

喷丸强化 AZ91D 镁合金残余应力场的数值模拟及实验研究

陈光忠¹, 何志坚¹, 杨岳²

(1. 湖南信息职业技术学院, 长沙 410200; 2. 中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410083)

摘要: **目的** 研究喷丸工艺对 AZ91D 镁合金表面残余应力场的影响。**方法** 基于有限元平台建立喷丸强化 AZ91D 镁合金的有限元模型, 从残余压应力层的厚度、残余压应力的峰值及其深度等方面探讨弹丸速度、弹丸直径和弹丸入射角对 AZ91D 镁合金表面残余应力场的影响, 并通过喷丸强化 AZ91D 镁合金的实验与有限元模拟结果进行对比。**结果** 增大弹丸速度对残余压应力层的厚度、残余压应力的峰值提高效果明显, 但对残余压应力峰值的深度影响不大; 增加弹丸直径, 残余压应力层的厚度、残余压应力的峰值及其深度均有明显提高; 增大入射角, 残余压应力层的厚度、残余压应力的峰值有明显提高, 但是残余压应力峰值的深度基本不变。有限元模拟结果中, 残余压应力层的厚度比实验值小 7%, 残余压应力的峰值比实验值大 5%, 残余压应力峰值的深度比实验值小 11%。**结论** 残余应力的实验结果与有限元模拟结果具有较好的一致性, 模型合理。

关键词: 喷丸; AZ91D 镁合金; 有限元模拟; 残余应力场

中图分类号: TG113.25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)02-0134-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.02.021

Numerical Simulation and Experimental Study of Residual Stress Field of AZ91D Magnesium Alloy by Shot Peening

CHEN Guang-zhong¹, HE Zhi-jian¹, YANG Yue²

(1. Hunan College of Information, Changsha 410200, China;

2. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the impact of the shot peening process on surface residual stress field of AZ91D magnesium alloy. **Methods** This paper established a finite element model of shot peening AZ91D magnesium alloy based on finite element platform and discussed the influence of pellet shot velocity, shot pellet diameter and incidence angle on the surface residual stress field of AZ91D magnesium alloy mainly from the aspects of the compressive residual stress layer thickness, the compressive residual stress peak and the depth of compressive residual stress peak. Besides, results of shot peening test and finite element simulation

收稿日期: 2015-11-15; 修订日期: 2015-12-06

Received: 2015-11-15; Revised: 2015-12-06

基金项目: 湖南省科技厅研究课题(2013FJ3019); 湖南省教育厅研究课题(14C0825)

Fund: Supported by the Department of Science & Technology of Hunan Province (2013FJ3019) and the Department of Education of Hunan Province (14C0825)

作者简介: 陈光忠(1968—), 男, 副教授, 主要从事零件表面强化技术及表面完整性研究。

Biography: CHEN Guang-zhong(1968—), Male, Associate professor, Research focus: parts surface strengthening technology and surface integrity.

were compared. **Results** The compressive residual stress layer thickness and compressive residual stress peak increased significantly with the increase of shot velocity, but the increase of shot velocity had little influence on the depth of compressive residual stress. The compressive residual stress layer thickness, the compressive residual stress peak and the depth of compressive residual stress peak increased significantly with the increase of shot pellet diameter. By increasing the incidence angle, the compressive residual stress layer thickness and the compressive residual stress peak increased significantly, but the depth of the compressive residual stress peak value basically remained unchanged. The compressive residual stress layer thickness of finite element simulation was 7% smaller than the test results, the compressive residual stress of finite element simulation was 5% higher than the test results, and the depth of compressive residual stress of finite element simulation was 11% smaller than the test results. **Conclusion** Residual stress test results have good consistency with finite element simulation results, verifying the validity of the finite element model.

