

doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2013.04.012

喷丸强化对 H08Mn2Si 堆焊层残余应力及组织结构的影 响^{*}

万盼兵¹, 张 伟¹, 汪 勇¹, 宋占永¹, 李戈舟²

(1. 装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室, 北京 100072; 2. 中国人民解放军 66295 部队, 河北 保定 071000)

摘 要: 利用气动式喷丸机对 H08Mn2Si 堆焊层表面进行强化处理。借助 X 射线衍射方法, 研究了强化层中残余应力沿材料层深分布规律, 采用金相显微镜、显微硬度仪、三维形貌仪分析了强化层的组织结构、显微硬度和表面粗糙度。结果表明: 喷丸强化使 H08Mn2Si 堆焊层形成了约 500 μm 的强化层, 表层的显微硬度呈先增大后减小的趋势, 金相分析表明铁素体组织未发生转化, 表面粗糙度有不同程度的增大。

关键词: 喷丸强化; H08Mn2Si 堆焊层; 残余应力

中图分类号: TG668

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2013)04-0077-06

Effects of Shot-peening on Residual Stress and Microstructure of H08Mn2Si Steel Layer

WAN Pan-bing¹, ZHANG Wei¹, WANG Yong¹, SONG Zhan-yong¹, LI Ge-zhou²

(1. Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Force Engineering, Beijing, 100072; 2. Unit 66295 of PLA, Baoding 071000, Hebei)

Abstract: The paper used the pneumatic type shot-peening to strengthen the layer of the H08Mn2Si steel. The regularities of distribution of residual stress along the depth, the organization structure, the microhardness and the roughness of the surface were studied by the X-ray diffraction, the metallographic microscope, the microhardness tester and the 3D Profiler. The results show that there is about 500 μm strengthened layer in the surface of the H08Mn2Si steel made by shot-peening, the trend of the microhardness first increases and then decreases, the ferrite microstructure of the surface is unconverted, and the surface roughness of the different specimens increases respectively.

Key words: shot-peening; H08Mn2Si steel layer; residual stress

0 引 言

工件中的残余应力对其疲劳强度、抗应力腐蚀能力、尺寸稳定性和使用寿命有着十分重要的影响^[1]。喷丸强化的主要强化机理是在表面引入残余压应力场^[2], 即利用高速喷射的细小弹丸撞击受喷工件的表面, 使材料表层产生弹、塑性变形, 呈现理想的组织结构和残余应力分布, 从而提高其强度和抗应力腐蚀性能^[3]。

实践证明, 喷丸强化能使碳钢、铝合金、钛合金、铁基热强合金、镍基合金、粉末材料以及表面涂层材料等的疲劳强度得到显著提高^[4], 目前已在诸如航空、航天、汽车、石油机械、汽轮机、核电站等各种工业上得到了广泛的应用^[5]。

为了适应复杂的应用环境, 人们研制了许许多多的堆焊材料, 其中铁基合金可以在很大范围内改变自身的强度、硬度、韧性、耐磨性、耐蚀性、

收稿日期: 2013-04-13; 修回日期: 2013-06-20; 基金项目: * 国家科技支撑计划(2011BAF11B07, 2011BAC10B05)

作者简介: 万盼兵(1984-), 男(汉), 江西南昌人, 硕士生; 研究方向: 等离子体增强物理(化学)气相沉积

网络出版日期: 2013-07-02 14:06; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130702.1406.001.html>

引文格式: 万盼兵, 张伟, 汪勇, 等. 喷丸强化对 H08Mn2Si 堆焊层残余应力及组织结构的影响 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(4): 77-

耐热性和抗冲击性^[6]。其中,实芯焊丝 H08Mn2Si 就是常见的一种,其主要配合 SJ201、SJ501 及 HJ431 等焊剂使用,其堆焊层具有优良的力学性能,主要用于废旧齿轮等零部件的修复,但由于 H08Mn2Si 堆焊层稀释率高,组织不均匀,疲劳性能差等原因,其用途并不广泛。国内外对 H08Mn2Si 堆焊层的喷丸强化研究也还比较少,尤其是对喷丸强化后残余应力场和组织结构的研究更少。

