

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2015.04.010

# 60Si2Mn 钢高速电弧喷涂耐磨涂层的摩擦磨损性能<sup>\*</sup>

李 晖<sup>a,b</sup>, 陈亚茹<sup>a</sup>, 邓书彬<sup>a</sup>, 梁举科<sup>b</sup>

(重庆理工大学 a. 材料科学与工程学院, b. 机械工程学院, 重庆 400054)

**摘 要:** 为提高旋耕刀的耐磨性并延长其使用寿命, 利用高速电弧喷涂技术在旋耕刀材料 60Si2Mn 钢表面制备 NiAl 粘结层与 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiC、Cr、Ti 和 Fe 构成的耐磨涂层。经 XRD、显微组织分析及硬度测试得到, 耐磨涂层由 Fe<sub>9.64</sub>Ti<sub>0.36</sub>、FeAl、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 多相组成, 组织均匀致密, 表面硬度达到 1 037 HV<sub>0.2</sub>, 比传统淬火、中温回火的表面硬度提高 69%, 表层硬度最高达到 1 202 HV<sub>0.2</sub>。摩擦磨损试验结果表明, 耐磨涂层与传统淬火、中温回火相比, 体积磨损量下降 60%, 摩擦因数降低 44%, 电弧喷涂涂层有效的降低了摩擦和磨损, 改善了材料的耐磨性。

**关键词:** 旋耕刀; 高速电弧喷涂; 耐磨涂层; 摩擦磨损

中图分类号: TG174.442

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2015)04-0077-07

## Friction-wear Behavior of 60Si2Mn Steel Sprayed with Wear-resistance Coating by High Velocity Arc Spraying

LI Hui<sup>a,b</sup>, CHEN Ya-ru<sup>a</sup>, DENG Shu-bin<sup>a</sup>, LIANG Ju-ke<sup>b</sup>

(a. College of Materials Science and Engineering, b. College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054)

**Abstract:** To improve the wear resistance and prolong its life of rotary tiller blades, this paper involved spraying NiAl bond coating and ceramic wear-resistance coating made up of Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC, Cr, Ti, and Fe by high velocity arc spraying on the surface of 60Si2Mn that was usually used in rotary tiller blades. XRD analysis indicates that the wear resistant coating is a multiphase structure consisting of Fe<sub>9.64</sub>Ti<sub>0.36</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeAl and SiO<sub>2</sub> and microstructure of the coating is uniform and compact. Hardness test results show that the surface hardness of wear resistant coatings is 1 037 HV<sub>0.2</sub>, which is 69% higher than that of the quenching and medium temperature tempering sample, and the maximum hardness of the gradient layer is 1 202 HV<sub>0.2</sub>. Friction and wear test results show that the volume wear of wear resistant coating compared with the quenching treatment sample is reduced by approximately 60% and the reduction friction coefficient of wear resistant coating is 44%, which illustrates that wear resistant coatings prepared by arc spraying can effectively reduce the degree of friction and wear, thus improving the wear resistance.

**Keywords:** rotary tiller blades; high velocity arc spraying; wear-resistance coating; friction and wear

### 0 引 言

作为农业机械中的关键耐磨件, 旋耕刀的材料性能对其工作寿命和农业机械的工作效率、耕作效果均产生重要的影响<sup>[1-2]</sup>。旋耕刀前端在碎

土、灭茬、抛土等工作中与土壤里的砂石产生剧烈的摩擦磨损, 同时也产生强烈的冲击和振动, 刀尖和刀刃部位需要硬度高、耐磨性好, 刀柄部位则需要足够的强度和弹性、韧性, 抵抗变形和

收稿日期: 2015-04-16; 修回日期: 2015-07-06; 基金项目: \* 重庆市科委资助项目(cstc2014yykfA70001)

通讯作者: 李晖(1972-), 男(汉), 副教授, 博士; 研究方向: 表面工程和机械设计; Tel: (023) 6256 3173; E-mail: 576921594@qq.com

网络出版日期: 2015-07-14 15:04; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150714.1504.002.html>

引文格式: 李晖, 陈亚茹, 邓书彬, 等. 60Si2Mn 钢高速电弧喷涂耐磨涂层的摩擦磨损性能 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(4): 77-83.  
Li H, Chen Y R, Deng S B, et al. Friction behavior of 60Si2Mn steel sprayed with wear-resistance coating by high velocity arc spraying [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(4): 77-83.