KEY WORDS: shot peening; AZ91D magnesium alloy; finite element simulation; residual stress field

镁合金是最轻的金属结构材料之一,具有良好的加工性能,对于节能减重及降噪减震效果显著,是未来汽车轻量化的首选材料^[1-2]。铸造镁合金在铸造过程中会产生大量残余应力,受交变载荷的反复作用易形成疲劳裂纹,提高镁合金的抗疲劳性能已受到科研人员的普遍重视。通过对镁合金进行表面强化处理是提高镁合金抗疲劳性能的重要途径,目前工程上常用的表面强化工艺有喷丸、滚压、表面化学热处理、表面离子注入及表面冷作变形等^[3-4]。其中,喷丸工艺是应用最广泛的表面强化工艺之一,与其他表面强化工艺相比,喷丸工艺具有成本低、工艺简单、强化效果明显的优点,在汽车、电力、模具制造、航空航天等领域具有广阔的应用前景。

喷丸强化的主要机制是喷丸强化层内存在残余压应力场^[5]。残余压应力不仅可以降低最大拉应力的数值,而且可有效降低应力比和减小平均应力,对提高零件的疲劳极限和延长疲劳寿命有利^[6-7]。零件表面的残余压应力与零件使用性能及疲劳寿命密切相关^[8-9],因此有必要确定喷丸工艺参数与喷丸强化后残余压应力之间的量化关系。影响喷丸强化效果的主要工艺参数有:弹丸材料、弹丸速度、弹丸直径、喷丸角度及喷丸时间等。工艺参数不同,喷丸强化效果差别较大^[10-12]。国内目前通常采用阿尔门试片弧高值表达喷丸效果,但是该方法只能近似反映喷丸后残余压应力的大小,无法推测残余压应力的分布及深度^[13]。长期以来人们主要依靠经验及实验确定喷丸的工艺参数,其缺点为周期长、测试费用高。

随着计算机应用技术的快速发展与一些功能强大的有限元软件的出现,近年来使用有限元方法模拟喷丸过程陆续出现,并且许多有限元分析结果已被证实具有较高的准确度^[14]。Meguid 等最早提出使用准静态模型求解喷丸残余应力场^[15-16];Garipey A 等^[17]通过有限元模拟定量地研究了各喷丸工艺参数下的

残余应力场;Bhuvarghan 等^[18]尝试将离散元方法与有限元方法相结合,研究了喷丸残余应力场的分布特征。目前国内还少有喷丸强化镁合金的研究及其过程的有限元模拟,本文在分析喷丸强化机理的基础上,建立喷丸强化 AZ91D 镁合金的三维有限元模型,研究各工艺参数对 AZ91D 镁合金残余应力场的影响规律。

1 机理分析

大多数零件的疲劳破坏一般始于零件表面,喷丸强化的主要机制在于利用高速运动的弹丸流对零件表面进行喷射,使零件表层组织产生塑性变形。在塑性变形层内,组织的晶粒细化,位错密度增加,能有效抑制疲劳裂纹在材料表面和次表面的萌生,延缓疲劳裂纹成核。更重要的是,喷丸可在工件表层引入厚度约 120 ~ 1000 μm 的残余压应力层,残余压应力通过与零件受载时的拉应力叠加,降低零件的总应力水平,同时使裂纹源从零件表面转移至次表面,零件的疲劳强度得到提高。

2 有限元模拟

喷丸强化 AZ91D 镁合金的过程中,受弹丸反复高速冲击作用,镁合金的组织产生塑性变形,组织的屈服应力和屈服极限随应变速率的不同而发生改变。Johnson-Cook 本构模型是高应变速率条件下理想的刚塑性强化模型,其表达式^[19]为:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left\{ 1 + C \left[\ln \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \right\} \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 、 $\dot{\varepsilon}_0$ 分别为材料的参考塑性应变率和等效塑性应变率; T_m 为材料的熔点温度, T_r 为室温; A 、

B 、 n 、 C 、 m 为待定系数,表示材料的塑形变形程度。

常温下喷丸过程中的温度远低于 AZ91D 镁合金的相变温度,因此可忽略温度对其应力的影响,AZ91D 镁合金的屈服极限可表示为^[20]:

$$\sigma = (164 + 343\varepsilon^{0.283})(1 + 0.02\ln \dot{\varepsilon}) \quad (2)$$

