

# 超声冲击对 65Mn 钢渗铬层摩擦磨损性能的影响

王志明, 李庆达, 汪昊, 王宏立, 胡军, 赵胜雪

(黑龙江八一农垦大学 工程学院, 黑龙江 大庆 163319)

**摘要:** **目的** 提高 65Mn 钢的固体粉末渗铬层厚度和耐磨性能。**方法** 对 65Mn 钢进行超声冲击 (UI) 和固体粉末渗铬 (SPC) 相结合的复合工艺处理。采用 X 射线衍射仪 (XRD)、光学显微镜 (OM)、扫描电镜 (SEM) 和能谱仪 (EDS), 研究 UI+SPC 复合工艺处理后 65Mn 渗铬层的物相结构、厚度及元素分布。通过显微维氏硬度计、摩擦磨损试验机研究渗铬层的显微硬度和摩擦磨损性能。**结果** SPC 处理试样的渗层厚度约为 45  $\mu\text{m}$ , UI+SPC 复合工艺处理试样的渗层厚度约为 58  $\mu\text{m}$ , 相比 SPC 试样, 渗层厚度提高了 13  $\mu\text{m}$ 。渗铬层表面均匀致密, 主要相组成为  $(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$ 、 $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_6$ 、 $\text{Cr}_2\text{C}$ 。UI+SPC 试样渗层表面硬度达 1659HV, 约为基体表面硬度的 6 倍, 且硬度从表面至心部呈梯度下降。UI+SPC 试样表面渗铬层具有较好的耐磨性能, 平均摩擦系数为 0.170, 磨损量约为基材的 1/4, 其主要磨损机理为粘着磨损和氧化磨损, 伴随着磨粒磨损。**结论** UI 可有效提高 SPC 工艺的 Cr 原子扩散性能, 提高渗铬层厚度。相比于单一的 SPC 处理试样, UI+SPC 复合工艺处理试样渗铬层的耐磨性显著提高。UI 处理的加入, 使 SPC 试样的磨损机理由“磨粒+粘着”转化为“粘着、氧化+磨粒”。

**关键词:** 超声冲击; 固体粉末渗铬; 渗铬层; 磨粒磨损; 氧化磨损; 粘着磨损

**中图分类号:** TG115.5+8; TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)01-0052-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.01.005

## Effect of Ultrasonic Impact on the Friction and Wear Properties of Chromized Layer of 65Mn Steel

WANG Zhi-ming, LI Qing-da, WANG Hao, WANG Hong-li, HU Jun, ZHAO Sheng-xue

(College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

**ABSTRACT:** This paper aims to improve the solid powder chromized layer thickness and wear resistance of 65Mn steel. The composite process of ultrasonic impact (UI) and solid powder chromizing (SPC) is carried out on 65Mn steel. The phase structure, thickness, and element distribution of the 65Mn chromized layer after UI + SPC treatments are studied by X-ray diffractometer (XRD), optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS). The microhardness and friction- wear properties of the chromized layer after UI + SPC treatments are investigated by the

收稿日期: 2021-03-19; 修订日期: 2021-05-25

Received: 2021-03-19; Revised: 2021-05-25

基金项目: 黑龙江省自然科学基金优秀青年基金 (YQ2019E032); 国家重点研发计划子课题 (2017YFC1601905—04)

Fund: Supported by Natural Science Excellent Youth Foundation of Heilongjiang Province (YQ2019E032); National Key Research and Development Program Sub-topics (2017YFC1601905—04)

作者简介: 王志明 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农机材料的摩擦磨损与防护。

Biography: WANG Zhi-ming (1997—), Male, Master's degree, Research focus: friction, wear and protection of agricultural machinery material.

通讯作者: 李庆达 (1982—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为金属材料的摩擦磨损与防护。

Corresponding author: LI Qing-da (1982—), Male, Doctor, Professor, Research focus: friction, wear and protection of metal material.

引文格式: 王志明, 李庆达, 汪昊, 等. 超声冲击对 65Mn 钢渗铬层摩擦磨损性能的影响[J]. 表面技术, 2022, 51(1): 52-59.

WANG Zhi-ming, LI Qing-da, WANG Hao, et al. Effect of Ultrasonic Impact on the Friction and Wear Properties of Chromized Layer of 65Mn Steel[J]. Surface Technology, 2022, 51(1): 52-59.

microhardness tester and friction-wear tester. The results demonstrate that the thickness of the chromizing layer is 45  $\mu\text{m}$  by the UI treatment and the thickness is 58  $\mu\text{m}$  by the UI + SPC treatment, 13  $\mu\text{m}$  thicker than the former. The surface structure of chromized layer is uniform and compact, and the main phase composition is  $(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$ ,  $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_6$  and  $\text{Cr}_2\text{C}$ . The surface hardness of the chromized layer reaches 1659HV by UI+SPC treatment, which is about six times of the surface hardness of the substrate, and the hardness distribution of the chromized layer show gradient descent from the surface to the inside. The surface chromized layer of the 65Mn steel has good anti-wear properties after UI + SPC treatment. The average friction coefficient is 0.170, and its wear weightlessness is about one-fourth of the that of the substrate. The dominating wear mechanism of UI+SPC sample is adhesive wear and oxidation wear, associated with slight abrasive wear. UI can effectively enhance the Cr atom diffusion property of SPC process and improve the thickness of chromized layer. Compared with SPC treatment, the wear resistance of the sample is significantly improved by UI+SPC treatment. With the addition of UI treatment, the wear mechanism of SPC samples changes from “abrasive + adhesive” to “adhesive, oxidation + abrasive”.

