

# U70MnSi 和 40Cr 钢电火花表面强化层的组织与性能

汤精明<sup>1,2</sup>, 乔生儒<sup>1</sup>, 韩栋<sup>1</sup>, 葛志宏<sup>1</sup>, 李玫<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学材料科学与工程学院, 陕西西安 710072; 2. 安徽工程科技学院机械工程系, 安徽芜湖 241000)

**摘要:** 采用硬质合金 YG-8 和焊条 FW-1101 作电极, 在电火花表面强化器上强化了 U70MnSi 钢和 40Cr 钢的表面; 用 X 射线衍射仪分析了强化层的结构, 用滚动和滚-滑磨损试验研究了强化层的耐磨性, 用阳极极化和浸泡试验研究了 40Cr 钢表面强化后的耐腐蚀性能。结果表明: 强化层是由化合物和非晶组织组成的混合层; 表面强化后试样的耐磨性明显提高; 40Cr 强化层的混合组织对耐腐蚀性能的影响超过了层中缺陷和残余应力的影响, 使其耐腐蚀性能提高。

**关键词:** 电火花; U70MnSi 钢; 40Cr 钢; 表面强化

**中图分类号:** TG156.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3738(2006)12-0044-04

## Microstructure and Performance of Electrical-discharge Strengthened Layer on the Surface of U70MnSi and 40Cr Steels

TANG Jing-ming<sup>1,2</sup>, QIAO Sheng-ru<sup>1</sup>, HAN Dong<sup>1</sup>, GE Zhi-hong<sup>1</sup>, LI Mei<sup>1</sup>

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Anhui University of Technology and Science, Wuhu 241000, China)

**Abstract:** The surface of U70MnSi and 40Cr were strengthened by a self-made electrical discharge surface strengthening equipment. Hard alloy YG-8 was used as surface coating materials for U70MnSi steel, and FW-1101 welding electrode for 40Cr steel. Composition of strengthened layer was analyzed by XRD. The wear resistance of strengthened layer was investigated by utilization of rolling-wear and rolling-sliding wear. After surface strengthened of 40Cr, the corrosion resistance was examined by anodic polarization and immersion. The results show that strengthened layer of two steels are mixture structure which composed of compound and amorphous structure. Wear resistance of two steels are considerably improved after strengthened under rolling-wear and rolling-sliding wear conditions. Effects of surface mixture structure exceed those of defects and residual stress in strengthened layer, which make corrosion resistance of 40Cr strengthened layer increased.

**Key words:** electrical spark; U70MnSi steel; 40Cr steel; surface strengthening

## 0 引言

目前铁路运输正向着重载、大密度和高速度方向发展, 使钢轨的磨损更加严重, 据前些年统计, 我国钢轨每年消耗约 90 万 t<sup>[1]</sup>。在现代造纸业中, 双螺旋辊式磨浆机因为其磨浆质量高、能量消耗低等优点被制浆造纸行业看好, 但磨浆区的压力高, 导致材料的磨损和腐蚀也非常严重<sup>[2]</sup>。

电火花表面强化工艺能显著改善钢铁材料表面

的性能, 延长易磨损零件的使用寿命<sup>[3-6]</sup>, 在工业生产中应用日益广泛, 经济效益也日益凸现。针对钢轨和双螺旋辊式磨浆机磨耗过快的问题, 作者利用电火花强化工艺, 对它们常用的 U70MnSi 钢和 40Cr 钢进行了表面处理, 并分析了强化后表层的组织与性能。

## 1 试样制备与试验方法

原材料为市购 40Cr 和 U70MnSi 钢, 其成分见表 1, 原始状态为退火态。将两种钢加工成环状试样, 尺寸为  $\phi 30 \text{ mm} \times \phi 16 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。先用丙酮清洗试样表面, 然后用无水酒精清洗, 最后干燥。在空气介质中用自制的 SQ-2 型电火花表面强化器强

