

300M 钢表面喷丸强化工艺应用研究

张志刚¹, 翟甲友¹, 高玉魁²

(1. 中航飞机起落架有限责任公司, 陕西 汉中 723200;
2. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092)

摘要: **目的** 对比和研究 300M 钢的铸钢丸和陶瓷丸喷丸强化后的效果, 选择合适的 300M 钢喷丸强化工艺。**方法** 采用铸钢弹丸和陶瓷弹丸以不同喷丸强度对 300M 钢表面进行喷丸强化, 研究对 300M 钢表面粗糙度、表面残余压应力及疲劳寿命的影响。**结果** 随着喷丸强度的增大, 300M 钢表面粗糙度增大, 但在相同或相当的喷丸强度下, 采用陶瓷弹丸喷丸强化可获得更小的表面粗糙度; 试样表面残余压应力均为先增大后减小, 分别在喷丸强度为 0.25A 和 0.2A 时达到最大值。在大应力水平试验条件下, 两种弹丸不同喷丸强度下的 300M 钢中值疲劳寿命增益均不明显; 在小应力水平试验条件下, 两种弹丸不同喷丸强度下的 300M 钢中值疲劳寿命增益差异显著, 铸钢弹丸喷丸强化最大值达到 22, 陶瓷弹丸喷丸强化最大值达到 38。**结论** 铸钢丸和陶瓷丸喷丸均可以提高 300M 钢的疲劳寿命。相对于铸钢丸喷丸, 300M 钢的陶瓷丸喷丸后的粗糙度水平更低, 疲劳寿命更长。

关键词: 陶瓷弹丸; 表面粗糙度; 残余应力; 中值疲劳寿命增益

中图分类号: TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)04-0065-04

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.04.011

Application Research of Shot Peening Process on 300M Steel Surface

ZHANG Zhi-gang¹, ZHAI Jia-you¹, GAO Yu-kui²

(1. Aircraft landing gear Co. Ltd, Hanzhong 723200, China; 2. School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

ABSTRACT: **Objective** To compare and study the performance results of 300M steel after ceramic shot and cast steel shot peening and obtain the proper shot peening process of 300M steel. **Methods** 300M steel was shot peened by cast steel shot and ceramic shot at different intensities. The surface roughness, surface residual stress and fatigue life of 300M steel shot peened by two different shot methods were tested and researched. **Results** The surface roughness of 300M increased after shot peening by both ceramic shot and cast steel shot, but lower roughness value was achieved by ceramic shot peening under the same condition of shot peening in-

收稿日期: 2016-03-23; 修订日期: 2016-04-05

Received: 2016-03-23; Revised: 2016-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(11372226); 航空科学基金项目(2014ZE38008); 中央高校基本科研业务费专项资金资助

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (11372226), Aeronautical Science Foundation of China (2014ZE38008) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities

作者简介: 张志刚(1960—), 男, 大专, 高级工程师, 主要研究方向为飞机起落架的表层改性。

Biography: ZHANG Zhi-gang (1960—), Male, Junior college graduate, Senior engineer, Research focus: surface layer modification of landing gear.

通讯作者: 高玉魁(1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为表层改性与疲劳断裂等。

Corresponding author: GAO Yu-kui (1973—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: surface layer modification, fracture and fatigue.

tensity. The surface residual compressed stress first increased and then decreased with the increase of shot peening intensity by ceramic shot peening or cast steel shot peening. When the cast steel shot peening intensity was 0.25A, the residual stress of the surface reached the maximum. For ceramic shot peening, the residual stress of the surface reached the maximum when the intensity was 0.2A. Under the condition of large stress level test, the median fatigue life gain of the sample with different shot peening intensity of two kinds of shot was not obvious. However, under low stress level test conditions, median fatigue life gain was significantly different with different shot peening intensity of two kinds of shot, with the maximum value reaching 22 (steel shot peening) and 38 (ceramic shot peening), respectively. **Conclusion** The fatigue life could be increased by both cast steel shot peening and ceramic shot peening, but the 300M steel processed by ceramic shot peening had lower roughness level and longer fatigue life.