在大型通用有限元分析软件 ABAQUS 里建立了喷丸过程中弹丸对工件碰撞的模型,靶材为 AZ91D 镁合金,弹丸选用铸钢丸。喷丸过程属于瞬时的接触和碰撞问题,在碰撞界面上,弹丸的速度是瞬时不连续的,造成分析时响应的不平滑性,有限元的显式时间积分具有步长小、计算稳定的优点,适于求解接触-碰撞等非线性问题,因此有限元分析在 ABAQUS 里的 Explicit 显式动力模块中进行。

根据 HAN 等^[21]的研究成果,为得到稳定的有限元模拟结果,模型的网格尺寸至少要小于弹丸直径的 1/10,为提高计算效率,要求所建模型不能太大,模型中靶材尺寸设定为 40 mm×40 mm×3 mm。在喷丸过程中,弹丸的形变量相对于工件很小,模型中约束弹丸为刚体;靶材的单元类型为减缩积分单元 C3D8R,为提高求解精度,对靶材主要受冲击区域进行网格细化处理,如图 1 所示。模型中设定弹丸的速度方向垂直于工件表面。

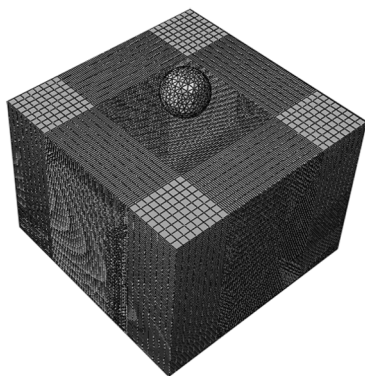


图1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

在实际喷丸过程中,大量弹丸对工件表面进行多次碰撞,为此分析中建立了弹丸多次对工件同一位置碰撞的有限元模型,有限元模拟思路为:在弹丸每次对工件冲击之后,在工件表面的残余应力场稳定时,使弹丸以相同的初速度对工件实施下一次冲击;随着冲击次数的增加,工件表层材料的塑性变形最终趋于饱和,工件表层残余应力的变化量逐渐减小,当残余应力基本不再变化时,停止弹丸对工件的冲击。

3 有限元分析

3.1 喷丸速度对残余应力的影响

设定喷丸速度 v 依次为 75、100、125、150 m/s,取弹丸直径 $D=0.8$ mm,得到不同弹丸速度下残余应力在工件表层的分布如图 2 所示。从图中可以看出,喷丸结束后,在工件近表层产生了深度约 0.6~1 mm 的残余压应力层,在残余压应力层内,残余压应力表现为先增大后减小的趋势;近表层各深度的残余压应力随弹丸速度的提高而增加;同时,增加弹丸速度对压应力层的厚度、残余压应力的峰值提高效果明显,对残余压应力峰值的深度影响不大。在工件次表层,产生了残余拉应力,增加弹丸速度,次表层残余拉应力峰值的位置向更深的方向产生了转移。

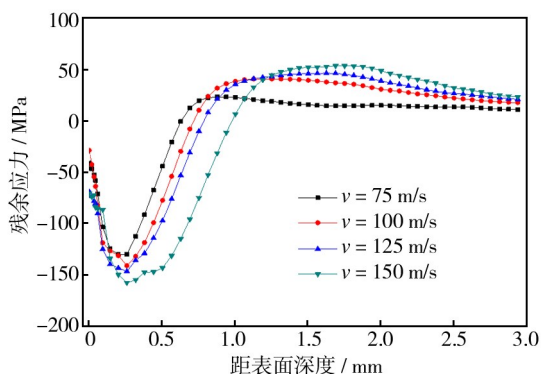


图2 不同弹丸速度下残余应力在工件表层的分布

Fig. 2 The distribution of residual stress on workpiece surface at different shot velocities

