

· XXXX ·



针阀体用材 18Cr2Ni2, 2Cr13 和 H13 摩擦 磨损性能的对比

董晓露^{1,2}, 钱进^{1,2}, 郭鑫^{1,2}, 杨梁^{1,2}, 王康³, 朱丽慧³

(1 船舶与海洋工程特种装备和动力系统国家工程研究中心, 上海 201108; 2 中国船舶集团有限公司第七研究所, 上海 201108; 3 上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444)

摘要:为满足柴油机喷油器更大喷射压力、更高工作温度的要求,寻找能替代 18Cr2Ni2 的新一代针阀体用材迫在眉睫。选取经渗碳处理的 18Cr2Ni2 钢、2Cr13 钢和 H13 钢,在柴油介质中分别与 M2 高速钢对磨,进行摩擦磨损试验。通过比较摩擦系数和耐磨性,分析磨损机理,探讨 2Cr13 钢和 H13 钢替代 18Cr2Ni2 作为新一代针阀体用材的可能性。结果表明,18Cr2Ni2 钢、2Cr13 钢和 H13 钢与 M2 高速钢在柴油中对磨时的平均摩擦系数分别为 0.111、0.122、0.132。2Cr13 钢和 H13 钢的磨损率分别只有 18Cr2Ni2 钢的 67% 和 55%。18Cr2Ni2 钢的磨损率最大,主要是由于 18Cr2Ni2 钢的硬度低造成磨粒磨损严重。此外,18Cr2Ni2 钢渗碳层硬度梯度过陡,一定程度加剧了疲劳磨损。三者之中,H13 钢的耐磨性最好,这主要得益于 H13 钢高的硬度、合适的渗碳层深度以及硬度梯度。2Cr13 钢渗碳层的硬度和心部硬度均低于 H13,导致磨粒磨损大于 H13 钢。同时,2Cr13 钢的渗碳层较浅,易引起表层大面积的剥落,疲劳磨损进一步恶化。仅从耐磨性的角度考虑,H13 钢是替代 18Cr2Ni2 针阀体用材较好的材料。

关键词:针阀体; 18Cr2Ni2 钢; 2Cr13 钢; H13 钢; 摩擦系数; 耐磨性

DOI:10.20057/j.1003-8620.N250605 中图分类号: TG142.1

Comparison on the Friction and Wear Performance of 18Cr2Ni2, 2Cr13 and H13 as Needle-Valve Body

Dong Xiaolu^{1,2}, Qian Jin^{1,2}, Guo Xin^{1,2}, Yang Liang^{1,2}, Wang Kang³, Zhu Lihui³

(1 National Engineering Research Center of Special Equipment and Power System for Ship and Marine Engineering, Shanghai 201108, China; 2 Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108, China; 3 School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: In order to meet the requirement of new-generation diesel engine injectors with higher injection pressure and higher working temperature, it is urgent to search for an alternative material to 18Cr2Ni2 steel for the needle-valve body. The carburized 18Cr2Ni2 steel, 2Cr13 steel and H13 steel were chosen to perform the friction and wear test in diesel against M2 high-speed steel. The coefficient of friction (COF) and wear resistance of three steels were compared, the wear mechanism was analyzed, and the possibility of replacing 18Cr2Ni2 steel with 2Cr13 steel or H13 steel as a new material of needle-valve body was explored. The results show that the average COF of 18Cr2Ni2, 2Cr13 and H13 against M2 high-speed steel in diesel is 0.111, 0.122, and 0.132, respectively. The wear rate of 2Cr13 steel and H13 steel is only 67 percent and 55 percent of 18Cr2Ni2 steel, respectively. The wear rate of 18Cr2Ni2 steel is the highest, which is mainly ascribed to the severest abrasive wear because of low hardness. Due to steep hardness gradient of carburized layer, the fatigue wear is exacerbated to some extent. Among the three steels, H13 steel exhibits the best wear resistance. It benefits from the combination of high hardness, suitable carburized layer depth and hardness gradient. Compared with H13 steel, 2Cr13 steel has lower hardness of both carburized layer and core, resulting in severer abrasive wear. Meanwhile, the shallow carburized layer of 2Cr13 steel makes the large-scale spalling easy, further aggravating the fatigue wear. From the viewpoint of wear resistance, H13 steel is a possible alternative material to 18Cr2Ni2 steel for the needle-valve body.

Key Words: Needle-valve Body; 18Cr2Ni2 Steel; 2Cr13 Steel; H13 Steel; Friction Coefficient; Wear Resistance

燃油喷射系统是船用柴油发动机的核心。针阀偶件又是其核心部件,主要由针阀体(通常采用渗碳钢制造)和针阀(通常采用高速钢制造)组成。

针阀体的服役环境复杂苛刻,长期处于高温、高压的环境,直接与高温燃气接触且受高压燃油的周期性冲击,常因磨损、腐蚀和疲劳断裂等原因而失效,

作者简介:董晓露(1990—),女,硕士,高级工程师; E-mail:dongxiaolu@smderi.cn; 收稿日期:2025-12-20

通信作者:朱丽慧(1971—),女,博士,教授; E-mail:lhzhzhu@i.shu.edu.cn

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

严重影响了发动机的可靠性。因此,要求针阀体材料不仅要有极高的硬度、强度和韧性以抵抗机械应力与磨损,还必须具有优异的热稳定性、抗回火软化能力以及良好的耐蚀性。“双碳”背景促使柴油机技术不断改进。为减少气体排放,强化燃油雾化效果、提高燃烧效率,新一代发动机共轨喷油器的喷射压力高达200~300 MPa^[1-2]。作为柴油机燃油喷射系统的核心部件,针阀体将承受更大的载荷,工作环境温度也将提高至250~300 °C^[3],对针阀体材料的性能提出了更高的要求。