KEY WORDS: ceramic shot; surface roughness; residual stress; median fatigue life gain

300M 钢具有高强度、高断裂韧度和很好的塑性及抗应力腐蚀开裂等优良性能^[1],因而在国内外得到广泛的关注,倍受设计师和工程师的青睐,在航空工业领域广泛应用于飞机主要承力构件,如飞机起落架、发动机的轴、螺栓等。这些零件往往由于疲劳断裂而失效,造成疲劳破坏时,循环交变应力中的最高应力一般远低于静载荷下材料的强度极限,有时也低于屈服极限,甚至低于材料的弹性极限。疲劳破坏通常表现为突然断裂,断裂前无显著变形,无法预察损坏迹象,容易产生大的灾难。因此研究 300M 钢表面喷丸强化工艺具有十分重要的意义^[2-3]。

喷丸强化使金属材料表面应力集中得到缓和,提高零件表面的残余压应力水平。在航空航天工业中,喷丸强化可以用来改善零件的抗疲劳性能和提高其微动疲劳抗力,提高零部件的表面完整性、可靠性和持久性^[4-6]。300M 钢理论上存在一个效果最好的喷丸强度,如果和该喷丸强度相差较多,则不能获得最佳的表面强化效果^[7-11]。喷丸强度并非越大越好,如果喷丸强度过大,表面残余应力反而会降低,表面粗糙度过度增大,引起零件表面应力集中,从而降低疲劳寿命和疲劳强度^[12-14]。目前为止,国内大多采用铸钢弹丸、玻璃弹丸、钢丝弹丸等喷丸介质对金属零件进行喷丸强化;陶瓷弹丸喷丸强化工艺,由于具有较多优点,在国外越来越被重视,但在国内仍处在起步阶段,实际应用较少^[7-11]。因此,本文采用铸钢弹丸和陶瓷弹丸以不同喷丸强度对 300M 钢表面进行喷丸强化,对比研究其对试样表面粗糙度、疲劳寿命等的影响,以掌握其规律,为喷丸强化工艺在选择弹丸介质、工艺参数等方面提供指导。

1 试验

试验材料为 300M 钢,其化学成分(以质量分数计)为:C 0.38%,Mn 0.89%,Si 1.67%,Cr 0.91%,

Ni 1.98%,Mo 0.42%,S 0.0018%,P 0.0059%,V 0.076%,Fe 余量。试样为直径为 7.5 mm 的光滑旋转弯曲疲劳试样,经锻造后进行最终热处理,其力学性能为:抗拉强度 1960 MPa,屈服强度 1670 MPa。热处理工艺为:淬火(870 ℃、90 min 油冷)+两次回火(每次 300 ℃、270 min)。

用轮廓仪测定试样表面粗糙度。用 XStress-3000 型 X 射线衍射残余应力测定仪测定不同喷丸工艺表面残余应力。在旋转弯曲疲劳试样机上进行疲劳试验,应力比及应力水平分别为 $R = -1$ 和 $\sigma_{\max} = 1150$ MPa、 $\sigma_{\min} = 1000$ MPa。

用铸钢弹丸和陶瓷弹丸分别以不同的喷丸强度对 300M 钢试样表面进行喷丸强化,共 8 种工艺,见表 1。

表 1 试样表面喷丸强化工艺

Tab. 1 Shot peening processes of the specimen surface

序号	弹丸种类	弹丸规格	喷丸强度	覆盖率/%
一				
二	铸钢弹丸	ASH230	0.18A	100
三	铸钢弹丸	ASH230	0.25A	100
四	铸钢弹丸	ASH230	0.36A	100
五	铸钢弹丸	ASH230	0.46A	100
六	陶瓷弹丸	Z425	0.10A	100
七	陶瓷弹丸	Z425	0.20A	100
八	陶瓷弹丸	Z425	0.30A	100

