

喷丸处理 Q235 钢中晶粒尺寸与残余应力的关系预测*

何浩然¹ 刘峰¹ 李恒智² 张晖辉¹

(1. 燕山大学河北省重型装备与大型结构力学可靠性重点实验室 秦皇岛 066004;

2. 河北对外经贸职业学院 秦皇岛 066311)

摘要: 作为优异的表面处理工艺,喷丸表面处理能够提高金属表面性能,被广泛应用于航天航空领域。为了研究喷丸表面强化的内在物理机理,建立了喷丸冲击的力学模型,应用 DYNA 软件研究弹丸速度、半径和弹丸数量等因素对残余应力的影响。进一步利用 Zener-Hollomon 参数模型和动态再结晶公式计算出理论晶粒尺寸,并讨论残余应力与晶粒尺寸的演化规律。分析结果发现:弹丸速度、半径和弹丸数量的增大会使残余应力变大而晶粒尺寸相对变小。但并未发现残余应力与晶粒尺寸之间存在定量关系,表明这两种强化机制相互独立。

关键词: 喷丸处理; dyna 软件; 有限元; 残余应力; 晶粒细化; Zener-Hollomon 模型

中图分类号: TG668

Prediction of Relationship Between Grain Size and Residual Stress in Shot Peening Q235 Steel

HE Haoran¹ LIU Feng¹ LI Hengzhi² ZHNAG Huihui¹

(1. Key Laboratory of Mechanical Reliability for Heavy Equipments and Large Structures
of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. Hebei Institute of International Business and Economics, Qinhuangdao 066311, China)

Abstract: As an excellent surface treatment process, shot peening surface treatment can improve metal surface performance and is widely used in the aerospace field. In order to study the physical mechanism of shot peening surface strengthening, a mechanical model of shot peening impact was established. The DYNA software was used to study the impact of shot velocity, radius and number of shots on the residual stress. The Zener-Hollomon parameter model and dynamic recrystallization were further used. The formula calculates the theoretical grain size, and dis-cusses the evolution rule of residual stress and grain size. Results show that the increase of projectile velocity, radius and number of shot peening will make the residual stress larger and the grain size relatively smaller. Although the changes of residual stress and grain size are similar, there is no quantitative relationship between them, and these two strengthening mechanisms are independent of each other.

Keywords: shot peening; dyna; finite element; residual stress; grain refinement; Zener-Hollomon

0 前言

喷丸表面处理属于机械加工的一种处理方式。目前来说,喷丸表面处理已经发展非常成熟,在金属清洁与表面强化方面拥有很广泛的作用,也派生了许多喷丸的方式,比如机械喷丸、高能喷丸、高压水枪喷丸、超声喷丸与激光喷丸等^[1]。喷丸表面处理

利用高速弹丸流对金属零件表面进行撞击,使零件表面层产生残余应力场,改变零件的表面状态并提高零件的疲劳性能。与其他表面处理工艺相比,喷丸表面处理具有强化效果明显、消耗成本低、实施过程简便等特点^[2],广泛应用于汽车、航空和航天等重要领域^[3-5]。喷丸强化过程是高度非线性的动态冲击过程,工艺参数对喷丸效果的影响需要借助于

* 河北省自然科学基金资助项目(E2017203240)。

Fund: Supported by Natural Science Foundation of Hebei Province (E2017203240).

20210122 收到初稿, 20210322 收到修改稿

数值仿真手段进行分析,近年相关学者开展了喷丸数值模拟研究取得了较大进展。但由于喷丸强化作用过程复杂且影响因素众多,至今仍有一些关键技术有待深化和解决。

国内外研究当中,主要以有限元方法进行数值模拟计算^[6-8]。仿真中,考虑了喷丸速度、喷丸半径、喷丸数量、喷丸撞击位置、覆盖率、冲击位置等因素对喷丸表面处理性能的影响^[9-11],使模拟更加贴近实际情况,对得出的应力、应变、残余应力、表面粗糙度等结果进行分析讨论^[12-13]。因此,喷丸模拟方面的影响因素考虑得比较全面,同时也验证了 CAE 仿真软件对模拟喷丸表面处理过程计算的准确性。

喷丸表面处理的残余应力研究更多的是试验研究。残余应力的测试方法有很多,如 X 射线衍射、超声残余应力检测和钻孔法等^[14]。基于这些测试方法,对残余应力场的特征规律进行了论证^[15]。关于不同弹丸的半径和强度等因素对喷丸表面强化效果的试验也有较多研究^[16-17]。这里更多的是宏观力学性质方面的直接研究。但是从晶粒尺度的角度观察,喷丸表面处理可以使工件表面层晶体得到细化^[18-19],晶体细化同样是产生残余应力,使试件硬度增强的一种物理机制^[20]。在强化的机制中,至少存在两种机制,分别为应力和组织强化机制^[21]。

对于晶粒尺寸的变化,国内外学者也给出了具有参考意义的经验公式,对奥氏体长大中对晶粒尺寸的影响因素和常用公式进行了归纳总结^[22-23]。总的来说,国内外学者在喷丸表面处理的模拟、试验方面取得了很多的成果,对晶粒尺寸变化也有一定的研究,但宏观力学性质中应变、应力、残余应力与微观晶粒变化的定量关系并未有明确的结论,因此本文就这一方面开展研究。

1 数值仿真模型建立

1.1 材料模型

根据目前使用喷丸处理的工况,板材选择广泛应用的 QB235 钢板材料,弹丸采用铸钢丸。Q235 钢的组成成分见表 1,弹丸及板材材料属性见表 2。

表 1 Q235 钢的组成成分

Table 1 Components of Q235 steel (wt. %)

C	Mn	Si	S	P	Fe
0.14~0.22	0.3~0.65	0.30	<0.05	<0.045	Balance

表 2 试件与弹丸材料属性

Table 2 Material properties of specimens and projectiles

Type	Density/ (kg/m ³)	Elasticity modulus/GPa	Poisson	Specific heat capacity J/K
Panel	7.8×10 ³	210	0.3	-
Projectile	7.8×10 ³	210	0.3	502

结合实际情况试件选取 J-C 本构材料模型,其表达式如下所示^[24]:

$$\sigma_{eq} = (A + B\dot{\varepsilon}_{eq}^n)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}_{eq}^*) (1 - FT^{*m}) \quad (1)$$

式中, A 、 B 、 n 、 C 和 m 是模型参数; σ_{eq} 为等效应力; ε_{eq} 为等效应变; $\dot{\varepsilon}_{eq}^*$ 为量纲一化等效塑性应变率。 T^* 量纲一化温度。

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] \times$$

$$(1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}_{eq}^*) [1 + D_5 \exp(D_6 T^*)] \quad (2)$$