18Cr2Ni2钢(德国牌号18CrNi8)是目前主流的针阀体专用钢。该钢渗碳处理后,在保证表面高硬度的同时心部仍可保持优良的韧性,并且工艺性能良好^[2-5]。博世公司在18Cr2Ni2钢的基础上,通过添加Mo元素开发出新一代含Mo针阀体用钢^[6]。上海大学闵永安团队在采用合金化提高18Cr2Ni2钢的性能方面进行了大量的研究^[2-3,6-7]。他们的研究表明,18Cr2Ni2Mo钢的强韧性显著高于18Cr2Ni2钢和18Cr2Ni2Nb钢^[7]。在18Cr2Ni2钢中添加1%的Mo,强塑积从11.73 GPa%提高至18.18 GPa%,冲击功从46.3 J提升到71.0 J。认为添加Mo有助于提升固溶强化、细晶强化和位错强化效果。Mo还可以抑制淬火时孪晶马氏体的生成,因而改善钢的韧性^[3]。然而,18Cr2Ni2钢和18Cr2Ni2Mo1钢均无法满足在250 °C以上的温度使用的要求^[2]。18Cr2Ni2钢的耐高温稳定性和耐蚀性也需提高。寻找能替代18Cr2Ni2的新一代针阀体用材迫在眉睫。

具有良好热稳定性的二次硬化合金钢和时效硬化马氏体钢被认为可以适用于大功率柴油机的针阀体^[2]。H13钢(4Cr5MoSiV1)具有很高的硬度、热强度和耐磨性,抗热疲劳性能好,是应用最多的二次硬化热作模具钢^[8]。国内外近年来对H13钢的成分^[9]和热处理工艺、性能^[10-13],特别是耐磨性^[13-15]进行了大量研究。国内外技术人员曾尝试采用H13钢来试制新一代针阀体,发现其耐热性、耐磨性显著提高,但韧性不足导致针阀体局部开裂^[2-3]。为

此,闵永安团队通过适当添加Mo、减少杂质含量和冶金缺陷、优化热处理工艺等方法,来改善H13钢的综合性能^[2]。当船用发动机使用含硫较高的燃油时,针阀体用钢的耐蚀性能尤为重要。Cr13型马氏体不锈钢耐蚀性优异,硬度、强度高^[16-17]。特别地,2Cr13钢出色的耐蚀性和良好的综合性能^[17-20],也有可能成为新一代针阀体用材。

针阀体一旦失效对柴油发动机的性能及可靠性将产生不利影响。磨损是针阀体主要失效形式之一^[4],它将导致针阀和针阀体配合面的间隙增大、喷油压力降低和雾化不良,从而影响柴油机的功率平衡和运转的稳定性。因此,耐磨性是针阀体材料非常重要的性能指标。针阀体长期在燃油环境下工作,评定材料在柴油介质中的摩擦磨损性能是很有意义的。尽管目前国内外学者认为2Cr13钢和H13钢有替代18Cr2Ni2钢成为新一代针阀体用材的可能性,但目前尚无18Cr2Ni2钢、2Cr13钢和H13钢三种材料在柴油介质中摩擦磨损性能的对比报道。因此,选择经渗碳处理的18Cr2Ni2钢、2Cr13钢和H13钢三种材料,与高速钢对磨。通过比较三种材料在柴油介质中的摩擦因数和耐磨性,分析摩擦磨损机理,探讨2Cr13钢和H13钢替代18Cr2Ni2钢作为新一代针阀体用材的可能性。以期针阀体潜在候选材料的选择和应用提供参考。

1 试验材料与方法

试验用18Cr2Ni2钢、2Cr13钢和H13钢的原始状态均为退火态。其中,18Cr2Ni2钢和2Cr13钢采用真空冶炼、锻造、软化退火工艺制得,H13钢采用电弧炉熔炼+电渣重熔工艺,然后经锻造、轧制、退火。试验用钢的主要成分见表1。

采用Rtec MFT-5000型多功能摩擦磨损试验机,在室温下进行摩擦磨损试验,试验示意图如图1所示。将渗碳、淬火回火后的18Cr2Ni2钢、2Cr13钢和H13钢加工成 $\phi 50.80 \text{ mm} \times 6.35 \text{ mm}$ 的圆盘试样,M2高速钢加工成尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的销。18Cr2Ni2钢的渗碳工艺为930 °C-4 h,2Cr13钢和H13钢的渗碳工艺为950 °C-4 h。盘、销试样的尺寸

表1 试验用钢的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main Chemical Composition of Tested Steels

试验钢	C	Cr	Ni	Mo	V	Si	Mn
18Cr2Ni2	0.18	1.86	2.00	-	-	0.21	0.56
2Cr13	0.22	13.22	0.40	0.14	0.16	1.01	0.99
H13	0.39	5.02	-	1.39	1.00	0.96	0.38

