

崔永婷, 张克平, 孙步功, 等. 激光淬火工艺对小麦磨粉机磨辊表面硬度及磨损性能的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(2): 126-132.
CUI Yongting, ZHANG Keping, SUN Bugong, et al. Effect of laser quenching process on surface hardness and wear performance of wheat grinder roller[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(2): 126-132.

激光淬火工艺对小麦磨粉机磨辊表面 硬度及磨损性能的影响

崔永婷, 张克平, 孙步功, 李小龙
(甘肃农业大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:【目的】研究激光淬火后小麦磨粉机磨辊表面材料性能变化, 解决磨辊磨损严重、使用寿命较短等问题。【方法】采用响应曲面的旋转二次组合设计原理, 按照 3 因素 5 水平试验方法建立激光功率、光斑直径、扫描速度与磨辊材料表面硬度的数学模型, 分析激光功率、光斑直径与扫描速度 3 因素及各因素间的交互作用对磨辊金属材料表面硬度的影响规律, 找出最优的参数组合, 探讨淬火后磨辊表面材料的磨损机理。【结果】激光功率、光斑直径与扫描速度对磨辊材料表面硬度影响显著; 激光功率、光斑直径和扫描速度对磨辊材料表面硬度的影响依次由强到弱; 最优工艺参数组合为激光功率 190 W、光斑直径 0.70 mm、扫描速度 220 mm/s, 该参数组合下得到的试样表面硬度为 688.67 HV, 比原始硬度提升了 35%; 经激光淬火最优参数组合处理的试样磨损质量损失约为未处理试样的 7%; 经激光淬火后的磨辊表面材料与小麦粉料间的摩擦磨损作用减弱, 小麦粉料在试样表面产生的划痕较轻轻短, 沟槽更加浅窄。【结论】磨辊表面材料经激光淬火处理后其抗小麦粉料磨损性能明显增强。

关键词: 小麦磨粉机; 磨辊; 响应曲面试验; 激光淬火; 硬度; 磨损性能
中图分类号: TH117.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2020)02-0126-07

Effect of laser quenching process on surface hardness and wear performance of wheat grinder roller

CUI Yongting, ZHANG Keping, SUN Bugong, LI Xiaolong
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: 【Objective】To study properties of surface material of wheat grinder roller after laser quenching, and solve the problems of grinding roller such as serious wear and short service life. 【Method】Using the principle of rotating combination design of response surface, a mathematical model of laser power, spot diameter and scanning speed with surface hardness of grinding roller material was established according to three-factor and five-level test method. The effects of laser power, scanning speed, spot diameter and reciprocal action among three factors on grinding roller surface hardness were analyzed. The optimal parameter combination was obtained. The wear mechanism of surface material of the grinding roller after quenching was investigated. 【Result】Laser power, spot diameter and scanning speed significantly affected surface hardness of grinding roller material. The effects of laser power, spot diameter and scanning speed on surface hardness of grinding roller material weakened successively. The optimal technological parameter combination was laser power 190 W, spot diameter 0.70 mm and scanning

speed 220 mm/s and the sample surface hardness obtained was 688.67 HV, which was 35% higher than original hardness. The mass loss of sample treated by optimal laser quenching parameter combination in wear process was about 7% of the untreated sample. The friction between grinding roller surface material and wheat powder material after laser quenching weakened. The scratches of wheat powder material on sample surface were lighter and shorter. The grooves were shallower and narrower. 【Conclusion】 The wear resistance against wheat powder material of grinding roller surface material is obviously enhanced after laser quenching treatment.

Key words: wheat mill; grinding roller; response surface test; laser quenching; hardness; wear property

小麦是仅次于大米的主要粮食作物,是人类生活中不可缺少的食物,通常利用制粉设备加工成面粉,制作成面包、面条等各种面食供人类食用。全世界每年需要加工制粉的谷物有 20 多亿 t,其中小麦大约有 6 亿 t^[1]。辊式磨粉机是加工面粉的主要设备,其工作原理是通过 1 对水平排列并以不同角速度高速相向旋转的圆柱形磨辊,对小麦粉料施加挤压、剪切、摩擦等方式的载荷,将物料颗粒压碎、研磨成细粉,制成各种不同用途的成品面粉^[2-3]。

