018, China;

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

[ABSTRACT] To study the effect of dual peening, the periodic 3D finite element model of 34CrNiMo6 shot peening with a number of random projectiles is established using finite element analysis software ABAQUS. At first, the proposed periodic model is verified by experiment. Then the strengthening effect of shot peening and the influence of Almen intensity on residual stress field are analyzed with the proposed periodic model. The results show that the residual stress on surface layer of 34CrNiMo6 caused by dual shot peening is larger than that caused by single shot peening, and the residual stress distribution on surface is more uniform, but the depth of maximum residual stress is the same. Dual shot peening can attain less surface roughness.

Keywords: Dual peening; Finite element simulation; Residual stress; 34CrNiMo6 steel

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.10.099

喷丸强化是航空、航天、车辆等领域广泛应用的表面强化手段之一。其强化原理是通过大量球形(或近似球形)弹丸轰击待加工的零件表面,使其发生塑性变形,形成残余压应力,从而显著提高材料的疲劳性能、表面强度、抗应力腐蚀性能等^[1]。在实际生产中,复合喷丸是处理工件常用的一种方式,可在工件表面获得更高的残余应力及更好的表面质量。复合喷丸工艺一般顺序为先采用大尺寸的弹丸进行高强度喷丸(第一步喷丸),再采用小尺寸的弹丸进行低强度喷丸(第二步喷丸)。若仅用一种弹丸进行喷丸强化处理,则为单次喷丸。在目前的研究中,主要采用试验的方法对复合喷丸所产生的残余应力进行研究^[2-4],但对复合喷丸进行有限元仿真分析却不多见。

由于喷丸工艺参数较多,目前几乎没有对喷丸在不同工艺参数下强化效果变化规律的系统试验研究,而多采用计算机仿真模拟快速得到不同工艺参数下残余应力场的变化规律。因此,有限元分析方法逐渐成为研究喷丸强化的重要手段之一。Klemenz 等^[5]研究了入射序列对喷丸残余应力的作用规律,并发现应力值在喷丸区域取平均值和试验结果更为接近。Miao 等^[6]建立了随机弹丸喷丸模型,讨论了两种入射角度下残余应力的变化规律。李源等^[7]模拟了多弹丸随机入射 Q235 钢板的过程,并与单弹丸模型模拟结果作比较,发现多弹丸模型能够更好地模拟实际的喷丸强化。

目前,关于喷丸的有限元仿真多集中在单次喷丸弹丸阵列的排布方式上,其研究相对较完善。而关于复合喷丸强化的有限元模型模拟的文献较少,且复合喷丸因

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51575051)。

其更好的强化效果和表面质量而被广泛应用于实际生产中。鉴于此,本文采用有限元分析软件 ABAQUS 对 34CrNiMo6 钢复合喷丸强化过程进行数值模拟,提出了随机弹丸周期性模型,分析了复合喷丸强化残余应力场的分布规律,以及第二步喷丸的喷丸(阿尔门)强度对复合喷丸强化效果的影响。

1 周期性有限元模型

1.1 相邻弹丸间距的确定

在实际的喷丸过程中,大量弹丸无规律地随机撞击靶材,直接模拟这个物理过程十分困难。本文引入周期性模型的思想,以较小面积的代表单元来模拟实际情况中大面积工件表面的工况。因此,为保证所模拟的单元具有代表性,需将杂乱的弹丸排列成阵列,如图 1 所示。Gariépy 等^[8]利用高速摄像机研究实际喷丸过程中弹丸的分布情况,结果表明大多数弹丸是先后撞击靶材的,在极少数两颗弹丸几乎同时撞击靶材的情况中,弹丸之间也有较大的距离,可以认为弹丸之间互相没有影响。因此,只要相邻弹丸之间有一定距离使弹丸无相互影响,就可将弹丸流按周期性排列来进行模拟。