参见文献^[21]。在选择摩擦试验参数时,除考虑针阀体的实际工作环境外,还应考虑摩擦试验机的承受能力。针阀体在柴油燃烧环境下工作,所以本试验选择 10# 柴油作介质。考虑到船用发动机正朝着高速、重载的方向发展,载荷和转速的选择应尽可能取摩擦试验机的上限。综合考虑下,摩擦磨损试验参数为:载荷 140 N,速度 250 r/min,旋转半径 16 mm。摩擦磨损的时间 120 min。试验所用柴油通过注射器注入摩擦试验机的摩擦副接触区域,单次注入量为 30 mL,确保 18Cr2Ni2、2Cr13、H13 盘试样被柴油完全浸没。每组试验重复三次。摩擦因数是在试验过程中通过试验机采集数据计算后输出的。磨损速率 k 根据公式(1)计算得到。

$$k = \frac{\Delta V}{NL} \quad (1)$$

式中, ΔV 为磨损体积, mm^3 ; N 为法向载荷(140 N); L 为总的滑动距离(3 014.4 m)。

采用 Sensofar 3D 光学轮廓仪测量自动计算得到。具体测量计算如下:首先在磨损轨迹上等间距选取 3 个横截面轮廓,并对每个横截面进行背景扣除,以去除原始表面曲率影响;计算每个截面的磨损轮廓面积;取三个截面磨损轮廓面积的平均值,乘以磨损轨迹长度,即得 ΔV 。摩擦磨损试验后试样的磨损形貌采用 Sigma-300 型扫描电子显微镜进行观察。

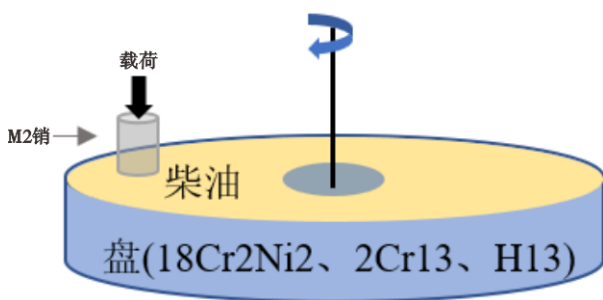


图1 销-盘式摩擦磨损试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pin-on-disc friction and wear test

为更好地理解 18Cr2Ni2 钢、2Cr13 钢和 H13 钢的磨损机理,还采用 VH1102 型显微硬度仪测量各材料渗碳层的硬度梯度。载荷选取 300 g,加载时间 10 s,两相邻硬度压痕中心的间距为 100 μm 。此外,参照 GB/T 11354—2005,对 18Cr2Ni2 钢、2Cr13 钢和 H13 钢渗碳试样的脆性进行评定。

2 试验结果与分析

2.1 18Cr2Ni2 钢、2Cr13 钢和 H13 钢的硬度分布曲线

图 2 为含渗碳层的 18Cr2Ni2 钢、2Cr13 钢和 H13 钢的硬度分布曲线。由图 2 可以看出,随着距表面距离的增大,三种材料的渗层硬度逐渐降低,到达试样心部时硬度基本保持不变。其中,18Cr2Ni2 钢渗碳层的硬度最高,H13 钢渗碳层硬度略低于 18Cr2Ni2 钢,而 2Cr13 钢的渗碳层硬度明显低于 18Cr2Ni2 钢和 H13 钢。但是,18Cr2Ni2 钢的硬度梯度变化最大,18Cr2Ni2 钢心部的硬度反而是最低的。H13 钢心部的硬度最高,2Cr13 钢心部的硬度介于两者之间。依据 GB/T 9450—2025,渗碳淬火硬化层的深度定义为曲线上与 550HV0.3 对应的距表面距离。测量得到,18Cr2Ni2 钢、2Cr13 钢和 H13 钢的渗层深度分别为 0.9、0.4、1.0 mm。三者中,2Cr13 钢的渗碳层深度最浅。

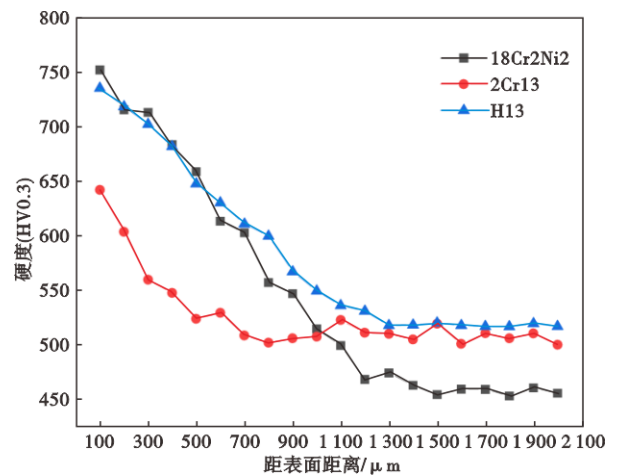


图2 含渗碳层的 18Cr2Ni2 钢、2Cr13 钢和 H13 钢的硬度分布曲线

Fig. 2 Hardness distribution curves of 18Cr2Ni2 steel, 2Cr13 steel and H13 steel with carburized layers