注:工艺一表示未喷丸。

2 结果和讨论

2.1 对表面粗糙度的影响

喷丸工艺对 300M 钢表面粗糙度的影响如图 1 所示,未喷丸试样表面的粗糙度值为 0.9 μm 。无论是铸钢弹丸还是陶瓷弹丸,试样表面的粗糙度值随着喷

丸强度的增加呈增大趋势,但变化的程度不同。以未喷丸试样表面粗糙度值为基准,计算喷丸后试样表面的粗糙度增加值如图 2 示。用铸钢弹丸进行喷丸强化时,试样表面粗糙度值随喷丸强度的增大而显著增大;用陶瓷弹丸进行喷丸强化时,试样表面粗糙度值则先减小而后增大,且喷丸强度为 0.1~0.2A,试样表面粗糙度值均不超过 1.0 μm 。因此,对于既要进行喷丸强化,又要求表面光度高的 300M 钢零件,应推荐选用陶瓷弹丸进行喷丸。

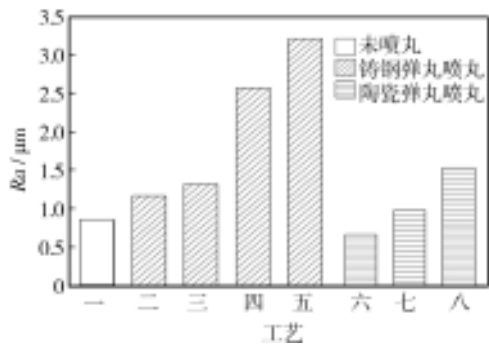


图 1 300M 钢表面粗糙度值

Fig. 1 Surface roughness of 300M steel

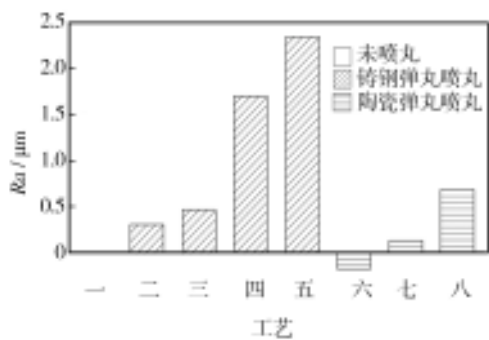


图 2 300M 钢表面粗糙度值的变化

Fig. 2 The change of roughness value of 300M steel before and after shot peening

2.2 对表面残余应力的影响

图 3 为喷丸工艺对 300M 钢表面残余应力值影响。由图可知,未喷丸试样表面残余应力为压应力分布,应力值较小,主要为加工刀具挤压及切削热引起。喷丸强化后残余压应力值大幅度提高,平均残余压应力绝对值均在 650 MPa 以上。对于铸钢弹丸和陶瓷弹丸喷丸强化,300M 钢表面残余压应力值均呈现先增大后降低的趋势,并在喷丸强度为 0.25A 和 0.2A 时,分别达到最大值为 790 MPa 和 830 MPa,当喷丸强度较小时,喷丸强化层累积的塑性变形量较小,因此残余应力值较低;当增大喷丸强度,表面残余压应力值随着增大达到一定的饱和值继续增大喷丸强度,由

于赫兹应力的作用,最大应力区转移至表面以下某一位置,表面残余压应力值则随之降低。因此,当需要较大表面残余压应力时,选择喷丸工艺应注意不能一味追求大的喷丸强度,而应该选择合适的喷丸工艺参数。