为研究弹丸间距对相邻弹丸形成应力的影响规律,建立了双弹丸模型,如图 2 所示。模型中,两粒弹丸的水平中心距为 C ,第一粒弹丸冲击靶材后会在 $A-A$ 线沿深度方向上形成残余应力 σ ; 随后第二粒弹丸的冲击会使 $A-A$ 线上的残余应力分布发生改变 $\Delta\sigma$ 。图 3 给出了 C 和 $\Delta\sigma$ 的关系。从图 3 可知,随着弹丸水平中心距 C 的增大,后入射弹丸引起的 $A-A$ 线上应力变化 $\Delta\sigma$ 已经逐渐减小。当 $C \geq 2.5R$ 时,应力变化和残余应力值相比已经可以忽略。因此,可认为靶材表面的某一点沿深度的应力分布不受与之相距为 $2.5R$ 或 $2.5R$ 以上的弹丸冲击的影响,故将相邻弹丸之间距离定为 $2.5R$ 。

1.2 材料的本构模型

喷丸靶材材料为 34CrNiMo6 钢,其本构关系描述选

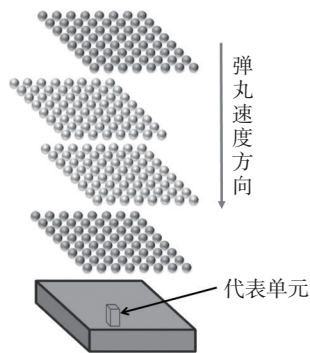


图1 周期性模型示意图

Fig.1 Illustration of periodic model

用 Johnson-Cook 本构模型,该模型能准确模拟喷丸时在高应变速率下材料的塑性变形。喷丸作为一种冷加工工艺,温度对材料塑性变形的影响可忽略不计。因此,其 J-C 本构模型可简化为:

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

其中, $\bar{\sigma}$ 为材料等效塑性应力, $\bar{\epsilon}$ 为材料等效塑性应变, A 为材料的屈服强度 (MPa), B 为材料的应变硬化常数, C, n, m 为材料常数(通过材料力学性能试验测算得出), $\dot{\bar{\epsilon}}$ 为应变率, $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ 为参考应变率,一般为 1。表 1 列出了 34CrNiMo6 的相关 J-C 本构参数。

1.3 模型的建立

建立周期性模型的目的是用较小的单元来代表大面积的靶材区域,理想状态下代表单元可拼接为大面积的靶材区域,即代表单元具有周期性。在代表单元区域内随机位置生成一颗弹丸,在该弹丸周边相应生成 8 颗弹丸,相邻弹丸间距为 $2.5R$,使弹丸之间无相互应力影响。球心位于代表单元区域内的弹丸为母球,其周边 8