**KEY WORDS:** ultrasonic impact; solid power chromizing; chromized layer; abrasive wear; oxidative wear; adhesive wear

与普通碳钢相比, 65Mn 弹簧钢具有良好的淬透性、较优的综合力学性能、脱碳倾向小和价格低廉等优点, 被广泛应用于工程机械上, 常用作生产弹簧、垫片、刀具、磨床主轴等机械零部件<sup>[1-2]</sup>。65Mn 钢零部件的服役环境多数情况下较为恶劣, 主要发生的失效方式为磨损失效。我国每年因机械零部件磨损失效, 造成了巨大的经济和能源损失<sup>[3]</sup>。如何提高 65Mn 钢零部件的耐磨性能, 延长其使用寿命, 降低成本和能耗, 具有重大的意义。目前, 国内外一些学者常采用堆焊、熔覆、喷涂、化学热处理、气相沉积等表面处理技术, 来提高机械零部件的耐磨性能<sup>[4-8]</sup>。

固体粉末渗铬 (Solid Power Chromizing, SPC) 作为化学热处理技术之一, 与气体渗铬、离子渗铬、盐浴渗铬工艺相比, 具有加工简单、成本低等优点<sup>[9]</sup>。通过 SPC 处理, 可在钢构件表面获得渗铬层, 不仅能够提高钢构件表面的耐腐蚀、耐高温氧化性能, 还可有效提高其表面的耐磨性能<sup>[10-11]</sup>。Dong 等<sup>[12]</sup>研究表明, 通过 SPC 处理, 可使 316L 钢的渗铬层厚度达到 75  $\mu\text{m}$ , 并显著提高其耐腐蚀性能。Lin 等<sup>[13-15]</sup>将 SPC 工艺应用于 P110 钢的耐磨处理, 结果表明, 经渗铬处理的 P110 钢与未处理的基材相比, 其耐磨性能和耐蚀性能均显著提高。综上所述, SPC 为提高材料表面耐磨性能提供了一条可行的途径。然而, SPC 工艺仍存在渗层薄、温度高、时间长等缺点<sup>[16]</sup>。一些国内外研究表明, 通过在粉末渗剂中添加稀土元素及其氧化物, 能够有效降低化学热处理温度, 缩短原子渗入时间, 提高渗层厚度<sup>[17-18]</sup>。但由于稀土元素价格较昂贵, 一定程度上限制了其在化学热处理领域中的应用。

近年来, 表面自纳米化技术已成为国内外学者研究的热点。通过表面机械研磨处理 (Surface Mechanical Attrition Treatment, SMAT)、超声冲击 (Ultrasonic Impact, UI)、高能喷丸 (High Energy Shot Peening, HESP) 等表面处理技术, 可使金属表面发生

剧烈的塑性变形, 促使材料表面粗晶逐步细化至纳米晶, 形成梯度纳米结构层, 该纳米结构层可有效提高原子动力学扩散性能和化学反应速率<sup>[19-22]</sup>。张聪慧等<sup>[23]</sup>研究表明, 高能喷丸处理后的 AZ91D 镁合金渗铝层较未喷丸处理的渗铝层厚度明显增加, 耐腐蚀性能显著提高。Laleh 等<sup>[24]</sup>对 SMAT 处理后的 316L 不锈钢进行了表面渗氮处理, 结果表明, SMAT 处理后, 试样的渗氮层较未处理试样的渗氮层厚度提高了 1 倍, 且 SMAT 试样具有较高的耐磨、耐腐蚀性能。综上所述, 表面自纳米化工艺与化学热处理工艺相结合的复合工艺, 在提高化学热处理原子动力学扩散性能、增加渗层厚度方面, 效果十分显著。本研究将 UI 处理技术与 SPC 工艺相结合, 在 65Mn 钢表面制备渗铬耐磨层, 研究 UI 处理对渗铬层微观形貌、厚度及耐磨性能的影响, 并分析其摩擦磨损机理, 为拓展 UI 处理工艺在材料表面耐磨处理领域的进一步应用, 提供科学理论依据。

## 1 试验

### 1.1 试样制备

试验选取 65Mn 钢作为基体材料, 其主要化学成分见表 1。用电火花切割试样尺寸为 25 mm×20 mm×4 mm。采用 250#—800#耐水砂纸对试样逐级打磨至表面光滑, 保证样品具有相同的表面粗糙度。然后依次浸于丙酮、无水乙醇溶液和去离子水中, 超声清洗 15 min, 洗净, 烘干。

采用 HI-T002015A 型超声冲击设备对 65Mn 钢试样进行 UI 处理, UI 工艺原理如图 1 所示。通过冲击头往复冲击试样表面, 使得试样表面发生塑性变形<sup>[25]</sup>。试验参数: 冲击振幅为 30  $\mu\text{m}$ , 冲击频率为 20 kHz, 输入电流为 0.2 A, 冲击时间为 5 min, 单头冲击, 冲击头直径为 6 mm, 冲击头行走速度为 5 mm/s。

表 1 65Mn 钢的化学成分  
Tab.1 Chemical composition of 65Mn steel

									wt%
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Fe	
0.62~0.70	0.17~0.37	0.90~1.20	≤0.035	≤0.035	≤0.025	≤0.025	≤0.025	Bal.	

