

文章编号:1673-2812(2017)05-0719-06

激光淬火功率对45#钢抗植物磨料磨损性能的影响

万芳新¹, 黄晓鹏¹, 吴劲锋¹, 黄建龙², 张克平¹

(1. 甘肃农业大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学机电学院, 甘肃 兰州 730070)

【摘要】 本文以苜蓿草粉为典型植物磨料, 系统研究了激光淬火功率对45#钢抗植物磨料磨损性能的影响。试验结果表明: 在实验条件下, 材料表面硬度最大值可达679HV, 材料硬度最大值在距表面0.2~0.4mm之间; 激光淬火后的45#钢抗植物磨料磨损性能远高于未经激光处理的试件。激光功率对材料硬度和耐磨性的影响趋势并不完全一致, 耐磨性最好的试件硬度并非最高; 植物磨料对激光淬火后的45#钢的磨损机理主要为显微切削, 与未经激光淬火的试件相比, 激光淬火后的45#钢表面犁削深度明显浅而窄, 但当激光功率降至1750W时, 塑变疲劳和碳化物剥落明显增加。研究结论可为农业机械金属材料的耐磨性设计提供依据。

【关键词】 激光淬火; 功率; 45#钢; 植物磨料; 磨损性能

中图分类号: S817.12; TH117.3 文献标识码: A DOI: 10.14136/j.cnki.issn.1673-2812.2017.05.007

Effect of Laser Quenching Power on Wear Behavior of 45# Steel Against Plant Abrasive

WAN Fangxin¹, HUANG Xiaopeng¹, WU Jingfeng¹, HUANG Jianlong², ZHANG Keping¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. College of Mechanical and Electromechanical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

【Abstract】 Taking the alfalfa grass powder as the typical plant abrasive, the effect of laser quenching power on wear behavior of 45# steel against plant abrasive is studied systematically. The result shows that under the laboratory conditions, the maximum hardness of the material reaches 679HV, and the maximum hardness is located in 0.2-0.4mm beneath the surface of the material. Wear properties of the 45# steel after laser quenching against the plant abrasive outclass the sample of non-laser quenching. There is no consistent impact tendency of laser power between the hardness and wear resistance, and the sample which has the best wear resistance doesn't have the best hardness. Wear mechanism of 45# steel after laser quenching against plant abrasive is mainly micro-cutting. Compared with the sample of non-laser quenching, the surface plough depth of the laser quenched sample is shallower and narrower. When the laser power is decreased to 1750W, fatigue of plastic deformation and spalling of carbides of the quenched material are increased significantly. The research can provide a theoretical basis for the durability design of agricultural machinery materials.

【Key words】 laser quenching; power; 45# steel; plant abrasive; wear properties

植物磨料是一种软磨料, 对金属的磨损属于磨料磨损。植物磨料对金属材料的磨损广泛存在于农业机械、农产品加工、食品加工等行业, 例如联合收割机割

1 引言

收稿日期: 2016-03-16; 修订日期: 2016-06-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51365002, 51065001), 甘肃省自然科学基金资助项目(1506RJZA138), 甘肃农业大学青年导师基金资助项目(GAU-QNDS-201204)

作者简介: 万芳新(1976-), 女, 副教授, 硕士生导师, 硕士, 从事农业机械装备与材料摩擦磨损的研究, E-mail: wanfx@gsau.edu.cn.

通讯作者: 黄晓鹏(1975-), 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 从事农业机械装备与材料摩擦磨损的研究, E-mail: huangxp@gsau.edu.cn.

台的磨损,农作物对耕作机械的磨损,制粒机、粉碎机、磨粉机、榨油机等关键部件的磨损失效^[1-6],它是影响相关行业机械使用寿命的主要原因之一,严重地制约了生产率和经济效益的提高。

为了提高农业机械抗植物磨料磨损的性能,研究人员采用常规热处理、化学热处理、热喷涂技术进行了一系列的试验研究,得到了一些有用的结论^[7-12]。激光淬火也称激光相变硬化,是激光强化工艺的一种,最终得到的金属材料组织比常规热淬火得到的组织更细小、位错密度高、固溶碳含量高,硬度亦显著高于常规淬火的硬度^[13]。激光相变强化提高材料耐磨性的研究在工业领域已经得到了广泛的应用^[14-17],而国内一些学者也将其应用于农机材料抗土壤磨粒磨损的研究中,试验结果发现,可以显著提高材料的耐磨性和使用寿命^[18-21]。