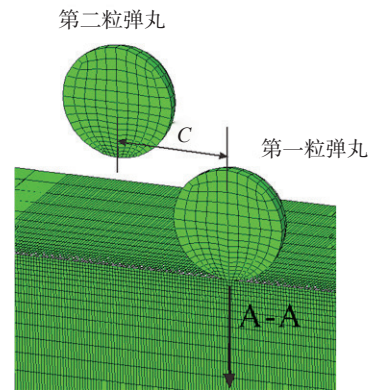


图2 双弹丸有限元模型

Fig.2 Finite element model of double shots

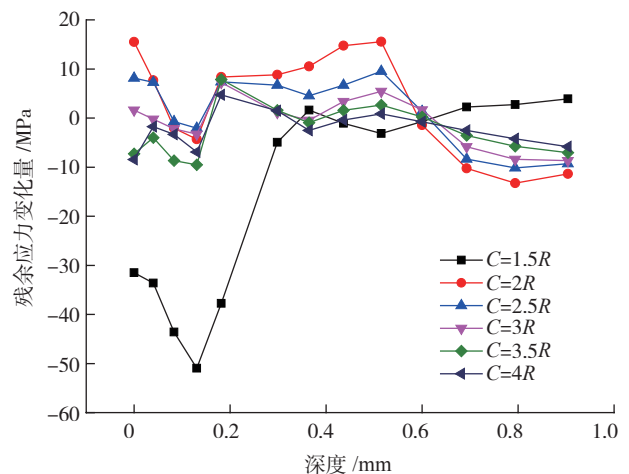


图3 不同中心距C对相邻弹丸应力相互作用的影响

Fig.3 Influence of different C values on the residual stress of adjacent shots

颗弹丸为子球。母球位置是随机生成的,8颗子球的位置根据母球位置确定,子球的其他参数(半径、速度、材料等)均与母球相同。以弹丸半径 $R=0.6\text{mm}$ 的情况为例,靶材模型 X - Y 平面的区域划分示意图如图 4(a)所示,其中实线圆代表母球,虚线圆代表子球。区域 1 是应力检测区,考虑到仿真结果与试验结果的对照,该区域尺寸定为 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$,即 X 射线应力检测仪的最小测量范围。区域 2 是代表单元区域,也是随机生成母球球心位置的区域,母球在三维空间中位置的随机分布由 ABAQUS/PYTHON 脚本控制。区域 3 为子球球心所在的区域。为了保证代表单元具有周期性,区域 2 的尺寸为 $2.5R \times 2.5R$,区域 3 的边长即为 $7.5R \times 7.5R$ 。区域 4 是靶材模型的边界,尺寸为 $9.5R \times 9.5R$ 。靶材模型高度为 $5R$,可避免底部边界对应力场的影响。为节约计算成本,靶材模型区域 2 网格划分较密,采用 8 结点减缩积分 C3D8R 单元类型,其他区域网格较粗。弹丸材料为铸钢,在仿真中近似为解析刚体。

第 N 个母球球心 (x, y, z) 在空间的分布表示为:

$$\begin{cases} z = -0.005 \times v \sin \phi \times (N - 1) - 0.6 \\ y = u(-1.25R, 1.25R) \\ x = (R - z) \cot \phi + u(-1.25R, 1.25R) \end{cases} \quad (2)$$

式中, v 为喷丸速度, ϕ 为入射角度, $u(-1.25R, 1.25R)$ 表示满足 $(-1.25R, 1.25R)$ 之间均匀分布的随机数。每组弹丸入射间隔时间为 $5\mu\text{s}$,上一组弹丸撞击靶材所引起的应力振荡在此时间间隔内可大幅减弱^[8]。以弹丸半径 0.6mm ,入射角度 60° 为例,周期性有限元模型如图 4(b)所示。

2 模型验证

2.1 周期性验证

若代表单元具有周期性,可拼接成大面积的靶材,则代表单元相对的侧面上的应力分布应该是对称的。以弹丸半径 0.6mm 、喷丸速度 40m/s 、入射角度 70° 、母球数量 50 为例(按 Miao 等^[6]提出的方法计算出当母球数量为 50 时代表单元的喷丸覆盖率可达到 100%),验证模型的周期性,仿真结果如图 5 所示。在仿真开始和结束阶段,代表单元相对侧面的应力云图都体现出了良好的对称性,即面 $DD'A'A$ 与面 $BB'C'C$ 、面 $AA'B'B$ 与面 $CC'D'D$ 上的应力分布对称,这验证了该模型周期性的正确性。应力云图中细微的差别可能是由于代表单元区域网格划分较细而周边区域网格较粗引起的。

2.2 试验验证

为了验证仿真结果的正确性,进行了相同工况下(弹丸半径为 0.6mm ,喷丸速度为 40m/s ,入射角度为 70°)的喷丸试验研究。试验试样经过调质热处理和磨

表1 34CrNiMo6材料Johnson-Cook参数

Johnson-Cook 材料常数	取值
A /MPa	792
B /MPa	510
n	0.26
C	0.014
m	1.03
$\dot{\epsilon}_0$	1