磨辊是辊式磨粉机的核心部件,其内层材料以灰口铁为主,外层抗磨部分主要为白口铁。制粉过程中其与小麦粉料剧烈摩擦,产生磨料磨损现象,造成磨辊表面原有的形态发生变化,如齿辊的齿部钝化、光辊表面粗糙度降低。当磨辊磨损达到一定程度后,磨粉机出粉率与生产效率都会明显降低,需重新做磨光拉丝或喷砂处理^[4-6]。磨辊磨损问题已经成为制约辊式磨粉机发展和应用的瓶颈,提高磨辊表面耐磨性能是目前制粉行业急需解决的难题。因此,磨辊金属材料的耐磨性是非常重要的性能,金属材料的耐磨性与表面硬度之间存在相应的关系,一般情况下,同类材料硬度增大则耐磨性提高,因此可以通过表面硬度间接反映材料的耐磨性^[7-8]。

激光表面淬火是强化材料表面硬度的一种热处理方法^[9-10],该技术解决了许多普通热处理工艺无法解决的难题,广泛用于汽车、冶金、模具、五金、轻工、机械制造等行业^[11-17]。有学者研究了激光淬火工艺参数对 HT210、模具钢 718 等材料淬硬层深度及表面硬度的影响^[18-21],发现获得高而均匀的硬度是提高铸铁材料耐磨性的关键。本研究拟利用响应曲面方法设计激光淬火试验,探究激光淬火工艺参数对磨辊表面金属材料硬度的影响规律,并确定最优工艺参数组合,探讨经激光淬火处理后磨辊表面金属材料的性能变化和磨损机理。

1 材料与方法

1.1 材料

试验材料为低铬白口铁,尺寸为 57 mm×25.5 mm×6 mm,表面机械研磨抛光,其化学成分质量分数如下: C 2.6%~3.2%、Si 低于 0.8%、Mn 1.0%~2.5%、Cr 2.0%~3.0%、Mo 2.0%~3.0%、Cu 2.0%~3.0%。

磨损试验中使用的磨料为甘肃产‘西早 1 号’小麦籽粒,自然风干后经破碎、筛分及匀化处理制备粒度分布为 0.5~1.5 mm 的小麦粉料。小麦粉料不同成分质量分数为:淀粉 71.8%、粗蛋白 12.9%、水分 9.8%、脂肪 2.2%、粗纤维 1.7%、粗灰分 1.6%。

1.2 试验设备

1.2.1 激光淬火试验 使用额定功率 200 W,波长 1 070 nm 的光纤激光器,工作频率 40 Hz,脉宽 20 ms。

1.2.2 硬度测定试验与金相组织试验 硬度测定采用莱州华银公司生产的 HVS-1000 型数显显微硬度计,施加载荷 100 g,加载时间 10 s。每组试样硬度测定试验重复 3 次,取 3 次测量值的平均值。采用 MR5000 型倒置金相显微镜(南京江南永新光学公司生产)检验试样金相组织。

1.2.3 磨损试验 采用 MLS-225 型橡胶轮式磨损试验机(张家口市宣化科华试验机制造有限公司生产)进行三体磨料磨损试验,采用精度为 0.1 mg 的分析天平称量试样磨损前后的质量损失,采用扫描电子显微镜(东莞市天测光学设备有限公司生产)观察试样被磨面的表面微观形貌。

1.3 试验方法

1.3.1 激光淬火试验 试样编号为 1~20,分别进行不同工艺参数的激光表面淬火热处理,表面淬火区域的淬火扫描点呈线性排列在试样表面,如图 1,淬火面积为 30 mm×18 mm。在进行激光淬火试验前,将试样置入丙酮溶液中,放入清洗机清洗 6 min,用碳素吸光涂料对试样作黑化处理,提高材料对激光的吸收率。完成激光淬火试验后,将试样沿着与激光扫描垂直的方向切开,用硬度计测量硬度值。



图 1 激光淬火试样

Fig. 1 Laser quenching sample

1.3.2 响应曲面试验设计 通过前期单因素激光淬火试验筛选,影响磨辊表面硬度的因素主要是激光功率、光斑直径和扫描速度。根据中心复合的旋转组合设计原理,以激光功率(A)、光斑直径(B)、扫描速度(C)为试验影响因素,以硬度(R)作为响应指标,采用3因素5水平试验。各试验因素水平如表1所示。

1.3.3 磨损试验 在三体磨料磨损试验前,磨损试验机的参数设定如下:转速400 r/min,压力225 N,轧距0.15 mm。选用硬度为60邵尔的橡胶轮,在室温条件下分别对未经激光淬火处理、经激光淬火最优工艺参数组合处理的2组试样进行为期2 h的抗