折断<sup>[3-4]</sup>。国内外普遍采用 65Mn 或 60Si2Mn 弹簧钢作为旋耕刀的主要材料,淬火、回火后的组织基本满足性能要求。但旋耕刀依然存在较严重的磨粒磨损,不仅降低了耕作效率,能耗增加、作业质量下降,同时也增加成本,因此提高旋耕刀的耐磨性、延长其使用寿命,具有重要的意义。

目前,针对农业机械特别是耕作刀具采用各种新型表面技术提高耐磨部件性能已成为重要的技术手段,20 世纪 90 年代已有堆焊、化学热处理技术用于农机刀具的研究,能够获得提高耐磨性、降低油耗和作业成本的良好效果<sup>[5-6]</sup>,针对旋耕刀进行激光表面热处理效率高、强化效果好,使用寿命可以提高到 30 h 以上<sup>[7]</sup>。土壤耕作机械如犁铧采用氧-乙炔镍基粉末喷焊、熔覆处理后生产效率提高 2 倍以上,圆盘耙片喷涂 25% WC+0.5% Re-Si-Fe 耐磨涂层,寿命可提高 3 倍以上<sup>[8]</sup>,Satit Karoonboonyanan<sup>[9]</sup> 等人对比了在耕刀(各成分质量分数为:0.5% C、0.9% Mn、0.7% Si 和余量 Fe)上超音速火焰喷涂(HVOF)制备的 WC-Co 涂层和等离子喷涂 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 涂层的耐磨性,结果表明,两种喷涂技术相比于常规处理方法均能有效改善耐磨性,在砂土磨损试验中 WC-Co 涂层的耐磨性更好,粉碎刀具热喷涂 WC-Co 后的磨损率仅为淬火钢的 38%<sup>[10]</sup>。

基于热喷涂技术能获得良好性能,利用其延长耕作刀具的使用寿命则具有一定的探索价值。常用的热喷涂方法中,电弧喷涂具有投资小、高效、成本低廉、喷涂层的结合强度高优点<sup>[11]</sup>,适于在农业机械上研究和应用。文中选择旋耕刀常用材料 60Si2Mn 钢,采用电弧喷涂技术制备陶瓷耐磨涂层,并与传统淬火、中温回火热处理后材料的性能进行对比,研究耐磨涂层的组织、结构特征和摩擦磨损性能。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

选用 60Si2Mn 为基体材料,试样尺寸  $\Phi$  20 mm  $\times$  5 mm。电弧喷涂制备耐磨涂层时,往往需要粘结过渡层,选择 NiAl 合金层为粘结层,由直径  $\Phi$  2 mm 的 Ni95-Al5(95% Ni+5% Al)粉芯丝进行电弧喷涂制备。NiAl 粘结层能缓解基体材料与耐磨涂层热膨胀系数的差异,对其产生的热应力起到“缓冲”作用<sup>[12]</sup>。

表面耐磨层由直径 2 mm 的 SX-304(SX-MeO)电弧喷涂粉芯丝制备。其主要成分的质量分数为 3.5%~5.5% Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、0.5%~0.8% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、0.02%~0.09% SiC、1.5%~2.5% Cr、0.1%~0.5% Ti、余量为 Fe,其中 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiC 为陶瓷材料,具有硬度高且熔点高、热稳定性好及化学性能好等特点,Cr、Ti 能够形成自粘接效应<sup>[13]</sup>,提高基体与涂层的结合强度,电弧喷涂 SX-304 制备耐磨涂层,不仅工艺简单,成本相对较低,而且能有效提高基体材料的耐磨性、耐高温或耐腐蚀等性能。

### 1.2 试验方法

涂层制备流程为:60Si2Mn 基体淬火+中温回火热处理→喷砂粗化→喷涂 NiAl 粘结层→喷涂耐磨涂层。喷砂处理能粗化表面,增加涂层与基体的接触面积,改善涂层与钢基体的结合强度。

热喷涂前 60Si2Mn 经 870 °C 保温 20 min 后淬火,然后在 440 °C 保温 30 min 进行中温回火处理,获得回火屈氏体,硬度 537 HV<sub>0.02</sub>。热处理后的材料表面经磨削加工处理后用 0.5 MPa 的压缩空气在 150 mm 处进行 5 min 喷砂处理。通过 SX-600 型电弧喷涂设备进行喷涂处理,NiAl 粘结层和耐磨涂层的喷涂工艺参数如表 1 所示。

表 1 NiAl 粘结层和耐磨涂层的喷涂工艺参数

Table 1 Arc sprayed coating parameters of NiAl bond coating and wear resisitant coating

Parameters	NiAl coating	Wear resisitant coating
Arc voltage/V	32	32
Arc current/A	250	200
Air pressure/MPa	0.5	0.5
Wire feeding voltage/V	14	14
Stand-off distance/mm	150	150