文中对 H08Mn2Si 堆焊层经不同喷丸工艺强化后的残余应力场、组织结构、显微硬度和表面粗糙度进行了研究,分析了它们之间的关系,讨论了 H08Mn2Si 堆焊层的强化机制,为优化 H08Mn2Si 堆焊层的性能提供了依据。

1 试验方法

1.1 试验材料及尺寸

试验母材为 45CrNiMoVA 钢,860~880 °C 淬火,420~440 °C 回火,尺寸为 100 mm×100 mm×20 mm,其力学性能如下:抗拉强度为 1.53 GPa,屈服点为 1.46 GPa,断后伸长率为 13%,断面收缩率为 47%,冲击韧性为 48.8 J/cm²,硬度为 470 HV_{0.1}。其化学成分见表 1。

表 1 母材 45CrNiMoVA 钢的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of 45CrNiMoVA (*w*/%)

Element	C	Mn	Mo	Ni
Content	0.42-0.5	0.5-0.8	0.2-0.3	1.3-1.8
Element	Cr	V	Fe	
Content	0.8-1.1	0.102	Bal.	

熔敷金属为 Φ 1.2 mm 的 H08Mn2Si 实芯丝材,焊接电压为 24.3 V,焊接电流为 213 A,焊接速度为 7.3 m/min,每条焊道熔宽为 6.4 mm,焊

道之间搭接量为 3.5 mm,每层用时 4 min,层与层之间间隔 5 min,共堆焊 3 层,每层成形路径为同向顺序焊,不同的层采用相同的成形路径和成形方向,成形后在空气中冷却到室温。在堆焊层表面利用机床进行铣削,形成 100 mm×100 mm×24.5 mm 的立方体。利用线切割机沿成形路径截面进行切割,得到尺寸为 20 mm×20 mm×24.5 mm 的立方体,如图 1 所示为试样形状,实线箭头方向为每层成形路径。H08Mn2Si 堆焊层的化学成分如表 2 所示。

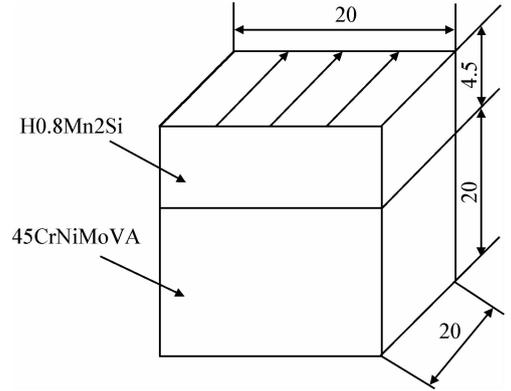


图 1 喷丸试样的形状

Fig. 1 Shape of the shot-peening specimen

表 2 H08Mn2Si 的化学成分(质量分数/%)

Table 2 Chemical composition of H08Mn2Si(*w*/%)

Element	C	Mn	Si	S	P
Content	0.05-0.11	1.8-2.1	0.65-0.95	0.03	0.03
Element	Cr	Ni	Cu	Fe	
Content	0.20	0.30	0.20	Bal.	

1.2 喷丸工艺

在气动式喷丸机上进行喷丸处理,钢丸类型为铸钢丸(平均硬度为 45 HRC),具体喷丸参数见表 3,喷丸强度使用 A 型阿尔门试片进行测试。

表 3 喷丸工艺参数

Table 3 Parameters of the shot-peening process

No.	Surface treatment	Time/s	Diameter/mm	Gas pressure/MPa	Intensity <i>f</i> /mm
0	Milling				
1	Shot-peening	20	0.6	5	0.4 A
2	Shot-peening	20	0.3	5	0.32 A
3	Shot-peening	20+20	0.6+0.3	5+5	0.4 A +0.32 A