表 1 因素水平表
Table 1 Factor-level table

水平 Level	激光功率/W Laser power	光斑直径/mm Spot diameter	扫描速度/(mm·s ⁻¹) Scanning speed
-1.682	163	0.53	166
-1	170	0.60	200
0	180	0.70	250
+1	190	0.80	300
+1.682	197	0.87	334

小麦粉料磨损试验,共计5个磨损周期,即总磨程为10 h。将试样磨损前后的质量损失作为评价指标,每组试样磨损试验重复3次,取3次测量值的平均值作为分析数据。

1.4 数据统计与分析

采用 Design-expert 8.0.6 对数据进行统计分析;用 Origin 8.0 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 激光淬火试验

响应面各因素试验设计与结果如表2所示。使

表 2 试验设计与结果
Table 2 Experiment design and result

试样编号 Sample number	因素 Factor			硬度/HV Hardness
	激光功率 Laser power	光斑直径 Spot diameter	扫描速度 Scanning speed	
1	-1	-1	-1	545.36
2	1	-1	-1	600.13
3	-1	1	-1	520.86
4	1	1	-1	637.81
5	-1	-1	1	530.77
6	1	-1	1	515.00
7	-1	1	1	592.02
8	1	1	1	560.35
9	-1.682	0	0	532.10
10	+1.682	0	0	695.13
11	0	-1.682	0	534.76
12	0	+1.682	0	658.30
13	0	0	-1.682	627.76
14	0	0	+1.682	521.55
15	0	0	0	644.24
16	0	0	0	680.32
17	0	0	0	659.18
18	0	0	0	663.26
19	0	0	0	687.08
20	0	0	0	631.29

用 Design-expert 8.0.6 软件分析试验结果, 得到各因素与响应值 R 的二次回归方程:

$$R = 661.80 + 29.18A + 23.98B - 20.84C + 5.79AB - 27.39AC + 11.68BC - 22.66A^2 - 28.70B^2 - 36.43C^2。$$

对回归方程进行方差分析和回归系数显著性检验,结果见表 3。回归模型 $P<0.01$,表明回归模型中各因素与响应值的相关性是显著的。其中模型的一次项 A (激光功率)、 B (光斑直径) 与 C (扫描速

度) 对磨辊材料表面硬度影响显著 ($P<0.05$); 二次项 B^2 、 C^2 对磨辊材料表面硬度影响极显著 ($P<0.01$), A^2 影响显著 ($P<0.05$); 交互项 AC 对磨辊材料表面硬度影响显著 ($P<0.05$), AB 与 BC 影响均不显著 ($P>0.05$)。根据模型各因素回归系数和 P 值大小, 得到影响磨辊材料表面硬度的各因素依次为激光功率、光斑直径、扫描速度。模型的复相关系数为 0.846 8, 模型的校正决定系数 R_{adj}^2 为 0.708 9, 试验误差小, 可以用于硬度的预测。

表 3 方差分析表¹⁾
Table 3 Variance analysis table

变异来源 Variance source	SS	DF	MS	F	P
模型 Model	65 184.71	9	7 242.75	6.14	0.004 5
A	11 625.85	1	11 625.85	9.86	0.010 5
B	7 855.99	1	7 855.99	6.66	0.027 4
C	5 932.68	1	5 932.68	5.03	0.048 8
AB	267.73	1	267.73	0.23	0.644 0
AC	6 003.89	1	6 003.89	5.09	0.047 7
BC	1 090.91	1	1 090.91	0.93	0.358 8
A^2	7 396.70	1	7 396.70	6.27	0.031 2
B^2	11 866.84	1	11 866.84	10.06	0.010 0
C^2	19 125.48	1	19 125.48	16.22	0.002 4
残差 Residual	11 792.58	10	1 179.26		
失拟项 Lack of fit	9 567.22	5	1 913.44	4.30	0.067 7
纯误差 Pure error	2 225.36	5	445.07		
总计 Total	76 977.29	19			

1) A 、 B 、 C 分别为激光功率、光斑直径、扫描速度
1) A , B and C indicated laser power, spot diameter and scanning speed, respectively

