

表面强化技术

微粒子喷丸高速动车组车轴钢
疲劳性能的影响因素研究

朱守东, 张继旺, 卢琪, 张浩楠

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 成都 610031)

摘要: **目的** 研究微粒子喷丸 EA4T 车轴钢表面残余应力、组织结构强化层以及表面粗糙度对疲劳性能的影响。**方法** 使用 250 °C 保温 2 h 和 550 °C 保温 4 h 的回火工艺对微粒子喷丸试样进行处理, 研究微粒子喷丸试样表面残余应力和组织结构强化层对疲劳强度的影响。分析喷丸及回火处理试样表面的粗糙度、三维形貌、深度方向残余应力分布、X 射线衍射峰、半高宽以及表面硬度, 并进行旋转弯曲疲劳实验, 确定疲劳性能。**结果** 微粒子喷丸增加了试样的表面粗糙度, 在表面引入了深度为 80~100 μm 的残余压应力和加工硬化。微粒子喷丸将材料的疲劳极限由 365 MPa 提高至 470 MPa。回火处理使得喷丸试样表面微观组织发生了回复, 其硬度降低, 残余应力松弛。250 °C 保温 2 h 和 550 °C 保温 4 h 的回火处理使得喷丸试样的疲劳强度分别降低至 450 MPa 和 430 MPa。**结论** 微粒子喷丸在 EA4T 车轴钢试样表面引入的残余应力和组织结构强化层对疲劳强度的提高分别约为 16% 和 23.8%, 而表面粗糙度则降低了疲劳强度, 降幅约为 10%。

关键词: 喷丸; EA4T; 残余应力; 粗糙度; 组织结构强化

中图分类号: TG156.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)12-0140-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.12.014

Research on the Fatigue Strengthening Influencing Factors of
Micro Shot Peened High Speed Railway Axle Steel

ZHU Shou-dong, ZHANG Ji-wang, LU Qi, ZHANG Hao-nan

(State-Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

ABSTRACT: In this study, the effects of the residual stress, the microstructure strengthening layer and the surface roughness on the fatigue performance of micro shot peened EA4T axle steel were evaluated. Two tempering treatments of 250 °C for 2 h and 550 °C for 4 h were applied on the micro shot peened specimens, and the fatigue effects of the residual stress and the microstructure strengthening layer of shot peened specimens were carefully studied. The surface roughness, 3D morphology, residual stress distribution, X-ray diffraction peaks, full width at half maximum of X-ray diffraction profiles and surface

收稿日期: 2021-04-20; 修订日期: 2021-05-26

Received: 2021-04-20; Revised: 2021-05-26

基金项目: 国家自然科学基金 (51675445); 牵引动力国家重点实验室自主研究课题 (2019TPL-T06)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51675445) and Independent Research Project of State Key Laboratory of Traction Power (2019TPL-T06)

作者简介: 朱守东 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为材料与结构的疲劳。

Biography: ZHU Shou-dong (1995—), Male, Master student, Research focus: material and structure fatigue.

通讯作者: 张继旺 (1983—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为材料与结构的疲劳。

Corresponding author: ZHANG Ji-wang (1983—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: material and structure fatigue.

引文格式: 朱守东, 张继旺, 卢琪, 等. 微粒子喷丸高速动车组车轴钢疲劳性能的影响因素研究[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 140-148.

ZHU Shou-dong, ZHANG Ji-wang, LU Qi, et al. Research on the fatigue strengthening influencing factors of micro shot peened high speed railway axle steel[J]. Surface technology, 2021, 50(12): 140-148.

hardness of the peened and tempered specimens were tested and analyzed, and the rotating bending fatigue test was performed to determine the fatigue performance. The results showed that the micro shot peening treatment increased the surface roughness, and introduced the compressive residual stress and work hardening with the depth of about 80~100 μm on the surface. Micro shot peening process improved the fatigue limit of the material from 365 MPa to 470 MPa. The surface microstructure of the tempered specimens recovered, the micro hardness decreased, and the residual stress released. And the tempering treatments of 250 $^{\circ}\text{C}$ for 2 h and 550 $^{\circ}\text{C}$ for 4 h reduced the fatigue limit of shot peened specimens to 450 MPa and 430 MPa, respectively. According to the test results, the fatigue strength influencing factors of micro shot peened EA4T axle steel are quantitatively evaluated, and the results show that the residual stress and the surface microstructure strengthening layer increase the fatigue strength by about 16% and 23.8% respectively, while the surface roughness reduces the fatigue strength by about 10%.

KEY WORDS: shot peening; EA4T; residual stress; roughness; microstructure strengthening

随着我国高速铁路的发展,动车组车轴承受着更加复杂的疲劳载荷,这对车轴的安全性和可靠性提出了新的挑战。为了提高车轴钢的疲劳性能,表面强化处理使用得较为广泛,各种表面处理工艺后的材料的疲劳性能也备受关注。Regazzi 等人^[1]研究了滚压 EA4T 车轴钢的表面改性及其疲劳行为。Li 等人^[2]研究了不同工艺的喷丸处理对 EA4T 车轴钢疲劳性能的影响。喷丸是一种广泛应用于机械和航空领域的表面处理方式,它具有高效、便利和经济等优点。喷丸使用高压气流将金属丸粒喷击至试样或结构的表面,在材料表面引入塑性变形层,该塑性变形层的深度受喷丸强度、喷丸覆盖率、丸粒材质和尺寸以及被喷试件的材料属性等影响。传统喷丸在低碳钢表面引入的塑性变形层厚为 400~800 μm ^[3]。丸粒直径为 0.02~0.2 mm 的微粒子喷丸能够有效控制喷丸引入的表面粗糙度^[4],能满足部分对表面粗糙度要求高的结构。该工艺在低碳钢表面引入深度约 100 μm 的残余应力层和表面硬化层^[5],且其表面粗糙度较传统喷丸显著降低。微粒子喷丸在保证试样表面具有较低的表面粗糙度外,能够显著提高材料的疲劳强度^[2]。为进一步提高 EA4T 车轴钢的疲劳性能,微粒子喷丸是一种可行的表面强化处理方式。

