

不同表面技术对挺柱组织及耐磨性的影响

程祥军^{1,2}, 黄国龙^{1,2}, 刘军^{1,2}, 魏涛^{1,2}, 张吉贤^{1,2}

(潍柴动力股份有限公司 内燃机可靠性国家重点实验室, 山东 潍坊 261061)

摘要: **目的** 为解决挺柱可靠性不足的问题, 研究不同表面技术对提高可靠性的效果。**方法** 采用软氮化、感应淬火和复合技术三种表面处理方法制备挺柱。利用显微硬度计、金相显微镜等对三种挺柱的组织、硬度进行了分析。利用 SRV 摩擦磨损试验机测试不同挺柱在干摩擦、富油、贫油条件下的摩擦系数, 并通过体视显微镜和轮廓仪对磨损后的形貌和深度进行了分析。最后在发动机台架上进行 1000 h 负载循环耐久试验, 验证挺柱可靠性。**结果** 氮化挺柱表层组织由 0.006 mm 厚的白亮层和 0.2 mm 厚的扩散层构成, 硬化层薄, 硬度过渡不平缓, 且白亮层中含有大量疏松缺陷。感应淬火挺柱表层为 2 mm 厚的普通马氏体, 硬化层深且硬度过渡平缓。复合强化挺柱表层由 0.04 mm 厚的含氮马氏体层和 2 mm 厚的普通马氏体组成, 硬度过渡平缓且硬化层深。氮化与复合强化挺柱干摩擦和富油摩擦系数随磨损时间基本保持不变, 干摩擦系数分别为 0.56、0.54, 富油摩擦系数均为 0.174, 表明两种挺柱都具有优良的抗粘着磨损与磨粒磨损性能。感应淬火挺柱干摩擦系数随磨损时间急剧增加, 最大达 0.95, 此时因粘着抱死导致试验过早终止, 富油摩擦系数稳定在 0.164, 表明其具有优良的抗磨粒磨损性能, 但抗粘着磨损性能极差。此外, 复合技术挺柱在台架耐久中的表现远优于氮化挺柱, 表面未出现异常磨损及剥落, 而氮化件表面剥落严重。**结论** 复合技术可有效提升挺柱可靠性。

关键词: 复合热处理; 软氮化; 感应淬火; 耐磨性; 挺柱; 显微组织

中图分类号: TG15; TK405 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)11-0119-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.11.018

Effect of Different Surface Treatment on Tappet Microstructure and Wear Resistance

CHENG Xiang-jun^{1,2}, HUANG Guo-long^{1,2}, LIU Jun^{1,2}, WEI Tao^{1,2}, ZHANG Ji-xian^{1,2}

(State Key Laboratory of Engine Reliability, Weichai power company limited, Weifang 261061, China)

ABSTRACT: The work aims to improve wear resistance. The tappet was treated by three kinds of surface treatment including nitriding, inducting hardening and compound technology. The microstructure and hardness of three tappets were analyzed by microhardness tester and metalloscope. The friction coefficient of tappets under three lubrication conditions, including dry friction, sufficient lubrication and insufficient lubrication was studied by SRV friction wear testing machine. Wear morphology and depth were analyzed by stereoscopic microscope and surface profile measuring instrument. Reliability of different tappets was studied by 1000 hours load cycle endurance test at engine bench. Nitriding tappet surface microstructure consisted of 0.006 mm thick compound layer and 0.2 mm thick diffusion layer. Its hardness layer was thin and the transition was not smooth. There were a lot of porosity defects in white layer. Inducting hardening tappet surface microstructure consisted of 2 mm thick general

收稿日期: 2018-05-29; 修订日期: 2018-07-06

Received: 2018-05-29; Revised: 2018-07-06

作者简介: 程祥军 (1987—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为内燃机结构与材料疲劳。邮箱: cxj135757@126.com

Biography: CHENG Xiang-jun (1987—), Male, Master, Engineer, Research focus: combustion engine structure and material fatigue of Internal-combustion engine. E-mail: cxj135757@126.com

martensite layer. Its hardness layer was deep and the transition was smooth. Compound technology tappet surface microstructure consisted of 0.04 mm thick nitric martensite layer and 2 mm thick general martensite layer. Its hardness layer was deep and the transition was smooth. The friction coefficient of nitriding and compound technology tappets were constant under dry friction and sufficient lubrication. The friction coefficient was 0.54 and 0.56 under dry friction. The friction coefficient were 0.174 under sufficient lubrication. Both tappets had excellent adhesive and abrasive wear resistance performance. The friction coefficient of inducing hardening tappet sharply increased under dry friction and was up to 0.95. By the time, the test was terminated due to adhesion clamping. Its friction coefficient was constant at 0.164 under sufficient lubrication. This indicated that inducing hardening tappet had better abrasive wear resistance performance, but it had poor, adhesive wear performance. In addition, the reliability of compound technology tappet was higher than that of nitriding tappet. The surface of compound technology tappet was free from abnormal wear and peeling, while the surface of nitriding tappet had worse peeling. Compound technology can effectively improve the reliability of tappet.