3.2 直径对残余应力的影响

喷丸工艺中弹丸的直径通常为 0.2~0.8 mm,由于 0.2 mm 的直径过小,导致喷丸强化效果不明显,很少使用。分析中依次选取弹丸的直径 D 为 0.4、0.6、0.8 mm。取喷丸速度 $v=100$ m/s,研究了不同弹丸直径对残余应力场的影响规律。图 3 为不同弹丸直径下工件表层残余应力的分布。从图中可以看出,增大弹丸直径,显著提高了残余压应力层的厚度、残余压应力的峰值及残余压应力峰值的深度,但是当弹丸直径为 0.8 mm 时,工件表层约 0.1 mm 深度范围内的残余压应力反而降低。当深度大于 0.1 mm 时,残余压应力值随弹丸直径的增大而明显增大。增加弹丸速度,次表层残余拉应力峰值的位置向更深的方向产生了转移。

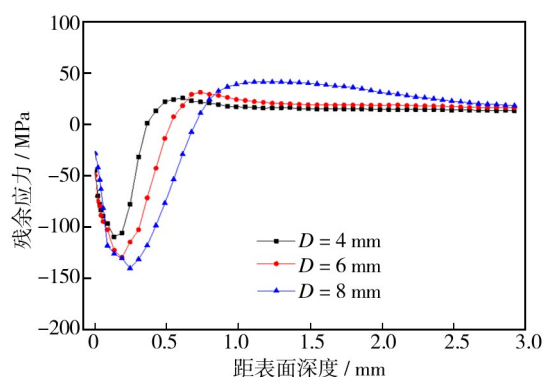


图3 不同弹丸直径下残余应力在工件表层的分布

Fig. 3 The distribution of residual stress on workpiece surface at different shot pellet diameters

3.3 入射角对残余应力的影响

弹丸入射角是指弹丸的速度方向与工件表面之间的夹角(图4)。考虑实际喷丸过程中弹丸从工件表面反弹后会与其他入射弹丸产生干涉,在模型中取弹丸直径 $D=0.8$ mm, 喷丸速度 $v=100$ m/s, 通过改变弹丸的入射角, 研究了残余应力随弹丸入射角度的变化规律。依次取入射角度为 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° , 不同入射角度下残余应力在深度方向上的分布结果如图5所示。从图中可以看出, 随着入射角度的增加, 残余压应力层的厚度、残余压应力的峰值也相

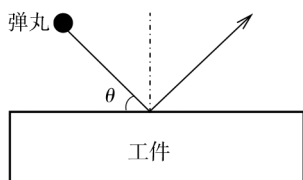


图4 弹丸入射角示意图

Fig. 4 Schematic diagram of incidence angle

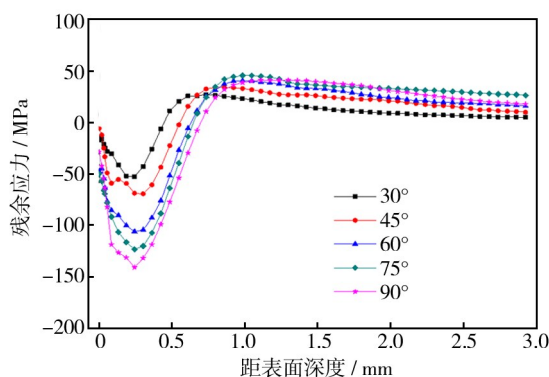


图5 不同入射角下残余应力在工件表层的分布

Fig. 5 The distribution of residual stress on workpiece surface at different incidence angles

应增加, 但是残余压应力峰值的深度基本不变。在实际喷丸过程中, 为获得更大的残余压应力, 一般尽量使喷丸入射角设定为 90° [22]。

4 实验分析

为验证模型的合理性, 进行了喷丸强化 AZ91D 镁合金的实验。采用 X 射线衍射法对工件表面的残余应力进行测量, 测量设备为 X350A 型应力测定仪。测量时采用侧倾测试法, 扫描方式为固定 ψ 法, ψ 角度分别取 0° 、 25° 、 35° 、 45° ; 选择半高宽法定峰, 利用 Cu 靶辐射, 管电压为 20 kV, 管电流为 5 mA。