采用 AX10 Imager A10 金相显微镜和 JEOL JSM-6460LV 型扫描电子显微镜观察分析试样组织形貌。用 DX-2500 型 X 射线衍射仪(XRD)分析材料相组成。采用 HX-1000HV 显微硬度仪测试涂层硬度,载荷 200 g,加载时间 10 s,表面硬度测量 9 组结果,取其平均值。截面硬度为以 0.15 mm 为间隔打点,测量至距表面约 2.5 mm 深度处。

采用 MFT-R4000 高速往复摩擦磨损试验机进行摩擦学性能测试, 试验载荷 20 N, 试验时间 10 min, 摩擦长度 5 mm, 摩擦球为  $\text{Si}_3\text{N}_4$  材料; 利用 JEOL JSM-6460LV 型电子显微镜观察摩擦磨损表面。采用 NanoMap500LS 扫描三维表面轮廓仪测量磨痕截面二维轮廓与截面面积, 并利用公式  $V=S \times L$  计算磨损体积, 其中  $S$  为磨痕截面面积,  $L$  为磨痕长度(试验采用往复式, 磨痕长度即为幅值), 轮廓仪参数设置: 根据磨痕宽度选择扫描范围 1 000~1 500  $\mu\text{m}$ , 扫描速度 50  $\mu\text{m}/\text{s}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 表面形貌与组织

图 1 为电弧喷涂前 60Si2Mn 钢经过淬火、中温回火后的显微组织, 由细小的白色针状铁素体和其周围弥散分布的黑色细粒状渗碳体组成, 该组织为回火屈氏体, 组织细小均匀, 平均硬度为 537  $\text{HV}_{0.2}$ 。

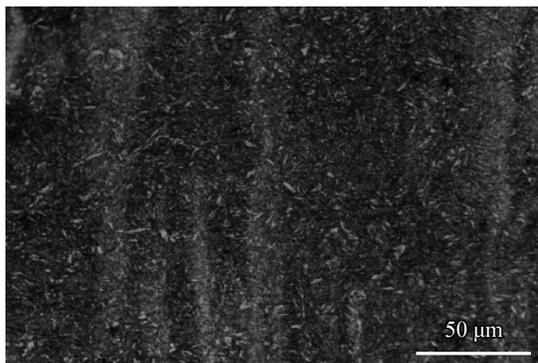


图 1 热处理后 60Si2Mn 钢的显微组织

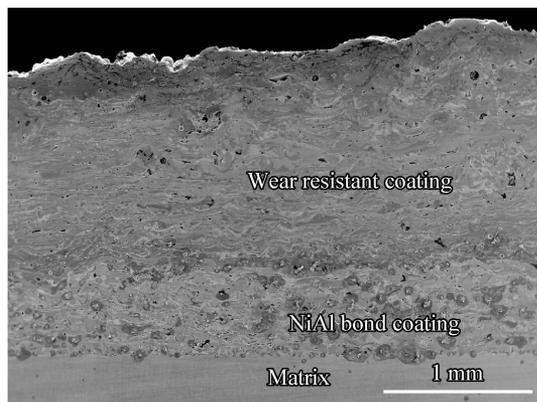
Fig. 1 Microstructure of 60Si2Mn steel after quenching and tempering

图 2 为电弧喷涂后涂层的截面组织。图 2(a) 中整个热喷涂层厚度达到 2 mm 左右, 涂层与底部的基体结合较好。表面电弧喷涂层分为两层, 根据制备工艺确定, 表面厚度 1.3 mm 左右、颜色相对较暗的灰色涂层为最后喷涂得到的耐磨涂层; 浅色涂层为 NiAl 粘结层, 厚约 0.6 mm。

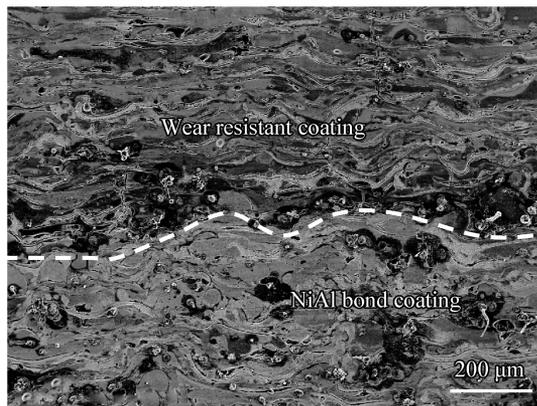
通常电弧喷涂涂层由变形良好的带状粒子相互搭接堆积而成, 中间夹杂着氧化膜、孔隙等缺陷<sup>[14]</sup>。图 2(b) 中 NiAl 粘结层与耐磨涂层呈波浪状, 具有典型的电弧喷涂形貌特征, 两个涂层间结合较好。耐磨涂层组织分布均匀且比较致密, 孔隙数目少; NiAl 粘结层则呈较大的波浪

