doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.01.015

超声表面加工和硫氮共渗复合处理对 35CrMo 钢 表面性能的影响 *

田 斌¹,岳 文²

(1. 北京工商大学 材料与机械工程学院,北京 100048; 2. 中国地质大学(北京) 工程技术学院,北京 100083)

摘 要:为了同时减少钻杆接头和对磨套管的磨损,采用超声表面加工技术和硫氮共渗技术对钻杆接头材料 35CrMo 钢进行复合处理。利用光学三维形貌仪、扫描电子显微镜、EDS 能谱仪、显微硬度计和 X 射线衍射仪分别研究了试样的 表面形貌、粗糙度、成分、硬度和相结构,并在水基钻井液润滑条件下采用环块磨损试验机考察了 35CrMo 钢和套管对磨 副的磨损性能。结果表明,超声表面加工可以使 35CrMo 钢和硫氮共渗复合处理改性层的表面粗糙度均显著降低,进一 步提高硫氮共渗改性层硬度,显著改善 35CrMo 钢的耐磨性能,并使对磨副套管的磨损率明显降低,钻杆接头和套管的 磨损表面形貌也得到显著改善。

关键词:超声表面加工;硫氮共渗;35CrMo钢;钻杆接头;磨损性能 中图分类号:TG174.44 **文献标志码:A 文章编号:**1007-9289(2016)01-0103-08

Influences of Ultrasonic Surface Processing and Nitriding–Sulphurizing Treatments on Surface Properties of 35CrMo Steel

TIAN Bin¹, YUE Wen²

 School of Materials Science and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048; 2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083)

Abstract: To reduce the wear of both drilling pipe joints and casing pipes, 35CrMo steel used in drilling pipe joints was successively treated by ultrasonic surface processing and nitriding-sulphurizing treatment. Surface morphology, roughness, composition, hardness, and phase structure, were characterized by optical profilometer, scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS), micro-hardness tester, and X-ray diffraction (XRD). The wear properties of 35CrMo drilling pipe joints and casing pipes were evaluated on a ring-block wear tester under lubrication with water-based drilling fluid. The results show that the ultrasonic surface processing can remarkably reduce the surface roughness of 35CrMo samples both with and without sulfur-nitrade treatments. The samples with both the surface nanocrystallization and nitriding-sulphurizing treatments have higher surface hardness, obviously improve the anti-wear properties of 35CrMo steel, and lower the wear rates of the casing pipe samples. At the same time, worn surface morphologies of both drilling pipe joints and casing pipes are evidently improved.

Keywords: ultrasonic surface processing; nitriding and sulphurizing; 35CrMo steel; drilling pipe joints; wear properties

收稿日期: 2015-08-22; 修回日期: 2016-01-06; 基金项目: *北京工商大学青年教师科研启动基金(QNJJ2015-17)

通讯作者:田斌(1981-),男(汉),讲师,博士;研究方向:机械零部件的表面工程和摩擦学;Tel:(010)82324213;E-mail:tianbin@btbu.edu.cn

网络出版日期: 2016-01-30 18: 01; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.tg.20160130.1801.030.html

引文格式:田斌,岳文. 超声表面加工和硫氮共渗复合处理对 35CrMo 钢表面性能的影响[J].中国表面工程,2016,29(1): 103-110. TIAN B, YUE W. Influences of ultrasonic surface processing and nitriding-sulphurizing treatments on surface properties of 35CrMo steel [J]. China Surface Engineering, 2016, 29(1): 103-110.

0 引 言

随着深部钻探、超深钻探和弯井等特殊井况 的出现,钻杆接头的自身磨损及其对套管内壁的 磨损成为需要得到同等重视的问题^[1-2]。35CrMo 钢是一种国内普遍使用的钻杆接头材料,采用各 种表面硬化和强化处理技术可以有效改善其摩 擦学性能。渗硼和渗氮等均可以显著改善钻杆 接头的耐磨性能^[3-4],但没能有效解决其对套管的 磨损问题;通过在钻杆接头表面焊接含有减摩成 分的高硬度合金耐磨带,可以有效减少钻杆接头 磨损及其对套管内壁磨损,但焊接的耐磨带存在 结合力差、易出现裂纹,在钻进过程中会发生耐 磨带材料脱落等问题^[1,2,5];对 35CrMo 钢进行硫 氮共渗表面处理可获得高强度自润滑地质钻杆 接头^[6-7], 但现有的研究主要集中在 35CrMo 钻杆 接头的耐磨性能上,并没有将对磨套管的磨损问 题进行重点研究。