本文以农业机械常用材料 45# 钢为试验材料,对其进行激光淬火处理,通过湿砂橡胶轮磨损试验机的磨损性能试验,系统研究激光淬火功率对 45# 钢抗植物磨料磨损性能的影响,并分析其磨损机理。研究可为农业机械关键部件选材及热处理工艺的制订提供依据。

2 实验部分

2.1 试验材料与试验设备

试验设备:粉碎机、标准筛一套、电热鼓风干燥箱;DL-HL-T10000B 型高功率横流 CO₂ 激光器、HVS-1000 型数字显微硬度计、Neophot-21 型光学金相显微镜;MLS-225 型湿砂橡胶轮式磨料磨损试验机、精度为 0.1mg 的分析天平、JSM-5600LV 型扫描电子显微镜(SEM)。CO₂ 激光器系统简图如图 1 所示,最大额定功率为 10KW。

供试材料:植物磨料为甘农三号紫花苜蓿,金属材料为 45# 钢,试件规格为 57mm×24.5mm×6mm。

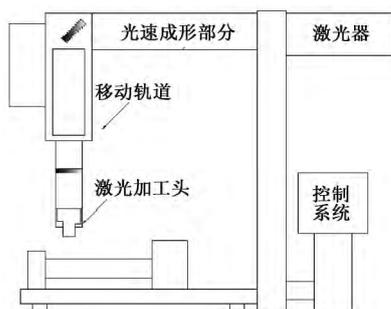


图 1 DL-HL-T10000B 型横流 CO₂ 激光器系统简图

Fig. 1 System sketch of DL-HL-T10000B type transverse CO₂ laser

2.2 试验方法与步骤

将苜蓿草粉经粉碎机粉碎,利用标准分级筛筛取 6mm 粒度的磨料。在电热鼓风干燥箱内 105℃ 下干燥 8h,待磨料温度降至室温后,进行配水实验,调配成含水率 6% 的磨料,存贮于黑塑料袋里。

在进行激光淬火之前,用碳素墨汁(加入适量石墨粉混合均匀)对 45# 钢试件进行表面预处理(黑化处理)。将试件放入丙酮溶液里在超声清洗机中清洗干净,然后在试件表面均匀涂抹一层碳素墨汁,以提高材料对激光的吸收率。利用 DL-HL-T10000B 型高功率横流 CO₂ 激光器,选定扫描速度为 20mm/s、光斑直径为 2mm,制备激光功率分别为 1750W、1900W、2050W、2200W 的 45# 钢激光淬火试件。采用 HVS-1000 型数字显微硬度计测量不同激光淬火功率下 45# 钢激光强化表面区和沿激光强化区深度方向的显微硬度,加载重量为 0.2kg,保压时间为 10s。采用 Neophot-21 型光学金相显微镜观测其金相组织。

在 MLS-225 型湿砂橡胶轮式磨料磨损试验机上,控制室温在 20℃ ~ 25℃,选取载荷 250N、转速 200r/min,每 10000r 为 1 磨程,总计 5 个磨程,进行植物磨料对不同激光淬火工艺 45# 钢的磨损试验。所有试样磨损试验前后浸入丙酮溶液进行超声清洗,采用精度为 0.1mg 的分析天平称重,磨损前后质量之差即为磨损失重,转换为磨损体积,获得其磨损率与磨损系数。每一试验条件下进行三次试验,取其平均值。磨损后金属试样用 JSM-5600LV 型扫描电镜(SEM)观察表面形貌,分析植物磨料对不同激光淬火工艺下 45# 钢的磨损机制,探讨激光淬火提高 45# 钢抗植物磨料磨损的机理。

磨损试验指标选取磨损率与磨损系数,分别通过式(1)、(2)获得^[22-23]。

$$Q = \frac{V}{d} \tag{1}$$

式中, Q 为磨损率, mm³/m; V 为体积磨损, mm³; d 为滑动距离, m。

$$k = \frac{Q}{W} \tag{2}$$

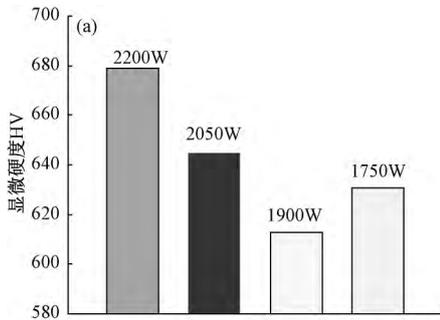
式中, k 为磨损系数, mm³/Nm; Q 为磨损率, mm³/m; W 为磨损试验施加载荷, N。