式中, $D_1 \sim D_6$ 是材料常数, σ^* 是应力三轴度。

1.2 仿真模型

本文采用 LS-dyna 软件进行模型仿真工作。选择 3D-solid164 单元进行模拟。为了减少计算时间,采用简化网格密度方式进行计算,如图 1 所示网格以弹丸撞击位置为中心向四周递减的方式划分。

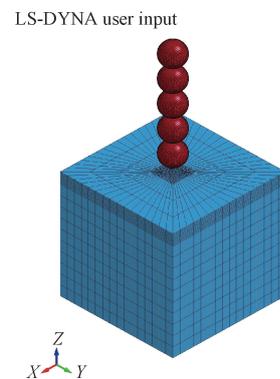


图 1 喷丸表面处理模型

Fig. 1 Model in shot peening surface treatment

因为弹丸撞击会产生冲击波,喷丸表面处理试件尺寸与弹丸半径相差较大,但是本文建立的试件模型尺寸与弹丸在尺寸相差较小,冲击波会对应力场产生影响,所以采用非反射边界条件,消除冲击波的影响。根据弹丸撞击试件的特性,只要弹丸速度足够大,试件会被破坏,所以选择侵蚀接触最为合适。

1.3 数据提取路线

在后续的数据提取中,规定表面方向如图 2a 所示为整体模型切片位置,图 2b 所示为表面和深度方向数据提取路线。

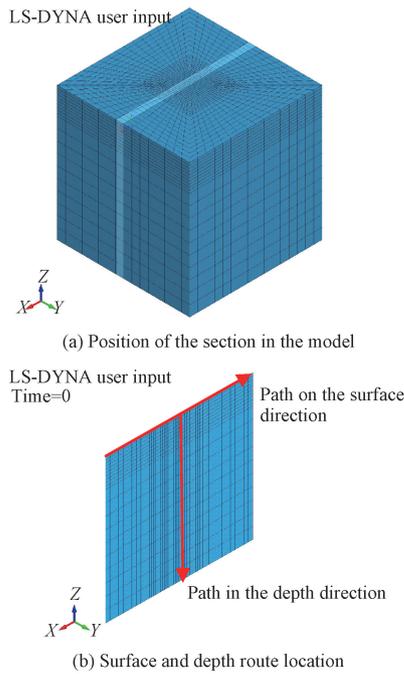


图 2 提取数据的位置
Fig. 2 Location to extract the data

2 不同因素对残余应力影响

下页针对单点弹丸位置的弹丸冲击模型进行讨论,主要讨论弹丸速度、弹丸冲击次数和弹丸半径对试件残余应力的影响。

2.1 弹丸速度对残余应力的影响

首先设置基本参数。设置 3 组试验,相同参数板材 20 mm 的正方形试件,5 个弹丸,弹丸半径 2 mm。分别进行 30 m/s、50 m/s、70 m/s 的弹丸速度仿真模拟。图 3 和图 4 所示为不同弹丸速度下沿表面方向和深度方向的残余应力分布。

从图 3a、3b 中可以看出,从撞击中心到边缘位置,残余应力呈先增大后减小的趋势,并没有处于撞击中心。从 3 组试验数据可以看出,随着弹丸

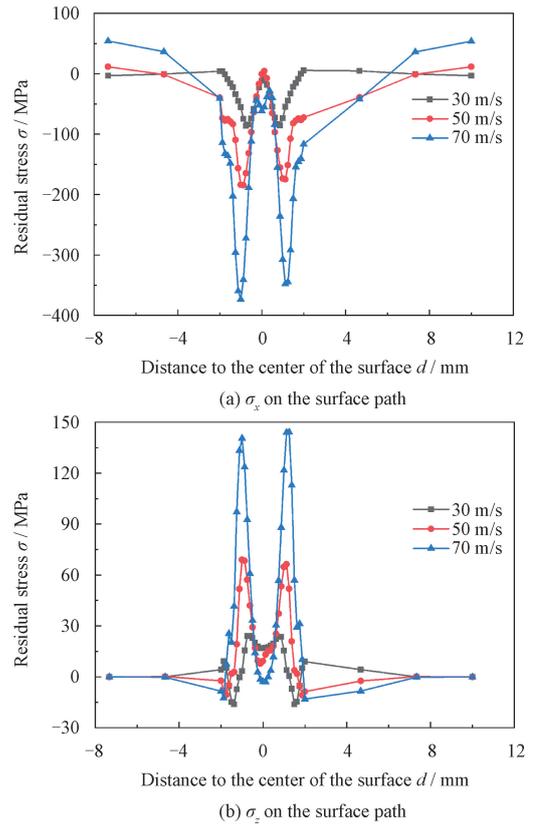


图 3 不同速度下表面残余应力
Fig. 3 Residual stresses on the surface at different velocities

撞击速度的增加,表面最大残余压应力对应数值为 -86.41 MPa、-184.39 MPa、-373.39 MPa;表面最大残余拉应力对应数值为 24.08 MPa、68.98 MPa、144.17 MPa,可以看出呈递增趋势。

图 4 为在速度因素影响下,喷丸表面处理的表面位置残余应力云图。可以看出,随着弹丸速度的增加,弹丸撞击影响的表面范围增大,最大残余应力值增大,最大残余应力值不在撞击中心。