起伏, 存在较大间隙。

图 2(c) 中对涂层与基体的结合状态进一步放大观察, 界面处局部可存在孔隙, 其形态与 NiAl 涂层中的波浪状空隙形态接近, 二者的成因相同, 因此提高电弧喷涂 Ni-Al 的界面结合需要更进一步控制涂层空隙, 界面无孔隙处的涂层与基体结合良好, 基体与粘结层结合强度为 40~50 MPa。



(a) Arc sprayed coating



(b) Cross section of NiAl bond coating and wear resistant coating



(c) Cross section of NiAl coating and matrix

图 2 电弧喷涂涂层的组织结构

Fig. 2 Surface microstructure of arc sprayed coating

图3为经电弧喷涂后涂层的XRD分析结果。主要有 $\text{Fe}_{9.64}\text{Ti}_{0.36}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{FeAl}$ 和单质 $\text{Cr}$ 。 $\text{Fe}_{9.64}\text{Ti}_{0.36}$ 和 $\text{FeAl}$ 属于金属间化合物,能提高试样的硬度和强度, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2$ 为陶瓷相,能显著提高涂层的硬度, $\text{Cr}$ 则是未溶的金属粒子,能提高涂层的红硬性。涂层中形成的新相及分布对涂层的性能有一定的影响。

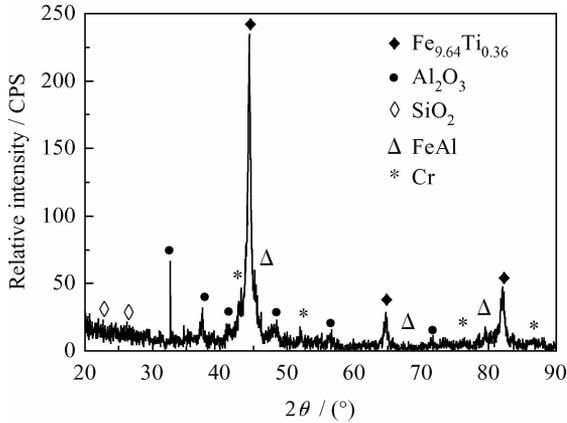


图3 电弧喷涂涂层的XRD图谱

Fig. 3 XRD patterns of arc sprayed coating

## 2.2 显微硬度

图4为电弧喷涂涂层与传统热处理钢的平均表面硬度对比,60Si2Mn钢经过淬火、中温回火热处理后,从热处理前的平均硬度 $323\text{HV}_{0.2}$ 增加到 $538\text{HV}_{0.2}$ ;电弧喷涂 $\text{NiAl}$ 层后表面硬度下降到 $428\text{HV}_{0.2}$ ;喷涂耐磨涂层后的表面硬度则提高到 $1037\text{HV}_{0.2}$ 。

相比于未经任何处理的试样,淬火、中温回火

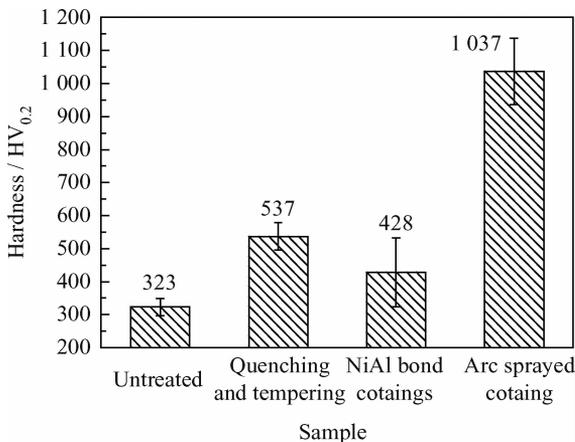


图4 不同工艺下各试样的表面硬度

Fig. 4 Surface microhardness of the samples under different process

的表面硬度提高了69%,电弧喷涂的耐磨涂层的表面硬度提高到3.21倍。与常规的淬火、中温回火工艺获得的 $538\text{HV}_{0.2}$ 硬度相比,电弧喷涂处理表面硬度提高了近一倍(93%)。

图5为电弧喷涂涂层与淬火、中温回火钢的表面硬度梯度的比较。因60Si2Mn钢淬火+中温回火为常规的热处理工艺,没有明显硬度变化,只是不同部位测量时的硬度数值波动。淬火时表面受冷却介质的作用,硬度略高;热处理后表层硬度最高达到 $590\text{HV}_{0.2}$ ,距表面距离大于2mm时,钢的硬度降到 $450\text{HV}_{0.2}$ 。