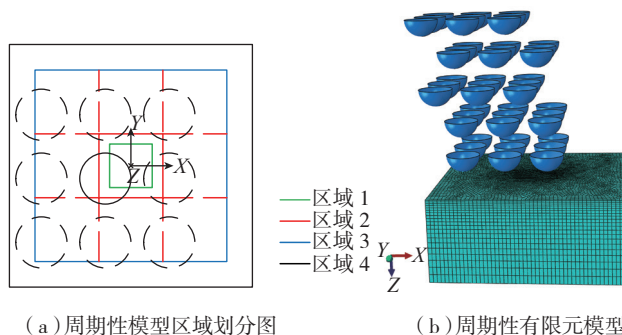


图4 周期性模型

Fig.4 Periodic model

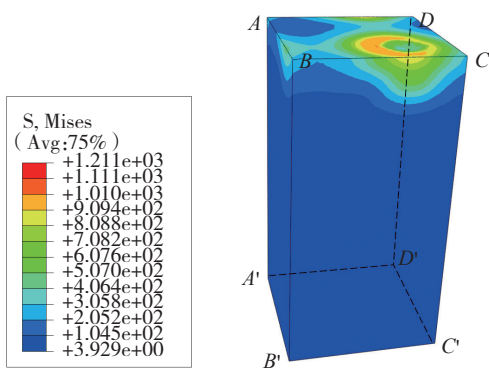
削后,表面存在 $50\sim 80\text{MPa}$ 的拉应力。试验使用的喷丸设备为 Q3518 抛丸机,叶轮线速度定为 40m/s ,喷丸时间为 1min 。应力检测设备为 X-350A 型 X 射线应力测定仪,电解抛光设备为 XF-1 型电解抛光机,电解溶液为饱和 NaCl 溶液,每次抛光去除材料厚度为 $60\sim 80\mu\text{m}$,去除厚度由 Mitutoyo 数显千分尺测定。

实际测量残余应力使用的 X 射线衍射与电解抛光法本身虽不会引入新的残余应力,但是电解抛光会去除表层材料,这在一定程度上破坏了靶材试样原有的应力平衡,引起喷丸残余应力的重新分布,因此采用 ABAQUS 的 Model Change 技术模拟电解抛光的过程。Model Change 方法可以将原有模型中部分几何元素或网格在指定的分析步中无效化,这一过程和电解抛光一样不会引入新的应力,所以成为了模拟电解抛光过程的有效手段。试验结果与仿真结果如图 6 所示。残余应力场分布呈现出相同的变化趋势,喷丸试验和仿真均在材料表面引入了残余压应力,随着深度的增加,残余压应力表现为先增加后减小的规律,这验证了周期性模型的正确性。仿真获得的最大残余压应力比试验值大,这可能与试样表面存在的初始残余拉应力有关。

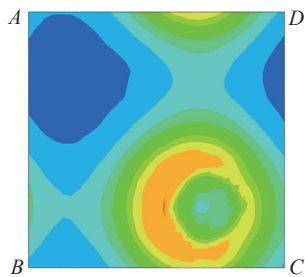
3 利用周期性模型模拟复合喷丸

3.1 比较复合喷丸与单次喷丸

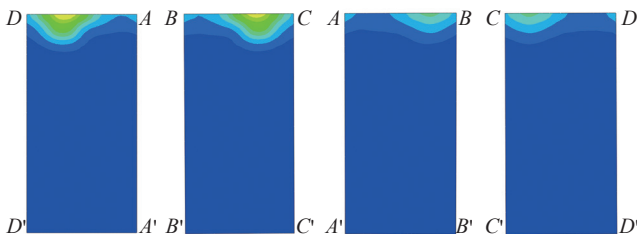
在本文的复合喷丸仿真模型中,所有的弹丸都近似为刚体,材料均为铸钢,但第二步喷丸的弹丸半径较小。仿真模型的相关喷丸参数如表 2 所示。其中模型 1 是单



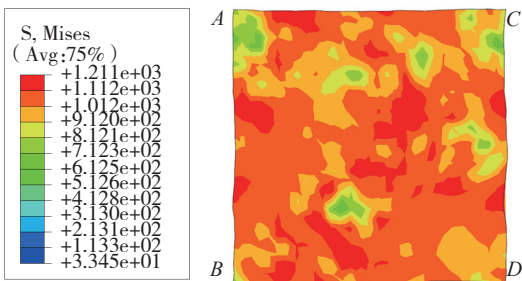
(a) 1 颗母球入射后的应力分布



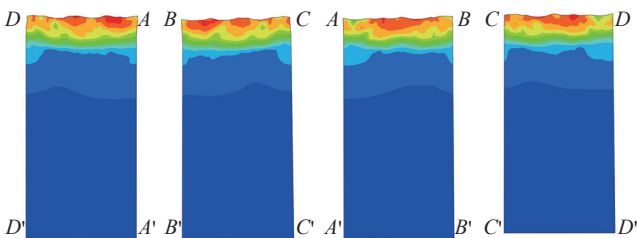
(b) 1 颗母球入射后上表面应力分布



(c) 1 颗母球入射后侧面的应力分布



(d) 50 颗母球入射后上表面应力分布



(e) 50 颗母球入射后侧面的应力分布

图5 代表单元的应力分布

Fig.5 Stress distribution of representative cell

次喷丸,弹丸半径为 0.6mm,覆盖率为 100%;模型 3 为复合喷丸,两步喷丸的弹丸半径分别为 0.6mm、0.3mm,覆盖率为 100%;模型 2 是模型 3 的对照组。为了保证模型的周期性,模型 3 中小弹丸的排列方式按 1.3 节中的周期规则进行了调整。模型 3 的弹丸排列如图 7 所示。