3 结果与讨论

3.1 显微硬度分析

图 2 为不同激光功率处理下 45# 钢的显微硬度图。在所选取的激光功率范围内,其表面平均显微硬度在

613HV~679HV 之间,是基体显微硬度 271HV 的 2.26~2.51 倍。激光强化提高材料表层显微硬度,是因为激光的快速加热及随后的快速冷却使奥氏体晶粒超细化,碳含量不均匀,导致发生了固态相变,得到的混合型马氏体具有较高的硬度和强度。由图 2(a)可知,随着激光功率的增加,试件表面显微硬度开始时略有减小,此后逐步升高。但是若激光功率过大,试样表面则会被熔化,形成粗大的马氏体结构,反而会使表面硬度下降。



由图 2(b)可知,硬度的最大值并不在试件表面,而是在距表面 0.2~0.4mm 之间。激光功率为 2200W 时,最大硬度在距表面 0.4mm 处,达到 730HV。激光硬化层的深度随激光功率的增大而增加,这是由于随着激光功率的增加,试件表面获得的能量增多,加热层的深度也增加,而在随后自冷过程中得到含马氏体的淬火组织,从沿深度方向硬度的分布曲线可以看出,激光淬硬层与基体之间有明显的过渡区与热影响区。

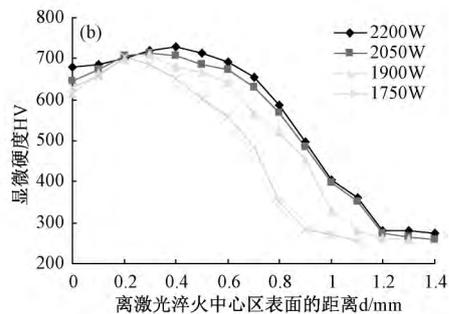


图 2 不同激光功率下 45# 钢的显微硬度 (a) 表面平均显微硬度; (b) 沿深度方向显微硬度的分布
Fig. 2 Microhardness of 45# under different laser power

3.2 磨损性能分析

图 3 为不同激光功率处理下 45# 钢的磨损率与磨损系数随滑动距离增加的变化曲线。图中可以看出,经过激光处理后的 45# 钢的耐磨性远远大于未经激光处理的 45# 钢。随着激光功率的提高,材料的耐磨性也有一定程度的提高,但当功率达到 2200W 时,其磨损率与磨损系数又有所增加。结合图 2 分析可知,激光功率对材料硬度及耐磨性的影响趋势并不是完全一致的。总体来看,经激光强化的材料,硬度高时其耐磨性也较高,材料的耐磨性与硬度不一致的原因是耐磨性还与材料的显微结构、晶粒大小及表面状态等因素有关。在试验所选激光功率范围内,耐磨性最好的是激光功率为 2050W 时处理的试件,而其表面显微硬度并非 4 种激光功率下最高的。从图中还可以看出,经激光处理后的各试件磨损率与磨损系数的变化趋势基本类似,均为近似线性,与未经激光处理试件明显不同的是磨损初期并无一个剧烈磨损期,只是在滑动距离超过 4000m 后,各试件磨损略有增加的趋势,而激光

功率为 2050W 的试件在整个磨损过程中的磨损率和磨损系数基本是稳定而缓慢增加的。

3.3 金相组织分析

图 4 为激光淬火后 45# 钢的金相组织照片。45# 钢的基体组织为珠光体+铁素体,如图 4(a)所示。在激光淬火过程中,受到温度梯度的影响,45# 钢从表面到内部的温度也由高到低各不相同,导致形成的组织形态也有很大的差异。图 4(b)为激光功率为 2200W 时的 45# 钢金相组织全貌。从图中可以看出,经激光淬火后,沿深度方向上硬化区域可分为三层,依次为过热区、相变硬化区和过渡区。