进一步研究喷丸强化影响因素及其评估方法,将对喷丸试样强度评估及寿命预测提供一定参考。为了研究残余应力和表面塑性变形层在不同初始条件下对材料疲劳强度的影响,本研究在微粒子喷丸后,使用不同温度回火处理的方法来改变试样表面的残余应力和表面组织硬化、细化参数。喷丸残余应力的降低或去除,通常有热处理和机械处理两种方法。单次或循环的机械加载能去除部分或者全部的喷丸残余压应力,但可能会造成表面微裂纹或疲劳损伤。喷丸试样在特定温度的热处理作用下,试样表面的残余应力在前期发生了快速松弛,而后残余应力逐渐保持稳定,稳定的残余应力值与热处理温度有关^[6-8]。回火

处理对喷丸试样表面的组织和晶粒尺寸也有一定的影响。Fu 等人^[7]采用 X 射线衍射的方法定量研究了回火热处理后喷丸试样表面的晶粒和组织变化情况,其结果表明,随着温度的升高,试样表面的晶粒尺寸逐渐回复增大。由于喷丸试样表面残余应力的松弛和表面硬化、细化组织回复等原因,喷丸后的热处理一般会使得疲劳强度降低。

一般认为,喷丸强化因素主要有表层引入的残余压应力和组织结构强化层(包括表层组织硬化、晶粒细化、位错密度提高)。喷丸引入的残余应力、组织结构强化层以及表面粗糙度一直是众多研究者关注的焦点^[9-11]。喷丸在试样表面引入的残余压应力在疲劳载荷作用下会发生松弛,其松弛过程通常可以分为两个阶段,即快速松弛阶段和循环松弛阶段。半高宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)是 X 射线衍射峰峰高一半处的峰宽,该参数与硬度和组织细化有关^[12-13]。采用喷丸前后半高宽的比值来评估喷丸表面组织细化和硬化对疲劳强度影响的方法被一些学者所采用^[14]。喷丸在试样表面引入上述强化因子的同时,增加了材料表面的粗糙度。研究发现,高强度喷丸可能在试样表面引入微裂纹^[15]。喷丸引起的表面粗糙度增加,使得表面局部应力集中加剧^[16],试样更容易从表面发生破坏。喷丸引入的残余应力和组织结构强化层相互影响,且在疲劳载荷中发生变化,喷丸对疲劳强度的影响因子的量化评估鲜有报道。

本文研究了微粒子喷丸以及喷丸后两种回火工艺下 EA4T 车轴钢的表面性能和疲劳强度,对微粒子喷丸试样和未处理试样的粗糙度和表面形貌进行了测试,分析了不同工艺下材料表面的残余应力,确定了不同工艺下材料表面一定衍射范围内的 X 射线衍射峰以及半高宽值。测试了回火工艺试样表面深度方向的微观硬度,确定了各表面状态影响下试样的疲劳性能。根据试验结果,评估了微粒子喷丸影响因素对 EA4T 车轴钢疲劳性能的影响。

1 试验

1.1 材料和表面处理

本研究使用的材料为 EA4T 车轴钢，是一种欧洲标准的车轴钢，其化学成分和力学性能分别见表 1 和表 2^[2]。疲劳试样的形状和规格如图 1 所示，未处理（Unpeening，UP）试样表面在机械抛光后进行了电解抛光，来降低机械加工引起的表面硬化和粗糙度。微粒子喷丸（Micro Shot Peening，MSP）试样是在

UP 试样中间圆弧段表面采用直径为 50 μm 的高速工具钢丸粒进行喷丸，其喷丸强度是 0.25 mmN，喷丸时间为 20 s（覆盖率大于 100%）。对 MSP 试样进行 550 $^{\circ}\text{C}$ 保温 4 h（High Temperature Tempering，HTT）和 250 $^{\circ}\text{C}$ 保温 2 h（Low Temperature Tempering，LTT）的回火处理。回火处理采用真空管式电热炉，为避免试样在加热过程中发生氧化，加热过程中，采用真空泵将管中抽成真空后，持续不断地通入惰性气体（氩气），同时试样在加热过程中被埋入石墨粉中。

表 1 EA4T 的化学成分^[2]
Tab.1 Chemical composition of the EA4T steel^[2]

wt%									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo	Fe
0.27	0.39	0.72	0.0075	0.0013	1.11	0.014	0.25	0.25	Bal.

表 2 EA4T 的力学性能^[2]
Tab.2 Mechanical properties of the EA4T steel^[2]

Young's modulus/GPa	Yield strength/MPa	Poisson ratio	Tensile strength/MPa	Elongation/%
209	675	0.3	791	19

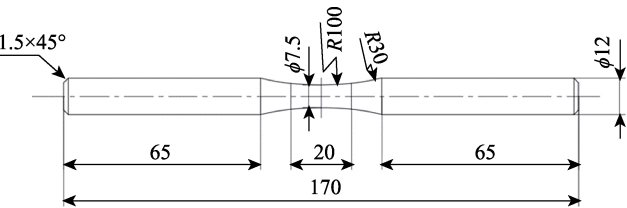


图 1 试样的形状与规格（单位：mm）
Fig.1 Specimen shape and dimensions (unit: mm)

1.2 表面性能测试

使用 Olympus OLS4100 激光共聚焦显微镜测量喷丸处理前后试样的粗糙度和表面三维形貌，测量过程中采用 12 mm 的基准长度，每个粗糙度的数据采用 3 组数据的平均值。采用 Pulstec μ -X360n X 射线残余应力分析仪测量表面和深度方向的残余应力和疲劳过程中的 FWHM，使用 Cr-K α 辐射，光斑直径为 2 mm，管电压和电流分别为 30 kV 和 1.0 mA，衍射角为 156 $^{\circ}$ ，衍射晶面为 {211}，衍射线入射角为 35 $^{\circ}$ 。为准确获得试样表面深度方向的残余应力数据，试验中使用电解液腐蚀喷丸试样表面，用 Olympus OLS 4100 激光共聚焦显微镜扫描腐蚀坑。根据腐蚀坑的三维形貌测量腐蚀坑深度，腐蚀坑深度取 3 次测量结果的平均值，在同一深度下残余应力值取 3 个点的平均值。使用 PANalytical Empyrean XRD 分析仪对试样表面进行 X 射线衍射分析，采用 Cu-K α 靶材，电压为 40 kV，电流为 40 mA，测量角度为 30 $^{\circ}$ ~130 $^{\circ}$ 。为了获得微粒子喷丸试样在深度方向的硬度分布，采用 HVS-1000Z 型自动转塔数显显微硬度计进行硬度测