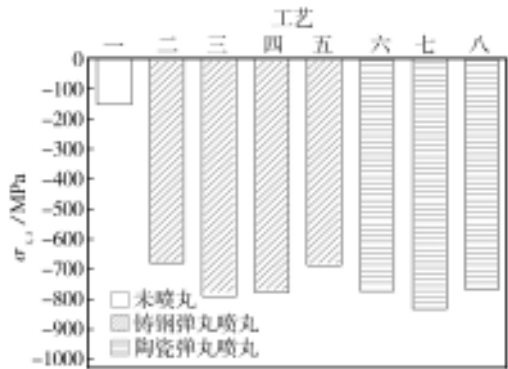


图 3 300M 钢表面残余应力值

Fig. 3 The residual stress of 300M steel

2.3 对疲劳寿命的影响

在大应力水平下 ($\sigma_{\text{max}} = 1150 \text{ MPa}$) 测定试样的疲劳寿命结果如图 4 所示,试样喷丸强化后,中值疲劳寿命均得到提高。随着喷丸强度的增加,陶瓷弹丸喷丸强化试样的中值疲劳寿命也增大,而铸钢弹丸喷丸强化试样的中值疲劳寿命变化不明显。未喷丸试样中值疲劳寿命约为 2×10^4 周次,铸钢弹丸和陶瓷弹丸喷丸强化试样中值疲劳寿命最大值分别为 4.7×10^4 周次和 7.2×10^4 周次。

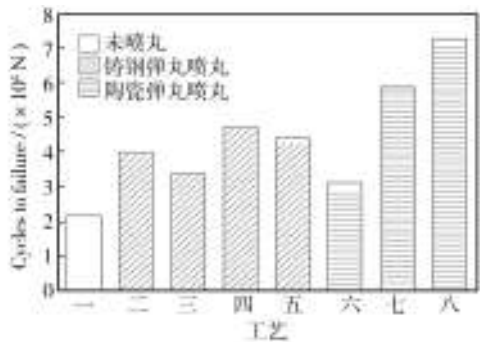


图 4 大应力水平下 300M 钢试样的中值疲劳寿命

Fig. 4 Median fatigue life of 300M steel specimen under high stress level

图 5 为小应力水平下 ($\sigma_{\text{min}} = 1000 \text{ MPa}$) 试样中值疲劳寿命的测试结果,随着喷丸强度的增加,两种弹丸的喷丸强化试样中值疲劳寿命均表现为先增大后减小的趋势,且变化极大。铸钢弹丸和陶瓷弹丸喷丸强度为 0.36A 和 0.20A 时中值疲劳寿命最大,分别

为 250×10^4 周次和 400×10^4 周次,其余喷丸强度下均不超过 100×10^4 周次。试样的疲劳寿命与试样表面粗糙度、表面残余应力分布及表面微观组织状态等有关,并非喷丸强度越高效果就越好^[15]。因此,要获得良好的抗疲劳性能,就要考虑各种影响因素,优化工艺参数。

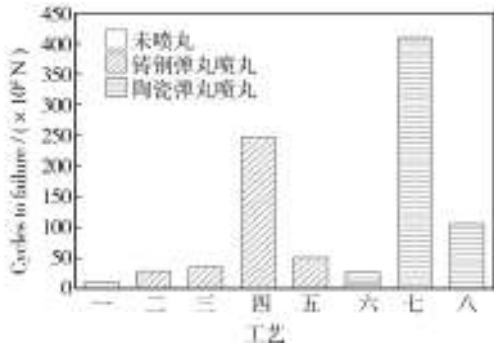


图5 小应力水平下 300M 钢试样的中值疲劳寿命

Fig. 5 Median fatigue life of 300M steel specimen under low stress level

以喷丸强化试样的中值疲劳寿命与未喷丸强化试样的中值疲劳寿命之比,作为喷丸强化试样的中值疲劳寿命增益,对比两种弹丸在不同喷丸强度下喷丸强化效果的差异,如图 6 示。图中表明,在大应力水平试验条件下,两种弹丸不同喷丸强度下试样的中值疲劳寿命增益为 2~4,效果均不明显,而在小应力水平试验条件下,两种弹丸不同喷丸强度下试样的中值疲劳寿命增益差异显著,最小值均为 3,最大值为 22 (铸钢弹丸喷丸强化) 和 38 (陶瓷弹丸喷丸强化)。