1.3 分析和表征

使用爱斯特公司 X-350A 型 X 射线应力测定仪,测定 H08Mn2Si 堆焊层的残余应力场分布。试验采用 Cr 靶,管压为 22 kV,管流为 7 mA,X 射线波长为 2.229 1 nm,应力常数为 -318 MPa/°,照射直径 2 mm,测试点为试样中心点。使用氯化钠饱和溶液进行电化学腐蚀剥层,每次进行完腐蚀之后,用 X-350A 型 X 射线应力测定仪测量各个试件相应深度的残余应力值。

使用 D8 型 X 射线衍射仪对 H08Mn2Si 堆焊层试样的晶体结构进行分析,结合 Eva、Topas 等软件分析 H08Mn2Si 堆焊层经各种喷丸工艺处理后的物相特征。

使用 HVS-1000 显微硬度测量仪测量 H08Mn2Si 堆焊层喷丸试样截面的显微硬度,用测量仪自带螺旋测微器在深度方向每 30 μm 测试 5 个点,点与点之间横向间隔 100 μm,然后取平均值。

对 H08Mn2Si 堆焊层试样截面进行抛光,经 4% 的硝酸酒精腐蚀 15 s 后,在 OLYMPUS 金相显微镜下进行观察。使用 OLYMPUS 三维形貌观察仪观察 H08Mn2Si 堆焊层的金相组织和表面粗糙度。

2 试验结果与分析

2.1 堆焊层的残余应力

喷丸产生的残余压应力场存在以下 4 个参数:表面残余压应力(σ_{rs})、最大残余压应力(σ_{mrs})、最大残余压应力深度(ξ_m)和残余压应力深度(强化深度)(ξ_0)。喷丸产生的残余压应力场中,最大值并不是表面残余压应力,而是位于距离表面一定深度处,并且残余压应力场具有一定的梯度关系。喷丸前后试样的残余应力分布如图 2 所示。由图可以看出:0、1、2 和 3 号试样表层的残余应力均为残余压应力。其中 0 号试样的残余应力数值不大,为 78~242 MPa,且作用层深不深,约为 160 μm;喷丸强化后的 1、2 和 3 号试样表层约 500 μm 内残余压应力几乎都大于铣削处理后 0 号试样的残余压应力,说明喷丸强化的效果比铣削强化的效果更好,且有:

$$\sigma_{1mrs} = 498 \approx \sigma_{3mrs} = 495 > \sigma_{2mrs} = 482 \quad (1)$$

$$\xi_{1m} = 50 \approx \xi_{3m} = 47 > \xi_{2m} = 25 \quad (2)$$

这可以看出,最大残余压应力和最大残余压

应力深度与大直径丸粒有关,且丸粒直径越大,试样残生的残余压应力越大,最大残余压应力深度更深。喷丸强化产生的残余压应力的作用在于,当有残余压应力存在时,疲劳裂纹不能在零件的表层产生,而只能在零件的次表面产生,而且产生疲劳裂纹所需的交变应力的最小值提高,从而提高了零件的疲劳寿命^[7]。此外,残余压应力的作用在零件表面上有缺口或微裂纹时将表现得更为显著,残余压应力能够防止在缺口以及裂纹处集中,能够削减外力在这些部位引起的拉应力峰^[8]。

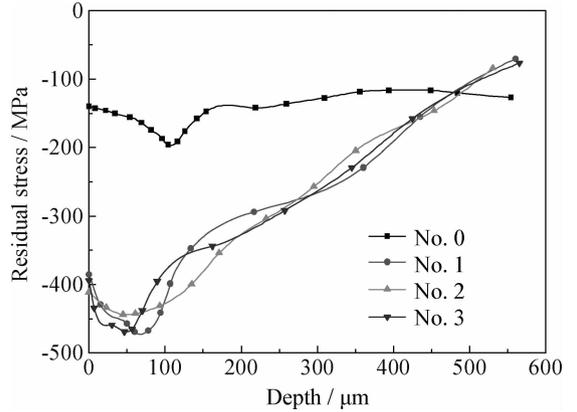


图 2 喷丸前后试样的残余应力

Fig. 2 Residual stress of unpeened and shot-peening specimens

2.2 堆焊层喷丸前后的 XRD 和半高宽

喷丸前后试样的 X 射线衍射如图 3 所示。从图中可以看出,衍射峰未发生明显变化,说明喷丸前后试样的铁素体未发生明显变化。喷丸前后试样应力测定仪测试的半高宽结果如图 4 所示。1、2 和 3 号试样的半高宽在距表面约 75 μm 的范