试，加载载荷为 0.245 N，保荷 10 s，取 3 个数据点的平均值。

1.3 疲劳试验和断口观察

疲劳试验在 PQ-6 四点弯曲疲劳试验机上进行，其应力比 $R=-1$ 。疲劳试验终止条件为试样完全断裂或疲劳加载周次达到 10^7 周次。试样断裂后，使用 JSM-6610LV 扫描电镜对试样的断口进行观察分析。

2 结果与分析

2.1 粗糙度和表面形貌

UP 试样和 MSP 试样表面的粗糙度见表 3，其中 R_a 为轮廓算数平均偏差， R_z 为微观不平度十点高度， R_{max} 轮廓最大高度。结果表明，微粒子喷丸使得试样表面的粗糙度 R_a 增加了 2.44 μm ，相比于未喷丸试样，其粗糙度增大。UP 和 MSP 试样表面的三维形貌如图 2 所示。UP 试样表面较为光滑，微粒子喷丸试样表面存在大量由喷丸引起的凹坑。回火处理试样表面粗糙度和三维形貌与 MSP 试样相同。

表 3 UP 和 MSP 试样表面粗糙度
Tab.3 The surface roughness of the UP and MSP specimens μm

Specimen	R_a	R_z	R_{max}
UP	0.05	0.49	0.57
MSP	2.44	15.89	18.51

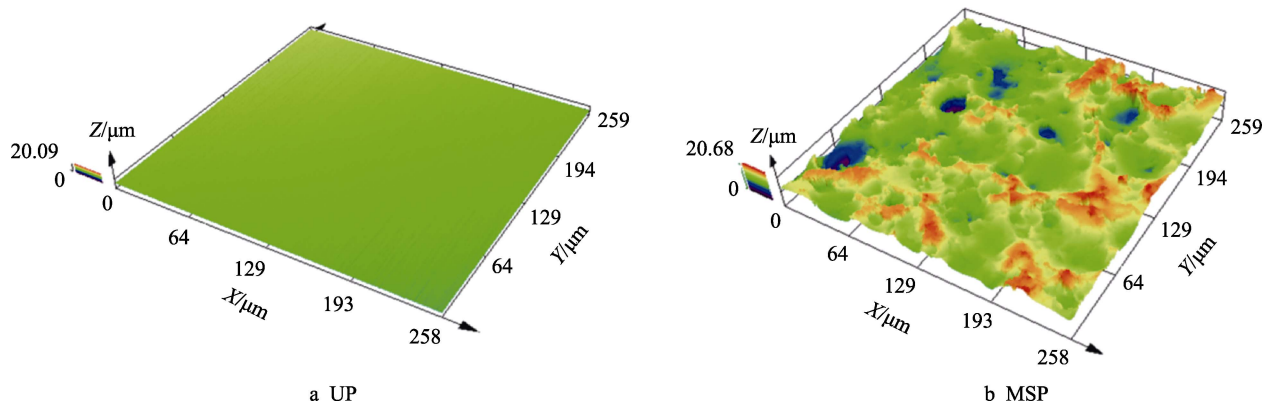


图 2 UP 和 MSP 试样的表面三维形貌
Fig.2 Surface morphology of UP and MSP specimens

2.2 表面残余应力分布

UP、MSP、LTT 以及 HTT 试样表面深度方向的残余应力分布如图 3 所示。微粒子喷丸在 EA4T 车轴钢表面引入了深度大约为 100 μm 的残余应力层，其表面残余应力为-423 MPa，在深度为 10 μm 左右达到最大值，约为-502 MPa。550 ℃保温 4 h 回火处理试样表面的残余应力得到了很大程度的松弛，约为-35 MPa，残余应力最大值位于表面以下约 60 μm，为-201 MPa。250 ℃保温 2 h 的回火工艺使得微粒子喷丸试样表层残余应力发生了一定程度的松弛，试样表面残余应力降至-375 MPa，LTT 试样残余应力分布曲线与 MSP 试样相似，但残余应力层变浅。

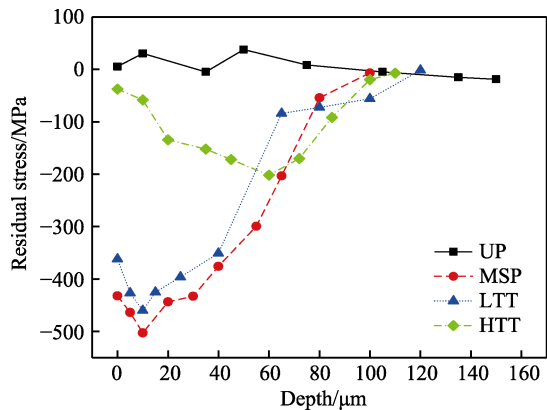


图 3 残余应力分布曲线
Fig.3 Residual stress distribution profiles

2.3 XRD 结果与微观组织观察

UP、MSP、HTT 以及 LTT 试样表面的 X 射线衍射峰结果如图 4 所示。结果表明，相比于 UP 试样，MSP 试样的衍射峰显著变宽、变低。两种回火工艺都不同程度地使得衍射峰峰宽变窄，峰高变高，且温度越高，变化越明显。半高宽通常可以用来表征材料的组织细化程度^[12-13]。表 4 中的 FWHM₁₁₀是在衍射角为 44.6°的{110}晶面所对应的衍射峰计算所得。不

同表面处理方式下的试样表面晶粒尺寸可以通过谢乐公式^[13]进行评估，见式(1)。

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}$$

(1)

式中：K 为常数 0.89；λ 为 X 射线波长；β 为半高宽 FWHM₁₁₀；θ 为衍射角。由表 4 可知，微粒子喷丸使得试样表面的晶粒得到细化，两种回火工艺都使得试样表面晶粒得到不同程度的回复。