2.2 淬火工艺参数交互作用分析

为了考察各因素及其交互作用对磨辊材料表面硬度的影响,采用 Design-expert 8.0.6 软件得到了各因素间的响应曲面图和等高线图,如图 2~4 所示。各因素间交互作用的显著性取决于响应曲面的陡峭程度。响应曲面坡度越陡,说明该因素对响应值的影响越显著。当等高线的形状为椭圆形时,线密度大,表明因素间交互作用对硬度影响显著;等高线的形状为圆形或近似圆形时,线密度小,交互作用对硬度影响不显著。

2.2.1 激光功率与扫描速度对硬度的影响 激光功率方向的坡度比扫描速度陡峭 (图 2a), 表明激光功率对磨辊材料表面硬度的影响大于扫描速度。等高线图形状呈椭圆形 (图 2b),表明激光功率与扫描速度间的交互作用对硬度影响显著。

2.2.2 激光功率与光斑直径对硬度的影响 响

应面图中激光功率方向的曲线坡度大于光斑直径方向 (图 3a),说明激光功率对磨辊材料表面硬度的影响大于光斑直径。与激光功率和扫描速度交互作用下等高线密度 (图 2b) 相比较,图 3b 中的等高线轮廓近似圆形,线密度较小,表明激光功率与光斑直径间的交互作用对硬度影响不显著。

2.2.3 光斑直径与扫描速度对硬度的影响 从响应曲面图可观察出,光斑直径方向响应面曲线比扫描速度方向陡峭 (图 4a),表明光斑直径对磨辊材料表面硬度的影响大于扫描速度。等高线图的线密度小,轮廓呈圆形 (图 4b),说明光斑直径与扫描速度间的交互作用对硬度的影响也不显著,这与回归分析结果一致。由上述结果可知,影响磨辊材料表面硬度的最主要因素为激光功率,其次为光斑直径和扫描速度。

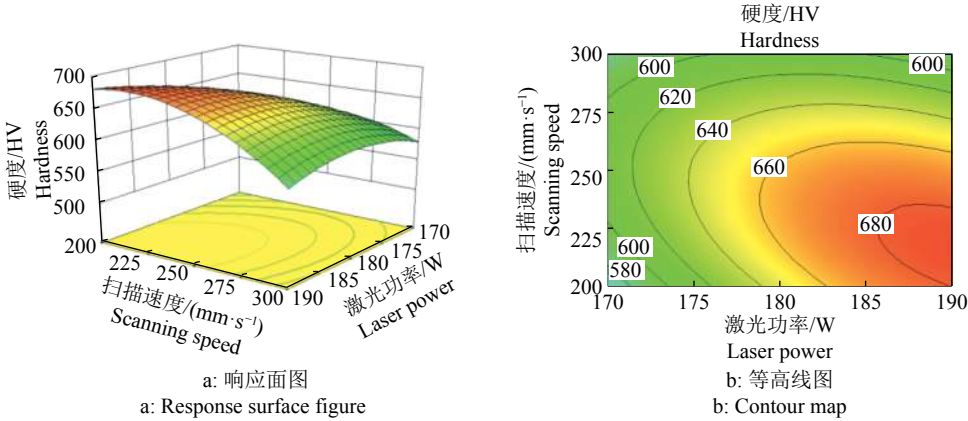


图 2 激光功率与扫描速度对硬度影响的响应曲面图与等高线图

Fig. 2 Response surface figure and contour map of effects of laser power and scanning speed on hardness

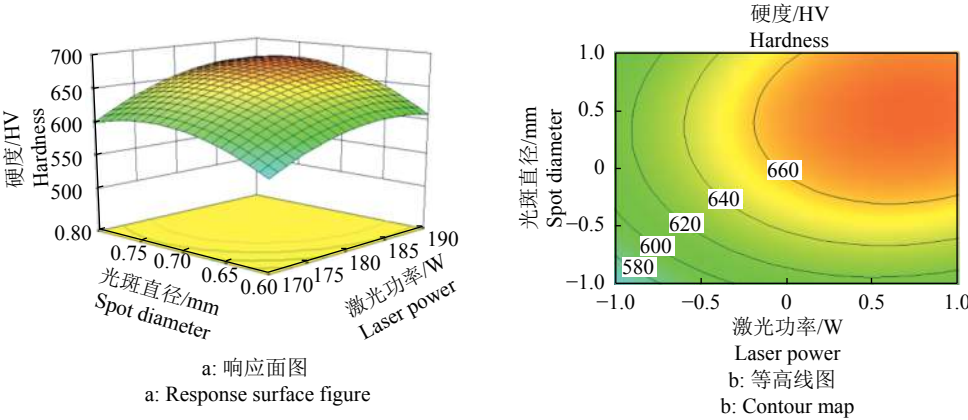


图 3 激光功率与光斑直径对硬度影响的响应曲面图与等高线图

Fig. 3 Response surface figure and contour map of effects of laser power and spot diameter on hardness