图 5 为在速度因素影响下,喷丸表面处理的深度位置残余应力云图。可以看出,随着弹丸速度的增

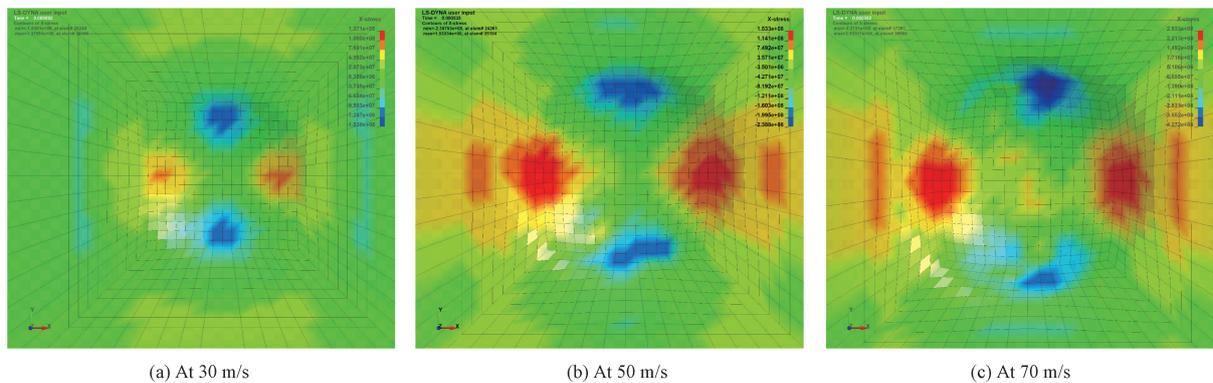


图 4 不同速度下表面位置 σ_x 的云图

Fig. 4 Stress contour plots of surface position σ_x at different velocities

加,弹丸撞击影响的深度范围增大,但对比 50 m/s 和 70 m/s 的情况,最大残余应力值没有变深,可能是

撞击位置出现饱和情况。还可以得到最大残余应力值在次表层的结论。

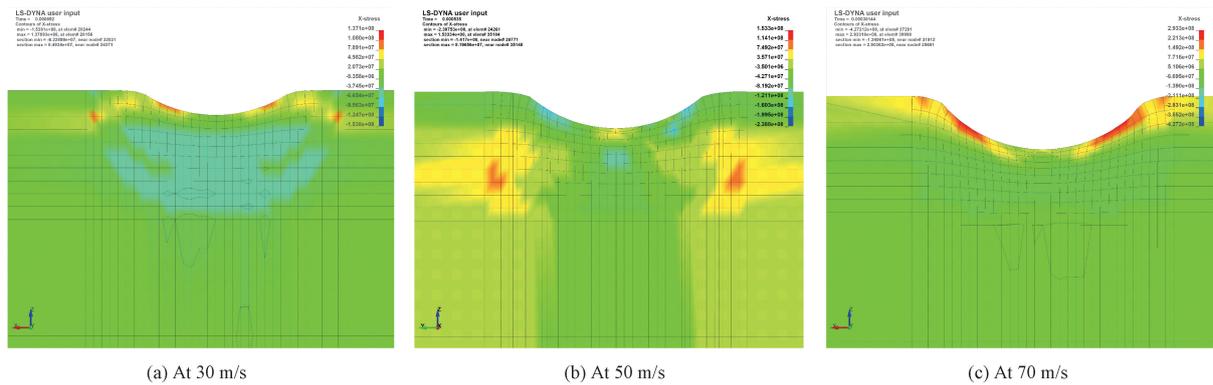


图 5 不同速度下深度位置 σ_x 的云图

Fig. 5 Stress contour plots of depth position σ_x at different velocities

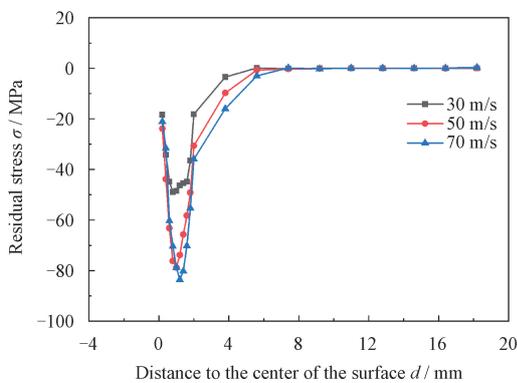
接下来不同因素的情况,并不影响以上结论。所以之后不同因素的残余应力云图基本趋势相同,以免赘述不再给出。

从图 6a、6b 中可以看出,随着弹丸速度的增加,深度最大残余压应力所对应的数值为 -48.91 MPa、-78.76 MPa、-83.55 MPa;深度最大残余拉应力所对应的数值为 96.06 MPa、155.36 MPa、158.36 MPa。结果表明弹丸冲击后,最大残余应力并非在撞击中心,而是在

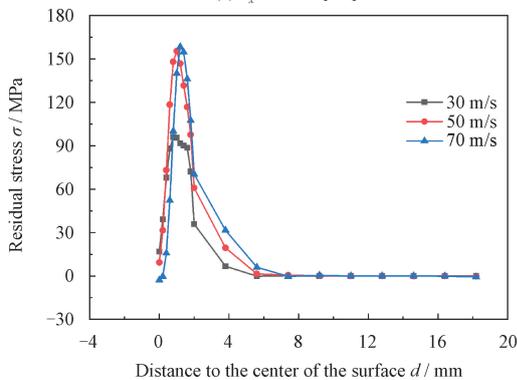
其附近次表层;残余应力随着弹丸撞击次数的增加而增大,残余应力的深度也随之变深。

2.2 弹丸数量对残余应力的影响

首先设置基本参数。设置 3 组试验,相同参数板材 20 mm 的正方形试件,弹丸速度 50 m/s,弹丸半径 2 mm。分别进行 20 个、25 个、30 个的弹丸数量仿真模拟。图 7 和图 8 所示为不同弹丸数量下沿表面方向和深度方向的残余应力分布。