X 射线衍射法测量残余应力的深度约 $10\ \mu\text{m}$, 为得到工件表层不同深度的残余应力值, 采用 XF-1 型电解抛光机对工件进行了电解剥层, 测量了工件表层 1 mm 范围内各层深的残余应力。由于残余应力的测量误差一般较大, 对测量结果进行了曲线拟合, 实验结果与仿真结果的对比如图6所示。从图6可以看出, 二者具有相似的变化规律, 有限元模拟结果的残余压应力层厚度比实验结果小 7%, 有限元模拟结果中残余压应力的峰值比实验结果大 5%, 有限元模拟结果中残余压应力峰值的深度比实验结果小 11%。有限元模拟结果和实验结果具有较好的一致性, 说明本模型能够有效地模拟喷丸 AZ91D 镁合金后的残余应力场。

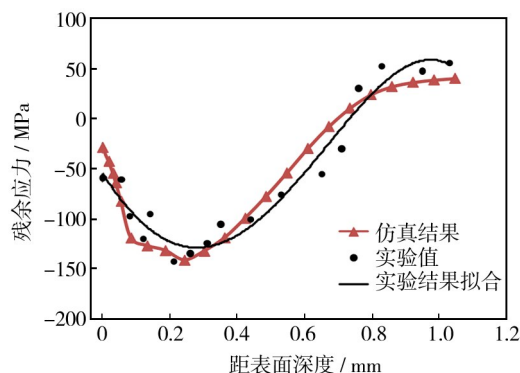


图6 仿真结果与实验结果的比较

Fig. 6 Comparison between simulation results and experimental results

5 结论

建立了喷丸强化 AZ91D 镁合金的有限元模型, 研究了弹丸速度、弹丸直径及入射角对喷丸后残余应力场的影响规律, 并结合实验验证了模型的合理性,

得出如下结论。

1) 有限元模拟结果表明, 喷丸使 AZ91D 镁合金表层产生了一定深度的残余压应力, 残余压应力在工件表层呈先增大后减小的趋势。

2) 增大喷丸速度对残余压应力层厚度、残余压应力峰值的提高效果明显, 但对残余压应力峰值的深度影响不大; 增加弹丸直径, 残余压应力层的厚度、残余压应力的峰值、残余压应力峰值的深度均有明显提高; 增大入射角, 残余压应力层的厚度、残余压应力的峰值提高明显, 但是残余压应力峰值的深度基本不变。