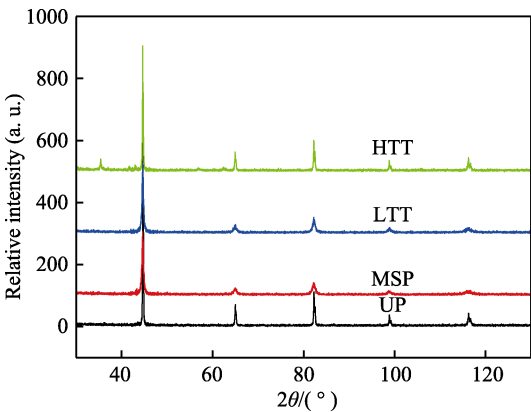


图 4 不同处理 EA4T 试样表面 X 射线衍射峰
Fig.4 X-ray diffractograms of the EA4T with different treatments

表 4 不同处理试样表面 FWHM₁₁₀ 值与晶粒计算
Tab.4 FWHM₁₁₀ values and crystallite size of different treatments

	UP	MSP	HTT	LTT
FWHM ₁₁₀ /(°)	0.0323	0.3326	0.16	0.3114
Crystallite size/nm	> 100	25	52	27

微粒子喷丸试样和未喷丸试样表面的金相图如图 5 所示。可以看出，UP 试样表面组织与内部相似，试样表面没有明显的塑性变形和组织细化。MSP 试样表面组织发生了显著的塑性变形，在表面以下 20~30 μm 内，组织有明显的细化。

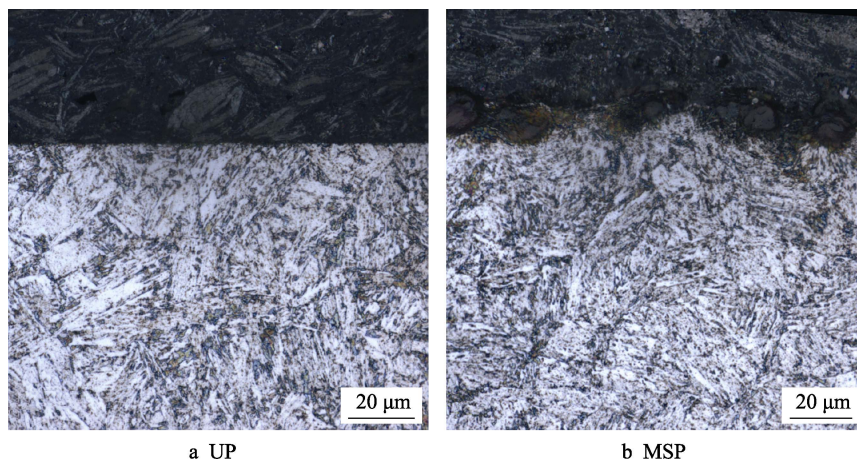


图5 表面金相
Fig.5 Surface metallography

2.4 表面硬度观察

MSP、HTT 与 LTT 试样在深度方向的硬度分布如图6所示。UP 试样的表面硬度为 248HV。微粒子喷丸使得 EA4T 车轴钢表面发生了加工硬化,形成了深度约为 90 μm 的硬化层,表面的硬度为 458HV。HTT 与 LTT 试样表面的硬度分别降低至 320HV 与 366HV,表面硬化层深度没有发生明显的改变。

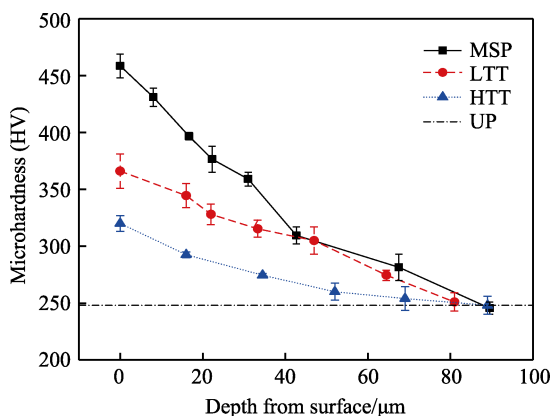


图6 深度方向的微观硬度分布
Fig.6 Micro-hardness distribution profiles in depth direction

2.5 疲劳试验结果

疲劳试验结果如图7所示。 $S-N$ 曲线采用最小二乘法进行线性拟合,试验中试样的疲劳极限定义为 10^7 不发生失效的最高应力水平。UP 试样的疲劳极限为 365 MPa,微粒子喷丸使得试样的疲劳极限提高到 470 MPa,两种回火工艺使得试样的表面特性发生了改变,HTT 与 LTT 试样的疲劳极限由 MSP 的 470 MPa 分别降至 430 MPa 与 450 MPa。可以看出,微粒子喷丸在高周疲劳寿命阶段,疲劳寿命得到了显著提高,但在应力水平高于 520 MPa 的低周疲劳阶段,微粒子喷丸对试样疲劳性能的提高并不显著。就喷丸对材料疲劳强度提高的机理来看,喷丸引入的含有残余应力

的表面塑性变形层对疲劳裂纹的扩展主要在裂纹的萌生和早期的扩展阶段,在长裂纹阶段的抑制效果并不明显。在高应力载荷作用下,微裂纹比较容易萌生和扩展,因此材料本身的强度和性质对寿命的影响更大。此外,喷丸在材料表面引入的残余应力在疲劳载荷的作用下发生松弛,且存在快速松弛阶段^[17],该阶段的松弛程度随着载荷的增加而增加。因此,在高载荷作用下,疲劳裂纹更容易成核,并穿过强化层,喷丸表面处理对材料疲劳性能的影响减弱。