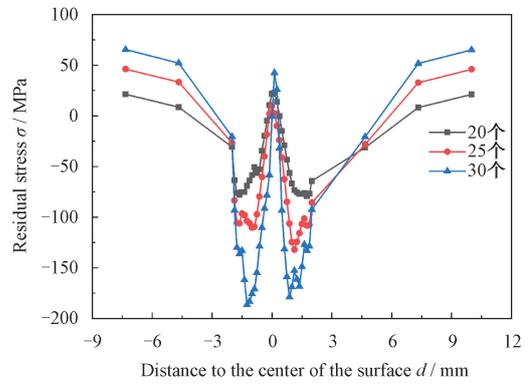
(a) σ_x in the depth path



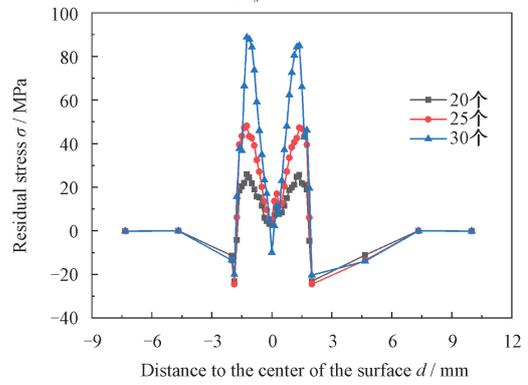
(b) σ_z in the depth path

图 6 不同速度下深度残余应力

Fig. 6 Residual stresses in the depth at different velocities



(a) σ_x on the surface path



(b) σ_z on the surface path

图 7 不同数量下表面残余应力

Fig. 7 Residual stresses on the surface at different quantities

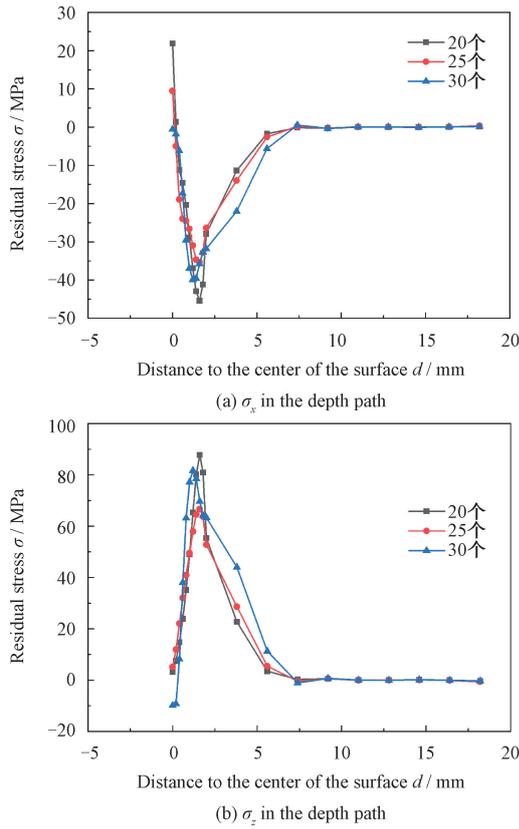


图 8 不同数量下深度残余应力

Fig. 8 Residual stresses in the depth at different quantities

从图 7a、7b 中可以看出,随着弹丸撞击数量的增加,表面最大残余压应力所对应数值为 -79.24 MPa、-132.12 MPa、-186.36 MPa,表面最大残余拉应力所对应的数值为 25.96 MPa、48.14 MPa、88.80 MPa,可以看出呈递增趋势。

从图 8a、8b 中可以看出,随着弹丸数量增加,深度最大残余压应力对应数值为 -45.43 MPa、-35.33 MPa、-39.90 MPa,深度最大残余拉应力对应数值为 87.73 MPa、66.67 MPa、81.65 MPa。结果表明,弹丸冲击后,在表面方向最大残余应力值随着弹丸数量的增加而变大,但是影响范围并没有变大;在深度方向,并没有明显的规律。

2.3 弹丸半径对残余应力的影响

首先设置基本参数。设置 3 组试验,相同参数板材 20 mm 的正方形试件,5 个弹丸,弹丸速度为 30 m/s。分别进行 1 mm、4 mm、6 mm 的弹丸半径仿真模拟。图 9 和图 10 所示为不同弹丸半径下沿表面方向和深度方向的残余应力分布。

从图 9a、9b 中可以看出,随着弹丸半径的增加,表面最大残余压应力所对应的数值为 -94.14 MPa、-85.81 MPa、-86.45 MPa,表面最大拉残余应力对应数值为 26.42 MPa、25.29 MPa、

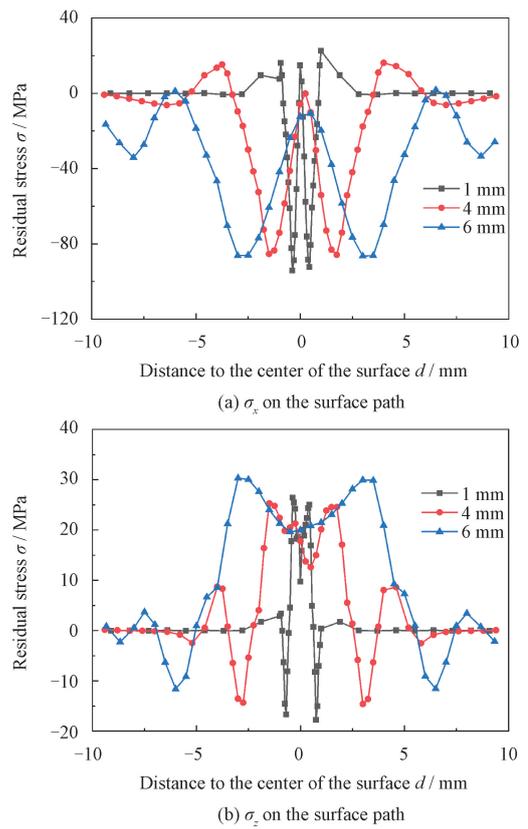


图 9 不同半径下表面残余应力

Fig. 9 Residual stresses on the surface at different radii

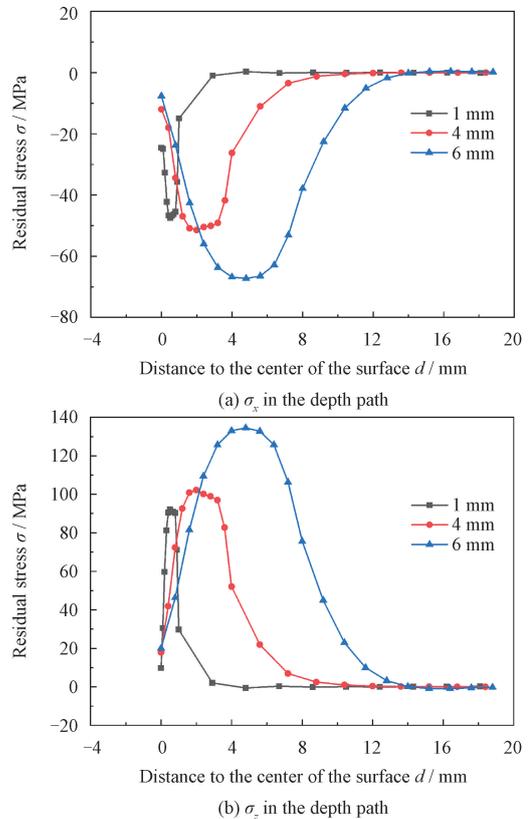


图 10 不同半径下深度残余应力

Fig. 10 Residual stresses in the depth at different radii

30.32 MPa,可以看出基本一致。

从图 10a、10b 中可以看出,随着弹丸半径增加,深度最大残余压应力所对应的数值为 -47.46 MPa、-51.44 MPa、-67.28 MPa,深度最大残余拉应力对应数值为 92.20 MPa、102.18 MPa、134.49 MPa。结果表明,弹丸冲击后,在表面方向最大残余应力随着半径的增大,残余应力并没有明显变化,但是残余应力影响范围变大;在深度方向,弹丸半径变大,残余应力数值变大,影响范围也变大。

2.4 板材长度对残余应力的影响

首先设置基本参数。设置 3 组试验,相同参数为 5 个弹丸,弹丸速度为 30 m/s,弹丸直径 2 mm。分别进行 10 mm、40 mm、60 mm 的板材长度仿真模拟。图 11 和图 12 所示为不同板材长度下沿表面方向和深度方向的残余应力分布。