收稿日期: 2005-12-25; 修订日期: 2005-12-10

作者简介: 汤精明 (1975—), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生。

导师: 乔生儒教授

化两种试样表面,用市售的堆焊焊条 FW-1101(主要元素质量分数为 2.0%~4.0%C,12%~20%Cr)作电极强化 40Cr 钢,用硬质合金 YG-8(92%WC,8%Co)作电极强化 U70MnSi 钢。电火花强化试样表面时,电极在被处理表面的移动速度为 600 mm/min。先用粗电规准强化,电压为 60 V,电容为 300  $\mu$ F;后用精电规准对试样表面进行修整,电压为 20 V,电容为 300  $\mu$ F。

表 1 原材料的主要化学成分(质量分数/%)

Tab. 1 Chemical content of Materials (mass/%)

| 材料      | C             | Si            | Mn            | P         | Cr            | Ni        | S         |
|---------|---------------|---------------|---------------|-----------|---------------|-----------|-----------|
| U70MnSi | 0.65~<br>0.75 | 0.85~<br>1.15 | 0.85~<br>1.15 | <<br>0.04 |               |           | <<br>0.04 |
| 40Cr    | 0.37~<br>0.44 | 0.17~<br>0.37 | 0.50~<br>0.80 |           | 0.80~<br>1.10 | ≤<br>0.30 |           |

用 D/Max-3C 型自动 X 射线衍射仪(XRD)对强化层进行相结构分析;用 HV-1000 型显微硬度计测量强化层深度方向的显微硬度,保压时间 15 s,负荷为 0.98 N。

用 MM-200 型磨损试验机评定电火花表面强化层的耐磨性,试验条件为:空气介质,无润滑干摩擦,相对湿度 30%,室温(25℃)及加载 1.47 kN。采用两种方法测量强化层的耐磨性:(1) 分别用相同尺寸未强化的 40Cr 钢(365 HV)和 GCr15 钢(26 HRC)为上试样,强化和未强化的 40Cr 钢、U70MnSi 钢为下试样形成滚动磨损,由下试样带动下试样转动,下试样转动速度为 400 r/min;(2) 相同尺寸的未强化 GCr15 钢为下试样,其转动速度为 200 r/min,上试样分别为强化和未强化的 U70MnSi 钢,上试样转动速度为 180 r/min,形成潜滑率为 10.53% 的滚、滑动摩擦磨损。用 TG328B 型电光分析天平测量质量损失,精度为 0.1 mg,每隔一定时间用无水酒精清洗后测一次试样的质量损失,取 3 个试样的平均值,试样的磨损质量损失记为 W,取其倒数  $W^{-1}$  作为耐磨性指标。

用阳极极化和浸泡试验评定 40Cr 钢强化前后的耐蚀性。阳极极化在 PS168 型电化学测试仪上进行,腐蚀介质为 0.5 mol/L 的 HCl 溶液;采用三电极体系装置,即饱和甘汞电极(SCE)作参比电极,金属铂片作辅助电极,强化和未强化的 40Cr 钢试样作研究电极;试样的非工作面用聚四氟乙烯和石蜡封固,试样有效暴露面积为 1 cm<sup>2</sup>,自腐蚀电位( $E_{\text{corr}}$ )的测量在稳定 40 min 后记录;恒定电位扫描

采样速率为 0.166 mV/s,采样区间为 -440~1 500 mV。浸泡试验使用两种浸泡液,一种为 10% HCl 溶液,另一种为 10% NaOH 溶液;40Cr 钢强化试样用环氧树脂密封未强化表面和标记试样,未强化的 40Cr 钢对比试样也用环氧树脂密封其它各面和标记试样,只留下与强化试样强化面积大小相等的表面与腐蚀介质接触;采用 5 块强化试样,并同时放入一块未强化试样进行耐蚀性对比;试样在腐蚀介质中总浸泡腐蚀时间为 140 h,每隔 20 h 取出试样称量,用试样的质量变化反映试样的腐蚀速率。