2.2 18Cr2Ni2 钢、2Cr13 钢和 H13 钢渗碳试样脆性的比较

图 3 为选取 180 kgf 的载荷评定 18Cr2Ni2 钢、2Cr13 钢和 H13 钢渗碳试样脆性时的压痕宏观形貌。三个试样的压痕四角均无裂纹产生。进一步比较发现,2Cr13 钢渗碳试样的压痕尺寸略大,在压痕四条边的周围有许多微裂纹,其中,一条边上还观察到细小的剥落。18Cr2Ni2 钢和 H13 钢压痕尺寸相差不大,四条边相对比较完整,微裂纹数量较

少。与18Cr2Ni2钢和H13钢相比,2Cr13钢渗碳试样的脆性较大。

2.3 18Cr2Ni2钢、2Cr13钢和H13钢的摩擦磨损性能的比较

图4为18Cr2Ni2钢、2Cr13钢和H13钢的摩擦因数随时间变化的曲线。总的来讲,18Cr2Ni2钢摩擦因数曲线比较平稳,而H13钢和2Cr13钢摩擦因数在摩擦过程中呈现较大的波动。经计算,18Cr2Ni2钢、2Cr13钢和H13钢与M2高速钢在柴油中对磨时的平均摩擦因数分别为0.111、0.122和0.132,如图5(a)所示。根据Stribeck曲线,边界润滑区域的摩擦因数范围为0.05~0.15^[22]。这暗示在当前摩擦试验参数下为边界润滑。图5(b)比较了18Cr2Ni2钢、2Cr13钢和H13钢的磨损率。在柴油介质中,18Cr2Ni2钢的磨损最大,2Cr13钢和H13钢的磨损率明显降低,分别只有18Cr2Ni2钢的67%和55%。

2.4 18Cr2Ni2钢、2Cr13钢和H13钢的磨痕形貌的比较

图6比较了18Cr2Ni2钢、2Cr13钢和H13钢在

柴油中摩擦磨损试验后的磨痕宏观形貌和轮廓仪测量的犁沟截面轮廓曲线。经测量计算,18Cr2Ni2钢、2Cr13钢和H13钢的磨痕平均宽度分别为1495、512、518 μm,18Cr2Ni2钢磨痕最宽。比较图6(d)、(e)和(f)发现,18Cr2Ni2钢和2Cr13钢的犁沟很深,H13钢的犁沟深度最浅。综合磨痕宏观形貌和犁沟截面轮廓曲线可知,18Cr2Ni2钢的磨痕宽且深,故18Cr2Ni2钢的磨损体积最大。尽管H13钢的磨痕宽度与2Cr13相当,但因犁沟深度浅,故H13钢的磨损体积最小。这和磨损率的计算结果是一致的。

图7为18Cr2Ni2钢、2Cr13钢和H13钢的磨损形貌SEM照片。除犁沟、粘着特征外,在18Cr2Ni2钢、2Cr13和H13钢的磨损表面还观察到一些尺寸大小不一、深浅不同的豆形凹坑以及少量的剥落。相对来说,18Cr2Ni2钢中的凹坑数量较少,2Cr13渗碳钢表层的剥落较多、面积较大。对18Cr2Ni2钢、2Cr13钢和H13钢磨损表面进行了能谱分析,结果见表2。点1、点3和点4的能谱分析显示含C、O和S,并且凹坑内C、O含量相对较高,这是由于一部分柴油进入