KEY WORDS: compound heat treatment; soft nitriding; induction hardening; wear resistance; tappet; microstructure

凸轮-挺柱摩擦副是发动机里面的三大摩擦副之一,两者属高副点或线接触,易磨损。且随着发动机向节能、高效、低污染、高强度、高可靠性等方向发展,挺柱与凸轮工作负荷增大,挺柱表面疲劳剥落和摩擦磨损性损伤等问题日益突显。传统的单一表面强化技术,如氮化、感应淬火等,已不能满足挺柱减摩、耐磨的要求。研究可用、现代化的表面强化技术是解决此问题的有效手段之一。新发展起来的表面技术^[1-2]可有效改善挺柱的摩擦性质,减小摩擦系数,最终减少磨损,大量学者对此进行了研究。AHN S. G 等^[3]研究了超级渗碳挺柱,与普通渗碳相比,其摩擦系数降低了 40%,抗点蚀能力提升,为发动机降低了 4%~5%的磨损损失。KODAI A 等^[4]研究了 DLC、CrN、TiN 涂层挺柱,研究表明三种涂层均能有效提高挺柱抗粘着磨损,其中 DLC 的摩擦系数最小。AHN J U 等^[5]对含 Si、Ti 和 Cr 的 DLC 涂层挺柱进行了研究,结果表明,含 Si 的 DLC 涂层比含 Ti 和 Cr 的 DLC 涂层具有更好的摩擦性能,且 Si 含量在 5%~9%时最佳。武彬等^[6]研究了 DLC 涂层挺柱,摩擦系数降低 67%,且在实际工况中摩擦损失降低 6%。刘冠成等^[7]研究了 WC、NiCr-Cr₃C₂ 等涂层挺柱, NiCr-Cr₃C₂ 涂层挺柱寿命得到提高,耐磨性最好。李伟军等^[8]研究表明,含 Si 的 DLC 涂层能减小高达 20%的磨损损失,且耐磨性极佳。这些先进涂层主要功能在于降低摩擦系数,减小摩擦损失,起到减磨效果,但这些表面技术成本高,且技术成熟度不高,尚不具备批量工程应用的条件,且重在减磨,对解决挺柱疲劳剥落方面不足。

本文在传统氮化挺柱的基础上,提出了采用氮化后再感应淬火的复合强化技术制备挺柱样件。这种复合强化技术成熟度高、成本低,工程应用前景较大。该复合技术是先进行盐浴软氮化处理,再进行感应淬火处理,将氮化时生成的化合物(ϵ -Fe₂-3N)加热分解,氮原子扩散固溶到奥氏体中,随后急冷,表层形成极细微的含氮马氏体组织(Fe-C-N系)^[9-11]。该种含氮马氏体与普通淬火的马氏体相比,组织细微,位

错密度高,硬度高,强化效果更加显著;与纯氮化相比,极大增加了硬化深度,且具有氮化的众多优点,同时克服了氮化的某些不足,如疏松、脆性大等;还可在表面形成较大的残余压应力,显著提高工件的疲劳强度和耐磨性^[12-15]。本文对比研究了氮化、感应淬火、复合强化三种表面技术对挺柱组织及耐磨性的影响,为工程上解决挺柱磨损剥落提供了一种新的思路。

1 试验

1.1 试验材料

挺柱材料为 Cr12W,其化学成分(以质量分数计)为: C 2.15%, Si 0.22%, Mn 0.56%, P 0.01%, S 0.01%, Cr 12.32%, W 0.72%, Fe 余量。挺柱经锻造成形及调质后,分别进行氮化、感应淬火、复合技术(氮化处理后再进行感应淬火处理)三种表面处理。调质后的金相组织见图 1。调质处理工艺:先加热至 1000~1040 °C,保温淬火 20~40 min,再进回火炉,加热至 550~650 °C,保温 30~100 min,出炉,自然冷却至室温。氮化处理工艺:预热 350~420 °C,保温 40~120 min, 545~575 °C 盐浴氮化,氮化时间 60~150 min, CNO⁻质量分数 32%~36%。感应淬火工艺:高频感应淬火处理(60~400 kHz),加热至 850~970 °C,保温 0~6 s,淬火介质冷却至室温,再在 180~240 °C 低温回火,保温 2~4 h,空冷至室温。