2 结果与讨论

2.1 电火花强化层的组成

由图 1 可见,强化层主要由铁、Fe<sub>3</sub>C、Cr<sub>2</sub>N 和 BN 构成,出现了碳和氮的化合物。虽然 XRD 谱上有几个明显的尖锐峰,但尖锐化程度不高,衍射峰宽化,出现类似非晶衍射所特有“馒头峰”。据文献分析<sup>[7,8]</sup>,可能是晶体衍射峰叠加在非晶衍射的“馒头峰”上形成叠加峰的结果。由电火花表面强化过程可知,强化中产生高温和瞬时急冷,使电极材料与试样的熔化处以很快的冷速凝固成非晶态组织;特别在电极继续运动时,电极和试样材料挤压在一起,使接触面大为增加,导致材料的传热和冷却速率显著提高,有效阻止了熔融液滴(特别是熔融液滴心部)组织的结晶,使得熔融液滴形成非晶态组织。

U70MnSi 钢强化层的衍射分析也发现了类似现象(图略),所不同的是,衍射谱更复杂,主要有 W<sub>2</sub>C、Cr<sub>2</sub>N、Fe<sub>3</sub>C 和 (Fe,Cr)<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 等相,还有些相结构无法确定,其中有锰的化合物。

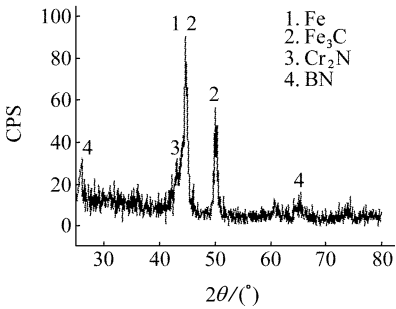


图 1 40Cr 钢强化层 XRD 谱

Fig. 1 XRD pattern of 40Cr strengthening surface

由图 2 可见,两种钢表面强化层的深度约为 70  $\mu$ m,其硬度明显高于基体的硬度,而在热影响区的硬度明显下降,这是由于表层组织含有高硬度的碳化物(如 Fe<sub>7</sub>C<sub>3</sub>)、氮化物(如 Cr<sub>2</sub>N、BN)及合金元

素,所以硬度非常高。

从以上分析可见,电火花表面强化决不是简单的镀覆过程,而是电极和试样中的诸元素及空气中电离的各种离子(主要为氮离子)发生扩散、合金化和氮化的过程,使强化层产生一系列特殊结构的高硬、耐磨相。

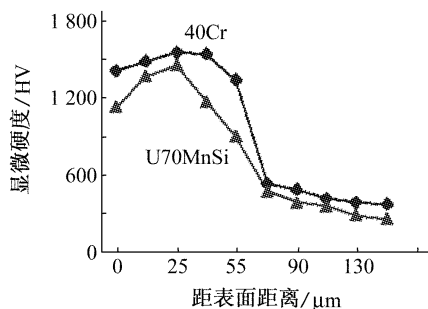


图2 强化层的显微硬度与深度的关系

Fig. 2 Variation of micro-hardness with depth of strengthened layer of materials

## 2.2 强化层的耐磨性

由图3、图4可见,滚动磨损试验中,未强化的U70MnSi钢和40Cr钢耐磨性很低;经电火花表面强化后耐磨性有了显著提高,强化后试样的耐磨性比未强化试样提高约4倍。

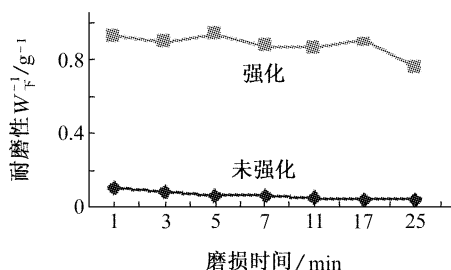


图3 下试样为U70MnSi钢、上试样为GCr15钢滚动磨损时下试样的耐磨性

Fig. 3 Wear-resistance of lower samples of U70MnSi steel mating with non-strengthened

由图5可见,在滚、滑动磨损中,U70MnSi钢强化后的耐磨性也同样有了显著提高,并且强化试样的耐磨性随磨损时间的增加逐渐降低,说明随磨损时间的增加试样磨损加剧。这是由于强化层的硬度沿强化层深度方向呈梯度降低,随磨损时间的增加高硬度层逐渐损失,使强化层耐磨性逐渐下降,接近于基体材料。