3) 残余应力的实验结果与有限元模拟结果具有较好的一致性, 模型合理。

参考文献

- [1] 李玉青, 吴殿杰. 汽车轻量化以及铝镁铸件的应用[J]. 中国铸造装备与技术, 2005(4): 48—50.
LI Yu-qing, WU Dian-jie. Automobile Lightening and Application of Al & Mg Alloy Casting[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2005(4): 48—50.
- [2] 王新印, 周亚茹, 张鉴清, 等. 镁及其合金腐蚀析氢的研究现状[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 129—136.
WANG Xin-yin, ZHOU Ya-ru, ZHANG Jian-qing, et al. Research Status of Hydrogen Evolution during Magnesium Alloy's Corrosion Process[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(4): 129—136.
- [3] 慕伟意, 李争显, 杜继红, 等. 镁合金的应用及其表面处理研究进展[J]. 表面技术, 2011, 40(2): 86—91.
MU Wei-yi, LI Zheng-xian, DU Ji-hong, et al. Application and Surface Treatment Research Progress of Magnesium Alloys[J]. Surface Technology, 2011, 40(2): 86—91.
- [4] 梁春林, 刘宜汉, 韩变华, 等. 镁合金表面处理研究现状及发展趋势[J]. 表面技术, 2006, 35(6): 57—64.
LIANG Chun-lin, LIU Yi-han, HAN Bian-hua, et al. Present Situation and Development Trend of Mg Alloy Surface Treatment[J]. Surface Technology, 2006, 35(6): 57—64.
- [5] 高玉魁. 表面完整性理论与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
GAO Yu-kui. Surface Integrity Theory and Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [6] 高玉魁. 表面强化对 A-100 钢带孔构件疲劳性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(5): 160—164.
GAO Yu-kui. Influence of Local Surface Strengthening on Fatigue Properties of components with Holes of an A-100 Steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(5): 160—164.
- [7] 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): 737—747.
- [8] 何少杰, 杨文玉, 郭步鹏, 等. 机加工表面残余应力及其疲劳寿命评价的研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44, (6): 120—132.
HE Shao-jie, YANG Wen-yu, GUO Bu-peng, et al. Research Progress on Evaluation of Surface Residual Stress and Fatigue Life of Machined Products[J]. Surface Technology, 2015, 44, (6): 120—132.
- [9] 何柏林, 邓海鹏. 表面完整性研究现状及发展趋势[J]. 表面技术, 2015, 44(9): 140—152.
HE Bo-lin, DENG Hai-peng. Research Status and Development of Surface Integrity[J]. Surface Technology, 2015, 44(9): 140—152.
- [10] 赵艳丽, 王强, 杨庆祥. 喷丸工艺参数对 A-100 高强度钢残余应力场的影响[J]. 金属热处理, 2013, 38(8): 10—14.
ZHAO Yan-li, WANG Qiang, YANG Qing-xiang. Effect of Shot Peening Parameters on Residual Stress Fields of A-100 High Strength Steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(8): 10—14.
- [11] 李鹏, 刘道新, 关艳英, 等. 喷丸强化对新型 7055-T7751 铝合金疲劳性能的影响[J]. 机械工程材料, 2015, 39(1): 86—93.
LI Peng, LIU Dao-xin, GUAN Yan-ying. Effects of Shot Peening on Fatigue Property of New Aluminum Alloy 7055-T7751[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(1): 86—93.
- [12] 刘道新, 何家文. 喷丸强化因素对 Ti-合金微动疲劳抗力的作用[J]. 金属学报, 2001, 37(2): 156—160.
LIU Dao-xin, HE Jia-wen. Effect of Shot Peening Factors on Fretting Fatigue Resistance Titanium Alloy[J]. ACTA Metallurgica Sinica, 2011, 37(2): 156—160.
- [13] 刘飞宏, 王建明, 余丰, 等. 基于 SPH 耦合有限元法的喷丸残余应力场数值模拟[J]. 山东大学学报, 2010, 40(6): 67—71.
LIU Fei-hong, WANG Jian-ming, YU Feng, et al. Numerical Simulation for Compressive Residual Stress of Shot Peening Based on SPH Coupled FEM[J]. Journal of Shan Dong university, 2010, 40(6): 67—71.
- [14] 刘海英, 轧刚, 路会龙. 超声喷丸强化产生残余应力的有限元分析[J]. 新技术新工艺, 2008(1): 25—28.
LIU Hai-ying, YA Gang, LU Hui-long. Ultrasonic Shot Peening Residual Stress Finite Element Analysis[J]. New Technology & new Process, 2008(1): 25—28.

(下转第 187 页)