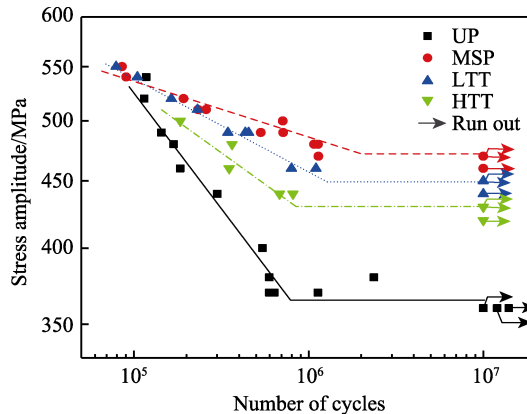


图7 $S-N$ 曲线
Fig.7 $S-N$ curves

2.6 残余应力与 FWHM 松弛

在 490 MPa 应力水平下, MSP 和 LTT 试样表面的残余应力松弛曲线如图8所示。结果表明,490 MPa 应力水平下,微粒子喷丸试样在疲劳加载的过程中,90%以上的寿命对应的表面残余应力基本处于稳定状态, MSP 试样表面残余压应力为 240~275 MPa。低温回火试样表面残余应力的松弛情况与 MSP 试样具有相同的规律。从疲劳裂纹扩展规律来看,疲劳裂纹需要一定的循环次数才会萌生和进行初期的扩展。因此,前 10 周次疲劳加载过程中高的残余应力对裂纹的抑制作用并不显著,在裂纹的萌生和扩展阶段,其

试样表面的残余应力已经趋于稳定。在疲劳载荷下，试样表面的 FWHM 会逐渐趋于稳定^[18]。出现疲劳极限的试样表面的残余应力和 FWHM 数据见表 5。

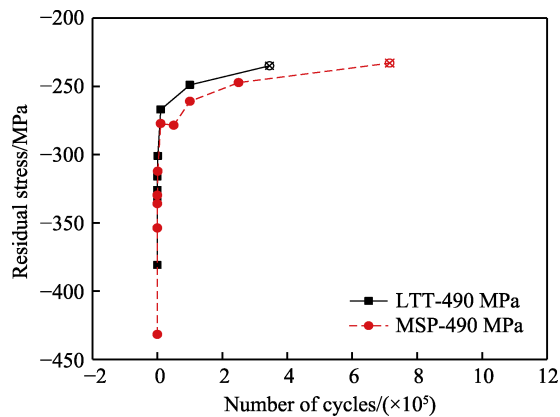


图 8 残余应力松弛
Fig.8 Residual stress relaxation

表 5 出现疲劳极限试样表面的残余应力和 FWHM({211} 晶面)

Tab.5 Surface residual stress and FWHM ({211} diffraction crystal plane) of the specimen with fatigue limit

Surface treatments	Residual stress/MPa	FWHM/(°)
UP	0	2.54
MSP	-274	3.80
HTT	-32	3.31
LTT	-220	3.71

2.7 断口观察

试样断口形貌如图 9 和图 10 所示。由图 9 可知，断口形貌可分为 3 个区域：裂纹萌生区 (Region1)、裂纹稳定扩展区 (Region 2) 以及瞬断区 (Region 3)。其中，裂纹萌生区和裂纹稳定扩展区的断口表面较为平整，瞬断区表面凹凸不平，有明显的瞬断和撕裂痕迹。观察回火试样断口，都与图 9 中的 MSP 试样具有相同的断裂机制。UP 试样、MSP 试样、HTT 试样和 LTT 试样的裂纹萌生区扫描电镜图如图 10 所示，所有试样的疲劳裂纹都从试样表面萌生，裂纹萌生主要由疲劳载荷作用和应力集中 (较高的表面粗糙度引起) 作用下发生的塑性滑移引起。回火工艺降低了喷丸强化作用，而没有改变表面粗糙度，疲劳裂纹更容易从表面萌生。

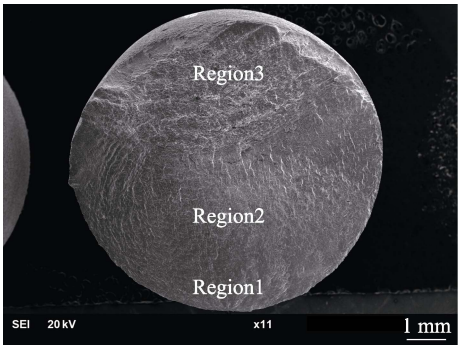


图 9 疲劳试样断裂面(MSP, $\sigma_a=490$ MPa, $N_f=3.49\times10^5$ cycles)
Fig.9 Fracture surface of fatigue specimen (MSP, $\sigma_a=490$ MPa, $N_f=3.49\times10^5$ cycles)