## 2.3 40Cr钢强化层的耐腐蚀性能

由图6可见,当研究电极在稳定电位进行极化时,在相同的电位条件下,未强化的40Cr钢试样的

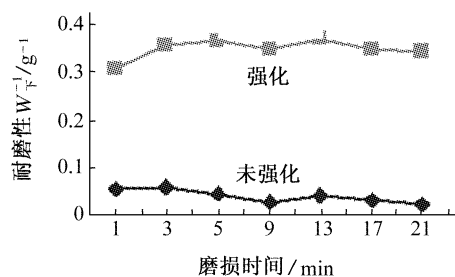


图4 下试样为40Cr钢、上试样为未强化的40Cr钢滚动磨损时下试样的耐磨性

Fig. 4 Wear-resistance of lower samples of 40Cr steel mating with non-strengthened 40Cr steel upper sample under rolling wear

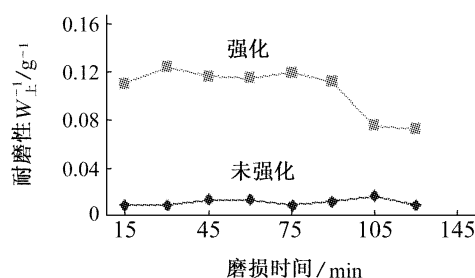


图5 上试样为U70MnSi钢时滚、滑动磨损的耐磨性

Fig. 5 Wear-resistance of upper samples of U70MnSi steel under rolling-sliding wear

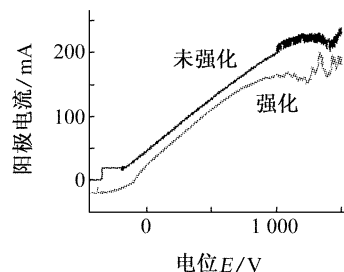


图6 40Cr钢阳极极化曲线

Fig. 6 Anodic polarization curves of 40Cr specimens

阳极电流明显比强化试样的大,这表明经强化处理后试样的耐腐蚀性能比未强化的试样好。

用Origin7.0软件将研究电极的电位对电流求导,并平滑之,得到研究电极的阳极极化度  $dV/dI$  与过电位的关系(图7)。由腐蚀电化学基本理论可知,阳极极化度反映了电极在单位电流下电位的变化,此值越大,电极阳极溶解的速率越小,其耐腐蚀性能越强。图8进一步说明了在相同条件下,40Cr钢经表面强化后其耐腐蚀性能要比未强化的好。

相同时间下,未强化处理的40Cr钢试样在还原性腐蚀介质10% HCl溶液中腐蚀质量损失更大,约是强化处理试样的2.2倍。强化与未强化处理的40Cr钢试样在10% NaOH溶液中腐蚀较轻(图9),

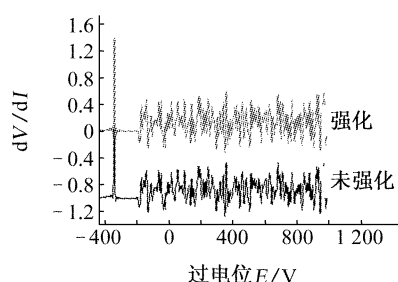


图 7 40Cr 钢阳极极化度与过电位的关系

Fig. 7 Relationship between the anodic polarization degree and the potential of 40Cr specimens

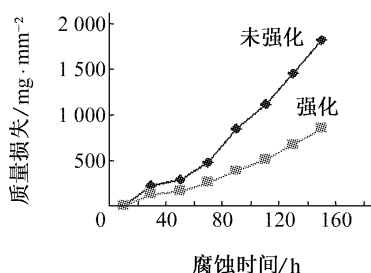


图 8 40Cr 钢试样在 10% HCl 溶液中的腐蚀动力学曲线

Fig. 8 Thermo gravimetric curves of the two specimens in 10% HCl solution

其中强化试样表现为腐蚀质量增加,未强化试样腐蚀初期为腐蚀质量增加,40h 后表现为质量损失,且损失速率很快。由此可见,40Cr 钢经表面强化处理后,其耐酸性和耐碱性均有不同程度的提高,并改变了试样在腐蚀液中的腐蚀机理。