已有研究^[8-10]表明,表面纳米化技术通过在 材料表面形成纳米晶结构,可以促进化学热处理 过程的进行,在较低温度和较短的时间内可以获 得更厚的渗硫层和渗氮层。因此,如果将表面纳 米化和硫氮共渗相结合对 35CrMo 进行复合处 理,将有望获得减摩性能和耐磨性能更加优异的 钻杆接头,但是目前为止还未见到在 35CrMo 钻 杆接头上进行纳米化处理和硫氮共渗复合处理, 并将钻杆接头和套管的磨损同时进行研究的 报道。

文中以钻杆接头常用的 35CrMo 钢为研究对 象,采用超声表面加工和硫氮共渗对其进行复合 处理,研究其对 35CrMo 钢表面形貌、粗糙度、硬 度和相结构等的影响,并在水基钻井液润滑条件 下利用环-块磨损试验机对钻杆接头和套管的磨 损性能进行对比研究。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

钻杆接头和套管均为 35CrMo 钢^[11],调质处 理,硬度 $370 \text{ HV}_{0.5}$,其中钻杆接头基材为内径 16 mm,外径 40 mm,长 100 mm 的圆管,分别先 后进行表面纳米化和硫氮共渗处理;套管试样尺 寸为: $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm},$ 磨损试验前用 $40 \mu m(1 000 \text{ })$ 砂纸进行表面打磨。

摩擦磨损试验中的润滑使用水基钻井液,其成

分为(质量分数):水 + 2% 钠土浆 + 0.3% PAC-LV(低粘度聚阴离子纤维素)+4% GJL-1(自研降 滤失剂)+4% SPNH(褐煤树脂)+0.2% NaOH+ 2% 聚合醇 + 2% FT-1A(磺化沥青粉)+重晶石 (密度 1.2 g/mL),其性能见表1所示。

表1 钻井液性能

Table 1	Properties	of the	drilling	fluids
---------	------------	--------	----------	--------

Parameters	Values
Apparent viscosity/(mPa • s)	24
Plastic viscosity/(mPa • s)	21
Yield point/Pa	3
Gel strength (10 s)/Pa	2
Gel strength (10 min)/Pa	3
Filtration loss API/(mL)	2

1.2 试验方法

采用天津天东恒科技发展有限公司生产的 USP-125型超声金属表面加工处理装置对 35CrMo圆管试样外表面进行处理,该装置的示 意图见图1所示。结合文献^[12]和课题组前期试 验结果^[13],确定优化处理工艺如下:采用直径10 mm的WC陶瓷球,频率20kHz,振幅20μm,静 载荷300N,转速200r/min,进刀量0.03 mm/r, 往复处理10次。处理过程为,首先通过WC陶 瓷球对工件圆弧外表面施加300N的静载荷,然 后以0.03 mm/r的进给速度对旋转的工件进行 连续超声机械振动冲击,使工件的外表面材料发



图 1 超声表面加工装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the ultrasonic surface processing equipment 其表面的微观形貌和微观结构,从而提高其综合 力学性能。表面处理后采用线切割将圆管试样分 切为厚度 10 mm 的圆环试样。

采用 LDM2-15 型等离子化学热处理设备对 35CrMo 圆环试样先后进行离子渗氮和离子渗硫 表面处理^[6-7],渗氮工艺参数如下:保温温度 550℃、保温电压 700 V、保温真空度 550~600 Pa、 保温时间5 h;渗硫工艺:保温温度230℃、保温电 压 860 V、保温真空度 30~50 Pa、保温时间 2.5 h。

采用 M-200 型环-块磨损试验机在水基钻 井液润滑条件下进行磨损试验,固定载荷 400 N, 试验时间 30 min,每组试验重复 3 次,平均磨损 率采用 3 次磨损失重的平均值计算得来。其中, 块试样(套管)为上试样,环试样(钻杆接头)为下 试样,过程中将环试样的底部浸泡于钻井液当 中,随着环试样的旋转将钻井液带到摩擦表面来 实现润滑。