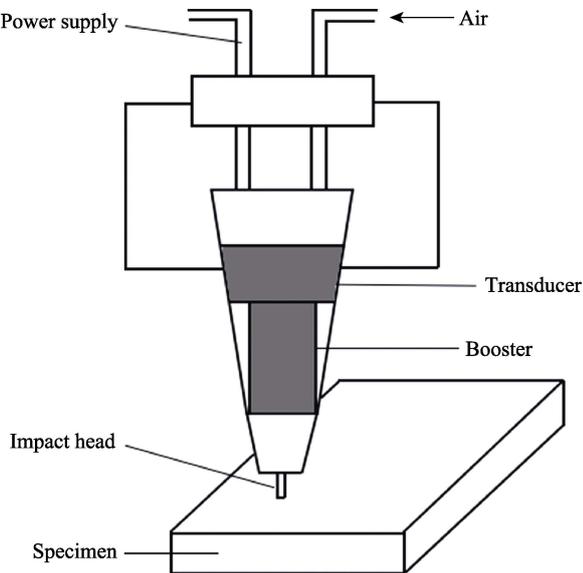


图 1 超声冲击工艺原理  
Fig.1 Principle diagram of UI process

采用 JQF1100-40 型箱式气氛炉对 65Mn 基材和 UI 试样进行 SPC 处理, SPC 工艺原理如图 2 所示。渗铬剂成分(质量分数)为: Cr 粉 50%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉末 46%,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  粉末 4%。3 种粉末通过球磨机均匀混合, 将配制好的渗铬剂放入箱式炉内加热至 200 °C, 保温 2 h, 烘干处理后使用。将基材、UI 试样和配制好的渗剂放入坩埚内, 通过耐火砂、黏土、水玻璃 3 种混合物密封后, 放入箱式炉中<sup>[14]</sup>。试验参数: 温度为 1000 °C, 保温时间为 8 h, 升温速率为 8 °C/min。

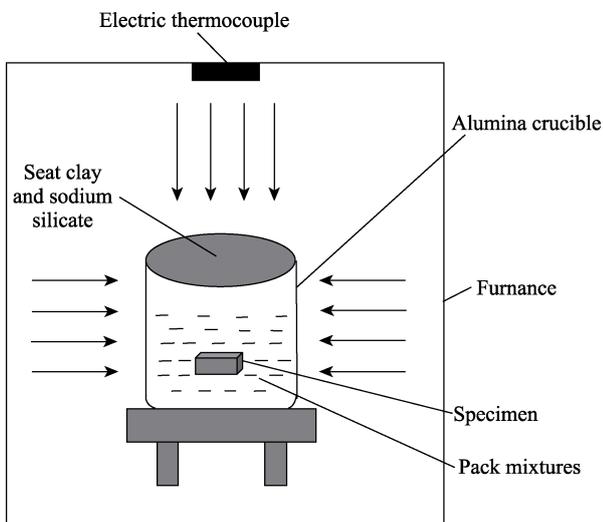


图 2 固体粉末渗铬工艺原理  
Fig.2 Principle diagram of SPC process

## 1.2 结构表征及性能测试

采用岛津 XRD-7000S/L 型 X 射线衍射仪(XRD)表征经不同工艺处理前后的试样相结构, 衍射角范围为 10°~80°, 扫描步长为 0.02°, 扫描速度为 6 (°)/min。采用莱卡 DM4000M 光学显微镜(OM)和日立 S-3400N 型扫描电镜(SEM)观察渗铬层表面和截面形貌。采用 EDS 能谱仪测试渗铬层表面和截面的元素成分。采用 TMVS-1 型显微维氏硬度计对试样表面和截面的显微硬度进行测量, 载荷为 9.8 g, 保压 15 s, 同一平面选取间隔 3 mm 的 5 个点测试, 结果取平均值; 截面方向以 10 μm 为间隔, 测试 2 个平面, 结果取平均值。采用 MMU-10 型微机控制端面摩擦磨损试验机测试试样的摩擦磨损性能, 摩擦副选用直径为 5 mm 的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  球, 试验参数: 载荷为 20 N, 转速为 220 r/min, 磨损时间为 2 h。