图 4(c)至 4(e)为不同区域的金相组织。如图 4(c)所示,过热区形成枝晶状马氏体和少量残余奥氏体,由于结晶速度快,使得枝状主干组织优先增长,且方向与分界线垂直。微细的偏析也得到很大发展,横截面的柱状晶体呈现等轴晶状的形貌,晶粒有许多小块区域组成。由于含碳量大于 0.3%,形成的马氏体的硬度远大于低碳钢过热区中形成的枝晶状马氏体的

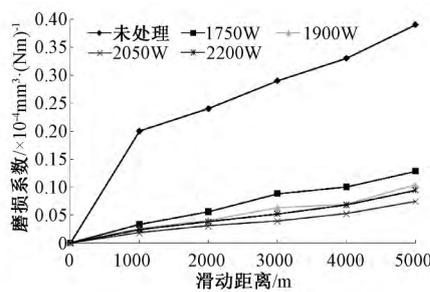
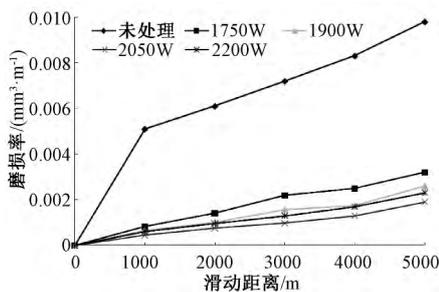


图 3 不同激光功率下的磨损率与磨损系数变化曲线图 (a) 磨损率; (b) 磨损系数

Fig. 3 Graphs of wear rate and wear coefficients under different laser power (a) Wear rate; (b) Wear coefficient

硬度。

相变硬化区的深度远大于过热区,此区域晶粒完全细化,如图4(d)所示。显微组织主要是隐晶马氏体,为亚结构位错型板条马氏体和孪晶马氏体的混合结构。此外,相变硬化区中,靠近过热区存在相对粗大的板条状和片状马氏体,随着深度的增加,马氏体逐渐变得细小和均匀,最终形成隐晶马氏体,这一变化趋势与沿硬化深度方向显微硬度逐渐增加的趋势相一致。

过渡区的组织如图4(e)所示,主要由混合马氏体、屈氏体和部分未熔的铁素体所组成。同时因为显微组织中具有组织遗传性,因此局部仍然保持有珠光

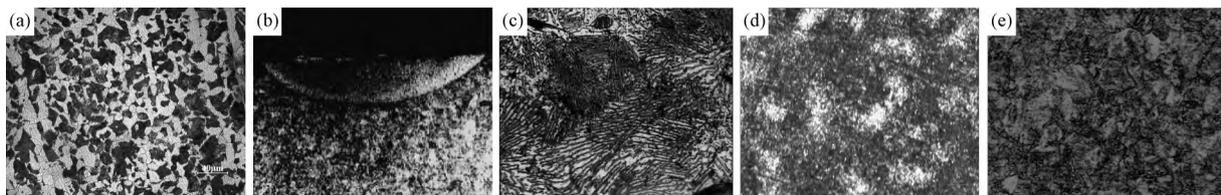


图4 激光淬火后45#钢的金相组织照片

(a) 45#钢基体组织; (b) 45#钢激光淬火后的金相全貌; (c) 表层过热相变区; (d) 相变硬化区; (e) 过渡区

Fig. 4 Microstructure of 45# steel by laser quenching (a) Matrix structure; (b) Metallograph panorama by laser quenching; (c) Surface overheating phase transformation region; (d) Phase transformation hardening region; (e) Transition region

3.4 磨损形貌分析

图5为苜蓿草粉对不同激光功率处理的45#钢试件的磨损形貌照片。从图5(a)中可以看出,未处理的45#钢试件的磨损表面有大量深而宽的犁沟,有明显的犁削现象,同时表面有塑变痕迹,并且已出现粘着磨损,其主导机制为显微切削+粘着磨损。而经激光处理后的试件其表面犁削深度相比未处理的试件明显变得浅而窄,这是由于激光强化提高了金属材料的表面硬度,从而降低了存在于植物磨料内部的硬质颗粒对材料表面的切削作用。由于激光相变硬化后显微组织发生明显细化,形成了枝晶状马氏体,马氏体位错密度很高。晶粒细化后,晶界数目增多,阻碍了疲劳裂纹的产生与扩展。此外,激光淬火过程中试件强化区表层产生的残余压应力也会阻碍金属材料的滑移和裂纹的产生,因此激光强化后的试件在交变应力下疲劳磨损程度也明显小于未经处理试件。