图 8 所示为复合喷丸残余应力的仿真结果。可以看出,模型 1 和模型 3 最大残余应力所处的深度相同,均为 0.195mm,但在 0~0.195mm 深度范围中模型 3 的残余应力均大于模型 1。此结果与 Fu 等^[9]的复合喷丸试验结果类似,进一步说明了周期性模型的正确性。模型 2 与模型 3 覆盖率相同,但因第二步喷丸中弹丸尺寸的不同,残余应力场分布不同。在模型 2 中,层深较大处残余应力大于模型 1,但在较浅的层深中残余应力与模型 1 相近甚至更小。对比 3 个仿真结果,可以得出结论,

表2 单次喷丸及复合喷丸仿真模型参数

模型	弹丸半径 /mm	覆盖率 /%	弹丸速度 / $(m \cdot s^{-1})$
1	0.6	100	40
2	0.6+0.6	100+100	40
3	0.6+0.3	100+100	40+40

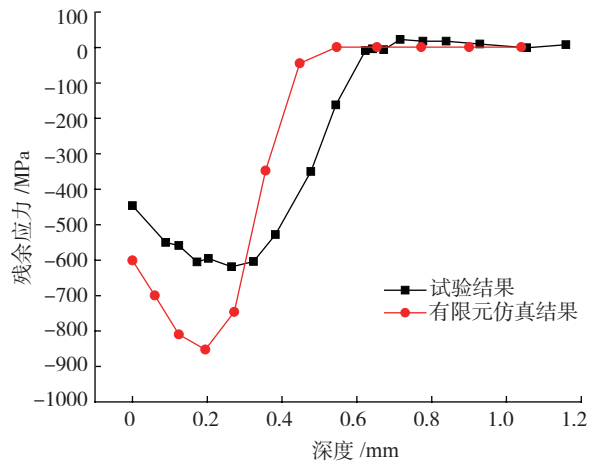


图6 试验结果与仿真结果的对比

Fig.6 Comparison of residual stress profiles obtained by experiment and simulation

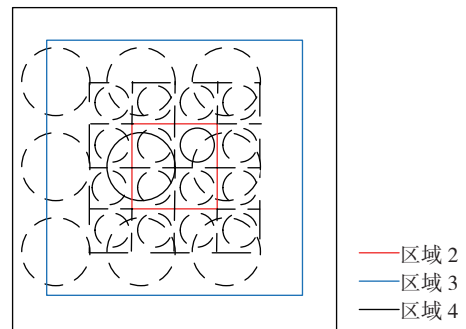


图7 复合喷丸的弹丸排列示意图

Fig.7 Shots array schematic diagram of dual peening

复合喷丸在浅表面所形成的残余应力比单次喷丸所形成的残余应力大。

图9所示为模型1和模型3中代表单元表面的残余应力云图。模型1和模型3表面S11的标准差分别为390.11MPa和345.98MPa。通过比较应力云图和S11的标准差,可以看出复合喷丸可以得到更均匀的表面应力分布。模型1和模型3的表面粗糙度为:

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |z_i| \quad (3)$$

式中, z_i ($i=1,2,\dots,n$)是模型表面第*i*个节点的垂直位移, N 是所计算的节点个数。为了得到更准确的结果,靶材表面区域2中所有的节点的垂直位移都进行了计算。得到的结果为模型1表面粗糙度为 $R_a=8.8\mu\text{m}$,模型3表面粗糙度为 $R_a=8.0\mu\text{m}$ 。这说明复合喷丸可以形成更好的表面质量。

3.2 喷丸强度对复合喷丸的影响

在很多关于复合喷丸的研究中,喷丸(阿尔门)强度是区分两步喷丸的重要参数。Miao等^[10]研究表明,喷丸强度与入射速度呈正相关关系,并且入射速度是影响喷丸强度的主要参数。因此可以将入射速度作为变量来研究喷丸强度对复合喷丸的影响。表3所示为模型3、4、5的喷丸参数,图10为残余应力的仿真结果。