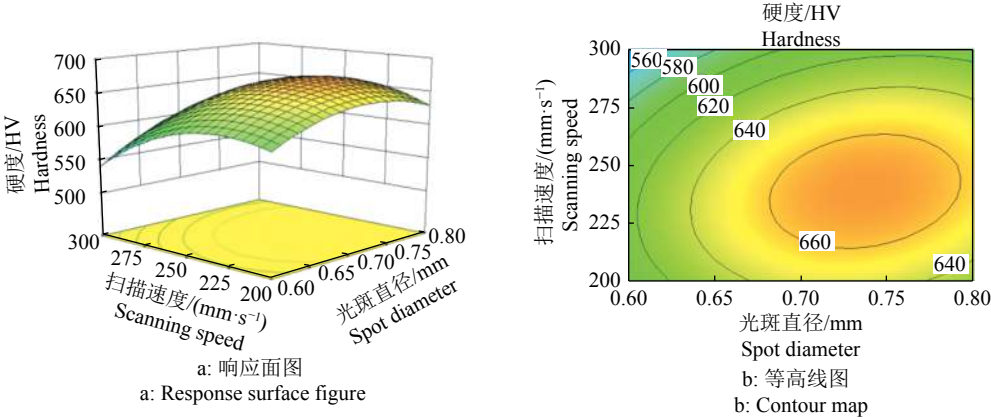


图 4 光斑直径与扫描速度对硬度影响的响应曲面图与等高线图

Fig. 4 Response surface figure and contour map of effects of spot diameter and scanning speed on hardness

2.2.4 激光淬火工艺参数最优组合 在实际面粉生产中, 最终目的是提高磨辊的硬度, 加强磨辊的耐磨性能, 延长磨辊的使用周期。本试验利用响应曲面旋转二次组合设计方法, 采用激光功率、光斑直径和扫描速度 3 个参数的试验范围作为约束条件, 经过显著性检验的响应值 R 作为目标函数, 经过非线性优化后得出最优的参数组合。分析得到激光淬火优化参数组合为: 激光功率 190 W, 光斑直

径 0.74 mm, 扫描速度 220.14 mm/s, 该参数组合下的试样表面硬度为 688.67 HV。考虑到实际试验操作的便利, 将此工艺条件进行进一步修正, 得到可在实际生产中应用的工艺参数组合: 激光功率 190 W, 光斑直径 0.70 mm, 扫描速度 220 mm/s。为了检验软件分析结果的正确性, 用上述最佳的淬火工艺参数进行 3 次验证试验, 试验的结果与软件分析的结果基本吻合。

2.3 金相组织分析

该试样的原始硬度为 509 HV, 激光淬火处理后其硬度提升了 35%, 对试样进行激光淬火处理提升其耐磨性的本质是使其金相组织发生变化。图 5 为试样淬火后的金相组织图。

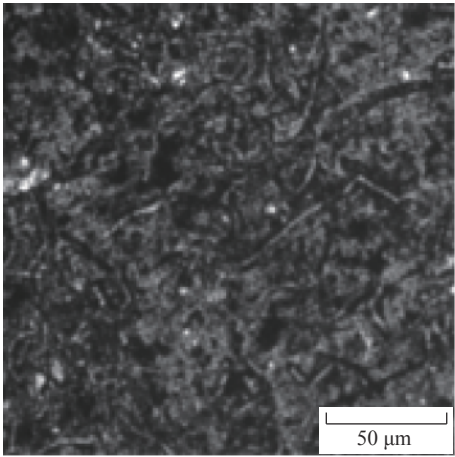


图 5 试样金相组织
Fig. 5 Gold phase organization of sample

在激光快速加热条件下奥氏体晶粒非常细小。快速加热升温增加了奥氏体内碳、铬等元素的溶解度。碳化物在奥氏体内溶解, 使其薄弱处发生断裂, 形态得到改善。碳、铬等元素在奥氏体内溶解使得它们在奥氏体内的溶入量增长, 激光淬火后得到的马氏体含碳量增加, 基体硬度提高。同时, 激光淬火使试样内部组织晶粒细化, 形成大量马氏体, 残留少量奥氏体。因此, 试样经激光淬火后耐磨性得到极大的改善。试样在淬火后未产生裂纹现象。