为便于标示和说明,对文中的试样进行编号,具体见表2所示。

Table 2	E Explanation of the sample numbers
No.	Treatment
S	35CrMo substrate
300N	Sample S after ultrasonic surface treatment
S-NS	Sample S after nitriding and sulphurizing
300N-NS	Sample 300N after nitriding and sulphurizing

表 2 试样编号说明

1.3 测试仪器

采用 NanoMap-D 表面三维形貌仪在白光干 涉模式下,对试样表面形貌进行观察,同时结合 其自带的 SPIP 软件(Scanning Probe Image Processor)进行表面粗糙度的分析处理;采用 JEOL JSM-7001F 型扫描电子显微镜(SEM)观察试样 的表面形貌,并利用自带 EDS 能谱仪测定其成 分;采用 D/MAX-2500 型 X 射线衍射仪(XRD)分 析样品的相结构,具体参数为 Cu 靶,电压 40 kV, 电流 200 mA,测量模式为连续扫描,速度 4°/min; 采用 MH-6 型显微硬度计对试样的表面硬度进 行测定,加载载荷 50 g;采用精度为 0.1 mg 的电 子天平对试样的磨损失重进行测量,并采用 NanoMap-D表面三维形貌仪对试样磨损表面形 貌进行观察。

2 结果与讨论

2.1 表面形貌和粗糙度

图 2 为不同表面处理后试样表面的典型二 维光学形貌。由 1 mm×1 mm 大小的光学形貌 可见,超声表面加工后试样表面整体平坦, 35CrMo基材试样 S 表面原有的车削等机加工痕 迹显著弱化,表明试样表面发生了明显的塑性变 形;而无论试样是否经过超声表面处理,其经过 硫氮复合处理后,表面形貌均出现粗糙化。



图 2 超声表面加工和硫氮共渗处理前后试样表面典型 二维光学形貌

Fig. 2 Typical two-dimension optical morphologies of the sample surfaces with and without ultrasonic surface treatment and nitriding-sulphurizing treatment

图 3 为不同试样表面的 SEM 形貌。与二维 光学形貌结果一致,硫氮复合处理后试样表面出 现随机分布的颗粒状形貌,而 300N-NS 试样表 面不仅颗粒排列更致密,而且由于超声表面处 理,颗粒明显变小,并有个别微裂纹出现。

图 4 和图 5 分别为利用三维形貌仪和 SPIP 软件对试样表面 1 mm×1 mm 区域大小进行扫 描和处理得到的粗糙度结果和典型二维轮廓曲 线。可以看到,与图 2 结果一致,超声表面处理 后,300N 试样的粗糙度 Sa 和 Sq 比 S 试样分别 降低约 96%和 94%,轮廓曲线显著平缓;硫氮复 合处理后,试样表面粗糙度显著上升,轮廓曲线 起伏明显加大,但 300N-NS 试样的粗糙度 Sa 和





(c) S-NS

(d) 300N-NS



Fig. 3 SEM images of the sample surfaces with and without ultrasonic surface treatment and nitriding-sulphurizing treatment



图 4 超声表面加工和硫氮共渗处理前后试样表面粗 糙度

Fig. 4 Surface roughness of the samples with and without ultrasonic surface treatment and nitriding-sulphurizing treatment

Sq仍比 S-NS 试样分别降低约 83%和 82%,而 粗糙度降低将有利于试样磨损性能的改善。

2.2 成分和相结构

图 6 为硫氮共渗复合处理前后试样表面的 EDS 能谱图。由图可见,与 S 试样相比,硫氮共 渗复合处理后,S-NS 试样和 300N-NS 试样表面 的 Fe 元素含量均显著降低,均出现 N 元素和 S 元素,但含量区别不显著。

图 7 为试样超声表面处理前后和和硫氮共 渗处理前后的 X 射线衍射谱图。由图 7(a)可见, 表面处理后,300N 试样的(110)、(200)、(211)3 个衍射峰位的半高峰宽均出现不同程度的宽化, 表明 35CrMo 表面处理后,试样表面晶粒得到了 细化,但由于微观应变也会引起一定的衍射峰宽 化^[14],因此晶粒的准确尺寸还需要下一步采用 TEM 观察来确定。而由图 7(b)可见,硫氮共渗 处理后,S-NS 试样和300N-NS 试样表面均出现 了铁氮化物相的衍射峰位,以 Fe₃N 和 Fe₄N 为 主,也有少量的 Fe₂N,比较发现,300N-NS 试样