## 2 结果与讨论

### 2.1 渗层表面形貌与相结构

SPC 和 UI+SPC 处理后, 65Mn 钢表面的 SEM 形貌如图 3 所示。可以看出, 渗铬层表面均匀致密, 且出现大小无规则的突起。由 EDS 元素分析结果(见表 2)可知, 渗层表面具有含量较高的 Cr 元素, 少量的 C、Fe、O 元素(Si 含量忽略不计), 产生突起的原因可能是 Cr 与基体中的 C 反应生成碳铬化合物所致。对比两种工艺处理后试样渗层的表面形貌可知, UI+SPC 试样渗层表面出现较多微小的孔洞, 这是因为经 UI 处理后, 试样表面晶粒得到细化, 晶界增加, 提高了原子之间的反应速率。孔洞产生的原因主要是活化 Cr 原子从基体向内部扩散时, 在与 C 原子反应生成碳化铬的过程中, 原子的空位迁移以及  $\text{NH}_4\text{Cl}$  分解为气体所致<sup>[26]</sup>。试样表面的 XRD 分析结果如图 4 所示。由图 4 可知, 经 SPC 和 UI+SPC 处理后的渗层, 具有相同的相结构, 主要相组成为  $\text{Cr}_2\text{C}$ 、 $(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$ 、 $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_6$ , 进一步验证了渗层表面突起成分为碳铬化合物。由于 Cr 原子和 Fe 原子具有相近的原子半径, 因此 Cr 原子易与 Fe 原子形成  $\alpha$  相固溶体, 在高温下 Cr 原子易与 C 原子发生反应, 形成硬质相碳铬化合物<sup>[27-29]</sup>。

### 2.2 渗层截面形貌和元素及硬度分布

为研究超声冲击处理对渗铬层厚度的影响, 对 SPC 和 UI+SPC 处理后试样的截面形貌进行观察, 并

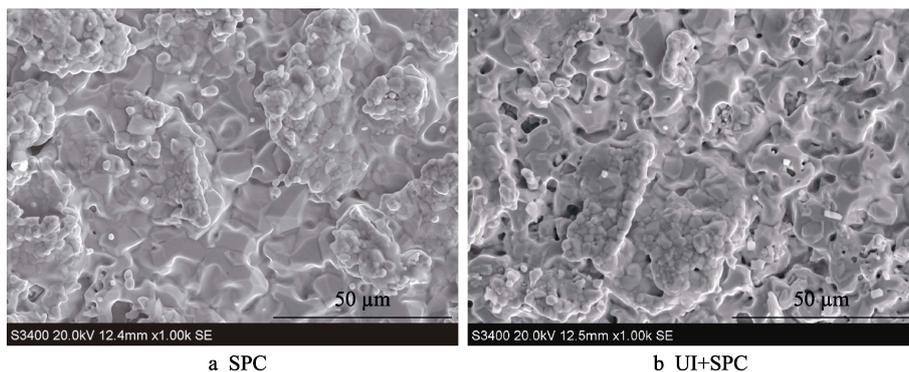


图 3 渗铬层表面形貌  
Fig.3 Surface morphologies of chromized layer

表 2 渗铬层表面 EDS 分析  
Tab.2 EDS analysis of chromized layer

	wt%				
	C	O	Si	Cr	Fe
	3.63	1.36	0.15	93.54	1.32

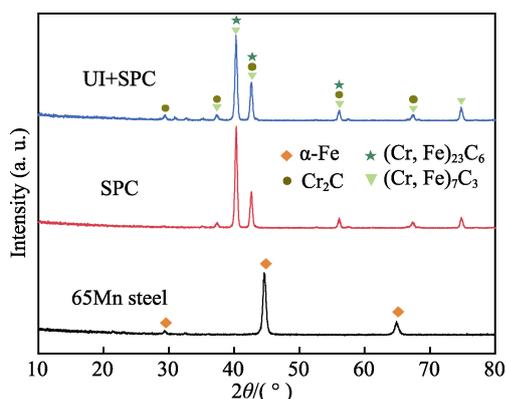


图 4 试样表面 XRD 图谱  
Fig.4 XRD patterns of samples

对截面元素成分进行 EDS 线扫描元素分析。渗铬层截面形貌和线扫描分析结果如图 5 所示。由图 5a、b 可以看出，SPC 和 UI+SPC 样品截面，渗铬层为均匀、连续、致密的亮白层，与基体结合紧密，该结果与文献[11]的研究结果相近。由图 5c、d 可知，SPC 样品的渗层厚度为 45 μm，UI+SPC 样品的渗层厚度可达 58 μm，厚度增加 13 μm。这是因为试样经 UI 处理后，表面发生强烈的塑性变形，此过程中，65Mn 钢表面晶粒发生滑移、位错、层错，使得晶界增加，引入了大量的缺陷和界限，增加了 Cr 原子动力学扩散性能，使 Cr 原子易于从试样表面向基体内部扩散，促使渗层生长<sup>[30-32]</sup>。由图 5c、d 还可以看出，渗层由外向内依次为明亮的富铬层、黑暗的过渡层和基体。这是因为 Cr 原子的扩散系数小于 C 原子，渗层的生长取决于 Cr 原子向基体内部的扩散速度。Cr 原子向内扩散过程中，与基体中的 C 原子反应，生成碳化铬。当渗铬层达到一定厚度时，阻碍了 Cr 原子向内扩散，Cr 原子的扩散速率下降，即形成梯度变化的黑暗过渡层<sup>[33]</sup>。