2.4 磨损试验

2.4.1 质量损失试验结果 小麦粉料与试样表面接触时, 其中的硬颗粒会与试样表面发生摩擦, 试样表面因塑性挤压产生划痕, 同时试样表面因压入的粉料硬颗粒形成沟槽, 试样表面经多次塑性变形, 发生疲劳破坏, 表面材料掉落, 脱离母体, 造成试样质量损失。图 6 所示为未经激光淬火处理和激光淬火最优参数组合处理 2 组试样以小麦粉料为磨料的三体磨料磨损试验质量损失。对比图 6 中 2 组数据可知, 经激光淬火最优参数组合处理后的试样质量损失约为未经激光淬火处理的试样的 7%, 由此可知, 激光淬火处理后磨辊表面材料抗小麦粉料磨损性能显著提升。

2.4.2 磨损面微观形貌分析 图 7 所示为激光淬火前后 2 组试样典型被磨表面微观形貌扫描电子显微镜图。试样经激光淬火处理后, 小麦粉料在试样表面的划痕较轻, 粉料中的坚硬颗粒在激光淬火

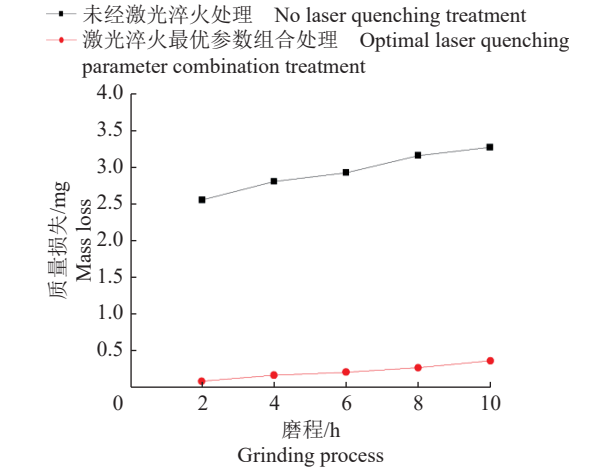


图 6 磨损质量损失
Fig. 6 Mass loss in wear process

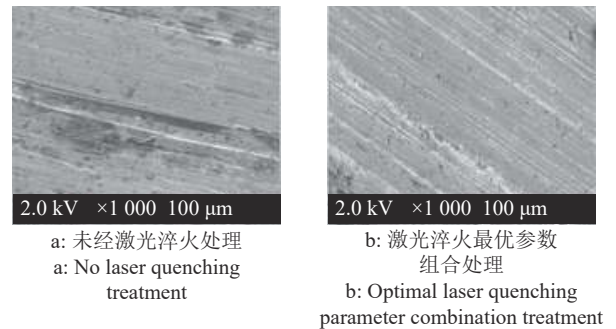


图 7 试样被磨表面微观形貌扫描电子显微镜图
Fig. 7 Scanning electron microscope image of the worn sample surface

试样表面很难存留, 表面上形成的划痕比较短, 在小麦粉料作用下形成的沟槽更浅窄。因此, 经激光淬火后的磨辊表面材料与小麦粉料间的摩擦磨损作用减弱, 塑性变形次数降低, 磨辊表面疲劳破坏得到改善, 磨辊的磨损周期延长, 生产成本降低。

3 结论

本文采用旋转组合设计方法设计 3 因素 5 水平响应曲面试验, 探究了激光功率、光斑直径和扫描速度对磨辊金属材料硬度的影响规律, 并对 3 个试验因素进行参数优化, 探讨磨辊材料耐磨性变化, 得到以下结论:

- 1) 各激光淬火工艺参数对磨辊金属材料硬度影响依次为激光功率>光斑直径>扫描速度; 激光功率与扫描速度间的交互作用对硬度影响显著。
- 2) 提高磨辊表面材料硬度的最优激光淬火工艺参数组合为: 激光功率 190 W、光斑直径 0.70 mm、扫描速度 220 mm/s; 激光淬火处理后试样硬度提升了 35%。