从图5(b)中可见,在激光功率为2200W时,试件磨损表面仅出现均匀且浅而窄的犁沟,而当激光功率降至1750W时,除了犁沟之外,还产生了少部分微裂纹与凿削形成的凹坑,这些微裂纹有可能是马氏体和奥氏体交界面的最大内应力所造成的^[24]。对比图2分析可知,激光功率为1750W时,试件的表面显微硬度和硬化层深度都明显小于2200W时,这可能是激光功率为1750W时,激光密度相对较小,表面温度低,珠光体中的碳未能完全溶解和扩散,从而不能完全产生

体的形态。由于存在温度梯度的影响,这一区域通常为不完全硬化区,加热温度在 $Ac_1 \sim Ac_3$ 范围之间^[13]。由于沿深度方向温度不同,导致相应的组织很不均匀,而硬度也明显低于过热区与相变硬化区,并逐步向基体硬度值过渡。

通过比较分析发现,激光淬火后45#钢的显微硬度与金相组织沿硬化层深度有一定的对应关系。表层过热区组织为晶粒较大的枝晶马氏体,硬度相对较低,而相变硬化层组织主要为晶粒细化的隐晶马氏体,硬度较高,过渡层则为不完全硬化层,组织为混合马氏体,硬度大幅下降。

马氏体,造成其硬度和耐磨性下降。同时,激光功率较小时,试样塑变疲劳和碳化物剥落现象明显增加。碳化物的脱落在摩擦力作用下会对材料产生挤压并产生塑性变形,形成孔洞和撕裂裂纹,从而加剧磨损。

45#钢经激光相变强化后,其表面硬度得到了极大的提高,且具备一定的硬化层深度,显著提高了基体的承载能力。由于植物磨料的硬度较低,经激光强化后磨料与被磨材料的硬度差异更大,原来磨料中硬质颗粒的显微切削及凿削作用被明显弱化了,同时磨料反复作用下因机械抛光去除的总量也大幅度下降,因此材料的耐磨性得到提高。

45#钢激光相变硬化后的组织主要为细小的位错马氏体和孪晶马氏体,板条马氏体位错密度很高,且还有一定量的残余奥氏体。晶粒细化的马氏体具有良好的机械性能,而高强韧性的奥氏体和细晶高碳马氏体对提高材料耐磨性能具有重要作用^[25-26]。晶粒细化后晶界会增多,疲劳裂纹扩展至晶界时被抑制,高密度位错不仅提高了45#钢的强度和硬度,还可以阻碍材料的滑移和疲劳裂纹核心的产生。同时位于板条马氏体间的残余奥氏体为一种韧性相,当裂纹扩展碰到韧性相时,由于韧性相发生塑性变形,会弛豫裂纹的应力集中,使裂纹钝化,且塑性变形消耗能量,也会使疲劳裂纹的扩展受到阻碍,因此使马氏体的疲劳强度得到提高,进而大幅度降低植物磨料对45#钢的疲劳磨损(塑变疲劳、粘着疲劳)。

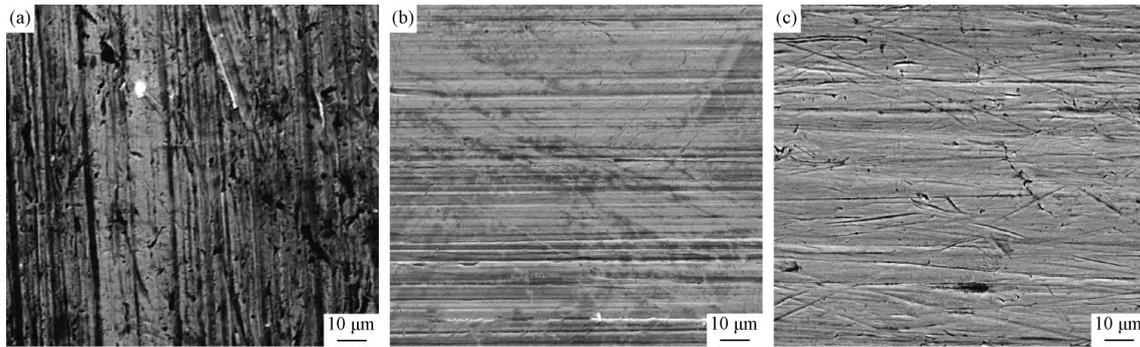


图 5 不同激光功率下的磨损形貌图 (a) 未处理; (b) 激光功率 2200W; (c) 激光功率 1750W

Fig. 5 SEM morphology of the abrasion surfaces of the 45# steel laser-quenched under different powers (a) Untreated; (b) 2200W; (c) 1750W