1.2 组织观察及性能测试

采用蔡司金相显微镜观察挺柱显微组织,并用岛津显微硬度计测试硬度梯度。采用 SRV 摩擦磨损试验机分别测试三种挺柱在干摩擦、富油、贫油(仅形成一层薄薄的油膜)时的耐磨性。从挺柱本体截取 $\phi 24$ mm \times 7.9 mm 的圆盘,以直线往复式进行摩擦磨损测试,测试参数:滚球为直径 10 mm 的 GCr15 钢球,硬度为(60 \pm 2)HRC,载荷 200 N,位移 1 mm,频率 20 Hz,测试时间 8 h。用基恩士体视显微镜对挺柱磨

损后的磨痕进行观察和面积测量，并用泰勒轮廓仪测量磨痕深度。

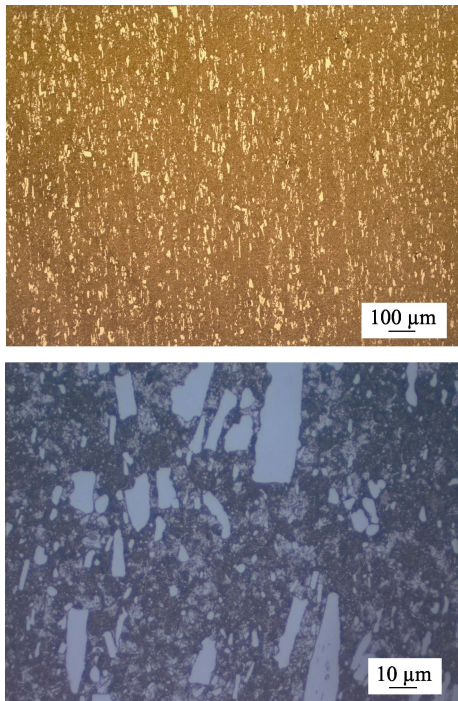


图 1 挺柱基金相组织
Fig.1 Metallographic structure of tappet

采用 AVL 发动机台架测控系统（直列 6 缸柴油机）验证挺柱的可靠性，发动机额定功率为 338 kW，最大扭矩 2110 N·m，排量 12 L，以试验工况怠速 30 s、最大扭矩点 13 min、标定点 13 min 和最高空车点 20 s 为一个循环，共运行 1000 h，其中标定点、最大扭矩点负荷率为 105%，另两点基本无负荷。

2 试验结果与分析

2.1 表层组织

氮化挺柱表层组织从上往下依次为 0.006 mm 厚的白亮层、0.2 mm 厚的扩散层，见图 2。白亮层又称化合物层，主要为 ϵ 相，硬度高且耐磨性好，但此材料在氮化处理过程中易形成被一些碳化物等填充的疏松缺陷。此外，白亮层脆性较大，实际工作中易从此层及疏松填充物等处产生疲劳剥落。氮化挺柱最大的缺点是其硬化层受材料、工艺的限制，层深很难再增加，不利于磨损寿命提高。感应淬火挺柱表层组织为 2 mm 厚的普通马氏体，见图 3。复合强化挺柱表层组织见图 4，从上往下依次为 0.04 mm 厚的含氮马氏体、2 mm 厚的普通马氏体。含氮马氏体是由于氮化生成的化合物层受感应加热分解，氮原子向内扩散，淬火后形成的，能有效提高抗咬合、抗疲劳等性能；而氮未扩散到的区域则形成普通马氏体，与纯感应淬火的组织相同。