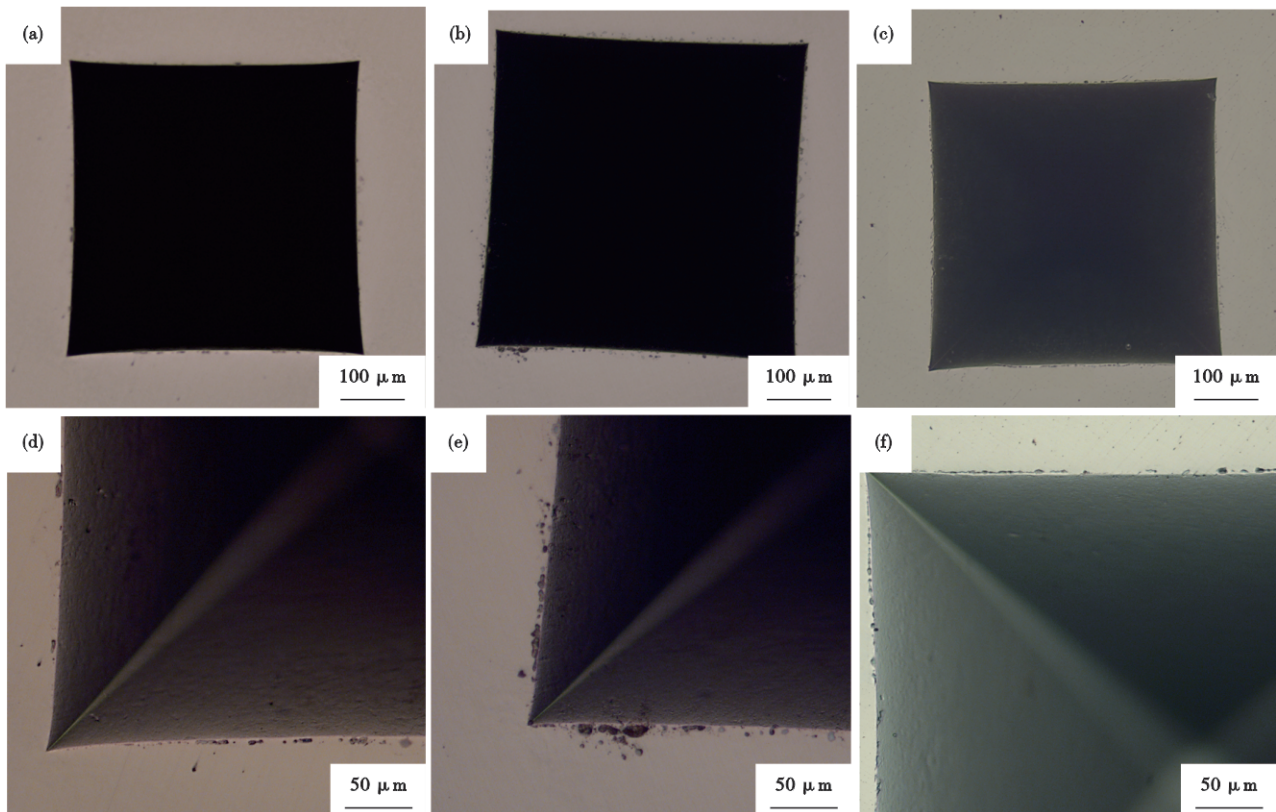


图3 试验钢渗碳试样脆性评定时的压痕形貌: (a) (b) 18Cr2Ni2钢; (c) (d) 2Cr13钢; (e) (f) H13钢

Fig. 3 Indentation morphology used to evaluate the brittleness of carburized samples of tested steels: (a) (b) 18Cr2Ni2; (c) (d) 2Cr13; (e) (f) H13

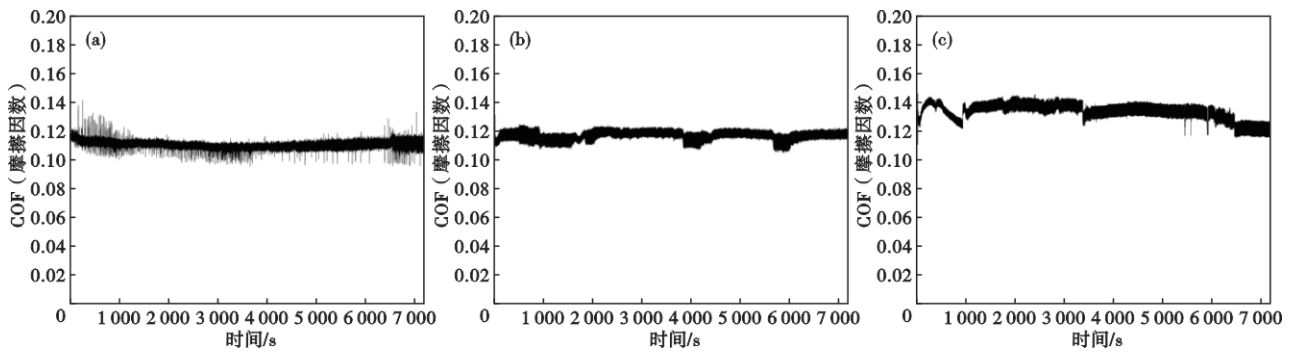


图4 试验钢的摩擦因数曲线: (a) 18Cr2Ni2, (b) 2Cr13, (c) H13

Fig. 4 Coefficient of friction (COF) curves of tested steels: (a) 18Cr2Ni2, (b) 2Cr13, (c) H13

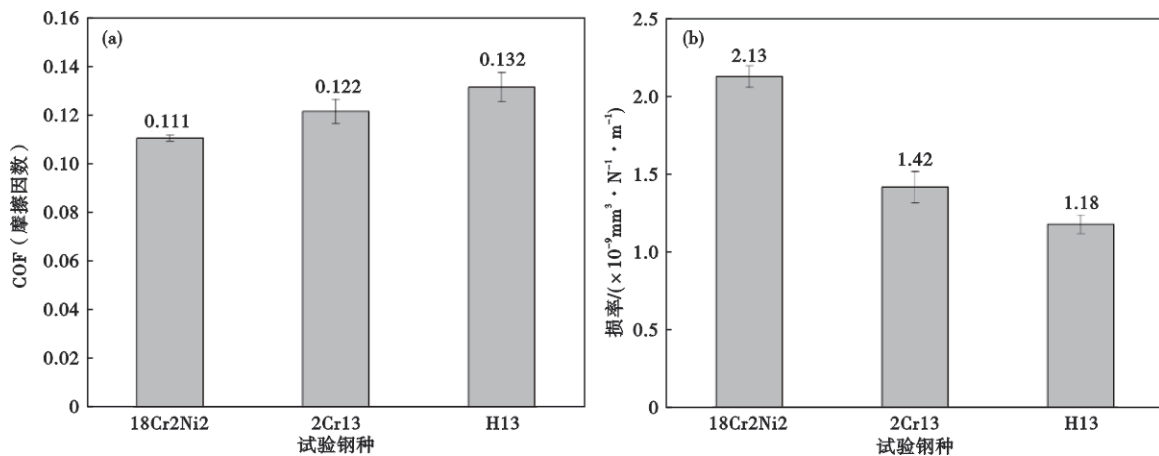


图5 18Cr2Ni2钢、2Cr13钢和H13钢的摩擦因数(COF)(a)和磨损率(b)的比较

Fig. 5 Comparison of COF (a) and wear rate (b) among 18Cr2Ni2 steel, 2Cr13 steel and H13 steel