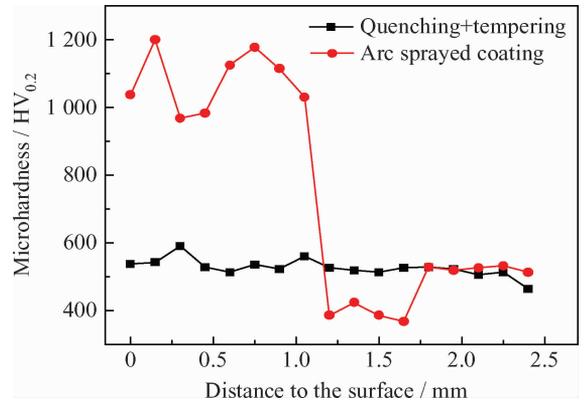


图5 淬火、回火钢与电弧喷涂层的硬度分布

Fig. 5 Microhardness distribution curves of quenching and tempering steel and arc sprayed coating

电弧喷涂层硬度则在表层高达 $1202\text{HV}_{0.2}$ ,在深度1.0mm范围内涂层硬度存在波动,但均超过 $900\text{HV}_{0.2}$ 。对比组织特征可知,该区域为耐磨涂层,涂层硬度与喷涂层结构和成分有关:电弧喷涂层硬度受到组织分布不均匀以及内部孔隙的影响而产生一定的波动;涂层硬度分布表明在耐磨涂层和基体之间存在约0.6mm、硬度较低的 $\text{NiAl}$ 层。通过控制电弧喷涂工艺参数,涂层厚度可以达到1mm以上,比常规表面热处理的硬化层厚。砂粒是造成农机零件磨损的第一杀手,要完全避免砂粒损伤,零件硬度要达到 $873\sim 1387\text{HV}^{[4]}$ ,根据图4中测得耐磨涂层的表面硬度可以推知,电弧喷涂耐磨涂层通过提高表面硬度,有助于改善耕刀砂粒损伤,提高刀具的耐磨性和使用寿命。

## 2.3 摩擦磨损性能

传统热处理钢与电弧喷涂涂层的摩擦因数曲线如图6所示。在1min时间内,淬火+回火处

理试样和未经处理试样的摩擦因数迅速增加,其中淬火、中温回火试样增加到 0.465,未经处理试样则在 2.5 min 左右增大到 0.522。电弧喷涂层的摩擦因数增加较缓慢,4 min 左右达到 0.296,随着时间延长,摩擦因数均在一定的范围内波动。

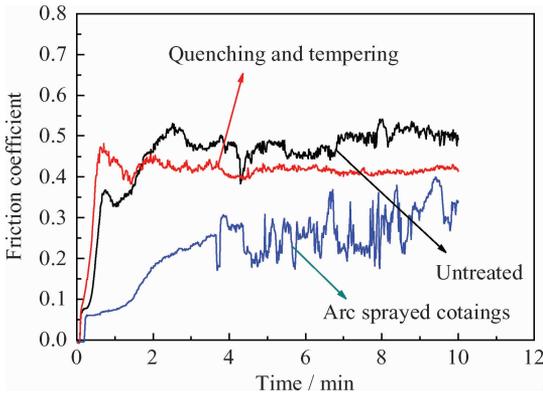


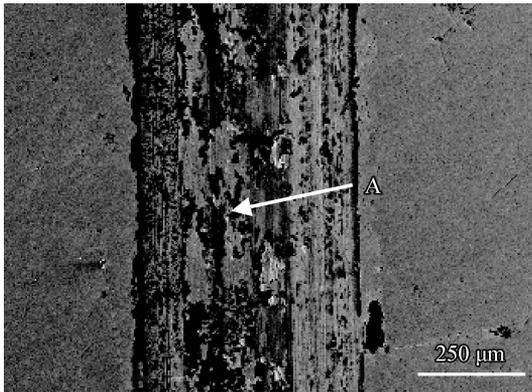
图 6 未处理试样、淬火回火钢和电弧喷涂层的摩擦因数对比

Fig. 6 Friction coefficient of untreated samples, quenching and tempering steel and arc sprayed coatings