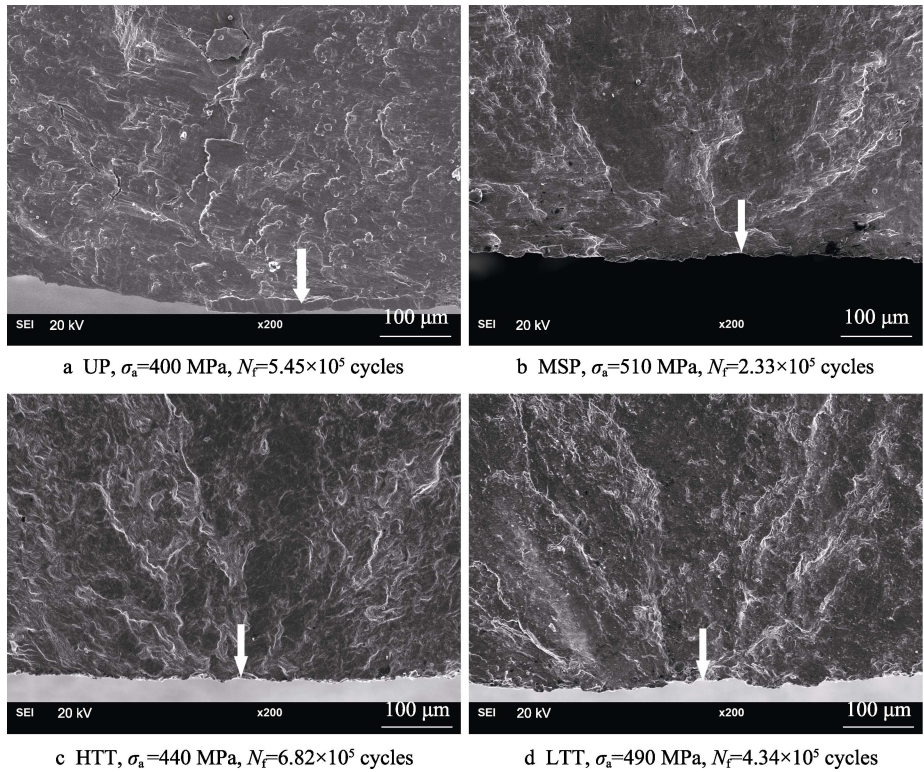


图 10 疲劳裂纹萌生处断口观察
Fig.10 Fracture surface observation of the initial crack region

3 讨论

疲劳试验结果表明,微粒子喷丸使得 EA4T 车轴钢表面粗糙度增加,表面存在残余压应力层和组织结构强化层。微粒子喷丸能够显著提高 EA4T 车轴钢的疲劳性能,疲劳极限从 365 MPa 提高到 470 MPa。在高周疲劳阶段,喷丸强化效果最为显著。一般认为喷丸引入的残余应力和表面硬度较高的组织细化层是引起疲劳强度提高的两个主要因素^[19-20],表面粗糙度的增加则对疲劳强度的提高不利^[21]。两种回火工艺改变了微粒子喷丸试样的表面残余应力和组织结构强化层,因此其疲劳性能发生改变。结合实验结果,下文就微粒子喷丸残余应力、组织结构强化以及粗糙度对 EA4T 车轴钢疲劳强度的影响进行讨论。MSP 试样的疲劳强度 σ_{MSP} 与 UP 试样的疲劳极限 σ_{UP} 存在的对应关系见式(2)^[22]:

$$\sigma_{MSP} = \sigma_{UP} \cdot K_r \cdot K_{cw} \cdot C_s \quad (2)$$

式中: K_r 为残余压应力影响因子; K_{cw} 为表面组织结构强化影响因子; C_s 为表面粗糙度影响因子。

将喷丸试样表面残余压应力视为一种平均应力,并对疲劳强度进行评估是一种常用的评估方法^[22-23]。喷丸引入的残余应力在快速松弛阶段后,继续缓慢地松弛。在喷丸试样绝大部分寿命内,表面残余应力相对稳定,且本试验中所有试样都从表面萌生裂纹,即在裂纹的萌生和扩展过程中,残余压应力相对稳定。因此,可以采用快速松弛阶段后较为稳定的残余应力作为平均应力,并对微粒子喷丸试样的疲劳强度进行评估。通常可以使用 Goodman 方法和 Gerber 方法^[24]对由平均应力 σ_m 改变而引起的材料疲劳强度的变化进行评估。同时考虑到喷丸后试样表面的硬度提高,表面材料的力学性能发生变化,Arakawa 等^[25]在研究中对使用喷丸前后硬度的比值对 Goodman 方程进行修正,修正的 Goodman 方程为:

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{uts} \cdot i_{HV}} \right) \quad (3)$$

式中: σ_{uts} 为材料的拉伸强度; σ_{-1} 为应力比 $R=-1$ 时的疲劳极限; σ_m 为平均应力; i_{HV} 为喷丸前后硬度的比值。

此外,Avilés 等^[22]就喷丸和低塑性抛光的 34CrNiMo6 合金钢使用 Dietmann^[26]方法进行了强度评估,其评估结果合理。Dietmann 方程为:

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{uts}} \right) = 1 \quad (4)$$

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \cdot \sqrt{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{uts}}} \quad (5)$$

基于 EA4T 车轴钢的 Goodman 曲线,得到修正的 Goodman 曲线以及 Dietmann 曲线如图 11 所示。修正的 Goodman 曲线考虑了喷丸强化对材料表面硬

度的提高,但该方法仍然是一种线性模型,存在一定的局限性。随着负平均应力的持续增加,负平均应力对疲劳强度的提高效应会逐渐减小,疲劳强度增长速率变小^[26],而线性模型认为疲劳强度增长速率不变,与实验规律不符。由图 11 可以看出,在平均应力为 0~ -500 MPa 时,修正的 Goodman 曲线与 Dietmann 曲线较为接近,但 Dietmann 曲线更加符合实验规律。本文采用 Dietmann 方法对疲劳强度进行评估,将喷丸试样疲劳极限处的表面残余应力视为一种平均应力,即可以定义残余应力影响因子为:

$$K_r = \sqrt{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{uts}}} \quad (6)$$

残余应力影响因子评估结果见表 6, σ 为实验疲劳极限, σ_f 为评估疲劳极限, e 为评估偏差。评估中,由于 HTT 试样表面残余应力为 -32 MPa,但在深度约为 60 μm 处,残余应力为 -201 MPa,且在深度方向,残余应力仍有较大保有量。因此,为准确评估 HTT 试样表面残余应力对寿命的影响,本文采用 HTT 试样残余应力最大值对 K_r 进行评估。

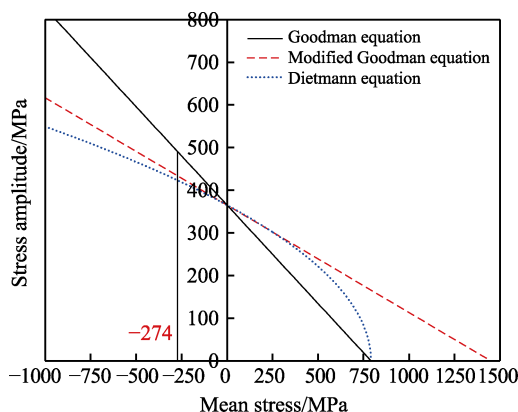


图 11 Haigh 图

Fig.11 Haigh diagram

表 6 回火处理试样疲劳极限评估验证

Tab.6 evaluation and verification of fatigue limit of tempered specimens

Treatments	K_{cw}	K_r	C_s	σ/MPa	σ_f/MPa	$e/\%$
MSP	1.238	1.160	0.9	470	—	—
HTT	1.145	1.120	0.9	430	421	-2.03
LTT	1.221	1.131	0.9	450	453	0.78

为定量评估粗糙度对疲劳强度的影响, Buch^[27]提出粗糙度对疲劳强度的影响因子 C_s 与疲劳极限存在式(7)的关系。

$$C_s = \frac{\sigma_{ds}}{\sigma_d} < 1 \quad (7)$$

式中: σ_{ds} 为给定表面状态下的疲劳极限; σ_d 为表面经过精抛光处理的疲劳极限。同时, C_s 与 R_z 存在对应关系,随着 R_z 增大, C_s 呈现非线性下降。基