到凹坑内。点2的Cr含量高,点6含大量的V和少量的W,表明在摩擦过程中发生了材料的转移。由此可见,18Cr2Ni2钢、2Cr13钢和H13钢在柴油中的磨损机理包括磨粒磨损、粘着磨损和疲劳磨损。

3 讨论

图4结果暗示,在当前摩擦试验参数下为边界润滑。此外,图7磨损的形貌表明有犁沟和粘着痕迹,这些是边界润滑的典型特征^[23]。边界润滑状态下由于油膜的破裂,可能导致摩擦副的表面直接接触。接触点产生粘着,在随后的滑动过程中粘着点

破坏,造成粘着磨损。少量金属从表面被撕裂下来,有可能成为磨屑。同时,渗碳层及金属中的硬质相也可能剥落下来。图7和表2中点2和点6的能谱分析可以证实这一点。它们都将作为磨粒而诱发磨粒磨损。此外,凹坑和剥落的存在表明还发生了疲劳磨损。它们的形成经历了“微裂纹的萌生→润滑油的楔入→微裂纹的扩展→剥落”四个阶段。摩擦磨损试验时,因表面最大切应力的反复作用,在表层局部区域产生塑性变形。当最大综合切应力大于材料抗剪强度时,在表层萌生微裂纹。通

表2 18Cr2Ni2钢、2Cr13钢和H13钢磨损表面能谱分析结果(质量分数)

Table 2 EDS Analysis about Worn Surface of 18Cr2Ni2 Steel, 2Cr13 Steel and H13 Steel

试验钢	分析点	Fe	C	O	Cr	Ni	Mn	Si	S	V	Mo	W
18Cr2Ni2	点1	79.2	14.3	2.1	1.7	1.7	0.7	0.2	0.1	-	-	-
2Cr13	点2	62.9	11.2	-	25.3	-	-	0.2	0.1	0.3	-	-
	点3	63.3	18.9	7.8	9.6	-	-	0.3	0.1	-	-	-
H13	点4	60.1	15.1	16.7	2.5	-	-	1.3	1.3	1.6	1.4	-
	点5	79.1	10.6	4.7	3.6	-	-	1.3	0.3	0.4	-	-
	点6	8.0	27.3	-	8.2	-	-	-	-	55.2	-	1.3

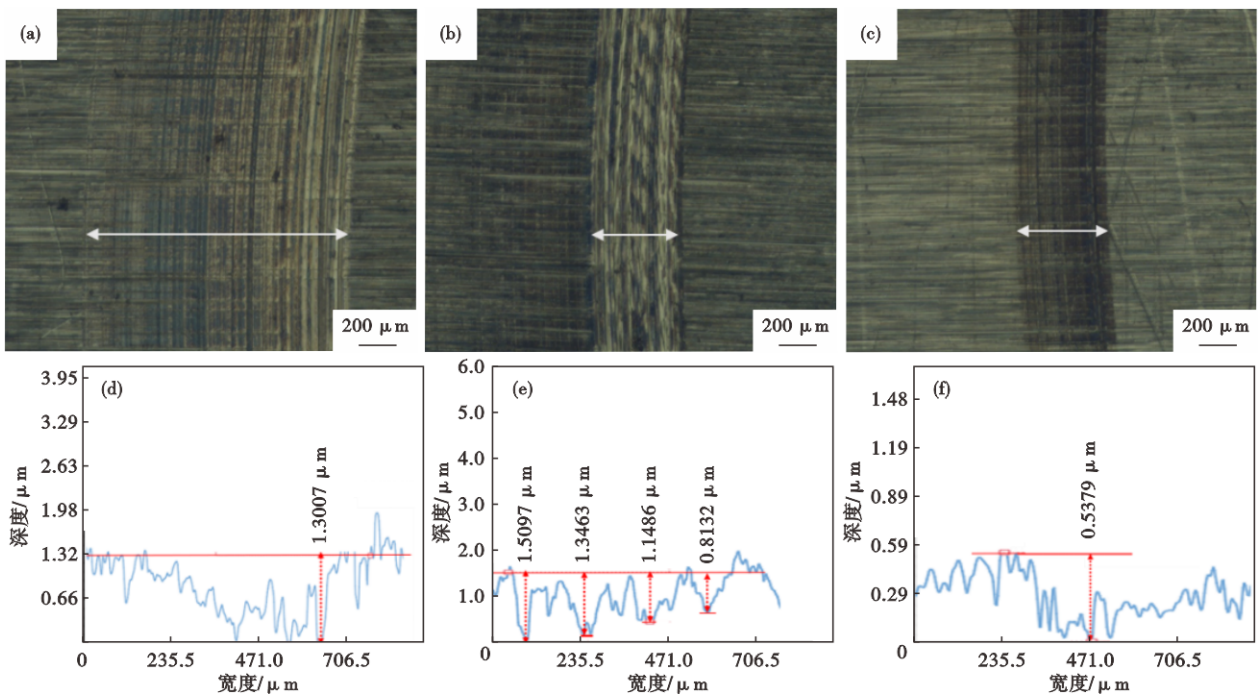


图6 18Cr2Ni2钢、2Cr13钢和H13钢磨痕的宏观形貌及截面轮廓曲线：(a) 18Cr2Ni2钢，磨痕宏观形貌；(b) 2Cr13钢，磨痕宏观形貌；(c) H13钢，磨痕宏观形貌；(d) 18Cr2Ni2钢，截面轮廓曲线；(e) 2Cr13钢，截面轮廓曲线；(f) H13钢，截面轮廓曲线