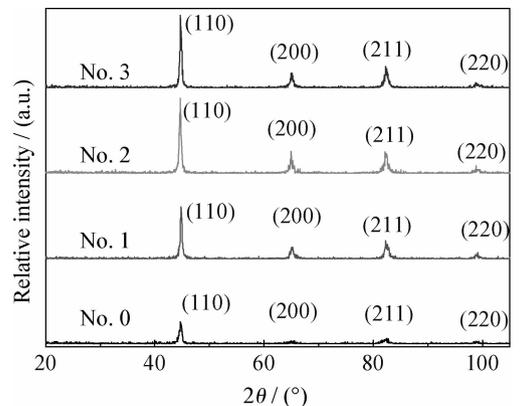


图 3 喷丸前后试样表面的 XRD

Fig. 3 XRD of unpeened and shot-peening specimens

围内均大于0号试样,原因可能是由于喷丸后试样表层的残余压应力值增大,晶粒细化。这说明喷丸强化使试样发生了加工硬化。

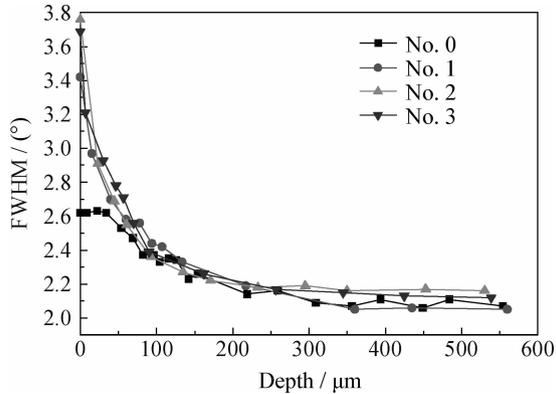


图4 喷丸前后试样表层的半高宽

Fig. 4 FWHM of unpeened and shot-peening specimens

2.3 喷丸对堆焊层显微硬度的影响

喷丸前后 H08Mn2Si 堆焊层试样的显微硬度沿层深分布如图5所示。0号试样经过铣削强化,显微硬度最大值为 234.2 HV_{0.1},且表层约 220 μm 内硬度明显高于堆焊层其他位置,这是因为在加工过程中造成了加工硬化。产生硬化的原因可能是金属在塑性变形时,晶粒发生滑移,出现位错的缠结,使晶粒拉长、破碎和纤维化,金属内部产生了残余应力等^[9]。

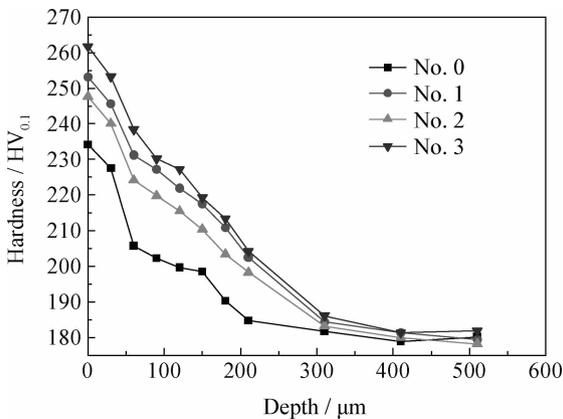


图5 喷丸前后试样显微硬度沿层深的分布

Fig. 5 Depth distribution of microhardness of shot-peening specimens

由图5可见,试样1、试样2和试样3的显微硬度最大值分别为 253.2、247.7 和 261.8 HV_{0.1},相对试样0分别提高了 8.1%、5.7%和 11.8%,且显微硬度值从 310 μm 内开始趋于稳定,说明