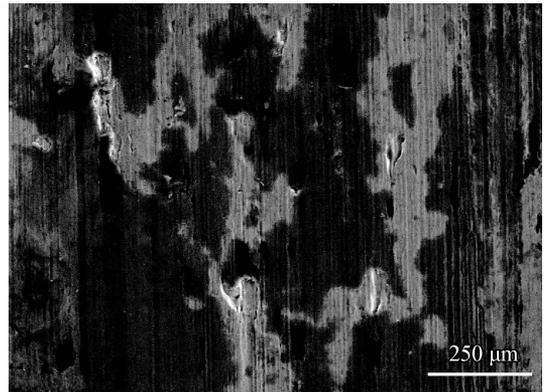
未处理试样与淬火、中温回火试样的摩擦因数波动很小,耐磨涂层的摩擦因数波动较大。这是因为在稳定磨损阶段,摩擦副( $Si_3N_4$ )与涂层表面趋于匹配,但由于耐磨涂层中有孔隙和未熔颗粒,导致在摩擦过程中摩擦因数变化较大。未处理试样平均摩擦因数为 0.448,热处理试样摩擦因数为 0.406,耐磨涂层平均摩擦因数为 0.226,较未处理试样下降 49.5%,较热处理试样下降 44%,说明电弧喷涂处理有效的降低了摩擦因数。

对比两种硬度较高的试样,即淬火+中温回火热处理和电弧喷涂磨损试样的磨损试验的磨痕形貌,如图 7 所示。图中可以看到,淬火、中温回火后的磨痕较为清晰,比电弧喷涂涂层的磨痕宽。

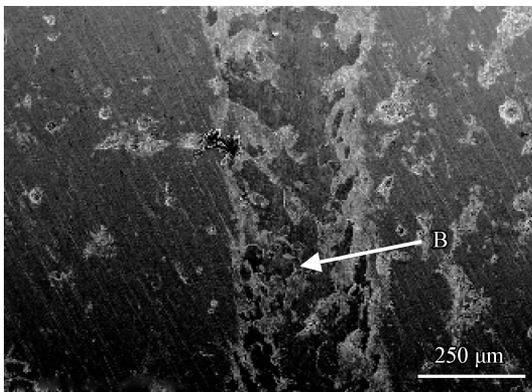
淬火+中温回火处理试样在 20 N 载荷下,磨痕呈较为典型的划痕状或犁沟状形貌,同时表面存在大量的剥落坑,对磨痕放大观察(如图 7(b)),看到磨痕和少量的形状不规则的碎屑脱落,因此其磨损形式应主要为磨粒磨损,同时伴随一定粘着磨损。



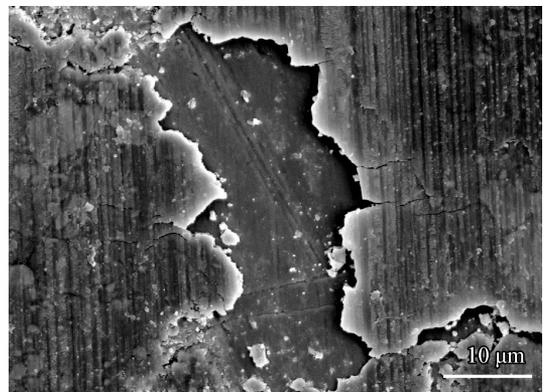
(a) Quenching and Tempering



(b) Magnification of area A in (a)



(c) Arc spraying coating



(d) Magnification of area B in (c)

图 7 淬火回火钢和电弧喷涂层的磨痕表面形貌

Fig. 7 Worn surface morphologies of quenching and tempering steel and arc sprayed coating

磨损的类型与摩擦副材质有关,对于淬火+中温回火的试样,在与  $\text{Si}_3\text{N}_4$  磨球摩擦中,因配磨球硬度远远高于试样,摩擦时对试样表面形成切削效果,造成犁沟和划痕,这是磨粒磨损的典型特征<sup>[15]</sup>。同时因为干摩擦磨损,钢试样表面形成较大的摩擦热导致温度升高,磨痕形成了一定的粘着磨损特征。

电弧喷涂层表面在摩擦磨损试验前经过砂纸打磨,未摩擦部位形貌特征与磨痕形貌特征基本一致,两者都呈现磨粒磨损的形貌,对电弧喷涂磨痕中 B 处进一步放大观察(如图 7(d)),呈现划痕状形貌特征,同时存在片状剥落特征。这表明尽管喷涂层的磨损形式为磨粒磨损,但是其磨损机制与淬火+回火热处理不同,应为微观断裂机制下的磨粒磨损。