从图10中可以看出,模型1~5中残余应力最大值

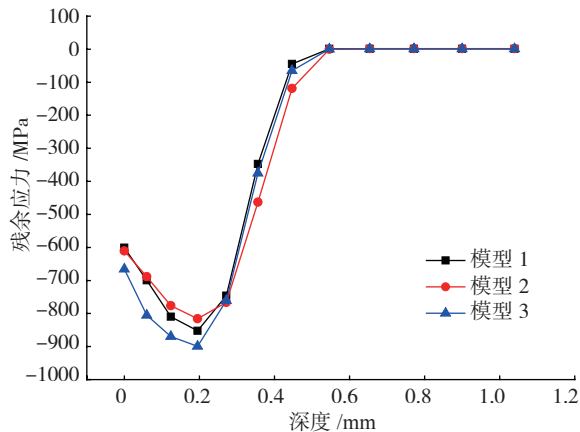


图8 模型1~3的残余应力分布

Fig.8 Residual stress distribution of model 1~3

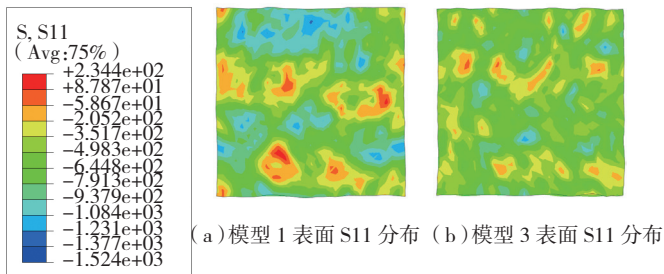


图9 代表单元表面的应力分布

Fig.9 Residual stress distribution of representative cell

表3 复合喷丸仿真模型参数

模型	弹丸半径/mm	覆盖率/%	入射速度/(m·s ⁻¹)
1	0.6+0.3	100+100	40+20
2	0.6+0.3	100+100	40+30
3	0.6+0.3	100+100	40+40
4	0.6+0.3	100+100	40+50
5	0.6+0.3	100+100	40+60

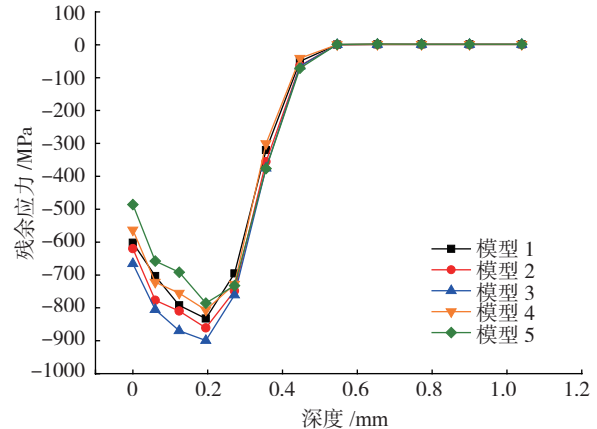


图10 模型1~5的残余应力分布

Fig.10 Residual stress distribution of Model 1~5

均在0.195mm处,且随着第二步喷丸的入射速度即喷丸强度的增加,0~0.195mm深度的残余应力先增大后减小,层深大于0.272mm后残余应力值基本相同。模型4和5中0~0.195mm深度的残余应力比模型1中小,这可能是由于喷丸强度过大而造成过度喷丸,使强化效果变差。

4 结论

(1)对于先后连续入射的弹丸,后入射的弹丸对先入射的弹丸残余应力场的影响随着弹丸间距的增加而减小。

(2)本文提出的周期性模型具有良好的周期性,而且仿真结果与试验结果相近,因此该模型可用于模拟随机多弹丸入射的喷丸强化。

(3)复合喷丸相对于单次喷丸可在靶材表面形成更均匀的残余应力场,而且可在浅表面形成更大的残余应力。

参考文献

[1] SHIGERU H, HIYOKAZU S. Studies on improvement of surface durability of carbonitrided and hardened gear steel[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 2000, 66(11):1766-1770.

[2] 李荣斌,王相虎,尚海龙,等.复合喷丸工艺对S30432钢表面应力与组织的影响[J].材料热处理技术,2012,41(4):148-149.

LI Rongbin, WANG Xianghu, SHANG Hailong, et al. Effect of composite shot peening on residual stress and microstructure of S30432

(下转第108页)