3) 经激光淬火最佳工艺参数组合处理后试样的质量损失约为未经激光淬火处理试样的 7%, 经激光淬火处理后的磨辊表面材料与小麦粉料间的摩擦磨损作用减弱, 小麦粉料在试样表面的划痕较轻较短, 试样磨损面的沟槽更浅窄。

本试验结果表明, 经过激光淬火处理后磨辊表面材料较未经处理的材料硬度显著提升, 耐磨性能增强, 这与华希俊等^[22]的研究结果一致。淬火后的试样与小麦粉料发生摩擦磨损时, 由于其表面的硬度得到强化, 小麦粉料中的硬颗粒很难存留在试样表面, 在表面产生的划痕与沟槽极为浅窄, 使材料表面的损伤减少, 极大地缓解了磨辊磨损严重等问题。

参考文献:

[1] 张继英, 蒋梅峰, 朱志昂. 实验室小麦磨粉机换辊前后小麦粉品质特性分析[J]. 粮食科技与经济, 2017, 42(3): 49-51.

[2] 张克平, 姜良朋, 姚亚萍. 白口铁抗小麦籽粒粉料的磨料磨损试验研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(1): 109-112.

[3] 张克平, 姜良朋, 王久鑫. 不同铬含量白口铸铁的抗小麦粉料磨粒磨损性能[J]. 机械工程材料, 2016, 40(12): 57-60.

[4] 张克平, 姜良朋, 黄晓鹏. 小麦磨粉机磨辊材料抗磨损热处理工艺优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(21): 271-276.

[5] 吴家祥, 张克平. 小麦制粉过程中辊间压力对磨辊磨损性能的影响[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(1): 157-159.

[6] 张克平, 吴家祥, 姚亚萍. 影响磨辊磨损失重的技术参数优化[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(5): 117-121.

[7] 艾云龙, 陈卫华, 丁家圆, 等. 低碳高铬白口铸铁热处理工艺研究[J]. 金属热处理, 2011, 36(6): 107-111.

[8] 艾莹珺, 艾云龙, 丁家圆, 等. 热处理对高铬白口铸铁组

织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2010, 39(16): 133-135.

[9] 苏超然, 吕长乐, 师陆冰, 等. 激光离散淬火对球墨铸铁磨损与损伤性能的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 85-90.

[10] 刘庆刚, 郭彦书, 于新奇, 等. 激光表面淬火工艺对表面硬度影响实验研究[J]. 制造业自动化, 2018, 40(8): 10-11.

[11] 张开熙, 刘永超, 周铁军, 等. 激光淬火在汽车模具制造业中的应用研究[J]. 模具制造, 2018, 18(11): 78-81.

[12] 符轲, 张修庆, 续晓霄, 等. 45 钢激光淬火工艺优化及性能[J]. 金属热处理, 2017, 42(1): 154-158.

[13] 钱振华. 激光微织构技术在关节轴承表面处理中的应用[J]. 机械制造, 2018, 56(7): 85-88.

[14] 覃敏. 激光表面处理技术在重工业领域的研究和应用进展[J]. 装备制造技术, 2017(12): 51-53.

[15] 封亚明, 何柏林, 江明明, 等. 表面技术在模具制造和修复中的应用[J]. 热加工工艺, 2018, 47(4): 30-34.

[16] 何柏林, 江明明. 激光淬火技术在模具表面处理中的应用与展望[J]. 表面技术, 2016, 45(11): 180-186.

[17] 刘红宇, 张雷, 黄雄荣. 激光表面改性技术及其在轴承上的应用[J]. 热处理, 2018, 33(3): 40-43.

[18] 苏辉, 马冰, 依颖辉, 等. 42CrMo 钢激光淬火组织和硬度的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 34(2): 84-86.

[19] 万芳新, 黄晓鹏, 吴劲锋, 等. 激光淬火功率对 45#钢抗植物磨料磨损性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2017, 35(5): 719-723.

[20] 郜飞飞, 王敬忠, 包汉生. 激光淬火工艺参数对 HT210 淬硬层深及硬度的影响[J]. 物理测试, 2017, 35(5): 20-25.

[21] 贺长林, 陈少克, 周中河, 等. 模具钢 718 激光淬火的工艺参数研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(20): 169-172.

[22] 华希俊, 郝静文, 王蓉, 等. 泥浆泵高铬铸铁材料激光淬火技术及其摩擦磨损性能研究[J]. 表面技术, 2017, 46(6): 215-220.

【责任编辑 李庆玲】