喷丸过程中 H08Mn2Si 堆焊层试样表面发生了弹塑性变形,产生喷丸强化作用,表面硬度有所提高。在相同深度处,试样3的硬度均大于试样2,且试样2的硬度均大于试样1。由此可知,在其他条件相同的情况下,丸粒的直径越大,喷丸强度越高,试样的显微硬度值越大,且作用的深度也越深。

2.4 喷丸对堆焊层显微组织的影响

试样的组织结构如图6所示。由图可知,各试样表面组织为铁素体组织,喷丸前后试样组织形貌变化不大,说明喷丸后组织没有发生转变。

2.5 堆焊层的表面形貌和表面粗糙度

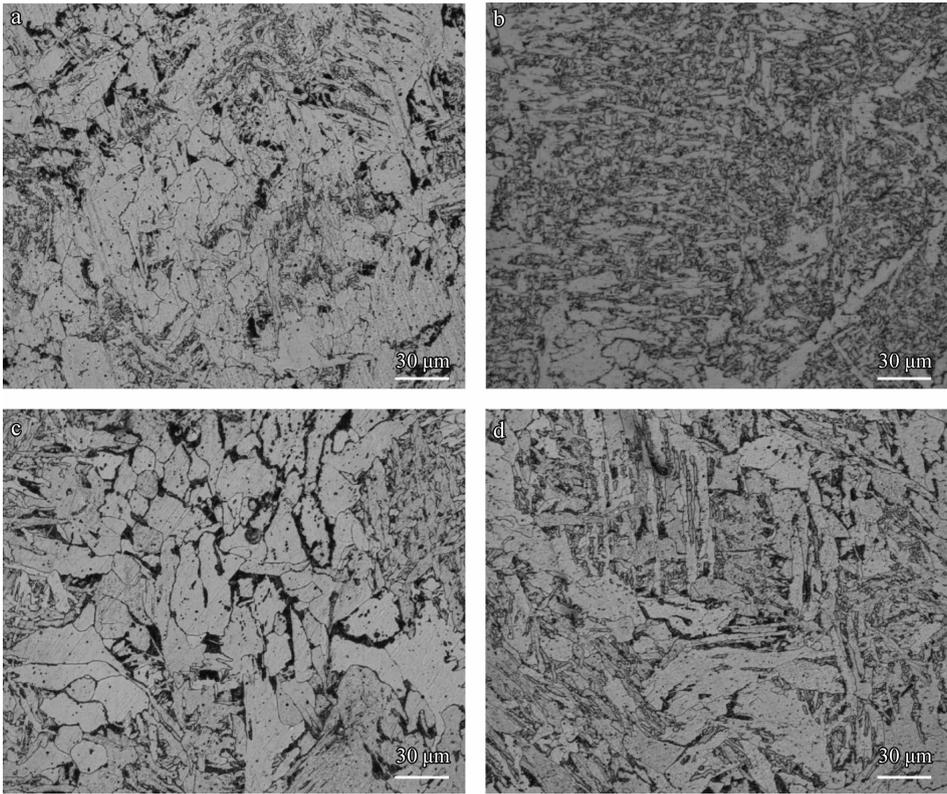
喷丸前后 H08Mn2Si 堆焊层的表面粗糙度和表面形貌分别如表4和图7所示。

表4 喷丸前后试样的表面粗糙度

Table 4 Roughness of unpeened and shot-peening specimens

No.	Ra/μm					Average/μm
0	1.66	1.98	1.58	1.77	1.97	1.79
1	9.86	8.65	9.31	8.99	10.90	9.54
2	6.66	6.45	6.84	6.77	6.73	6.89
3	8.99	8.66	9.83	8.58	8.99	8.44