4 结 论

1. 对 45# 钢进行激光淬火处理,随着激光功率的增加,试件表面显微硬度开始时略有减小,此后逐步升高。激光淬火后,45# 钢硬度的最大值并不在试件表面,而是在距表面 0.2~0.4mm 之间。

2. 经激光淬火后,沿深度方向上硬化区域可分为三层,依次为过热区、相硬化区和过渡区。过热区形成枝晶状马氏体和少量残余奥氏体;相硬化区的深度远大于过热区,此区域晶粒完全细化,显微组织主要是隐晶马氏体;过渡区的组织主要由混合马氏体、屈氏体和部分未熔的铁素体所组成。

3. 经过激光处理后的 45# 钢的抗植物磨料磨损性能远大于未经激光处理的 45# 钢。激光功率对材料硬度及耐磨性的影响趋势并不完全一致。耐磨性最好的试件其硬度并非最高,但总体来看,硬度的增加对提高材料抗植物磨料磨损还是起到很大的作用。

4. 植物磨料磨损后,经激光处理后的试件表面犁削深度相比未处理的试件明显变得浅而窄,同时其疲劳磨损程度也明显小于未经处理试件。在激光功率较高时,磨损表面仅出现均匀且浅而窄的犁沟,反之,还会产生少部分微裂纹与凿削形成的凹坑。

参 考 文 献

- [1] 关凯书,张美华. 颗粒饲料机压模的磨损失效分析及耐磨材料研究[J]. 润滑与密封, 1995, 20(5): 49~54.
- [2] 吴劲锋,黄建龙,等. 苜蓿草颗粒制粒环模磨损失效分析与磨料磨损试验研究[J]. 中国农机化, 2007, 27(4): 83~86.
- [3] 霍丽丽,侯书林,田宜水. 生物质固体燃料成型机压辊磨损失效分析[J]. 农业工程学报, 2010, 27(7): 103~106.
- [4] 包那日那. 粉碎机锤片磨损机理分析及粉碎性能试验研究[J]. 农机化研究, 2011, (11): 153~156
- [5] 赵博彦,徐克明,田志兴. 磨粉机轧辊失效机理及提高使用寿命的途径[J]. 沈阳工业大学学报, 1987, (2): 26~29.
- [6] 皮亚南. 关于螺旋榨油机的磨损问题[J]. 中国油脂, 1991, (6): 46~50.
- [7] Zheng Yun-ling, Dennis P Wiesenborn, Kristi Tostenson, et al. Screw Pressing of Whole and Dehulled Flaxseed for Organic Oil [J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 2003, 80 (10): 1039~1045.
- [8] 张炜,吴劲锋,黄晓鹏,王芳. 农业纤维物料对 9SiCr 钢磨损性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(10): 105~109.
- [9] 邱孟轲,黄晓鹏,回振龙,等. 40Cr 钢离子氮化与离子镀 TiN 复合涂层与苜蓿草粉之间的摩擦学特性[J]. 材料科学与工程学报, 2013, 31(3): 441~445.
- [10] 万芳新,吴劲锋,等. 40Cr 热喷涂涂层抗植物磨料磨损性能试验 [J]. 材料科学与工程学报, 2016, 34(2): 269~273.
- [11] Aluko O B, Oluwadare G O, Ola I A, Makanjuola G A. Rapid Comparative Wear Evaluation of Oil seed Screw Press Maintenance Materials in Nigeria [J]. Journal of Food Engineering, 2003, 59:111~116.
- [12] 肖磊,马跃进,赵建国,曲平,张印勇. 离子喷涂改善秸秆压块机模块耐磨性的研究[J]. 表面技术, 2012, 41(3): 87~93.
- [13] 张麟,刘学进,李栋. 低温螺旋榨油机榨螺表面爆炸喷涂涂层技术[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 113~117.
- [14] 关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 2005, 9.
- [15] Roy A, Manna I. Laser Surface Engineering to Improve Wear Resistance of Austempered Ductile Iron[J]. Materials Science and Engineering, 2001, A293: 85~93.
- [16] Nelea V, Pelletier H. Mechanical Properties Improvement of Pulsed laser-deposited Hydroxyapatite Thin Films by High Energy Ion-beam Implantation [J]. Applied Surface Science, 2002, 186: 483~489.
- [17] Xue Y, Wang H M. Microstructure and Wear Properties of Laser Clad TiCo/Ti₂Co Intermetallic Coatings on Titanium Alloy [J]. Applied Surface Science, 2005, (243): 278~286.
- [18] 任露泉,王再宙,韩志武. 激光处理非光滑凹坑表面耐磨试验的均匀设计研究[J]. 材料科学与工程学报, 2002, 20(2): 214~216
- [19] 凌刚,李德玉,徐杨,等. 农机用 65Mn 钢激光表面处理后的组织与性能[J]. 中国农业大学学报, 1996, 1(6): 62~65.
- [20] 花银群,杨继昌,张永康,等. 激光复合强化提高球铁耐磨性能的实验研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(1): 146~149.
- [21] 陈卓君,张祖立,李柏姝,等. 旋耕刀表面激光强化工艺参数研究[J]. 润滑与密封, 2009, 34(1): 63~66.