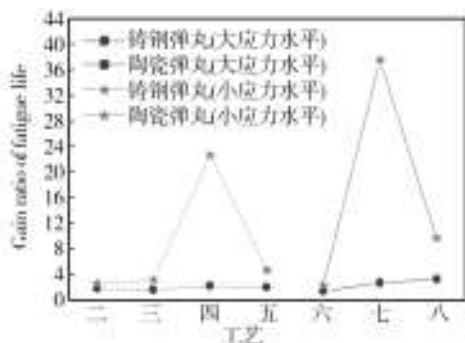


图6 中值疲劳寿命增益

Fig. 6 Median fatigue life gain

3 结论

1) 对于两种弹丸喷丸强化,随着喷丸强度的增大,试样表面粗糙度值呈增大趋势,但在相同或相当的喷丸强度下,采用陶瓷弹丸喷丸强化可获得更小的表面粗糙度值。

2) 随着喷丸强度的增加,试样表面残余压应力均先增大后减小。在铸钢弹丸喷丸强度为 0.25A 时,表面残余应力达到最大值 790 MPa,陶瓷弹丸的喷丸强度为 0.2A 时,表面残余应力达到最大值 830 MPa。

3) 在大应力水平试验条件下,两种弹丸不同喷丸强度下试样的中值疲劳寿命增益为 2~4,效果均不明显,而在小应力水平试验条件下,两种弹丸不同喷丸强度下试样的中值疲劳寿命增益差异显著,最小值均为 3,最大值为 22 (铸钢弹丸喷丸强化) 和 38 (陶瓷弹丸喷丸强化)。

参考文献

- [1] 刘道新. 300M 超高强度钢应力腐蚀敏感性及其断口分维特征[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1994, 6(1): 78—81.
LIU Dao-xin. Stress Corrosion Sensitivity and Fractal Dimension Characteristics of 300M Ultra High Strength Steel [J]. Corrosion Science and Protection Technique, 1994, 6(1): 78—81.
- [2] NASCIMENTO M P. Effects of Surface Treatment on the Fatigue Strength of AISI 4340 Aeronautical Steel [J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(7): 607—618.
- [3] ZHANG X H. Effect of Shot Peening on Fretting Fatigue of Ti811 Alloy at Elevated Temperature [J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(5): 889—893.
- [4] 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 Its Application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [5] 高玉魁. 喷丸对 Ti-10V-2Fe-3Al 钛合金拉-拉疲劳性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(1): 60—63.
GAO Yu-kui. The Shot Peening Effects of Ti-10V-2Fe-3Al Titanium Alloy on Tensile Tensile Fatigue Property [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(1): 60—63.
- [6] GAO Yu-kui. Effect of Shot-peening on Microstructure of TC4 Titanium Alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(9): 1536—1539.
- [7] GAO Yu-kui. Influence of Surface Integrity on Fatigue Strength of 40CrNi2Si2MoVA Steel [J]. Materials Letters, 2007, 61: 466—469.
- [8] 李向斌, 王仁智, 殷源发. 一种新型超高强度钢喷丸强化的研究 [J]. 材料工程, 1991(3): 14—18.
LI Xiang-bin, WANG Ren-zhi, YIN Yuan-fa. Study of Shot Peening on a New Type of Ultra High Strength Steel [J]. Materials Engineering, 1991(3): 14—18.

(下转第 74 页)