由图 5e、f 可以看出，SPC 和 UI+SPC 试样渗层元素的分布趋势差别不大。Cr 元素和 C 元素从表面到内部呈逐渐下降的趋势，Fe 元素从表面到内部呈逐渐上升的趋势。对比两种渗层 Cr 元素的分布趋势可知，SPC 试样渗层中，Cr 元素含量在距表面 42 μm 左右处趋于平稳，UI+SPC 试样渗层的 Cr 元素含量在距表面 55 μm 左右处趋于平稳。该结果进一步验证了 UI 处理能有效提高 Cr 原子向基体内部的扩散能力，促进渗层生长。

SPC 和 UI+SPC 试样的渗铬层显微梯度硬度如图 6 所示。由图 6 可知，SPC 处理后的试样具有较高的表面硬度，表面平均硬度值可达 1608HV，约为基体硬度的 6 倍，这主要源于表面硬质碳铬化合物的形成。UI+SPC 试样表面平均硬度值为 1659HV，相比 SPC 试样，硬度提高 51HV。由 Hall-Patch 公式  $\sigma_y = \sigma_0 + k\sqrt{d}$  (式中： $\sigma_y$  为材料发生 0.2% 变形时的屈服应力，可用显微硬度 HV 表示； $\sigma_0$  为单晶体屈服强度； $k$  为常数； $d$  为平均晶粒尺寸) 可知<sup>[22]</sup>，经 UI 处理后，晶粒得到细化，晶粒尺寸减小，金属材料表面硬度得到提高。由于在 1000 °C 高温渗铬环境下，经 UI 处理后，试样表面晶粒发生再结晶和晶粒长大<sup>[34]</sup>，限制了 UI+SPC 试样表面硬度进一步提高。如图 6 所示，经两种工艺处理后，试样渗层硬度的变化从表面至心部均呈梯度下降趋势。SPC 处理后，试样的渗层硬度在距表面 50 μm 左右处趋于平稳，UI+SPC 处理后试样的渗层硬度下降较为平缓，在距表面 60 μm 左右处趋于平稳，随着表面距离增加，最终降至基体硬度。该硬度变化规律与图 5e、f 线扫描所示 Cr 含量变化规律相一致。

## 2.3 摩擦磨损性能

### 2.3.1 摩擦系数和磨损量

试样摩擦系数随时间的变化情况如图 7 所示。结果表明，65Mn 基材的摩擦系数最高，且波动较大，平均摩擦系数为 0.260。这是由于 65Mn 钢材的表面硬度较低，与较硬摩擦副 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 球对磨时，使大量磨屑脱落，粘附在磨痕表面，导致摩擦系数波动较大，