(下转第 854 页)

- (109): 07A939.
- [32] Saha R, Nigam A K. Room Temperature Inverse Magnetocaloric Effect in Pdsubstituted $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{37}\text{Sn}_{13}$ Heusler Alloys[J]. *Physics B: Condensed Matter*, 2014, 448:263~266.
- [33] J. Liu, Moore J D, Skokov K P, et al. Exploring $\text{La}(\text{Fe},\text{Si})_{13}$ -Based Magnetic Refrigerants towards Application [J]. *Scr. Mater.*, 2012, 67(6):584.
- [34] O. Gutfleisch, K H. Muller. Large Magnetocaloric Effect in Melt-Spun $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ [J]. *Appl. Phys*, 2005, 97(10): 305.
- [35] B. G. Shen, J. R. Sun, F. X. Hu. Recent Progress in Exploring Magnetocaloric Materials[J]. *Advanced Materials*, 2009, 21(45): 4545~4564.
- [36] B. Bao, Y. Long, B. Fu. The Study on the Microstructure and the Magnetocaloric Effects in $\text{LaFe}_{10.8}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.5}\text{C}_{0.2}$ Compound at Different Annealing Times[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107: 09A905.
- [37] T. Palstra, J. Mydosh, G. Nieuwenhuys, et al. Study of the Critical Behaviour of the Magnetization and Electrical Resistivity in Cubic $\text{La}(\text{Fe},\text{Si})_{13}$ Compounds[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1983,36(3): 290~296.
- [38] F. X. Hu, B. G. Shen, J. R. Sun, X. X. Zhang. Great Magnetic Entropy Change in $\text{La}(\text{Fe}, \text{M})_{13}$ (M=Si, Al) with Co Doping[J]. *Chinese Physics*, 2000, 9(7): 550.
- [39] F. X. Hu, B. G. Shen, J. R. Sun. Very Large Magnetic Entropy Change Near Room Temperature in $\text{LaFe}_{11.2}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$ [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(5): 826~828.
- [40] J. Shen, Y. X. Li, F. X. Hu, et al. Effect of Substitution of Co for Fe on the Magnetic Hysteresis Loss and the Refrigerant Capacity in the $\text{La}_{0.5}\text{Pr}_{0.5}\text{Fe}_{11.5}\text{Si}_{1.5}$ Compounds [J]. *Appl. Phys*, 2009, 105(7): 07A901.
- [41] M. Balli, D. Fruchart, D. Gignoux. Optimization of $\text{La}(\text{FeCo})_{13-x}\text{Si}_x$ based Compounds for Magnetic Refrigeration[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2007, 19(23): 236230.
- [42] F. Wang, Y. F. Chen, G. J. Wang, et al. Spin-Glass Behavior In $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_{11.4}\text{Si}_{1.6}$ Compounds [J]. *Phys. Rev. B*, 2004, 69(9): 094424.
- [43] A. Yang, K. H. MÜLLER, O. Gutfleisch. Magnetocaloric Effect in $\text{LaFe}_{11.8-x}\text{Co}_x\text{Si}_{1.2}$ Melt-Spun Ribbons[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 450(1): 18~21.
- [44] X. Liu, Z. Altounian. Phase Formation and Magnetocaloric Effect in Rapidly $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)$ [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(11): 113904.

~~~~~

(上接第 723 页)

- [22] 陈卓君, 张祖立. 激光硬化 9SiCr 表面土壤磨损研究[J]. *摩擦学学报*, 2011, 31(1): 83~87.
- [23] Wirojanupatump S, Shipway P H. A Direct Comparison of Wet and Dry Abrasion Behaviour of Mild Steel [J]. *Wear*, 1999, 233~235: 655~665.
- [24] Wirojanupatump S, Shipway P H. Abrasion of Mild Steel in Wet and Dry Conditions with the Rubber and Steel Wheel Abrasion Apparatus[J]. *Wear*, 2000, 239: 91~101.
- [25] Sagaro R, Ceballos J S, Mascarell J, Mascarell J. Tribological Behaviour of Line Hardening of Steel U13A with Nd:YAG Laser [J]. *Revista de Metalurgia (Madrid)*, 1999, 35 (3): 166~172.
- [26] Ouyang Jiahu, Li Xiadong, Pei Yutao. Structure and Properties of Laser Quenched 4Cr13 Steel[J]. *Chinese Journal of Laser*, 1993, B2 (5): 475~480.
- [27] Hua Yinqun, Chen Ruifang, Yang Jichang, et al. Study on Experiments and Mechanism of 40Cr Steel Surface by Laser Compound Processing [J]. *Chinese Journal Lasers*, 2005, 32 (10): 1445~1448.