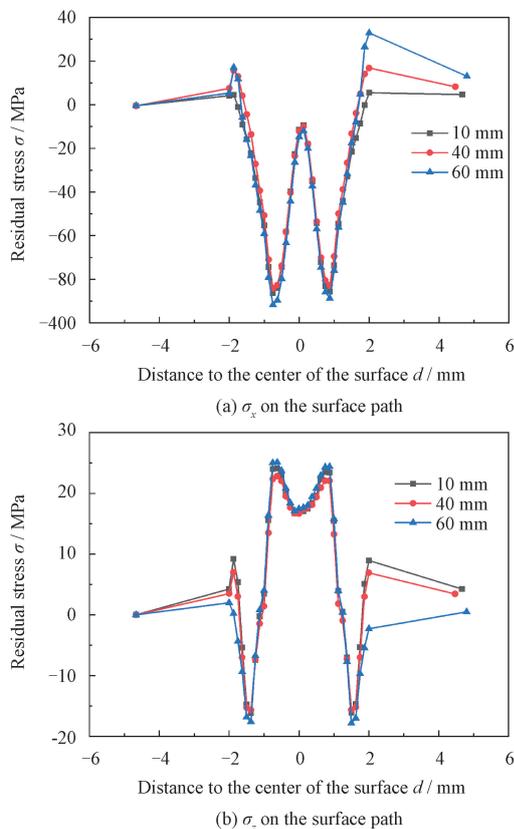


图 11 不同板材长度下表面残余应力

Fig. 11 Residual stresses on the surface at different plate lengths

从图 11a、11b 可以看出,随着板材长度的增加,表面最大残余压应力对应数值为 -86.16 MPa、-83.86 MPa、-88.23 MPa,表面最大拉残余应力对应数值为 24.08 MPa、22.82 MPa、25.12 MPa,可以看出呈基本一致。

从图 12a、12b 中可以看出,随着板材长度增加,深度最大残余压应力所对应的数值为

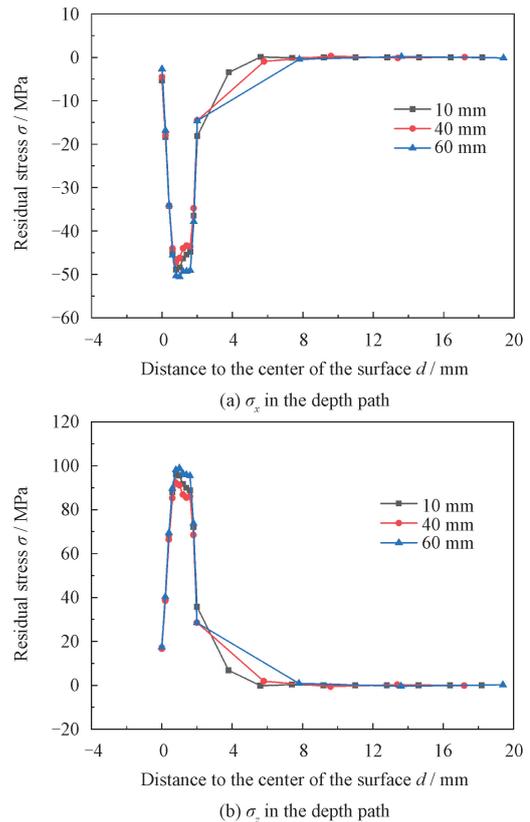


图 12 不同板材长度下深度残余应力

Fig. 12 Residual stresses in the depth at different plate length

-47.16 MPa、-45.12 MPa、-48.35 MPa,深度最大残余拉应力对应数值为 96.06 MPa、92.23 MPa、98.91 MPa。结果表明,弹丸冲击后,在表面方向和深度方向,残余应力基本一致。所以在对称约束下,板材的长度对残余应力并没有影响。

3 不同因素对晶粒尺寸影响

以下针对单点弹丸位置的弹丸冲击模型进行讨论,主要讨论弹丸冲击次数、弹丸速度和弹丸半径对试件晶粒尺寸的影响。

3.1 晶粒尺寸公式

在 1994 年,ZENER 和 HOLLomon 通过研究应变速率和温度对钢的应力应变关系^[25],提出了 Z 参数模型:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (3)$$

式中, $Q = 2.88000 \text{ J/mol}$ 为形变激活能; $R = 8.314 \text{ J/(mol}\cdot\text{k)}$ 为气体常数; T 为变形热力学温度; $\dot{\epsilon}$ 为等效塑性应变率,即:

$$\dot{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon} : \dot{\epsilon}} \quad (4)$$

魏洁等^[26]采用单道次压缩热模拟试验,建立了

动态再结晶的模型:

$$D = a \cdot Z^b \quad (5)$$

式中, D 代表了晶粒尺寸; Z 代表了霍洛蒙参数; $a = 20\ 500$ 、 $b = -0.25$ 为材料常数。

3.2 弹丸速度对晶粒尺寸的影响

首先设置基本参数。设置 3 组试验, 相同参数板材 20 mm 的正方形试件, 5 个弹丸, 弹丸半径 2 mm。分别进行 30 m/s、50 m/s、70 m/s 的弹丸速度仿真模拟。图 13 所示为不同弹丸速度冲击下沿表面方向和深度方向的晶粒尺寸情况。

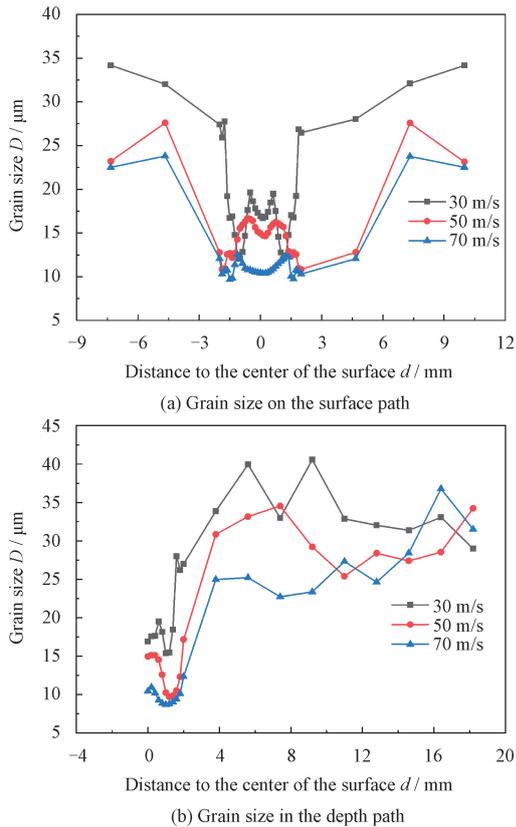


图 13 不同速度下晶粒尺寸
Fig. 13 Grain size at different velocities

从图 13a、13b 中可以看出, 从边缘位置到撞击中心位置, 晶粒尺寸呈逐渐变小的趋势。从 3 组试验数据可以看出, 表面的最小晶粒尺寸所对应的数值为 $12.10\ \mu\text{m}$ 、 $10.84\ \mu\text{m}$ 、 $9.75\ \mu\text{m}$; 深度的最小晶粒尺寸所对应的数值为 $15.38\ \mu\text{m}$ 、 $9.70\ \mu\text{m}$ 、 $8.71\ \mu\text{m}$ 。结果表明, 晶粒尺寸随着弹丸撞击速度增加而减小; 随着半径的增大晶粒细化的范围没有明显变化。