于上述方法和大量的试验数据，由粗糙度 R_z 来查询粗糙度对疲劳强度的影响因子的方法被一些研究者使用和验证^[14]。因此，结合本试验结果查表可得，MSP 试样的粗糙度系数 C_s 约为 0.9^[27]。

微粒子喷丸使得试样表面晶粒细化，喷丸影响层硬度提高，而两种回火工艺在不同程度上使得喷丸表面的细化组织和硬度都有一定程度的回复。表面组织结构强化层将阻碍裂纹的萌生和扩展，提高疲劳强度。但是，喷丸试样表面组织结构强化层与疲劳强度之间的量化评估存在很多困难，目前没有较为完善的评估方法。作为一种经验方法，用喷丸试样表面半高宽对组织结构强化层的疲劳强化作用进行评估是一种可行的方案。一般认为，半高宽是一项与表面组织细化和表面硬化相关的参数。一些试验结果也表明，不同表面改性试样表面的硬度和半高宽具有相同的变化规律^[6]。Bagherifard 和 Guagliano^[14]使用喷丸前后半高宽的比值来评估喷丸引入的表面硬化和组织细化对疲劳强度的影响，结果表明，该方法有一定的合理性。然而，微粒子喷丸 EA4T 车轴钢试样表面半高宽，在疲劳载荷加载过程中会随着载荷次数的增加而松弛减小，即表面硬度可能随着疲劳载荷而改变。因此，本研究拟采用 MSP 试样在疲劳极限处相对稳定的半高宽值对 K_{cw} 进行评估。同时，喷丸与未喷丸试样半高宽的比值表征的是试样表面特性的改变，该比值能影响疲劳强度，但直接作为强化因子进行强度评估计算并不准确。因此，为更合理地评估喷丸试样表面组织结构强化层对疲劳性能的影响，本文首先通过式（2）、（6）、 $C_s=0.9$ 以及喷丸前后试样的疲劳极限对 $K_{cw,MSP}$ 进行计算，见式(8)，计算出 $K_{cw,MSP}$ 为 1.238，然后，利用两种回火处理工艺试样和机械加载下 MSP 试样强度的评估结果对评估方法进行验证。

$$K_{cw,MSP} = \frac{\sigma_{MSP} \cdot \sigma_{uts}}{\sigma_{UP} \cdot C_s \cdot (\sigma_{uts} - \sigma_m)}$$

(8)

回火试样组织结构强化层因子的变化，实质上是在微粒子喷丸试样表面硬化和细化层基础上发生回复造成的。因此，将微粒子喷丸组织结构强化的有效疲劳强度增益按半高宽变化量的比值进行评估，即可认为回火处理的试样组织结构强化因子 $K_{cw,t}$ 与微粒子喷丸试样组织结构强化因子 $K_{cw,MSP}$ 存在如式(9)的关系式。

$$K_{cw,t} = (K_{cw,MSP} - 1) \frac{FWHM_t - FWHM_{UP}}{FWHM_{MSP} - FWHM_{UP}} + 1$$

(9)

式中： $FWHM_{UP}$ 、 $FWHM_{MSP}$ 、 $FWHM_t$ 分别为 UP、MSP 和回火试样在疲劳极限处试样表面半高宽值。根据式(9)可计算得到回火处理后试样表面的组织强化因子，结果见表 6。可根据式(10)对回火处理试样的疲劳极限进行评估。

$$\sigma_f = \sigma_{UP} \cdot K_f \cdot K_{cw,t} \cdot C_s$$

(10)

从评估的结果来看，HTT 与 LTT 试样的评估强度与实验结果偏差较小。 $K_{cw,MSP}$ 取 1.238 时，采用回火处理试样 K_{cw} 的计算方法预测 HTT 和 LTT 试样的疲劳极限较为准确，上述评估方法合理。为进一步验证上述评估方法的合理性，使用上述方法对微粒子喷丸试样在机械加载下的强度进行评估验证。

在喷丸试样和 UP 试样的 $S-N$ 曲线中，同一寿命下两种试样疲劳强度的差异可以视为在该特定应力水平下喷丸残余应力、组织结构强化层、粗糙度的综合作用结果。而在某一特定应力水平下，喷丸试样较为稳定的表面性能可以视为循环机械加载作用的结果。如图 12 所示，同一寿命下，微粒子喷丸试样强度为 σ_{MSP} ，而 UP 试样的强度为 $\sigma_{f,UP}$ ，假定微粒子喷丸试样表面强度影响因素为 K_f 、 K_{cw} 、 C_s ，则可以利用式(10)对与 UP 试样具有相同寿命的微粒子喷丸试样强度 σ_f 进行评估。将评估的喷丸试样强度 σ_f 与实验值 σ_{MSP} 进行比较，即可进一步验证本研究提出的喷丸强化因子的评估方法。Li 等^[2]使用喷丸压力为 0.4 MPa、喷丸时间为 30 s 的微粒子喷丸工艺对 EA4T 车轴钢进行喷丸处理，并展开了详细的实验研究。根据上述评估方法，结合微粒子喷丸试样的残余应力松弛与疲劳实验结果，对微粒子喷丸试样的疲劳强度进行评估，其评估结果见表 7。

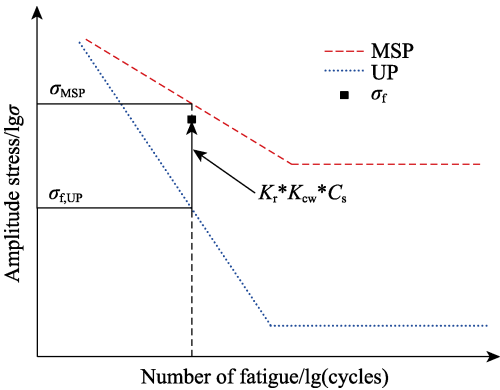


图 12 机械加载疲劳强度评估
Fig.12 Schematic diagram of mechanical loading fatigue strength evaluation

表 7 机械加载下喷丸强度验证
Tab.7 Shot peening strength verification under mechanical loading