~~~~~

(上接第 830 页)

- [18] M. S. Bono Jr, A. M. Anderson, M. K. Carroll. Alumina Aerogels Prepared Via Rapid Supercritical Extraction [J]. *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, 2010, 53(2): 216~226.
- [19] K. Maaz, S. Karim, A. Mumtaz, et al. Synthesis and Magnetic Characterization of Nickel Ferrite Nanoparticles Prepared By Co-Precipitation Route [J]. *J. Magn. Mater.*, 2009, 321 (12): 1838~1842.
- [20] C. R. Bhattacharjee, D. D. Purkayastha, S. Bhattacharjee, et al. Homogeneous Chemical Precipitation Route to Zn Nanosphericals [J]. *Phys. Sci. Technol.*, 2011, 7(2): 122~127.
- [21] M. M. Xing, W. H. Cao, H. Y. Zhong, et al. Synthesis and Upconversion Luminescence Properties of Monodisperse Y_2O_3 : Yb, Ho Spherical Particles [J]. *J. Alloys Compd.*, 2011, 509 (19):5725~5730.
- [22] K. Petcharoena, A. Sirivat. Synthesis and Characterization of Magnetite Nanoparticles Via the Chemical Co-Precipitation Method [J]. *Mater. Sci. Eng., B*, 2012, 177(5): 421~427.
- [23] 周曦亚, 欧阳世翕, 程吉平. 液相共沉淀法制 Al_2O_3 超细粉过程及防团聚措施 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 1996, 24(7): 78~82.
- [24] 宋晓岚, 邓冠周, 等. 高纯活性纳米 γ 型氧化铝的化学沉淀法合成及其性能表征 [J]. *材料导报*, 2004, 18(8): 64~67.
- [25] 王柳燕, 张宁. 超细 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 粉体化学沉淀法的合成及表征 [J]. *粉末冶金技术*, 2014, 32(1): 23~29.
- [26] M. D. Sacks, T. Y. Tseng, S. Y. Lee. Thermal Decomposition of Spherical Hydrated Basic Aluminium Sulfate [J]. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 1984, 63(2), 301~310.
- [27] S. A. Hassanzadeh-Tabrizi, E. Taheri-Nassaj. Economical Synthesis of Al_2O_3 Nanopowder Using A Precipitation Method [J]. *Mater. Lett.*, 2009, 63(27): 2274~2276.
- [28] E. Matijevic. Monodispersed Metal (Hydrous) Oxides - A Fascinating Field of Colloid Science [J]. *Acc. Chem. Res.*, 1981, 14(1): 22~29.