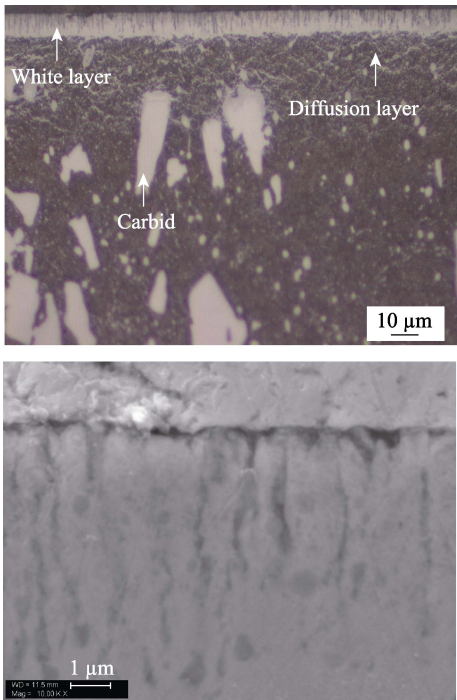


图 2 氮化挺柱截面组织
Fig.2 Cross-sectional microstructure of nitriding tappet

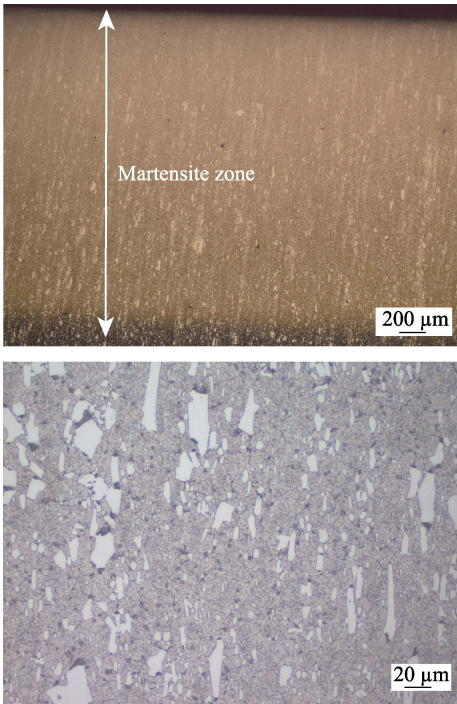


图 3 感应淬火挺柱截面组织
Fig.3 Cross-sectional microstructure of inducting hardening tappet

2.2 硬度梯度

三种挺柱截面显微硬度梯度曲线见图 5。由图可知，其近表面硬度均在 800HV 左右。其中，氮化挺柱硬化层深约 0.2 mm，但硬度过渡不平缓，主要是因为最表层化合物层硬度高，次表层扩散层硬度较低。这种过渡不平缓不利于整体抗磨，一但化合物层

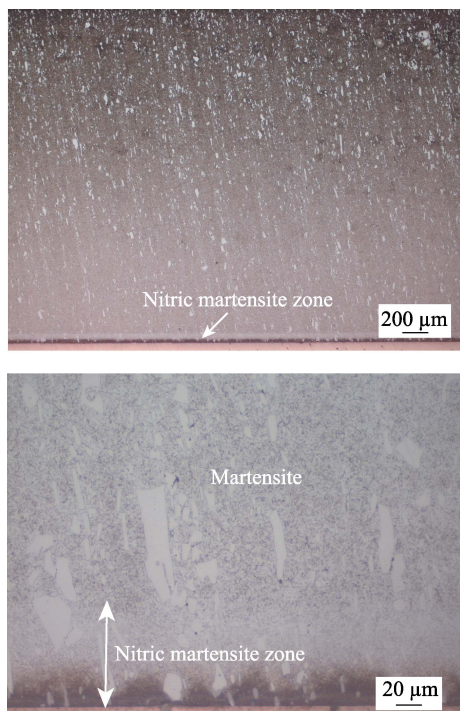


图 4 复合技术挺柱截面组织

Fig.4 Cross-sectional microstructure of compound technology tappet

磨损掉,磨损就会急剧加速,导致零件很快失效。而感应淬火和复合强化的硬化层深大,均约为 2 mm,是氮化的 10 倍,且硬度过渡平缓,这样零件整体耐磨性好,有利于提高磨损寿命。与感应淬火不同的是,复合强化挺柱又多了一层性能优良的含氮马氏体层,可进一步提高疲劳强度。

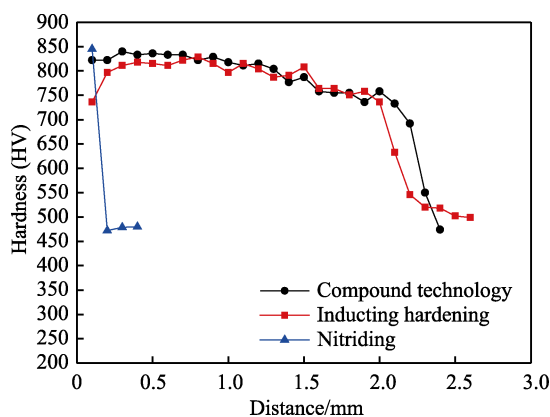


图 5 显微硬度梯度曲线

Fig.5 Microhardness gradient curve

2.3 摩擦磨损试验

2.3.1 干摩擦磨损试验

图 6 为三种挺柱干摩擦磨损试验后的磨损形貌。由图可知,三种挺柱的磨损模式主要为粘着磨损,且通过此试验可分析三种挺柱的抗粘着磨损能力。图 7 为三种挺柱的干摩擦实验结果。由摩擦系数曲线(图 7a)可知,三种挺柱在小载荷阶段摩擦系数均较大,

主要是因为小载荷阶段,摩擦系数受表面粗糙度的影响大。进入设定施加的载荷后,随着磨损时间的增长,氮化与复合强化试样的摩擦系数缓慢升高,基本保持稳定,分别稳定在 0.54、0.56。而感应淬火试样的摩擦系数则呈线性上升,由起初的 0.6 上升至 0.95,且磨损至一定时间后出现严重的粘着、抱死,导致试验过早终止。由图 7b 可知,挺柱经氮化与复合强化后的磨损量、磨损面积及磨痕深度均较小,两者基本相同。而感应淬火后的挺柱磨损程度最大,磨痕深度是另两种的 3 倍,磨损量与另两种差别不大,其原因是因为试验过早终止,磨损时间短。