电弧喷涂层的成分以无机化合物为主,硬度远远高于 60Si2Mn 钢基体,在与  $\text{Si}_3\text{N}_4$  磨球摩擦时,其表面的高硬度组织有效提高了耐磨性,抑制表面形成类似于金属磨粒磨损造成的犁沟或划痕。但喷涂层硬度高、脆性较大,且其内部存有空隙,因此摩擦时磨球作用于涂层表面使得涂层受到拉应力和压应力的交替作用,在涂层中波浪状分布的空隙处诱发裂纹,裂纹在应力作用下扩展并与周围的孔隙连接,形成更长的裂纹,裂纹沿着与表面大致平行的层叠、波浪状组织边界扩展,导致涂层剥落,形成的磨屑在摩擦力作用下造成涂层的碾压和划伤,加剧了涂层的剥离和裂纹扩展<sup>[15-16]</sup>。

图 8 为未处理试样、淬火及中温回火试样、电

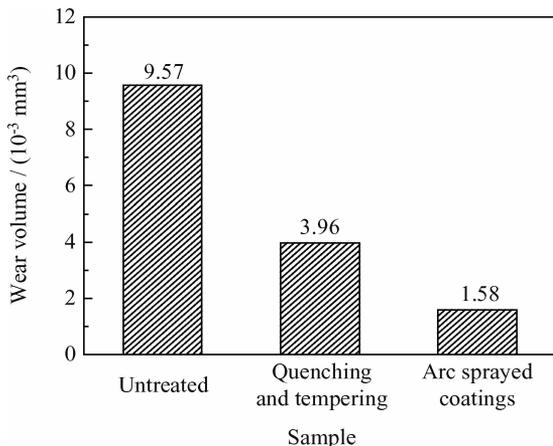


图 8 未处理试样、淬火、中温回火回火钢和电弧喷涂层体积磨损量对比

Fig. 8 Wear volume of untreated samples, quenching and tempering samples and arc sprayed coating

弧喷涂涂层的体积磨损量,可以看到淬火、中温回火处理和电弧喷涂均能降低磨损,其中电弧喷涂涂层的耐磨性最好,其磨损量仅为淬火、中温回火处理的 40%。

### 3 结论

(1) 采用电弧喷涂制备由  $\text{Fe}_{9.64}\text{Ti}_{0.36}$ 、 $\text{FeAl}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$  多种化合物组成、组织均匀致密的耐磨涂层,与 NiAl 涂层界面结合良好,表面硬度达到 1 037  $\text{HV}_{0.2}$ ,比淬火、中温回火的表面硬度提高 69%,电弧喷涂层表层硬度高达 1 202  $\text{HV}_{0.2}$ 。

(2) 相比于淬火、中温回火处理后的摩擦因数 0.406,耐磨涂层平均摩擦因数为 0.226,下降 44%,电弧喷涂处理有效的降低了减少了摩擦。

(3) 淬火、中温回火后的 60Si2Mn 钢产生磨粒磨损,磨损机制为韧性材料的微观犁沟、切削机制;耐磨涂层则为微观断裂形成的剥落导致的磨粒磨损。耐磨涂层硬度高,体积磨损量小,为淬火+中温回火处理的 40%。电弧喷涂耐磨涂层能够有效改善 60Si2Mn 钢的耐磨性。

### 参考文献

- [1] 吕云龙. 农业机械材料失效与控制 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.  
Lv Y L. The failure and control of agricultural machinery [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014 (in Chinese).
- [2] 苏彬彬, 徐杨, 简建明. 农业机械耐磨件发展及研究现状 [J]. 热处理技术与装备, 2013, 34(5): 53-56.  
Su B B, Xu Y, Jian Ji M. The actuality of development and research of wear resistant part for agricultural machinery [J]. Technology and Equipment of Heat Treatment, 2013, 34(5): 53-56 (in Chinese).
- [3] 黄建洪. 农机耐磨零件的硬度设计 [J]. 金属热处理, 2001, 26(7): 7-11.  
Huang J H. Hardness Design of anti-wear components in agricultural machinery [J]. Heat Treatment of Metal, 2001, 26(7): 7-11 (in Chinese).
- [4] 黄建洪, 刘冬雨, 李凌雨, 等. 农机零件磨损、选材及热处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.  
Huang J H, Liu D Y, Li L Y, et al. Agricultural machinery parts wear, material selection and heat treatment [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2013 (in Chinese).
- [5] 许斌, 冯承明, 宋岳鹏, 等. 常规处理 65Mn 钢和 45 钢碳化物层的磨粒磨损性能研究 [J]. 热加工工艺, 1997(4): 19-20.  
Xu B, Feng C M, Song Y P, et al. Study on the abrasion behavior of 65Mn steel by convenient heat treatment and 45