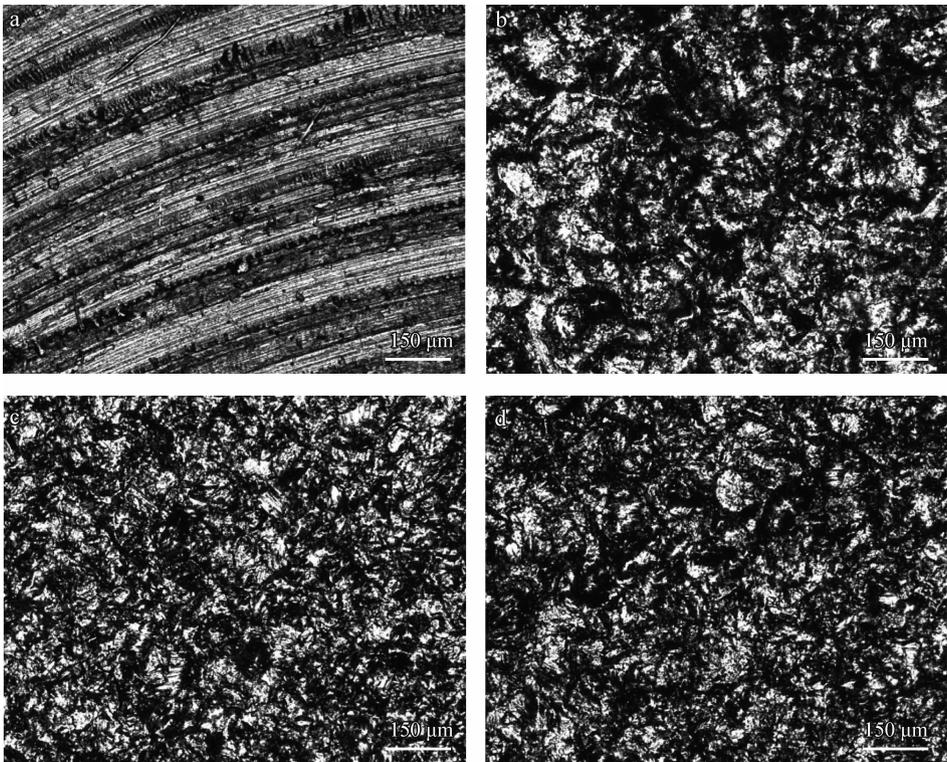
由图7可知,机械铣削后的 H08Mn2Si 堆焊层试样表面存在明显的加工刀痕,犁沟分布不均匀且深浅不一,利用 OLYMPUS 三维形貌仪随机在表面取 5 条线,测其表面粗糙度,平均值为 1.79 μm;喷丸处理后的 H08Mn2Si 堆焊层试样表面由于弹丸冲击,产生了塑性变形,其表面的铣削刀痕已难以辨认,形成了大小不一的凹坑,测得试样1、2和3的粗糙度平均值分别为 9.54、6.89 和 8.44 μm。上述结果表明,对于 H08Mn2Si 堆焊层这类硬度比较低,塑性变形难度比较小的材料,喷丸强化可以清除铣削的加工刀痕,但会形成凹坑,相对粗糙度会增大。同时,对比1号和2号试样,发现在气体压力和处理时间相同的条件下,丸粒的直径越大,H08Mn2Si 堆焊层的粗糙度越大。对比1号和3号试样发现,经过小直径的二次喷丸后,H08Mn2Si 堆焊层的粗糙度降低。所以,3号试样的工艺要优于1号和2号试样的工艺。一方面,喷丸强化会增加机械零件的表面粗糙度,而机械零件的表面粗糙度会对耐磨性、抗腐



(a) No. 0 (b) No. 1 (c) No. 2 (d) No. 3

图 6 喷丸前后试样表面的微观组织

Fig. 6 Microstructure of unpeened and shot-peening specimens



(a) No. 0 (b) No. 1 (c) No. 2 (d) No. 3

图 7 喷丸前后试样表面的形貌

Fig. 7 Surface morphologies of unpeened and shot-peening specimens

蚀性、疲劳强度、密封性、精度和接触刚度等使用性能产生很大的影响^[10];另一方面,喷丸强化会改善机械零件的残余应力场,提高机械零件的硬度。所以,在针对具体机械零件的时候,要综合考虑残余应力场和表面粗糙度两方面的影响。