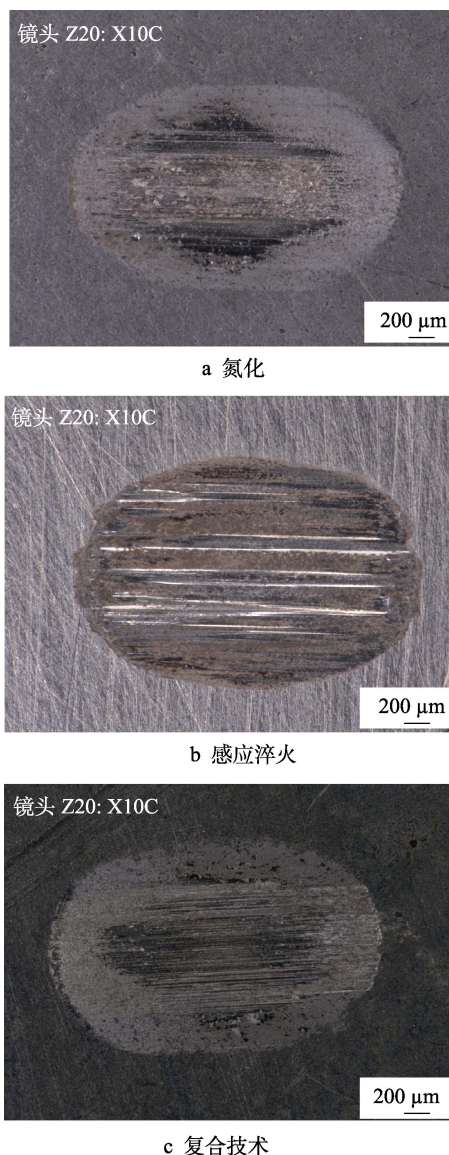


图 6 干摩擦磨损形貌

Fig.6 Wear appearance under dry friction: a) nitriding; b) induction hardening; c) composite technology

综上表明,挺柱经氮化与复合技术处理后,其抗粘着磨损性能优于感应淬火后的挺柱,主要是因为粘着磨损与材料配副关系较大,材料组织越相近,相溶

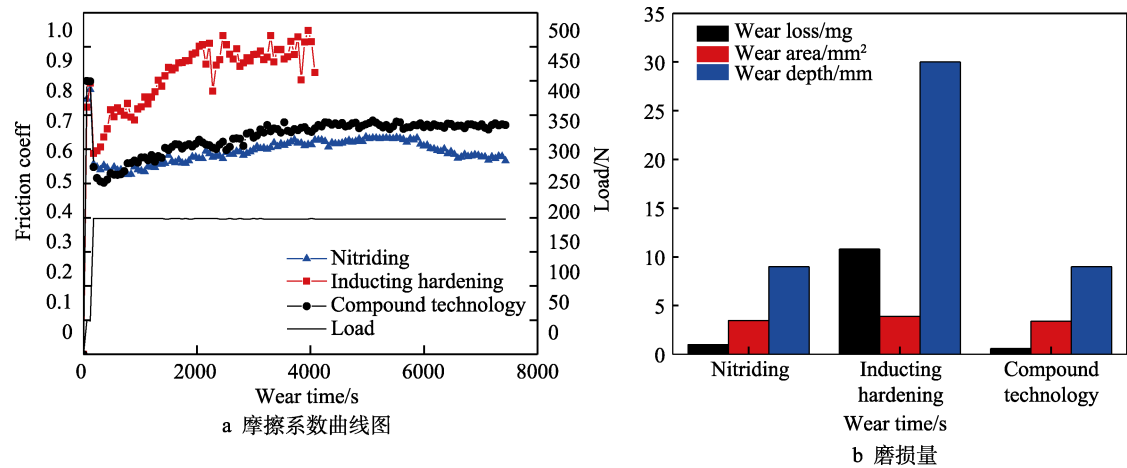


图 7 干摩擦磨损试验结果
Fig.7 Test results of dry friction: a) friction coefficient curve; b) wear amount

性就越大，越易发生粘着磨损。其中，氮化与复合强化表面形成的化合物层和含氮马氏体与配副球的普通马氏体组织微观结构不同，不易粘着；而感应淬火形成的普通马氏体与配副球的组织相同，易粘着。