Fig. 6 Macroscopic morphology and cross-sectional profile curves of worn 18Cr2Ni2 steel, 2Cr13 steel and H13 steel: (a) 18Cr2Ni2 steel, macroscopic morphology of wear track; (b) 2Cr13 steel, macroscopic morphology of wear track; (c) H13 steel, macroscopic morphology of wear track; (d) 18Cr2Ni2 steel, cross-sectional profile curve of groove; (e) 2Cr13 steel, cross-sectional profile curve of groove; (f) H13 steel, cross-sectional profile curve of groove

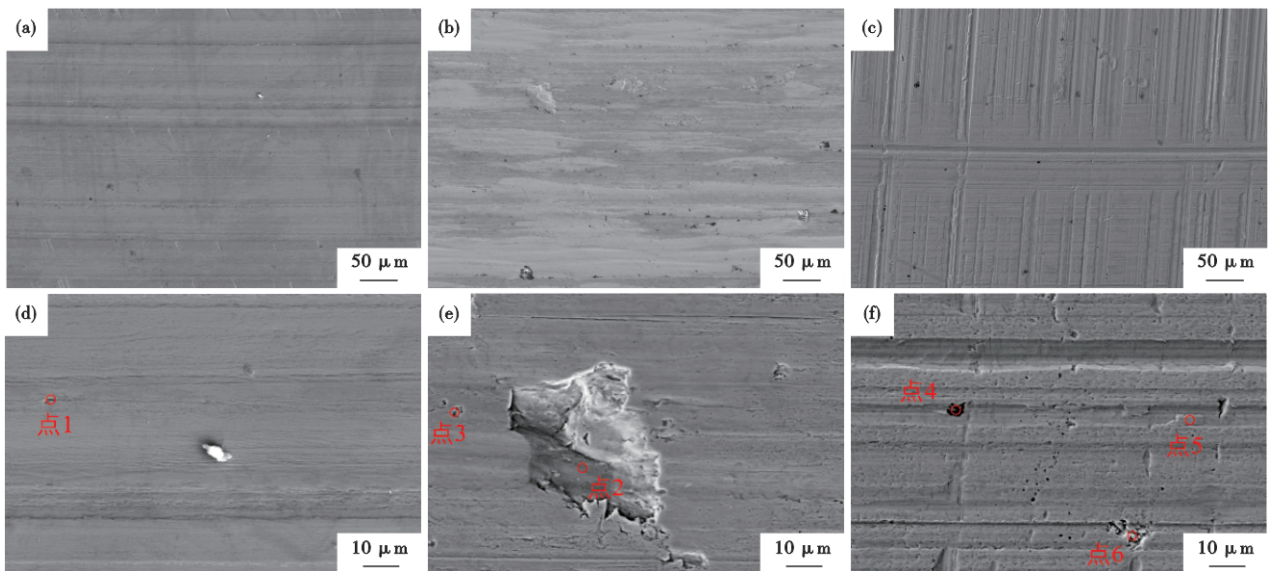


图7 试验钢的磨损形貌SEM照片：(a) (d) 18Cr2Ni2钢；(b) (e) 2Cr13钢；(c) (f) H13钢

Fig. 7 SEM images about worn morphology of tested steels: (a) (d) 18Cr2Ni2 steel; (b) (e) 2Cr13 steel; (c) (f) H13 steel

常，裂纹易在渗层缺陷或夹杂物、粗大第二相等处形核。随后，柴油被挤入到微裂纹中。封闭在微裂纹内的柴油会产生非常高的油压，促使裂纹沿与滚动方向呈小于45°的方向扩展。微裂纹扩展到一定

程度，将产生二次裂纹，它与初始裂纹是垂直的。柴油也会被挤入二次裂纹内部。柴油被挤入裂纹内部的推论，可以从表2中点1、点3和点4的能谱分析得到证实。在高压油的作用下二次裂纹不断地

向表面扩展,当扩展到表面时剥落下一块金属而形成凹坑。此外,由于渗层和基体的变形不协调,在渗层和基体的交界处更易产生应力集中。尽管交界处的切应力可能不是最大的,但由于此处是材料的薄弱区,也是裂纹容易萌生的区域。这些裂纹形成后沿过渡区继续扩展,而后再垂直于表面进行扩展,最后形成较大的剥落坑。