- Strength Steel and Research[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2011(6):73—76.
- [2] DEVILLEZ A, COZ G Le, DOMINIAK S, et al. Drymachining of Inconel 718, Workpiece Surface Integrity[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211:1590—1598.
- [3] GUILLEMOT N, MAWUSSI B K, LARTIGUE C. A First Approach to Characterize the Surface Integrity Generated by Ball-end Finishing Milling[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2013(64):269—279.
- [4] KING J E, KNOTT J F. The Effects of Crack Length and Shape on the Fracture Toughness of a High Strength Steel 300M[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1980, 28(3):191—200.
- [5] M'SAOUBI R, CHANGEUX B, LEBRUN J L, et al. Residual Stress Analysis in Orthogonal Machining of Standard and Resulturized AISI 316L Steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999(96):225—233.
- [6] 米谷茂(日). 残余应力的产生和对策[M]. 朱荆璞, 邵会孟, 译. 北京:机械工业出版社, 1983.
- MI Gu-mao. The Generation and Countermeasures of Residual Stress[M]. ZHU Jing-pu, SHAO Hui-meng, translation. Beijing: Mechanical Industry Press, 1983.
- [7] MMBRELLO Domenico. Investigation of Surface Integrity in Dry Machining of Inconel 718[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2013(7):23—26.
- [8] COKER S A, SHIN Y C. In Process Control of Surface Roughness due to Tool Wear Using a New Ultrasonic System[J]. Int J Mach Tools Manuf, 1996(36):411—422.
- [9] 张定铨, 何家文. 材料中残余应力的 X 射线衍射分析和作用[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1999.
- ZHANG Ding-cuo, HE Jia-wen. X-ray Diffraction Analysis and Function[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1999.
- [10] 袁发荣, 伍尚礼. 残余应力测试与计算[M]. 长沙:湖南大学出版社, 1987.
- YUAN Fa-rong, WU Shang-li. Test and Calculation of the Residual Stress[M]. Changsha: Hunan University Press, 1987.
- [11] OKUSHIRNA K, KAKINO I. The Residual Stress Produced by Metal Cutting[J]. Annals of the CIRP, 1971, 21(1):13—14.
- [12] OUTEIRO J C, DIAS A M, JAWAHIR I S. On the Effects of Residual Stresses Induced by Coated and Uncoated Cutting Tools with Finite Edge Radii in Turning Operations[J]. Annals of the CIRP, 2006, 55(1):167—172.
- [13] 韩容第. 金属切削原理与刀具[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1998:7—9.
- HAN Rong-di. Metals Slices to Pare Principle and Knife[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1998:7—9.
- [14] 方傅武. 金属冷热加工的残余应力[M]. 北京:高等教育出版社, 1991.
- FANG Fu-wu. The Residual Stress of Metal Hot and Cold Processing[M]. Beijing: Higher Education Press, 1991.
- [15] OKUSHIRNA K, KAKINO I. The Residual Stress Produced by Metal Cutting[J]. Annals of the CIRP, 1971, 21(1):13—14.
- [16] 赵显嵩. TC4 合金高速切削的表面粗糙度与切削力实验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
- ZHAO Xian-song. Experimental Study on Surface Roughness and Cutting Force of High Speed Cutting TC4 Titanium Alloy[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.

(上接第 138 页)

- [15] MEGUID S A, KLAIR M S. An Examination of the Relevance of Co-indentation Studies to Incomplete Coverage in Shot-peening Using the Finite-element Method[J]. J Mechanical Working Technology, 1985, 11(1):87—104.
- [16] MEGUID S A, KLAIR M S. Elasto-pastic Co-indentation Analysis of a Bounded Solid Using Finite Element Method[J]. Int J Mech Sci, 1985, 27(3):157—168.
- [17] GARIEPY A, LAROSE S, PERRON C. Shot Peening and Peen Forming Finite Element Modeling Towards a Quantitative Method[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48:2859—2877.
- [18] BHUVARAGHAN B, SRINIVASAN S, MAFFEO B, et al. Shot Peening Simulation Using Discrete and Finite Element Methods[J]. Advances in Engineering Software, 2010, 41:1266—1276.
- [19] JOHNSON G R, COOK W H. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strain, High Strain Rates and High Temperatures[J]. The Hague Nether Lands, 1983:541—547.
- [20] 周霞, 赵昌美, 李利, 等. 基于 SHPB 实验的挤压 AZ91D 镁合金动态力学行为数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(8):1968—1975.
- ZHOU Xia, ZHAO Chang-mei, LI Li, et al. Numerical Simulation of Dynamic Behavior of Extruded AZ91D Magnesium Alloy Based on SHPB Experiment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(8):1968—1975.
- [21] HAN K, OWEN D R J, PERIC D. Combined finite/Discrete Element and Explicit/Implicit Simulations of Peening Forming Process[J]. Engineering Computations, 2002, 19(1):92—118.
- [22] MIAO H Y, LAROSE S, PERRON C, et al. On the Potential Applications of 3D Random Finite Element Model for the Simulation of Shot Peening[J]. Advances in Engineering Software, 2009(40):1023—1038.