图 5 超声表面加工和硫氮共渗处理前后试样表面典型二维轮廓曲线

Fig. 5 Typical 2D profile curves of the sample surfaces with and without ultrasonic surface treatment and nitriding-sulphurizing treatment



图 6 硫氮共渗处理前后试样表面的 EDS 能谱图 Fig. 6 EDS results of the samples with and without the nitriding and sulphurizing treatment

的铁氮化物相衍射峰位有比较明显的增强,但铁 硫化物相 FeS 的衍射峰位变化不明显,表明超声 表面处理对 35CrMo 渗氮处理的促进程度更为显 著,这点在硬度上也得到了印证。图 8 为不同试 样截面的硬度分布,由结果可见,S-NS 和 300N-NS 的表面硬度平均值分别为 702 HV_{0.05}和 789 HV_{0.05}。超声表面处理后 300 N 试样的表面硬度 达到 480 HV_{0.05},显著高于基体 S 的 361 HV_{0.05}, 超声表面处理对基体 S 硬度的显著提高主要体 现在约 40 μ m 深度范围内。而超声表面处理过 程通过使材料表面产生显著塑性变形和形成纳 米晶结构表层来实现表面粗糙度的改善,以及表 面硬度的提高。

由文献[7]可知,35CrMo钢试样硫氮共渗层 的厚度只有约15μm,而由于表面渗氮层的存在 严重抑制了后续渗硫处理过程中活性S原子与 基体中 Fe原子之间的化学反应,因此其中渗硫 层的厚度也只有数十纳米。而由图8试样截面 硬度分布结果可见,超声表面处理后,硬度同 样出现了与基体试样硬度类似的快速降低,表明



(b) With and without nitriding and sulphurizing treatment



Fig. 7 XRD patterns of the sample surfaces with and without ultrasonic surface treatment and the nitriding and sulphurizing treatment



图 8 超声表面加工和硫氮共渗处理前后试样截面的硬 度分布

Fig. 8 Hardness profile on cross section of the samples with and without ultrasonic surface treatment and nitriding-sulphurizing treatment 渗氮层的厚度并没有出现明显提高,但是由于纳 米化改性层的存在一定程度上促进了渗氮的进 行,因此 300N-NS 试样表面和过渡层硬度均高 于基体渗氮试样。在渗硫层方面,与 S-NS 一 致,300N-NS 试样表面硬度均略低于其次表层 硬度,这是由于 FeS 存在所导致,而 300N-NS 试 样表面硬度的降低幅度更大一些,这可能与表面 渗硫层厚度和 FeS 含量更高一些有关,而采用俄 歇能谱等分析手段对渗层成分和含量的深度分 布等深入研究将在今后的工作中进行。

2.3 磨损性能

图 9 为钻井液润滑条件下钻杆接头和套管 试样的平均磨损率。由图可见,硫氮共渗处理 后,套管和钻杆接头的磨损率均显著降低,而超 声表面处理和硫氮共渗复合处理可以使套管和 钻杆接头的磨损率进一步降低。与 S-NS 试样 相比,300N-NS 钻杆接头试样及其对磨套管的 磨损率分别降低约 43%和 28%。



图 9 钻杆接头和套管试样平均磨损率



这表明,硫氮共渗处理后形成的高硬度铁的 氮化物可以显著改善35CrMo钢的耐磨性能,同 时具有优异减摩性能的FeS相又可以形成有效 润滑,从而实现钻杆接头和套管摩擦副双方均出 现磨损率显著降低的现象,而对于 300N-NS 试 样,由于超声表面处理获得的晶粒细化结构可以 进一步促进渗氮和渗硫处理,因此可以获得更加 优异的耐磨性能和润滑效果。