3.3 弹丸半径对晶粒尺寸的影响

首先设置基本参数。设置 3 组试验, 相同参数板材 20 mm 的正方形试件, 5 个弹丸, 弹丸速度为 30 m/s。分别进行 1 mm、4 mm、6 mm 的弹丸半径仿

真模拟。图 14 所示为不同弹丸半径冲击下沿表面方向和深度方向的晶粒尺寸情况。

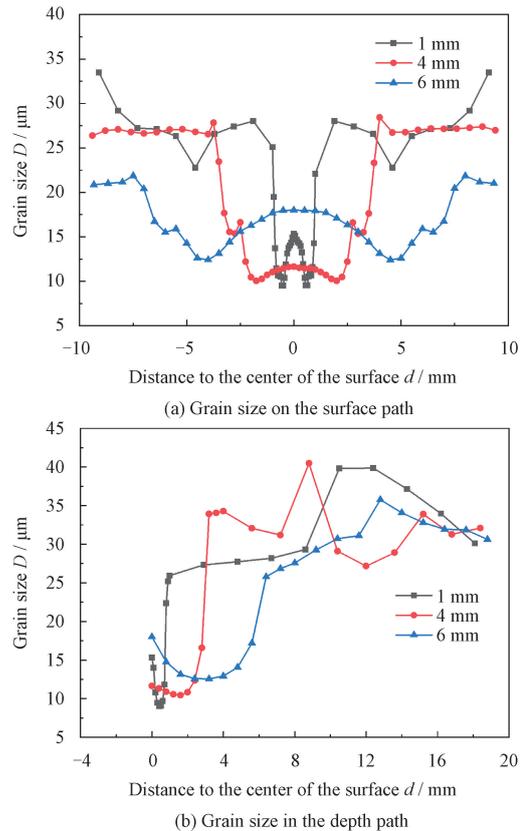


图 14 不同半径下晶粒尺寸
Fig. 14 Grain size at different radii

从图 14a、14b 中可以看出, 从撞击中心位置到边缘位置, 晶粒尺寸呈小减小后增大的趋势。从 3 组试验数据可以看出, 随着弹丸半径的增加, 表面的最小晶粒尺寸所对应的数值为 $9.51\ \mu\text{m}$ 、 $10.04\ \mu\text{m}$ 、 $12.40\ \mu\text{m}$; 深度的最小晶粒尺寸所对应的数值为 $9.02\ \mu\text{m}$ 、 $10.45\ \mu\text{m}$ 、 $12.57\ \mu\text{m}$ 。结果表明, 晶粒尺寸随着弹丸的半径增加而增大; 随着半径的增大使晶粒细化的范围变大。

4 残余应力与晶粒尺寸分析

本节针对第 2 节的宏观模拟结果和第 3 节的微观计算结果进行分析比对, 运用 MATLAB 软件拟合出残余应力与晶粒尺寸的函数, 得出残余应力与晶粒尺寸的定量关系。通过分析图 2~9 和图 10~12 的曲线趋势, 能够得出晶粒尺寸的变化趋势与残余压应力的结果基本一致的结论。所以在计算残余应力与晶粒尺寸的拟合函数时, 应用的是参与压应力与晶粒尺寸结果进行拟合的函数。

4.1 从速度方面对残余应力和晶粒尺寸关系分析

首先在弹丸速度影响因素中提取一部分残余压

应力结果和与之对应的晶粒尺寸结果,其中部分结果如表3。

表3 残余应力和晶粒尺寸在速度因子影响下的数据
Table 3 Data of residual stress and grain size under the influence of velocity factor

SN	residual stress σ/MPa	grain size $D/\mu\text{m}$	SN	residual stress σ/MPa	grain size $D/\mu\text{m}$
1	-3.223 97	34.177 80	11	-55.289 2	12.064 94
2	-0.475 58	32.029 34	12	-74.465 9	12.837 91
3	4.103 79	27.405 34	13	-86.411 6	14.663 16
4	4.549 06	25.920 39	14	-84.054 3	17.613 67
5	-1.123 09	27.748 96	15	-74.356 1	19.627 28
6	-9.220 03	19.215 28	16	-58.213 3	18.630 54
7	-15.890 5	16.704 52	17	-39.773 5	17.791 22
8	-22.251 5	16.908 76	18	-22.652 3	17.309 23
9	-33.682	14.760 89	19	-11.566 4	16.908 76
10	-44.753 4	12.466 89	20	-9.423 66	16.689 45

通过曲线观察并不能直接得出想要模拟的函数阶数,所以进行阶数的分析。通过进行1~5五阶的情况模拟,通过差值法,最终确定二阶的阶数得出的结果最为合理,因此残余应力与晶粒尺寸模拟函数均采用2阶的阶数进行拟合。

最终模拟出残余压应力与晶粒尺寸的函数:

$$D = 0.000 7\sigma^2 + 0.135 6\sigma + 20.664 1 \quad (6)$$

4.2 从半径方面对残余应力和晶粒尺寸关系分析

首先在弹丸速度影响因素中提取一部分残余压应力结果和与之对应的晶粒尺寸结果,其中部分结果如表4。

表4 残余应力和晶粒尺寸在半径因子影响下的数据
Table 4 Data of residual stress and grain size under the influence of radius factor

SN	residual stress σ/MPa	grain size $D/\mu\text{m}$	SN	residual stress σ/MPa	grain size $D/\mu\text{m}$
1	14.821 0	15.317 32	11	-49.026 7	9.553 04
2	6.279 6	15.124 05	12	-35.946 5	10.549 07
3	-12.593 6	14.668 66	13	-23.366 2	10.832 76
4	-33.555 3	14.414 18	14	-16.476 3	10.669 16
5	-57.683 6	14.271 80	15	-5.116 25	11.609 29
6	-76.045 1	13.952 58	16	14.814 11	14.275 85
7	-88.417 1	13.250 47	17	22.539 08	22.071 07
8	-92.257 4	11.916 63	18	9.566 05	28.014 65
9	-80.482 8	10.382 23	19	-0.506 39	27.399 44
10	-60.751 0	9.535 58	20	-0.660 59	26.568 64