电火花强化处理后表面形成了化合物和非晶组织组成的混合层。电火花表面强化处理还可以显著细化组织,同时也存在微孔洞和显微裂纹<sup>[9]</sup>。这种

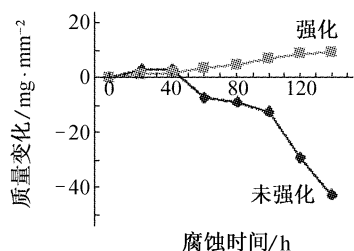


图 9 40Cr 钢试样在 10% NaOH 溶液中的

腐蚀动力学曲线

Fig. 9 Thermo gravimetric curves of the two specimens in 10% NaOH solution

表面状态的改善一方面使强化试样的耐腐蚀性能提高,但是另一方面强化层中非平衡相和夹杂物会降低强化层的化学稳定性,强化层中的微孔洞和显微裂纹为腐蚀液渗入强化层提供了便利通道,强化层内的残余应力也进一步加速了腐蚀裂纹的形成和扩展<sup>[10]</sup>。电火花强化层的耐腐蚀性能主要由以上两个因素共同决定。由于强化层中细晶组织和非晶组织对耐腐蚀性能的影响超过了缺陷、表面残余应力和杂质等的影响,所以经强化后其耐腐蚀性能得到提高。

### 3 结 论

经电火花表面强化处理后,在 U70MnSi 钢和 40Cr 钢表面形成化合物和非晶组织组成的混合层,使其在滚动磨损和滚、滑动磨损时耐磨损性能显著提高;随着摩擦磨损时间的增加,高硬度层逐渐损失,耐磨损性能接近于基体材料,使强化试样的耐磨损性能逐渐下降;强化层中化合物和非晶组织对耐腐蚀性能的影响超过了强化层中缺陷和表面残余应力的影响,使 40Cr 钢表面强化后耐腐蚀性能提高。

### 参考文献:

- [1] 刘启跃,张波,周仲荣. 铁路钢轨损伤机理研究[J]. 中国机械工程,2002,13(18):1596—1600.
- [2] 刘长恩,岳金权. 双螺旋辊式新型磨浆机及其应用[J]. 中国造纸,2000,(6):21—23.
- [3] 王振民. 电火花表面强化技术研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,1999.
- [4] 沈德久. 50CrMoV 钢脉冲放电涂层的激光重熔[J]. 复合材料学报,1997,14(4):147—150.
- [5] 潘国顺,曲敬信,邵荷生. 电火花表面强化工艺对涂层组织性能的影响[J]. 机械工程材料,2000,24(3):24—27.
- [6] 王振民,黄石生. 电火花表面强化技术发展概论[J]. 工具技术,2000,34(5):3—5.
- [7] 李建忱,马丽杰,于燕. Al-Mn 非晶合金镀层[J]. 中国有色金属学报,1997,7(1):172—175.
- [8] 王建升,王华昆,钟毅,等. H13 钢电火花沉积层组织结构的研究[J]. 中国表面工程,2003,6(63):27—30.
- [9] 乔生儒,韩栋,李玫. 钢铁表面电火花淬火超细组织化及机理[J]. 机械工程材料,2004,28(8):7—9.
- [10] 王引真,孙永兴,宋玉强,等. 等离子喷涂 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层腐蚀失效机制[J]. 腐蚀科学与防护技术,2002,14(4):227—231.

### 《机械工程材料》杂志欢迎广大作者网上远程投稿

为适应当前期刊网络化、数字化的发展趋势,本刊经过长期的筹划与准备,建立了远程在线投稿、审稿系统。该系统即将于 2006 年 12 月试运行,欢迎大家登录“材料与测试网站”(http://www.mat-test.com)查询该系统的使用方法,进行网上投稿。希望大家积极配合,争取尽快过渡到全部采用网上投稿。您在使用中如发现该系统有不完善的地方,请您悉心指教,并多提宝贵意见。本刊的电子邮箱为:mem@mat-test.com。

《机械工程材料》编辑部