2.4 磨损表面形貌

图 10 和表 3 分别为钻井液润滑条件下钻杆

接头和套管试样的典型磨损表面三维形貌图和 磨损表面粗糙度对比结果。对比图 10 可见,S 试 样磨损表面以犁沟和粘着形貌为主(图 10(a)), 而与之对磨的套管试样磨损表面同样有明显的 犁沟和严重的粘着(图 10(d)),表明磨粒磨损和 粘着磨损是其主要磨损机制;S-NS 试样和与之 对磨的套管试样磨损表面的犁沟明显变窄变浅, 粘着现象也显著减少(图 10(b)(e)),表 3 中的结 果也表明,硫氮共渗处理后,钻杆接头和套管典 型磨损表面的粗糙度 Sa 分别降低约 62%和 93%;而 300N-NS 试样的磨损表面得到进一步 显著改善,磨损表面上只有很浅的犁沟形貌,对 磨套管表面同样只有沿滑动磨损方向的较浅的 犁沟,粘着形貌基本消失,与 S-NS 试样相比,钻 杆接头和套管典型磨损表面的粗糙度 Sa 分别降 低约 86%和 53%。





图 10 钻杆接头试样和对磨套管试样典型磨损表面的三维形貌

Fig. 10 Typical three-dimension morphologies of worn surfaces of the drilling pipe joints and the counter-frictional casing pipe samples

(nm)

表 3 钻井液润滑条件下试样典型磨损表面的粗糙度 Sa Table 3 Surface roughness Sa of the typical worn sur-

faces of samples under lubrication of the drilling fluids

Samples	S	S-NS	300N-NS
Joints	1 452	549	77
Casing pipe	2 159	145	68

这表明,超声表面处理和硫氮共渗复合处理 可以进一步改善35CrMo钢的磨损性能,不仅使 其具有更低的磨损率、更平坦的磨损表面,同时 可以兼顾对磨副套管,使套管的磨损率显著降 低、磨损表面得到显著改善,是一种改善35CrMo 钢钻杆接头表面性能的有效途径。

硫氮共渗改性层是一种减摩耐磨性能优异 的改性层^[4,6-7]。其中高硬度的铁氮化物可以抵 抗磨损过程中外力产生的塑性变形,为表层提供

很好的支撑,从而提高基体的耐磨性能,而表层 的 FeS 具有密排六方易滑移结构,变形抗力小, 减摩和润滑性能优异,可以通过摩擦转移等方式 使对磨副得到保护,另外其疏松多孔的结构可用 于吸附和储存钻井液,进一步改善摩擦磨损条 件。而对于超声表面处理后再进行硫氮共渗复 合处理的35CrMo来说,一方面,超声表面处理使 得 35CrMo 试样表面的粗糙度显著降低,减少了 摩擦磨损过程中摩擦表面微凸体之间的卡咬,降 低了摩擦表面的磨损剧烈程度,获得较为平坦的 磨损表面;另一方面,由于晶界扩散系数大于晶 内扩散系数,超声表面处理形成的纳米晶结构可 以促进渗氮和渗硫的进行,使渗层的厚度得到提 高[8-10],而在更高硬度的氮化物层支撑下,钻井液 的边界润滑可有效减少粘着磨损的发生,加上 FeS减摩作用的发挥,钻杆接头的磨粒磨损和粘 着磨损得到显著改善,套管也得到有效保护。考 虑到 35CrMo 硫氮共渗层中的渗硫层的厚度只有

数十纳米^[7],在今后的工作中需通过采用 AES 或 XPS 等微观分析手段对硫氮共渗试样磨损前后 的表面进行元素成分、深度分布和化合价态的分 析研究,来进一步深入揭示其磨损机理。

3 结 论

(1) 对钻杆接头用 35CrMo 钢进行超声表面 加工和硫氮共渗复合处理,获得表面粗糙度显著 降低、硬度更高的硫氮复合改性层。

(2) 在水基钻井液润滑条件下,超声表面处 理可以使硫氮共渗复合处理后的 35CrMo 钻杆接 头耐磨性能显著改善,并可以有效保护套管对磨 副;与无表面处理相比,表面处理后硫氮共渗 35CrMo 钻杆接头试样及其对磨套管的磨损率分 别降低约 43%和 28%。