由4.1节拟合可知,最终采用2阶阶数进行模拟,故继续沿用其分析得出的结果。

最终模拟出残余压应力与晶粒尺寸的函数:

$$D = -0.002 5\sigma^2 + 0.174 7\sigma + 22.316 5 \quad (7)$$

4.3 弹丸板长对晶粒尺寸的影响

首先在弹丸速度影响因素中提取一部分残余压应力结果和与之对应的晶粒尺寸结果,其中部分结果如表5。

表5 残余应力和晶粒尺寸在板长因子影响下的数据
Table 5 Data of residual stress and grain size under the influence of plate length factor

SN	residual stress σ/MPa	grain size $D/\mu\text{m}$	SN	residual stress σ/MPa	grain size $D/\mu\text{m}$
1	-5.346 8	13.852 14	11	-44.824 6	9.863 69
2	-6.140 3	13.877 48	12	-33.535 1	11.215 41
3	-16.912 6	13.838 86	13	-22.901 4	12.490 32
4	-33.956 5	13.609 88	14	-16.876 5	11.953 93
5	-53.399 9	13.093 37	15	-10.243 2	12.561 67
6	-70.576 0	12.572 11	16	-1.984 4	14.462 25
7	-81.955 0	12.102 06	17	3.927 6	18.483 12
8	-86.116 5	11.267 20	18	3.988 2	28.030 37
9	-75.211 0	10.272 98	19	-4.509 8	14.120 21
10	-56.464 2	9.707 48	20	-5.525 8	14.152 94

最终模拟出残余压应力与晶粒尺寸的函数:

$$D = -0.002 5\sigma^2 + 0.174 7\sigma + 22.316 5 \quad (8)$$

4.4 残余应力与晶粒尺寸拟合函数分析

将以上四种模拟结果式(6)~(8),进行求平均值,得出最终的残余应力与晶粒尺寸函数:

$$D = 0.000 8\sigma^2 + 0.190 8\sigma + 19.783 5 \quad (9)$$

通过这个模拟出来的函数式(9),计算出拟合后的晶粒尺寸结果和模拟计算的晶粒尺寸结果进行对比。

从图15看出,晶粒尺寸的模拟结果和拟合函数结果在三种情况下趋势基本一致。但是拟合函数模拟出的结果并没有和模拟的结果一致。从这个结果得出,残余压应力是影响晶粒尺寸的主要因素,但不是唯一因素,不能建立唯一的定量关系,仍然有位错、晶壁和相变等因素对晶粒尺寸有影响。

5 结论

(1) 在宏观方面,喷丸表面处理最大残余应力并不在撞击中心,而是在撞击中心附近的次表层;弹丸速度增大,残余应力增大;弹丸撞击数量变大,残余应力增大;弹丸半径增大,表面方向残余应力增大不明显,但影响范围变大,深度方向残余应力和影响范围变大;在非反射边界条件下,板材长度对残余应力没有影响。

(2) 在微观方面,随着弹丸速度增大,晶粒尺寸减小;弹丸半径增大,表面方向和深度方向晶粒尺寸变大和影响范围均变大;在非反射边界条件下,板材

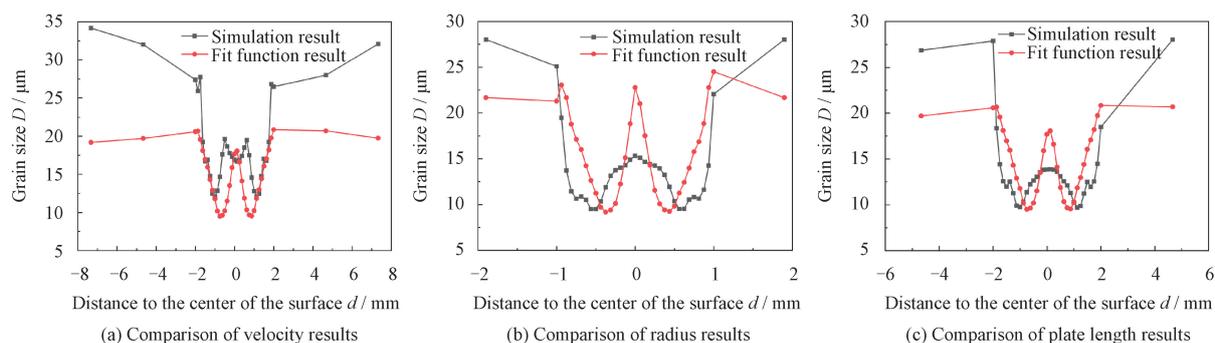


图 15 晶粒尺寸模拟计算和拟合函数对比

Fig. 15 Comparison of grain size between simulation and fitting function

长度同样对晶粒尺寸没有影响。

(3) 宏微观结合分析。通过拟合残余应力和晶粒尺寸的结果,得出拟合函数。对比分析后,残余应力与晶粒尺寸的变化趋势相似,这也意味着晶粒尺寸是影响残余应力的一个因素,但残余应力还与其他微观组织结构有关,因此只能定性地讨论关系。

参 考 文 献

[1] 高玉魁. 不同表面改性强化处理对 TC4 钛合金表面完整性及疲劳性能的影响[J]. 金属学报, 2016, 52(8): 915-922.
GAO Y K. Influence of different surface modification treatments on surface integrity and fatigue performance of TC4 titanium alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(8): 915-922. (in Chinese)

[2] 徐滨士, 谭俊, 陈建敏. 表面工程领域科学技术发展[J]. 中国表面工程, 2011, 24(2): 01-12.
XU B S, TAN J, CHEN J M. Science and technology development of surface engineering [J]. China Surface Engineering, 2011, 24(2): 1-12. (in Chinese)

[3] 柏琳娜, 刘福平, 王邃, 等. Fe-C-Cu 粉末锻造汽车发动机连杆的组织与力学性能[J]. 金属学报, 2016, 52(1): 41-50.
BAI L N, LIU F P, WANG X, et al. Microstructure and mechanical properties of Fe-C-Cu powder-forged connecting rod [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(1): 41-50. (in Chinese)

[4] 赵安安, 张贤杰, 高国强, 等. 大型机翼整体壁板系统化喷丸成形技术[J]. 航空学报, 2019, 40(2): 193-206.
ZHAO A A, ZHANG X J, GAO G Q, et al. Systematic shot peening technology for the integral panel of large wing [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(2): 193-206. (in Chinese)

[5] 田硕, 高建勤, 盖鹏涛, 等. 带筋整体壁板预应力喷丸成形数值模拟及变形预测[J]. 航空学报, 2019, 40(10): 1-13.
TIAN S, SHANG J Q, GAI P T, et al. Numerical simulation and deformation prediction of stress peen forming for integrally-stiffened panels [J]. Acta Aeronautica et Astronautica

Sinica, 2019, 40(10): 1-13. (in Chinese)

[6] 王永军, 孙宝龙, 张炜, 等. 铝锂合金喷丸强化数值模拟及试验[J]. 航空动力学报, 2015, 30(3): 595-602.
WANG Y J, SUN B L, ZHANG W, et al. Numerical simulation and experiment on shot peening of Al-Li alloy [J]. Journal of Aeronautical Dynamics, 2015, 30(3): 595-602. (in Chinese)

[7] 温飞娟, 董丽虹, 王海斗, 等. 42CrMo 曲轴钢喷丸强化有限元模拟[J]. 材料导报, 2018, 32(31): 517-521.
WEN F J, DONG L H, WANG H D, et al. Finite element simulation of 42CrMo steel shot peening [J]. Materials Reports, 2018, 32(31): 517-521. (in Chinese)

[8] ZHAO C, SHI C, WANG Q, et al. Residual stress field of high-strength steel after shot peening by numerical simulation [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(1): 358-364.