2.3.2 富油摩擦磨损试验

图 8 为富油摩擦磨损试验后的磨损形貌。由图可见，三种挺柱的形貌为细小的犁沟状，其磨损模式主

要为磨粒磨损。这是由于润滑油是静止的，磨损产生的磨料进入油中成为磨粒，进一步加速了磨损。通过此试验可分析三种挺柱的抗磨粒磨损性能。由摩擦系数曲线图（图 9a）可知，三种表面处理后的摩擦系数均稳定不变，且较小。氮化与复合强化的摩擦系数相同，均为 0.174；感应淬火的摩擦系数最小，为 0.164。从磨损程度（图 9b）来看，感应淬火试样

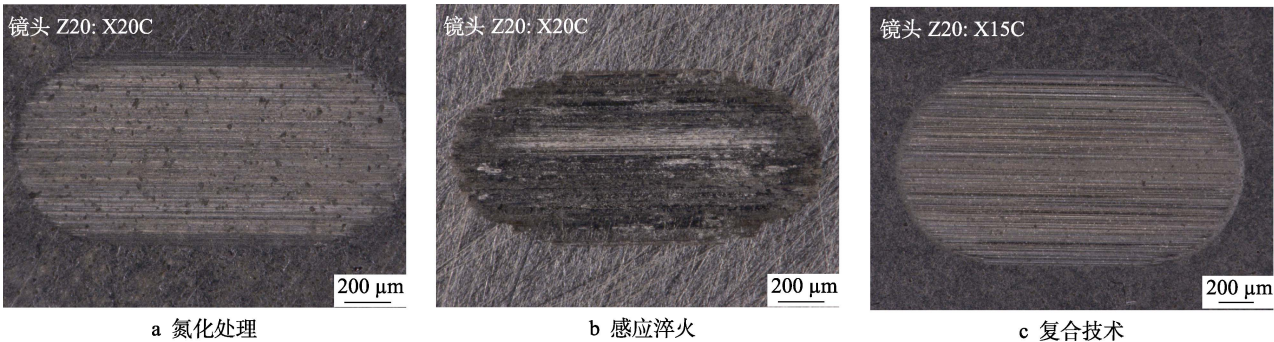


图 8 富油摩擦磨损形貌
Fig.8 Wear appearance under sufficient lubrication: a) nitridation; b) induction hardening; c) composite technology

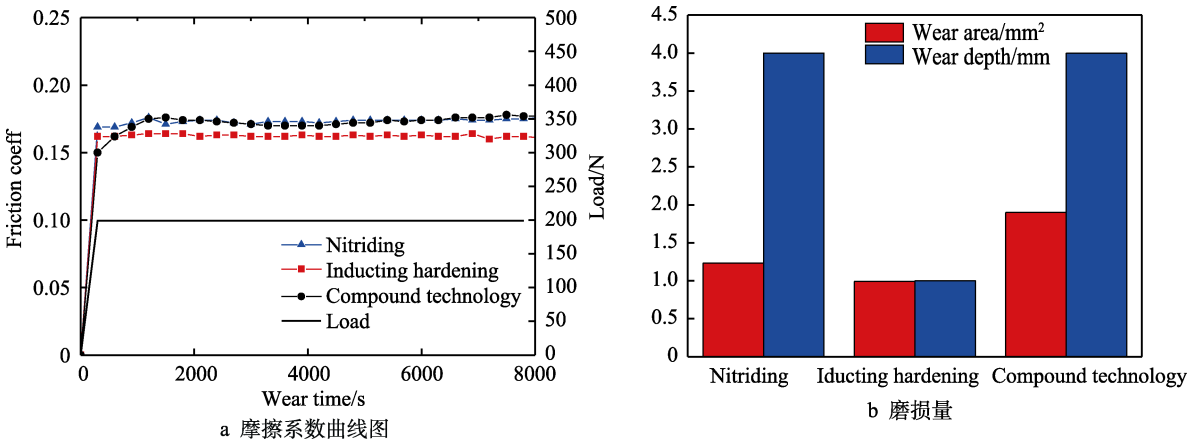


图 9 富油摩擦磨损试验结果
Fig.9 Test result under sufficient lubrication: a) friction coefficient curve; b) wear amount