(3)超声表面加工和硫氮共渗复合处理后, 35CrMo钻杆接头的磨粒磨损和粘着磨损都得到 显著抑制,钻杆接头和套管试样表面的磨损形貌 得到显著改善。

参考文献

[1] 韩勇. 钻杆接头与套管摩擦磨损问题的理论与试验研究
 [D]. 南充: 西南石油学院, 2002.
 HAN Y. Theoretical and experimental study on the prob-

lems of friction and wear of drill pipe and casing[D]. Nanchong: Southwest Petroleum Institute, 2002 (in Chinese).
[2] 戴中华,赵文轸,黄安.适于深井钻杆的自熔合金喷焊层

- 磨损特性研究[J]. 中国表面工程, 2003, 16(3): 32-35. DAI Z H, ZHAO W Z, HUANG A. A study of wear characteristics of selffluxing alloy spraywelding overlay for deep well drilling rod[J]. China Surface Engineering, 2003, 16 (3): 32-35 (in Chinese).
- [3] 姜彬霖. 渗硼技术用于钻杆接头表面硬化的试验研究[J]. 探矿工程: 岩土钻掘工程, 2008, 35(3): 28-29.
 JIANG B L. Test study on boriding technology in surface hardening of drilling rod joint[J]. Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunneling, 2008, 35(3): 28-29 (in Chinese).
- [4] 张宁,庄大明,刘家浚,等.离子渗氮和离子渗硫复合处理表面的摩擦学性能[J].中国表面工程,2000,13(2):18-22.
 ZHANG N, ZHUNAG D M, LIU J J, et al. Tribological behaviors of duplex-treated surface by ion-nitriding+ion-sulphurizing[J]. China Surface Engineering, 2000, 13(2): 18-22 (in Chinese).

- [5] HENDERSON LAN. Hardbanding of tool joints on drill pipes[J]. Australasian Welding Journal, 2003, 48: 17-19.
- [6] 车延岗,刘沅东,袁静静,等.钻杆接头材料 35CrMo 硫氮 复合处理层的干摩擦学性能研究[J]. 探矿工程:岩土钻掘 工程,2009,36(11):24-27.
 CHE Y G, LIU Y D, YUAN J J, et al. Study on dry tribological properties of drilling pipe joint material with 35CrMo sulphurized – nitrided compound[J]. Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunneling, 2009, 36(11): 24-27 (in Chinese).
- [7] YUE W, GAO X C, LIU YD, et al. Tribological properties of sulfurized - nitrided layer prepared by a two - step method[J]. Vacuum, 2011, 85: 1011-1016.
- [8] 李杨,许久军,王亮. 42CrMo 钢表面纳米化对离子渗氮的 影响[J]. 中国表面工程,2010,23(3):60-63.
 LI Y, XU J J, WANG L. Plasma nitriding of 42CrMo steel with a nanostructured surface layer induced by surface mechanical attrition treatment[J]. China Surface Engineering, 2010,23(3):60-63 (in Chinese).
- [9] TONG W P, HAN Z, WANG L M, et al. Low-temperature nitriding of 38CrMoAl steel with a nanostructured surface layer induced by surface mechanical attrition treatment [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202: 4957-4963.
- [10] 马国政,徐滨士,王海斗,等.表面纳米化预处理对 1Cr18Ni9Ti不锈钢渗硫层摩擦学性能的影响[J].机械工 程学报,2011,47(11):75-81.
 MAGZ,XUBS,WANGHD, et al. Effect of surface nanocrystallization pretreatment on the tribological properties of sulfide layers of 1Cr18Ni9Ti stainless steel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011,47(11):75-81 (in Chinese).
- [11] SY/T 5200-2012. 钻柱转换接头[S]. SY/T 5200-2012. Drill-stem subs[S] (in Chinese).
- [12] 龚宝明. 金属超声表面滚压加工纳米化研究[D]. 天津: 天 津大学, 2008.

GONG B M. The research of metallic surface nanocrystallization by ultrasonic rolling extrusion processing[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008 (in Chinese).

- [13] WANG Y Y, YUE W, SHE D S, et al. Effects of surface nanocrystallization on tribological properties of 316L stainless steel under MoDTC/ZDDP lubrications[J]. Tribology International, 2014, 79: 42-51.
- [14] 何家文. 追溯历史评表面形变纳米化[J]. 中国表面工程, 2014, 27(5): 1-13.
 HE J W. Comments on nano-treatment of surface attrition via historical review[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(5): 1-13 (in Chinese).