[9] 陈家伟, 廖凯, 李立君, 等. 不同丸粒对铝合金表面喷丸影响的仿真分析及试验[J]. 表面技术, 2019, 48(9): 133-138.
CHEN J W, LIAO K, LI L J, et al. Simulation and experiment for shot peening effect of different projectiles on Al-based alloy [J]. Surface Technology, 2019, 48(9): 133-138. (in Chinese)

[10] 刘辉, 蔡晋, 孟庆勋, 等. 超声喷丸与传统喷丸对 TC4 钛合金残余应力影响的仿真分析[J]. 航空发动机, 2020, 60(2): 91-96.
LIU H, CAI J, MENG Q X, et al. Simulation analysis of influence of ultrasonic and conventional shot peening on residual stress of TC4 Titanium alloy [J]. Aeroengine, 2020, 60(2): 91-96.

[11] PHAM T Q, KHUN N W, BUTLER D L. New approach to estimate coverage parameter in 3D FEM shot peening simulation [J]. Surface Engineering, 2017, 9(33): 687-695.

[12] 田硕, 高建勤. 基于均匀设计的喷丸指标响应面模型建立及应用[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(4): 260-267.
TIAN S, SHANG J Q. Establishment and application of response surface model for shot peening index based on uniform design [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(4): 260-267. (in Chinese)

[13] MOHAMED J, AUGUSTIN G, JULIE L, et al. Robust methodology to simulate real shot peening process using discrete-

- continuum coupling method[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, 2016(107): 21-33.
- [14] 宋俊凯, 黄小波, 高玉魁. 残余应力测试分析技术[J]. *表面技术*, 2016, 45(4): 75-82.
SONG J K, HUANG X B, GAO Y K. Test and analysis technology of residual stress[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(4): 75-82. (in Chinese)
- [15] 张志刚, 翟甲友, 高玉魁. 300M 钢表面喷丸强化工艺应用研究[J]. *表面技术*, 2016, 45(4): 65-68.
ZHANG Z G, ZHAI J Y, GAO Y K. Application research of shot peening process on 300M steel surface[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(4): 65-68. (in Chinese)
- [16] 董娜, 丁艳红, 卢德钊. 20CrMnTi 钢喷丸参数的研究[J]. *机械设计与制造*, 2019, S1(23): 95-98.
DONG N, DING Y H, LU D Z. Study on the shot peening parameters of 20CrMnTi steel[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2019, S1(23): 95-98. (in Chinese)
- [17] 熊谛, 王立强, 徐小严, 等. 不同喷丸强度下镍铝青铜的表面喷丸强化效果[J]. *机械工程材料*, 2017, 41(4): 15-29.
XIONG D, WANG L Q, XU X Y, et al. Surface strengthening effect of nickel-aluminum bronze treated by shot peening at different intensities[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2017, 41(4): 15-29. (in Chinese)
- [18] 黄六一, 钟丰平, 王学斌, 等. 高能喷丸 304 不锈钢应力腐蚀敏感性试验研究[J]. *浙江工业大学学报*, 2020, 48(6): 670-674.
HUANG L Y, ZHONG F P, WANG X B, et al. Experiment research on stress corrosion sensitivity of 304 austenitic stainless steel subjected to high energy shot peening[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2020, 48(6): 670-674. (in Chinese)
- [19] 陈涵悦, 付天琳, 高岩. 喷丸工艺对 TC4 钛合金梯度纳米晶结构的作用规律[J]. *表面技术*, 2020, 49(5): 214-221.
CHEN H Y, FU T L, GAO Y. Effect of shot peening parameters on the gradient nanocrystalline structure of TC4 titanium alloy[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(5): 214-221. (in Chinese)
- [20] 王春明, 杨牧南, 黄建辉, 等. 镁合金表面自纳米化研究进展及现状[J]. *材料导报*, 2019, 33(13): 2260-2265.
WANG C M, YANG M N, HUANG J H, et al. A review on surface self-nanocrystallization of magnesium alloys[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(13): 2260-2265. (in Chinese)
- [21] 王仁智. 金属材料的喷丸强化原理及其强化机理综述[J]. *中国表面工程*, 2012, 25(6): 1-9.
WANG R Z. Overview on the shot peening principle and its strengthening mechanisms for metallic materials[J]. *China Surface Engineering*, 2012, 25(6): 1-9. (in Chinese)
- [22] WANG C, JIANG C, CAI F, et al. Effect of shot peening on the residual stresses and microstructure of tungsten cemented carbide[J]. *Materials and Design*, 2016, 95: 159-164.
- [23] 刘文月, 任毅, 王爽, 等. 钢中奥氏体晶粒长大规律[J]. *上海金属*, 2019, 41(4): 88-93.
LIU W Y, REN Y, WANG S, et al. Austenite grain growth behavior in steels[J]. *Shanghai Metals*, 2019, 41(4): 88-93. (in Chinese)
- [24] 林莉, 支旭东, 范锋, 等. Q235B 钢 Johnson-Cook 模型参数的确定[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(9): 153-158.
LIN L, ZHI X D, FAN F, et al. Determination of parameters of Johnson-Cook models of Q235B steel[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(9): 153-158. (in Chinese)
- [25] ZENER C, HOLLomon J H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel[J]. *Journal of Applied Physics*, 1944, 15(1): 22-32.
- [26] 魏洁, 唐广波, 刘正东. 碳锰钢热变形行为及动态再结晶模型[J]. *钢铁研究学报*, 2008, 20(3): 31-35.
WEI J, TANG G B, LIU Z D. Hot deformation and dynamic recrystallization models of C-Mn steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2008, 20(3): 31-35. (in Chinese)

作者简介: 何浩然, 男, 1995 年出生, 硕士。主要研究方向为金属表面处理。

E-mail: 1822071051@qq.com

刘峰(通信作者), 男, 1977 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为增材制造数值模拟。

E-mail: liufeng@ysu.edu.cn