的磨损程度最小,氮化试样与复合强化试样的基本相同。综上表明,三种挺柱在富油下的耐磨性均较好,其中,感应淬火的耐磨性最佳。

2.3.3 贫油摩擦磨损试验

图 10 为三种挺柱在贫油条件下的摩擦系数曲线图。由图可知,摩擦系数变化呈现出两个阶段:先稳定在较小水平,持续一段时间后,急增至较大值。这

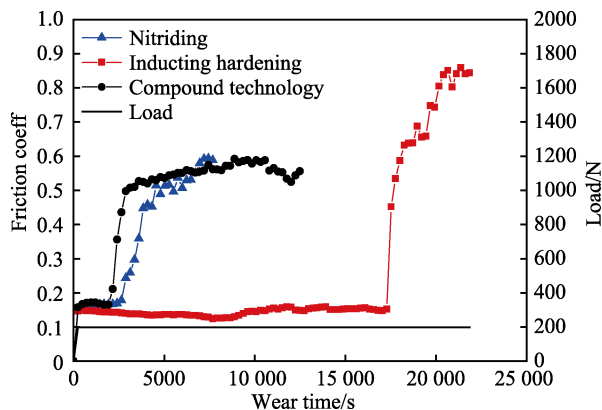


图 10 贫油摩擦系数曲线图

Fig.10 Friction coefficient curve under insufficient lubrication

是因为前期油膜起到了较好的润滑作用,但随着时间延长,油膜被破坏消耗,磨损形式转为干摩擦,导致磨损系数变大。两阶段摩擦系数结果与干摩擦、富油条件下的试验结果基本一致。

2.4 台架耐久试验

综上试验结果表明,考虑挺柱实际工况,即要在发动机起停阶段有较好的抗粘着磨损性能,又要在运行过程中有较好的抗磨粒磨损性能和抗疲劳性能。复合技术最能满足要求,因为与感应淬火相比,其具备优良的抗粘着磨损性能;与纯氮化相比,又具有硬化层深、硬度过渡平缓的特点;此外,相比于另两种技术而言,经复合技术处理后的挺柱表层的含氮马氏体,可大幅度提高疲劳强度和抗疲劳剥落能力。因此,复合技术是最能满足挺柱使用要求的表面技术。

结合组织及磨损试验结果,将传统氮化与复合技术挺柱件装机,进行 1000 h 台架耐久试验,试验后拆检照片见图 11。由图可知,复合技术挺柱表面状态良好,未出现异常磨损和剥落,而传统氮化挺柱表面剥落严重,表明复合技术挺柱可靠性远优于氮化挺柱。

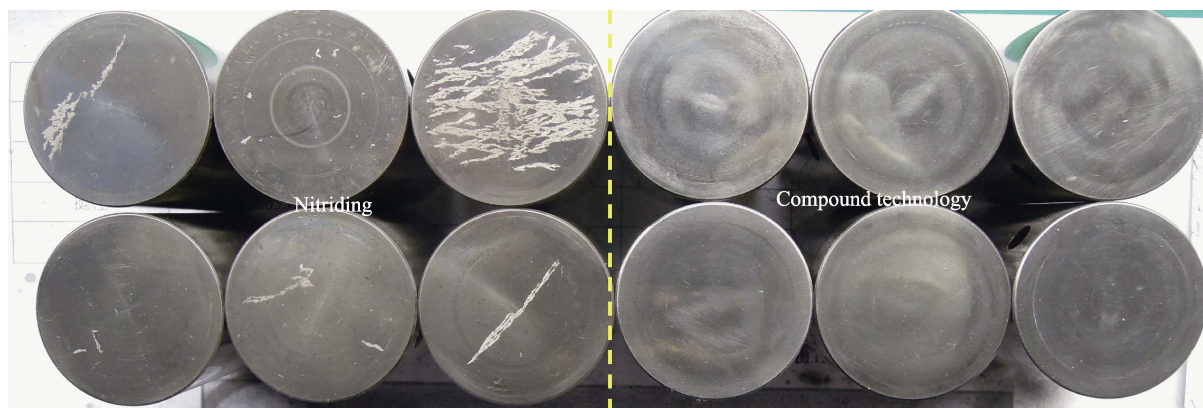


图 11 1000 h 台架耐久试验挺柱拆检照片

Fig.11 Picture of disassembled and inspected tappet after 1000 hours bench endurance test

3 结论

1) 氮化挺柱表层形成了 0.006 mm 化合物层和 0.2 mm 扩散层,硬化层薄且硬度过渡不平缓,不利于提高磨损寿命。感应淬火挺柱表层形成了 2 mm 厚的马氏体层,硬度过渡平缓。复合技术挺柱表层形成了 0.04 mm 厚的含氮马氏体层和 2 mm 厚的普通马氏体,硬化层深是氮化试样的 10 倍,且硬度过渡平缓,有利于提高磨损寿命。

2) 氮化挺柱试样和复合挺柱试样在干摩擦和富油条件下,摩擦系数基本稳定不变,磨损量也较小。氮化试样的摩擦系数分别为 0.54、0.174,复合强化试样的摩擦系数分别为 0.55、0.174,两种挺柱均具备优良的抗粘着磨损和磨粒磨损性能。

3) 感应淬火挺柱干摩擦时,摩擦系数呈线性上

升,最高达 0.95,此时因粘着抱死,导致试验过早终止,且磨损量较大,磨痕深度是另两种的 3 倍。富油时摩擦系数稳定不变,为 0.164,磨损量小。其具备极佳的抗磨粒磨损性能,但抗粘着磨损性能较差。