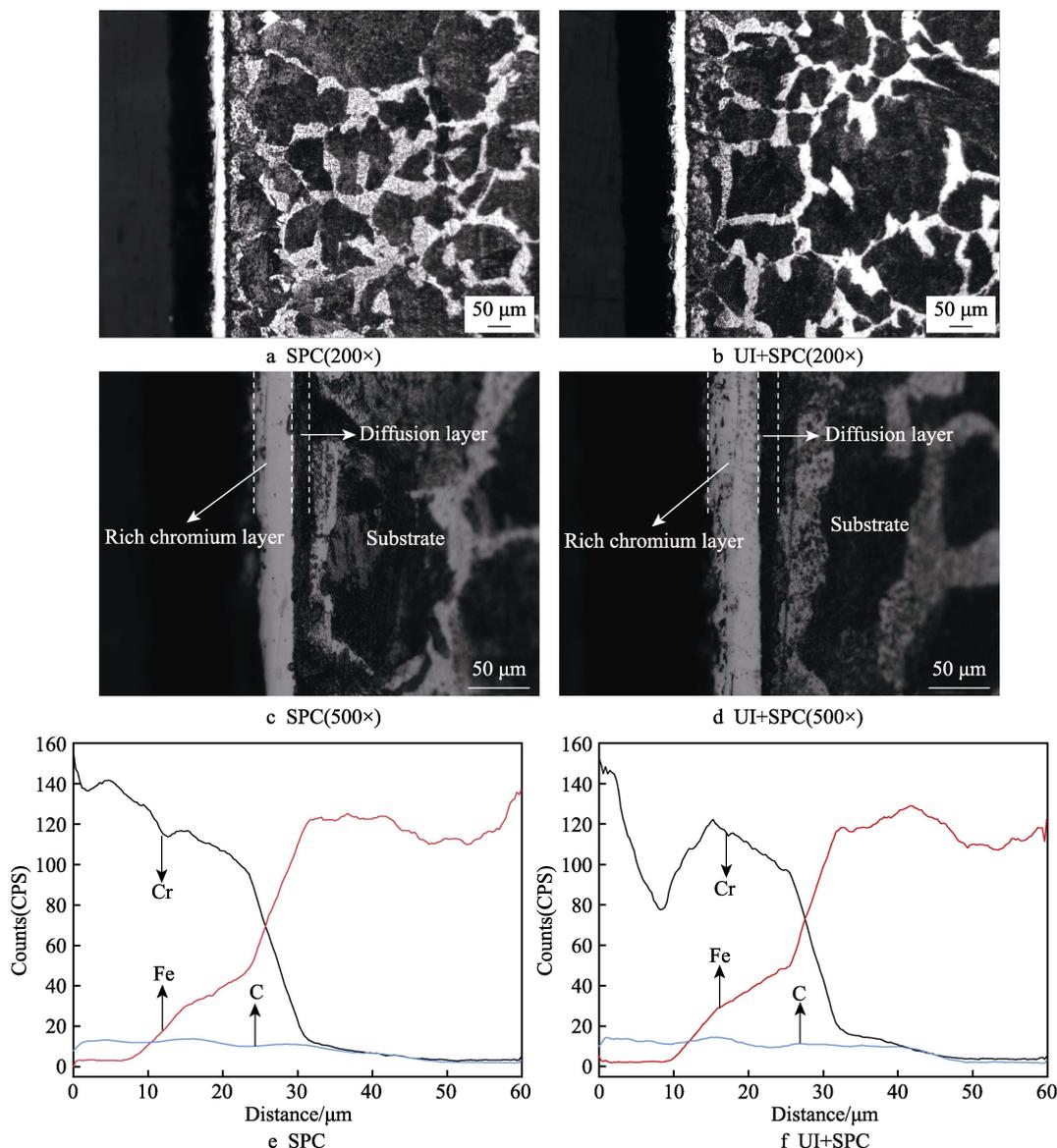


图5 渗铬层截面形貌和EDS线扫描分析  
Fig.5 Cross section morphology (a—d) of chromized layer and EDS line scanning analysis (e,f)

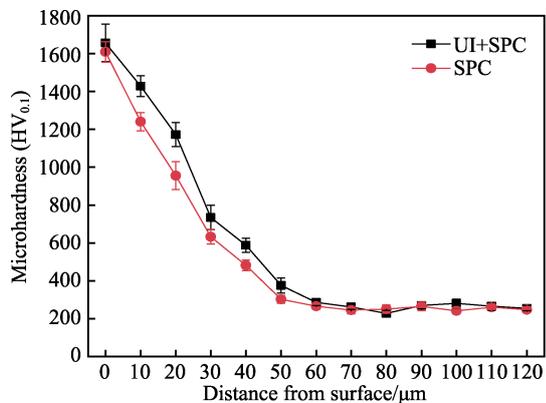


图6 渗铬层显微梯度硬度  
Fig.6 Micro-gradient hardness of chromized layer

磨损较严重。SPC 试样表面的摩擦系数较平缓,前 5 min 内,摩擦系数急剧上升至 0.247 左右,随后缓慢下降至 0.156 左右。随着磨损的进行,摩擦系数趋于平缓,

其平均摩擦系数为 0.205。UI+SPC 试样表面的摩擦系数在前 10 min 内,先急剧上升至 0.224 左右,随后缓慢下降至 0.136 左右。随着磨损的进行,摩擦系数趋于平缓,其平均摩擦系数为 0.170。这是因为 SPC 试样和 UI+SPC 试样具有较高的表面硬度,对磨时,少量磨屑脱落,经预磨期摩擦系数上升后,随着磨损的进行,对磨表面粗糙度降低,摩擦系数下降,然后轻微波动。由磨损量(如图 8 所示)可知,65Mn 基材具有最大的磨损量,为 6.452 mg, SPC 和 UI+SPC 处理试样具有较低的磨损量,分别为 2.163、1.675 mg。综上可知,渗铬层具有良好的抗磨作用,且 UI+SPC 处理可进一步提高渗铬层的耐磨性能,这主要是归因于其高硬度碳化铬的形成和 UI 工艺的引入。

### 2.3.2 磨痕形貌和磨损机理

为确定试样的磨损机理,利用 SEM 和 EDS 分析试样的磨痕形貌和元素含量。基材磨损形貌及其局部



表3 65Mn 基材磨痕表面 EDS 分析

Point	C	O	Si	Mn	Fe
1	1.69	1.86	2.52	1.31	92.62
2	1.64	3.84	6.05	1.25	87.22

表4 SPC 试样磨痕表面 EDS 分析

Point	C	O	Si	Cr	Fe
1	5.62	1.84	0.16	84.25	8.13
2	2.22	2.02	0.52	94.57	0.67

并粘附在磨痕表面<sup>[14-15,38-39]</sup>。综上所述, UI+SPC 试样的磨损机理主要为粘着磨损和氧化磨损, 伴随着磨粒磨损。

由以上分析可知, UI 工艺的引入在提高基体硬度、细化晶粒的同时, 也适当降低了其韧性。当发生

表5 UI+SPC 试样磨痕表面 EDS 分析

Point	C	O	Si	Cr	Fe
1	3.39	11.26	10.15	72.26	2.94
2	1.92	2.18	0.94	94.37	0.59

磨损时, 渗层相对容易脱落, 促进了粘着磨损的发生。同时, 由于晶粒细化作用增加了渗层氧化的概率, 进而使 SPC 试样由原来的“磨粒+粘着”磨损机理转化为 UI+SPC 试样的“粘着、氧化+磨粒”磨损机理。

为进一步研究 3 种试样的耐磨性能, 对 3 种试样磨损的对磨球进行 SEM 观察。Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 对磨球的磨损形貌如图 10 所示。由图 10 可知, 基材对磨球的磨损区域最大, SPC 对磨球次之, UI+SPC 对磨球最小。该结果与摩擦系数和磨损量的试验结果一致, 进一步验证了 UI 工艺的引入有助于增加 SPC 工艺的渗层厚度。