- steel boride layer [J]. Hot Working Technology, 1997 (4): 19-20 (in Chinese).
- [6] 许斌, 冯承明, 宋岳鹏. 硼铬稀土共渗对提高钢的耐磨粒磨损性能的试验研究 [J]. 农业工程学报, 1998, 14(3): 163-167.  
Xu B, Feng C M, Song Y P. Experiment and study on improving the abrasive wear resistance of steel by RE-chrome-boronizing [J]. Transaction of CSAE, 1998, 14 (3): 163-167 (in Chinese).
- [7] 陈卓君, 张祖立, 李柏妹, 等. 旋耕刀表面激光强化工艺参数的研究 [J]. 润滑与密封, 2009, 34(1): 63-66.  
Chen Z J, Zhang Z L, Li Bai S, et al. Study on processing parameters of laser strengthening on farm tools steel surface [J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(1): 63-66 (in Chinese).
- [8] 乔新义, 吕玉芬, 汪瑞军. 热喷涂技术在农机工程材料延寿中的应用现状 [J]. 热喷涂技术, 2013, 5(4): 1-5.  
Qiao X Y, Lv Y F, Wang R J. Application status of thermal spray technology in extending service lifetime of materials for agricultural machines [J]. Thermal Spray Technology, 2013, 5(4): 1-5 (in Chinese).
- [9] Karoonboonyanan S, Salokhe Vilas M, Niranatlumpong P. Wear resistance of thermally sprayed rotary tiller blades [J]. Wear, 2007(263): 604-608.
- [10] Niranatlumpong P, Sukhonket C, Nakgoenthong J. Wear resistant surface treatment of pulverizer blades [J]. Wear, 2013(302): 878-881.
- [11] 朱子新, 徐滨士, 马世宁, 等. 高速电弧喷涂 Fe-Al/WC 复合涂层的组织结构及其滑动摩擦性能研究 [J]. 中国表面工程, 2003, 16(5): 15-19.  
Zhu Z X, Xu B S, Ma S N, et al. The microstructure and sliding wear behavior of Fe-Al/WC composite coating produced by high velocity arc spraying [J]. China Surface Engineering, 2003, 16(5): 15-19. (in Chinese).
- [12] 马壮, 邹积峰, 李智超. 镁合金热喷涂 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米陶瓷涂层性能研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(4): 39-42.  
Ma Z, Zou J F, Li Z C. Properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based nano-structured ceramic coatings on magnesium alloy surface by thermal spraying [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 33(4): 39-42 (in Chinese).
- [13] 徐滨士, 刘世参, 李长久, 等. 表面工程技术手册(上) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.  
Xu B S, Liu S C, Li C J, et al. Surface engineering and technical manuals (on) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009 (in Chinese).
- [14] 高振, 郭金花, 李德仁, 等. 高速电弧喷涂含非晶相 Fe 基涂层的摩擦磨损特性 [J]. 中国表面工程, 2009, 22(4): 49-52.  
Gao Z, Guo J H, Li D R. Friction behavior of iron-based containing amorphous phase coating prepared by electric arc spraying [J]. China Surface Engineering, 2009, 22(4): 49-52 (in Chinese).
- [15] 田浩亮, 魏世丞, 陈永雄, 等. 高速电弧喷涂 FeAlCr 涂层的组织与耐磨性研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(1): 135-138.  
Tian H L, Wei S C, Chen Y X, et al. Structure and wear resistance of FeAlCr coatings by electric arc spraying [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(1): 135-138 (in Chinese).
- [16] 王兆华, 张鹏, 林修洲, 等. 材料表面工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 3-8.  
Wang Z H, Zhang P, Lin X Z, et al. Surface Engineering [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 3-8 (in Chinese).

(责任编辑: 陈茜)

\*\*\*\*\*

• 学术动态 •

2015 年中国表面强化技术研讨会将在无锡召开

为促进我国材料和零部件的表面改性事业蓬勃发展, 加强表面改性工作者的交流与合作, 全国热处理学会表面改性技术委员会定于 2015 年 10 月 25-26 日在江苏省无锡市召开 2015 年中国表面强化技术研讨会暨全国热处理学会表面改性技术委员会会议, 此次研讨会由全国热处理学会表面改性技术委员会和同济大学共同主办, 无锡富岛精工公司承办。

会议在无锡香梅国际大酒店召开, 报到时间为 2015 年 10 月 25 日 8:00-17:00 点, 地点为无锡市高新开发区梅村镇新华路 588 号。会议注册费 1000 元/人, 食宿统一安排, 费用自理。会议内容包括: 全国热处理学会表面改性技术委员会会议、表面强化技术研讨会筹备情况简报、表面强化技术研讨会和技术交流。

会议联系人: 高玉魁 (13524016340), 沈俊 (13801515161); 电子信箱: yukuigao@tongji.edu.cn。

(高玉魁 供稿)