4) 经 1000 h 台架耐久试验验证,复合技术的挺柱表面良好,未见异常磨损,而氮化挺柱表面疲劳剥落,表明复合技术具有更高的可靠性。

5) 复合技术挺柱的综合性能最优,具有更深的硬化层、更好的耐磨性和更高的疲劳强度,可靠性更高,能有效解决挺柱磨损剥落问题,值得在工程上进一步推广应用。

参考文献:

- [1] BAUDER R, HELBIG J. The new 3.0-ltdi biturbo engine

- from Audi[J]. MTZ, 2012(1): 26-32.
- [2] BOGHE M, CARVALHO N. Surface engineering for DLC coatings[J]. Auto technology, 2006, 39(5): 50-53.
- [3] AHH S G, BAN H O, JO B L, et al. Development of supercarburized tappet shim to improve fuel economy[J]. SAE, 2000, 01(0613): 2-11.
- [4] KODAI A, MORI T, INUKAI T. Applying hard thin coatings to tappets to reduce friction[J]. SAE, 2001, 01(1886): 3-10.
- [5] AHN J U, CHOI S M. Development of Si-DLC coated tappet for improved wear resistance[J]. SAE, 2015, 01(0685): 1-4.
- [6] 武彬, 李骏, 张俊彦, 等. 类金刚石薄膜挺柱的制备与性能[J]. 吉林大学学报, 2013, 43(1): 51-55.
WU Bin, LI Jun, ZHANG Jun-yan, et al. Fabrication and properties of tappet with diamond-like carbon film[J]. Journal of Jilin University, 2013, 43(1): 51-55.
- [7] 刘冠成, 卢继平, 唐其超, 等. 凸轮-挺柱摩擦副涂层的性能分析[J]. 江汉大学学报, 2015, 43(6): 557-565.
LIU Guan-cheng, LU Ji-ping, TANG Qi-chao, et al. Performance analysis of cam-tappet friction coating[J]. Journal of Jiangnan University, 2015, 43(6): 557-565.
- [8] 李伟军, 李周裕, 王媛慧. DLC 涂层改善气门挺柱摩擦学性能的试验研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(5): 704-709.
LI Wei-jun, LI Zhou-yu, WANG Yuan-hui. Experimental study on effects of DLC coating on improvement of tappet tribology characteristics[J]. China mechanical engineering, 2015, 26(5): 704-709.
- [9] 蒋心慧, 黄延芳, 包四平. 氮碳共渗淬火复合热处理的应用[J]. 金属热处理, 1995(9): 26-27.
JIANG Xin-hui, HUANG Yan-fang, BAO Si-ping. The application of compound heat treatment between nitrocarburizing and quenching[J]. Heat treatment of metals, 1995(9): 26-27.
- [10] 刘东雨, 黄建洪, 陈士仁. 含氮马氏体及其应用(I): 基础理论及其应用前景[J]. 金属热处理, 1997(4): 5-8.
LIU Dong-yu, HUANG Jian-hong, CHEN Shi-ren. Nitrogen contained martensite and its application part one: Basic theories and application prospects[J]. Heat treatment of metals, 1997(4): 5-8.
- [11] 刘东雨, 黄建洪, 陈士仁. 含氮马氏体及其应用(II): 工艺与讨论[J]. 金属热处理, 1998(3): 33-37.
LIU Dong-yu, HUANG Jian-hong, CHEN Shi-ren. Nitrogen contained martensite and its application (II): Processes and discussions [J]. Heat treatment of metals, 1998(3): 33-37.
- [12] 唐继海. 38CrMoAl 钢氮碳共渗与激光淬火复合改性层的组织与性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
TANG Ji-hai. Microstructure and properties of modified layer produced by duplex treatment of nitrocarburizing and laser quenching of 38CrMoAl steel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [13] 钟华仁. 钢铁软氮化后再加热淬火处理的组织和性能[J]. 金属热处理, 1983(4): 3-9.
ZHONG Hua-ren. Organization and performance by soft nitriding and quenching compound treatment in steel[J]. Heat treatment of metals, 1983(4): 3-9.
- [14] 饶酒进. 离子氮化+淬火的复合热处理工艺试验[J]. 电讯技术, 1985(4): 52-56.
RAO Jiu-jin. Plasma nitriding and quenching compound heat treatment test process[J]. Telecommunication engineering, 1985(4): 52-56.
- [15] 王志远. 离子氮化加淬火双重热处理提高钢件的耐磨性[J]. 国外金属热处理, 1985(1): 57-60.
WANG Zhi-yuan. Improve wear resistance of steel by nitriding and quenching heat treatment[J]. Foreign heat treatment of metals, 1985(1): 57-60.