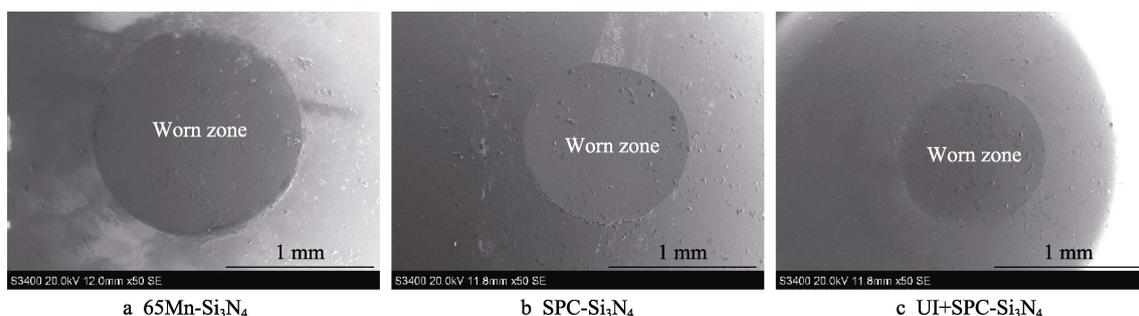


图 10 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 对磨球磨损形貌  
Fig.10 Ball wear morphologies of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

### 3 结论

1) 超声冲击处理可细化 65Mn 钢表面晶粒, 促使 65Mn 钢表面晶粒发生滑移、位错、层错, 使得晶界增加, 引入大量的缺陷和界限。超声冲击处理为粉末渗铬工艺中 Cr 原子的渗入提供了更多的扩散通道, 增强了 Cr 原子的动力学扩散性能。

2) 渗铬层截面金相显微组织表明, 超声冲击处理对粉末渗铬工艺渗层厚度的增加具有促进作用, 复合工艺的渗铬层厚度相比单一渗铬工艺提高了 13 μm, 验证了超声冲击工艺提高渗铬层厚度的可行性。

3) 超声冲击处理可有效提高渗铬层的耐磨性能, 复合工艺处理试样具有较小的摩擦系数和磨损量。对比磨损机理表明, 超声冲击处理的引入提高了基体硬度, 降低其韧性, 导致渗层脱落和粘着磨损的发生, 晶粒细化增加了渗层的氧化概率。超声冲击处理使 SPC 试样的磨损机理由原来的“磨粒+粘着”转化为 UI+SPC 试样的“粘着、氧化+磨粒”。

4) 超声冲击处理对提高化学热处理金属材料的摩擦磨损性能具有积极作用, 但需要合理选择超声冲

击工艺参数, 使金属获得较合适的韧性和晶粒度, 以期达到复合工艺材料抗磨性能的最优化。

#### 参考文献:

- [1] 张伟林, 赵靖宇, 王光辉, 等. 盐浴氮碳共渗对 65Mn 弹簧钢耐磨性的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(2): 127-132. ZHANG Wei-lin, ZHAO Jing-yu, WANG Guang-hui, et al. Effects of Salt Bath Nitrocarburizing on Wear Resistance of 65Mn Spring Steel[J]. Surface Technology, 2017, 46(2): 127-132.
- [2] 郭杰, 刘利国, 孟国庆, 等. QPQ 技术提高 65Mn 钢耐磨性的工艺参数优化[J]. 金属热处理, 2014, 39(2): 116-120. GUO Jie, LIU Li-guo, MENG Guo-qing, et al. Optimization of QPQ Process Parameters of 65Mn Steel for Improving Its Wear Resistance[J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(2): 116-120.
- [3] KE W M, ZHANG F C, YANG Z N, et al. Micro-Characterization of Macro-Sliding Wear for Steel[J]. Materials Characterization, 2013, 82: 120-129.
- [4] ZHOU Zi-li, YUAN Wu-hua, FANG Tie-hui, et al. High