3 结 论

(1) H08Mn2Si 堆焊层在喷丸强化后,形成的弹塑性强化层厚度约为 550 μm ,最大残余压应力为 -498 MPa,且喷丸强度越大,残余压应力值越大,深度也更深。应力强化可以有效抑制疲劳裂纹的萌生和扩展,从而提高 H08Mn2Si 堆焊层的接触疲劳寿命。

(2) H08Mn2Si 堆焊层在喷丸强化后,堆焊层表层的硬度有所提高,且喷丸强度越大,堆焊层表面的硬度越大。H08Mn2Si 堆焊层表面的铁素体组织未发生明显变化。

(3) H08Mn2Si 堆焊层在喷丸强化后,会消除铣削的加工刀痕,但会形成明显凹坑,表面粗糙度增大明显。在气体压力和喷丸时间条件相同的情况下,丸粒的直径越大,表面粗糙度越大。在经过小粒径二次喷丸后,表面粗糙度有所降低。故在使用喷丸强化时,要具体考虑机械零件的用途。

参考文献

- [1] 张定栓,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,1999:11-12.
- [2] 栾卫志. TiB₂/Al 复合材料喷丸强化及其表征研究 [D]. 上海:上海交通大学,2009.
- [3] 方博武. 受控喷丸与残余应力理论 [M]. 山东:山东科学技术出版社,1991,9:1-15.
- [4] 徐滨士,韩文政,姜厚温. 立竿见影的喷丸强化技术 [J]. 中国表面工程,2000,6(3):46-48.
- [5] 李金桂,吴再思. 防腐蚀表面工程技术 [M]. 北京:化学工业出版社,2003,5(1):71-75.
- [6] 徐滨士,等. 表面工程的理论与技术 [M]. 北京:国防工业出版社,1999:232-240.
- [7] 王东锋,汪定江,冯春晓. 激光冲击喷丸对 LY12 合金疲劳寿命的影响 [J]. 热加工工艺,2006,5(18):35-37.
- [8] 陈勃,高玉魁,吴学仁,等. 喷丸强化 7475-T7351 铝合金的小裂纹行为和寿命预测 [J]. 航空学报,2010,4(3):372-379.
- [9] 阎光明,杨巧凤. 0Cr15Ni7Mo2Al 不锈钢铣削加工硬化研究 [J]. 石油矿场机械,2008,37(12):60-62.
- [10] 朱晨. 17Cr2Ni2Mo 钢喷丸强化研究 [D]. 上海:上海交通大学,2011.

作者地址:北京丰台区长辛店杜家坎 21 号 100072
 装甲兵工程学院研究生三队
 电话:(010) 6671 7650
 E-mail: wanpanbing@163.com

• 学术动态 •

2013 世界再制造峰会将在上海举行

2013 世界再制造峰会将于 12 月 2~4 日在上海举行,此次峰会由中国再制造技术国家重点实验室、德国拜罗伊特大学及美国 RIT 携手举办。峰会主题为:"Partnering Industry & Science, Bridging Today & Tomorrow"(联结再制造产业与科学,构筑再制造今天与明天)。会议为期 3 天,12 月 2 日全体参会代表注册,3~4 日为再制造国际学术会议。峰会语言均为英语,届时将提供同声传译。

为了促进工业与科学的结合,构建国际再制造的今天与明天,此次峰会将邀请德国拜罗伊特大学的 Rolf Steinhilper 教授、美国 RIT 的 Nabil Nasrof 博士、中国再制造技术国家重点实验室的徐滨士院士和朱胜教授等国际再制造领域权威专家,以及卡特彼勒公司、博世公司等世界知名企业代表。大会将交流再制造领域的最新研究成果,探讨再制造领域的创新热点问题,分析再制造产业的发展形势。届时中国国家发展和改革委员会的专家将为参会代表解读中国再制造行业的最新法律法规。

(郭伟玲 供稿)