σ_{MSP} /MPa	σ_{UP} /MPa	FWHM /(°)	σ_{SCRS} /MPa	K_f	K_{cw}	σ_f /MPa	e /%
480	365	3.81	360	1.210	1.211	/	/
490	374	3.82	320	1.185	1.203	480	-2.03
500	405	3.77	310	1.180	1.195	514	2.81
540	500	3.72	250	1.147	1.187	613	13.52

由表 7 的评估结果可知，在 490 MPa 与 500 MPa 应力水平下，评估结果较为准确，540 MPa 下的评估

结果偏差较大。其主要原因是,载荷水平较高时,整个寿命阶段的残余应力和半高宽松弛较快,不稳定,因此评估方法的假设不成立;由于粗糙度参数 C_s 的取值为疲劳极限处的比值,在载荷水平远大于疲劳极限时,粗糙度对疲劳强度的影响已经发生较大变化,仍将 C_s 作为常值并不合理。

通过评估回火处理试样的疲劳极限以及机械加载下喷丸试样的疲劳强度,对微粒子喷丸强化因子评估的方法进行了验证,验证结果与实验结果的误差较小。因此,微粒子喷丸在 EA4T 车轴钢试样表面引入的残余应力和组织结构强化层对疲劳强度的提高分别约为 16% 和 23.8%,而表面粗糙度增大则使疲劳强度降低约 10%。

4 结论

1) 微粒子喷丸在 EA4T 车轴钢表面引入了残余应力层和表面组织硬化、细化层,微粒子喷丸试样的疲劳极限为 470 MPa,相比于未喷丸试样提高了 29%。

2) 550 °C 保温 4 h 和 250 °C 保温 2 h 两种回火工艺使得微粒子喷丸试样表面残余应力、表面组织细化硬化特性发生改变,回火温度越高,残余应力和表层硬度松弛越明显,分别使得微粒子喷丸试样的疲劳极限降低至 430 MPa 和 450 MPa。

3) 微粒子喷丸以及两种喷丸后的回火工艺没有改变疲劳断裂机制,疲劳裂纹从试样表面萌生。

4) 微粒子喷丸对 EA4T 车轴钢疲劳强度提高的影响因素主要为表层残余压应力、表面组织结构强化层和表面粗糙度。评估了各影响因素对疲劳强度的影响,结果认为,微粒子喷丸在 EA4T 车轴钢试样表面引入的残余应力和组织结构强化层对疲劳强度的提高分别约为 16% 和 23.8%,而表面粗糙度则使疲劳强度降低约 10%。

参考文献:

- [1] REGAZZI D, BERETTA S, CARBONI M. An investigation about the influence of deep rolling on fatigue crack growth in railway axles made of a medium strength steel [J]. Engineering fracture mechanics, 2014, 131: 587-601.
- [2] LI Xing, ZHANG Ji-wang, YANG Bing, et al. Effect of micro-shot peening, conventional shot peening and their combination on fatigue property of EA4T axle steel[J]. Journal of materials processing technology, 2020, 275: 116320.
- [3] KIM J C, CHEONG S K, NOGUCHI H. Residual stress relaxation and low- and high-cycle fatigue behavior of shot-peened medium-carbon steel[J]. International journal of fatigue, 2013, 56: 114-122.
- [4] 李行, 张继旺, 易科尖, 等. 喷丸处理 EA4T 车轴钢疲劳性能和残余应力松弛行为研究[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 244-250.
- [5] LI Xing, ZHANG Ji-wang, YI Ke-jian, et al. Fatigue properties and residual stress relaxation behavior of shot peened EA4T axle steel[J]. Surface technology, 2019, 48(10): 244-250.
- [6] HARADA Y, GOWA D, TSUJI T, et al. Effect of micro-shot peening on residual stress of high-toughness spring steel[J]. Advanced materials research, 2011, 325: 745-750.
- [7] 付鹏. 高强双相钢喷丸强化及其 XRD 表征[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [8] FU Peng. Study on shot peening and XRD characterization of high-strength dual phase steel[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [9] FU Peng, JIANG Chuan-hai. Residual stress relaxation and micro-structural development of the surface layer of 18CrNiMo7-6 steel after shot peening during isothermal annealing[J]. Materials & design, 2014, 56: 1034-1038.
- [10] HOLZAPFEL H, SCHULZE V, VÖHRINGER O, et al. Residual stress relaxation in an AISI 4140 steel due to quasistatic and cyclic loading at higher temperatures[J]. Materials science and engineering: A, 1998, 248(1-2): 9-18.
- [11] YUAN Fu-sen, LIU Cheng-ze, GU Heng-fei, et al. Effects of mechanical polishing treatments on high cycle fatigue behavior of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy[J]. International journal of fatigue, 2019, 121: 55-62.
- [12] LLANEZA V, BELZUNCE F J. Study of the effects produced by shot peening on the surface of quenched and tempered steels: Roughness, residual stresses and work hardening[J]. Applied surface science, 2015, 356: 475-485.
- [13] 朱鹏飞, 严宏志, 陈志, 等. 齿轮齿面喷丸强化研究现状与展望[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 113-131.
- [14] ZHU Peng-fei, YAN Hong-zhi, CHEN Zhi, et al. Research status and prospect of shot peening of gear tooth flanks[J]. Surface technology, 2020, 49(4): 113-131.
- [15] MALEKI E, UNAL O. Roles of surface coverage increase and re-peening on properties of AISI 1045 carbon steel in conventional and severe shot peening processes[J]. Surfaces and interfaces, 2018, 11: 82-90.
- [16] 丛秋滋. 多晶二维 X 射线衍射[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [17] CONG Qiu-zi. Polycrystalline two-dimensional X-ray diffraction[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [18] BAGHERIFARD S, GUAGLIANO M. Application of different fatigue strength criteria on shot peened notched parts. Part 2: Nominal and local stress approaches[J]. Applied surface science, 2014, 289: 173-179.
- [19] BAGHERIFARD S, FERNANDEZ-PARIENTE I, GHELICHI R, et al. Effect of severe shot peening on micro-structure and fatigue strength of cast iron[J]. International journal of fatigue, 2014, 65: 64-70.

(下转第 166 页)