- Temperature Wear Resistance of Cobalt-Based Cladding Layer Surfacing on H13 Steel[J]. Key Engineering Materials, 2019, 815: 81-88.
- [5] HE Bin-feng, MA Da-yan, MA Fei, et al. Microstructures and Wear Properties of TiC Coating Produced by Laser Cladding on Ti-6Al-4V with TiC and Carbon Nanotube Mixed Powders[J]. Ferroelectrics, 2019, 547(1): 217-225.
- [6] ZHANG Liu-yan, YANG Shui-mei, LV Xiao, et al. Wear and Corrosion Resistance of Cold-Sprayed Cu-Based Composite Coatings on Magnesium Substrate[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2019, 28(6): 1212-1224.
- [7] KUSMANOV S A, TAMBOVSKIY I V, KORABLEVA S S, et al. Enhancement of Wear and Corrosion Resistance in Medium Carbon Steel by Plasma Electrolytic Nitriding and Polishing[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(9): 5425-5432.
- [8] HUSSEIN M, ADESINA A, KUMAR M, et al. Investigations of *In Vitro* Corrosion, and Wear Properties of TiN PVD Coating on Ti6Al4V Alloy for Dental Application[J]. Key Engineering Materials, 2019, 813: 1-6.
- [9] 马朝平, 胡建军, 刘妍. 材料表面渗金属技术的研究进展[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2016, 30(10): 65-70.  
MA Chao-ping, HU Jian-jun, LIU Yu. Research Progress of Metallic Cementation Technology on Material Surface[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2016, 30(10): 65-70.
- [10] ZHOU Y B, CHEN H, ZHANG H, et al. Preparation and Oxidation of an  $Y_2O_3$ -Dispersed Chromizing Coating by Pack Cementation at 800 °C[J]. Vacuum, 2008, 82(8): 748-753.
- [11] HU Jian-jun, ZHANG Yu-qing, YANG Xian, et al. Effect of Pack-Chromizing Temperature on Microstructure and Performance of AISI 5140 Steel with Cr-Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 344: 656-663.
- [12] DONG Zhi-hao, ZHOU Tong, LIU Jie, et al. Effects of Pack Chromizing on the Microstructure and Anticorrosion Properties of 316L Stainless Steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 366: 86-96.
- [13] LIN Nai-ming, XIE Fa-qin, YANG Hui-jun, et al. Assessments on Friction and Wear Behaviors of P110 Steel and Chromizing Coating Sliding Against Two Counterparts under Dry and Wet Conditions[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(11): 4960-4970.
- [14] LIN Nai-ming, XIE Fa-qin, ZHOU Jun, et al. Microstructures and Wear Resistance of Chromium Coatings on P110 Steel Fabricated by Pack Cementation[J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, 17(6): 1155-1162.
- [15] LIN Nai-ming, XIE Fa-qin, TANG Bin. Corrosion Resistance of Chromizing Coating in Simulated Oilfield Stratum Water[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(S2): 658-662.
- [16] 赵晓博. 低温固体粉末渗铬机理的研究[D]. 济南: 山东大学, 2011: 2-9.  
ZHAO Xiao-bo. The Research of Low Temperature Solid Power Chromizing Mechanism[D]. Jinan: Shandong University, 2011: 2-9.
- [17] 唐相国, 代明江, 韦春贝, 等. 不同稀土掺杂固体渗铬对 Cr-RE 渗层结构及性能的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(10): 157-164.  
TANG Xiang-guo, DAI Ming-jiang, WEI Chun-bei, et al. Influence of Solid Chromizing Doped with Various Rare Earths on Microstructures and Properties of Cr-RE Coatings Fabricated by Pack Cementation[J]. Surface Technology, 2018, 47(10): 157-164.
- [18] 程亮, 李强, 董鲜峰, 等. 稀土元素钇对粉末冶金制备 V-5Cr-5Ti 合金微观组织的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2015, 20(1): 14-18.  
CHENG Liang, LI Qiang, DONG Xian-feng, et al. Effect of Yttrium on Microstructure of V-5Cr-5Ti Alloys Prepared by Powder Metallurgy[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2015, 20(1): 14-18.
- [19] WANG Shu-feng, LI Hui-qi, CHEN Xiang, et al. Improving Microstructure and Wear Resistance of Plasma Clad Fe-Based Alloy Coating by a Mechanical Vibration Technique during Cladding[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 528(1): 397-401.
- [20] WANG P F, HAN Z, LU K. Enhanced Tribological Performance of a Gradient Nanostructured Interstitial-Free Steel[J]. Wear, 2018, 402-403: 100-108.
- [21] SAHU J N. Development of Hard and Wear Resistant Surface Coating on Ni-Cr-Mo Steel by Surface Mechano-Chemical Carburization Treatment (SMCT)[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 263: 285-295.
- [22] 李庆达, 王志明, 郭建永, 等. 自纳米化结构金属材料摩擦磨损研究现状[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 85-96.  
LI Qing-da, WANG Zhi-ming, GUO Jian-yong, et al. Research Status on Friction and Wear of Self-Nanostructure Metal Materials[J]. Surface Technology, 2020, 49(3): 85-96.
- [23] ZHANG Cong-hui, SONG Guo-dong, WANG Jing, et al. Influence of Surface Nanocrystallization on Aluminizing Behavior of AZ91D Magnesium Alloy[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(2): 447-453.  
ZHANG Cong-hui, SONG Guo-dong, WANG Jing, et al. Influence of Surface Nanocrystallization on Aluminizing Behavior of AZ91D Magnesium Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(2): 447-453.
- [24] LALEH M, KARGAR F, VELASHJERDI M. Low-Temperature Nitriding of Nanocrystalline Stainless Steel and Its Effect on Improving Wear and Corrosion Resistance[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22(5): 1304-1310.
- [25] YU J H, LEE K Y, SHIM D S, et al. Metal Embedding and Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification Technology for Super Wear-Resistant Mechanical Parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(1-4): 951-962.
- [26] 齐涛, 郭喜平. 镍硅化物基合金 Si-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 共渗涂层的组织形成[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(10): 1822-1828.  
QI Tao, GUO Xi-ping. Structure Formation of Si-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Co-Deposition Coatings on Nb-Silicide-Based Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(10): 1822-1828.