参考文献

- [1] 陈恳. 超塑用 TC4 钛合金板材在某型飞机上的应用[J]. 航天制造工程, 1997(12): 18—19.
CHEN Ken. TC4 Titanium Alloy Plate Formed by Super Plastic Process Applied in a Certain Type of Aircraft[J]. Aerospace Manufacturing Engineering, 1997(12): 18—19.
- [2] LI M Q, XIONG A M. New Model of Microstructure Evolution During Isothermal Forging of the Ti-6Al-4V Titanium Alloy[J]. Mater Sci Technol, 2002, 18(2): 212—214.
- [3] 聂蕾, 李付国, 方勇. TC4 合金等温成型过程模拟与组织预测[J]. 宇航材料工艺, 2002(5): 45—49.
NIE Lei, LI Fu-guo, FANG Yong. Simulation and Structure Prediction of TC4 Titanium Alloy in Isothermal Forming[J]. Aerospace Materials Technology, 2002(5): 45—49.
- [4] 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 Its Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [5] 高玉魁. 喷丸对 Ti-10V-2Fe-3Al 钛合金拉-拉疲劳性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(1): 60—63.
GAO Yu-kui. The Shot Peening Effects of Ti-10V-2Fe-3Al Titanium Alloy on Tensile Fatigue Property[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(1): 60—63.
- [6] GAO Yu-kui. Effect of Shot-peening on Microstructure of TC4 Titanium Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(9): 1536—1539.
- [7] 刘继伟, 李杰光, 赵明, 等. 航空发动机薄壁叶片加工变形误差补偿技术研究[J]. 机械设计与制造, 2009(10): 175—177.
LIU Ji-wei, LI Jie-guang, ZHAO Ming, et al. Deformation Error Compensation of Manufacturing Thin-wall Blade[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2009(10): 175—177.
- [8] 李国祥. 喷丸成形[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
LI Guo-xiang. Shot Peening Forming[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1982.
- [9] HORWATH J A. Effect of Shot Peening Variables on Bending Fatigue[M]. Oxford: Pergamon Press, 1982: 229—235.
- [10] NIKU-LARI A. Shot Peening Proc of CSP-1[M]. Oxford: Pergamon Press, 1982.
- [11] CARY P E. History of Shot peening Proc of ICSP1[M]. Oxford: Pergamon Press, 1982.
- [12] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册飞机钣金工艺[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992.
General Editorial Board of Aeronautical Manufacturing Engineering Handbook. Aeronautical Manufacturing Engineering Handbook of Aircraft Sheet Metal Forming Process[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1992.
- [13] 马泽恩. 计算机辅助塑性成形[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.
MA Ze-en. Computer Aided Plastic Forming[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University press, 1995.
- [14] GRASTY L V. Shot Peen Forming[D]. Cambridge: Cambridge University, 1992.
- [15] EDWARDS J D. Shot Peen Forming: The Effect of Constraint[D]. Cambridge: Cambridge University, 1995.
- (上接第 68 页)
- [9] 高玉魁, 姚枚, 邵培革. 金属疲劳极限与静强度的相关性[J]. 机械强度, 2001, 23(1): 15—18.
GAO Yu-kui, YAO Mei, SHAO Pei-ge. Relativity of Fatigue Limit of Metals with Their Tensile Property[J]. Journal of Mechanical Strength, 2001, 23(1): 15—18.
- [10] 李向斌, 王仁智. 喷丸强化对材料旋转弯曲疲劳强度影响的定量研究[J]. 材料工程, 1995(10): 26—28.
LI Xiang-bin, WANG Ren-zhi. Quantitative Investigation of Influence of Shot Peening upon the Rotating Bending Fatigue Strength of Material[J]. Materials Engineering, 1995(10): 26—28.
- [11] 王仁智. 表面喷丸强化技术[J]. 中国表面工程, 1991(1): 36—48.
WANG Ren-zhi. Shot Peening Strengthening Technology[J]. China Surface Engineering, 1991(1): 36—48.
- [12] 高玉魁, 李向斌, 殷源发. 超高强度钢的喷丸强化[J]. 航空材料学报, 2003(10): 132—135.
GAO Yu-kui, LI Xiang-bin, YIN Yuan-fa. Shot Peening on Ultra · high Strength Steels[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003(10): 132—135.
- [13] 高玉魁. 高强度钢喷丸强化残余压应力场特征[J]. 金属热处理, 2003, 28(4): 42—44.
GAO Yu-kui. Characteristics of Compressive Residual Stress Fields in High-strength Steel Caused by Shot Peening[J]. Metal Heat Treatment, 2003, 28(4): 42—44.
- [14] 李金魁, 姚枚, 王仁智. 喷丸残余应力场特征值规律的研究[J]. 应用科技, 1990(4): 30—36.
LI Jin-kui, YAO Mei, WANG Ren-zhi. Research of Shot Peening Residual Stress Characteristic Value[J]. Applied Science and Technology, 1990(4): 30—36.
- [15] 李瑞鸿. 喷丸强化与表面完整性对 300M 钢疲劳性能的影响[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(9): 1418—1423.
LI Rui-hong. Influence of Shot Peening and Surface Integrity on the Fatigue Properties of 300M Steel[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(9): 1418—1423.