18Cr2Ni2 渗碳钢的摩擦因数小,黏着磨损相对小。但由于 18Cr2Ni2 渗碳钢心部的硬度较低,磨粒压入深度增加,磨粒的犁削作用加强,摩擦表面产生的沟槽宽且深,磨粒磨损严重。此外,18Cr2Ni2 钢渗碳层过陡的硬度梯度,使得渗碳层的脆性倾向增加,裂纹的形成和剥落更容易发生,一定程度会加剧疲劳磨损。但另一方面,18Cr2Ni2 钢自身塑性好,变形能力强,可有效缓解应力集中和抑制凹坑的形成,又使得疲劳磨损有所减轻。总体说来,磨粒磨损是 18Cr2Ni2 钢占主导的磨损机理。并且,磨粒磨损导致磨损体积迅速增加,造成 18Cr2Ni2 钢磨损最为严重。

与 18Cr2Ni2 渗碳钢相比,2Cr13 钢的耐磨性有所改善。这主要是由于 2Cr13 渗碳钢心部的硬度高于 18Cr2Ni2,承载能力和抗磨粒磨损能力得到增强。因此,2Cr13 钢的磨粒磨损没有 18Cr2Ni2 钢严重。对 2Cr13 钢来说,磨粒磨损不是其占主导的磨损机理。但因为 2Cr13 的摩擦因数略大于 18Cr2Ni2 钢,粘着磨损较大。同时,2Cr13 钢由于渗碳层较浅,微裂纹在界面处提前萌生,引起表层一些大面积的剥落,加剧了疲劳磨损。故 2Cr13 钢耐磨性的改善有限。与 H13 钢相比,2Cr13 钢的耐磨性稍差。这是由于 2Cr13 钢渗碳层的硬度和心部硬度均低于 H13,导致磨粒磨损大于 H13 钢。同时,2Cr13 钢的渗碳层较浅,易引起表层大面积的剥落,疲劳磨损也比 H13 钢大。

三者之中,H13 钢的耐磨性最好。H13 钢优异的耐磨性主要得益于 H13 钢更高的硬度、相对合适的渗碳层深度以及合理的硬度梯度。H13 钢渗碳层的硬度和心部硬度均很高。由图 2 可知,H13 钢表面渗碳层的硬度与 18Cr2Ni2 接近,尤其心部硬度在三者之中是最高的。通常,材料硬度越高抗磨粒磨损性能越好^[24]。与 2Cr13 钢类似,磨粒磨损也不再是 H13 钢占主导的磨损机理。正如图 6 和图 7 所示,H13 钢的磨痕宽度窄,并且犁沟深度最浅。这进一步证实,H13 钢的磨粒磨损远低于 18Cr2Ni2 钢和

2Cr13 钢。此外,H13 钢渗碳层深度比 2Cr13 钢大,而且渗碳层的硬度梯度又不似 18Cr2Ni2 钢那么陡。相应地,裂纹不易形成,大面积的剥落也不易发生。由图 3 可知,H13 渗碳钢的塑性也较好,能进一步抑制裂纹和剥落的发生。因此,H13 钢疲劳磨损也大大减轻。尽管 H13 钢的摩擦因数略大于 18Cr2Ni2 钢和 2Cr13 钢,粘着磨损可能较大。但由于柴油中通常含一些润滑剂,润滑油膜的形成一定程度上可以抑制对磨金属的直接接触,从而缓解黏着磨损造成的损伤。同时,磨粒磨损和疲劳磨损的显著降低抵消了粘着磨损的负面影响,H13 的耐磨性大大改善。因此,H13 钢在柴油介质中表现出优异的耐磨性能。

综上所述,在柴油介质下相较于 18Cr2Ni2 钢,2Cr13 钢和 H13 钢的磨损率均显著降低。仅从耐磨性的角度考虑,2Cr13 和 H13 钢都有可能替代 18Cr2Ni2。相对而言,H13 钢的耐磨性又优于 2Cr13 钢。因此,认为 H13 是新一代针阀体用材较好的方案。但考虑到针阀体的用材在不同应用场景下有不同的要求,选择针阀体的材料时须综合考量。如前所述,针阀体长期在高温环境下工作,18Cr2Ni2 钢在超过 250 °C 后会出现明显的硬度和强度的下降。相比之下,H13 钢在耐磨性和高温强度方面的优势明显。它能在保持高硬度、高强度、优异耐磨性的同时,仍拥有良好的韧性和抗热疲劳性能。更为重要的是,H13 钢属于二次硬化钢,其核心优势在于具有突出的抗回火软化能力和热稳定性。这意味着采用 H13 钢制造的针阀体即使在高温下持续工作,也能保持足够的表面硬度和整体强度,可以避免因高温软化导致的变形、磨损加剧、密封失效等问题。预计 H13 钢将在保持针阀偶件紧密的间隙配合与密封性能,确保燃油喷射的精准控制和高效率等方面发挥巨大的优势。此外,我们的研究结果表明 2Cr13 钢的耐磨性也优于 18Cr2Ni2 钢。凭借优异的耐蚀性和良好的综合性能,2Cr13 钢在特定燃油条件下也具有应用价值。尤其当船用发动机使用含硫较高的燃油时,燃油中的腐蚀性物质如 H₂S、SO₃ 和水分等在摩擦和热气流冲刷的作用下,会侵蚀针阀体的工作表面。2Cr13 钢出色的耐蚀性可以有效阻止燃油和润滑油对针阀体的侵蚀,使其继续保持表面的光洁度和精度。进一步挖掘和提升 2Cr13 钢应用的潜力也是很有意义的。

4 结论

1) 18Cr2Ni2 钢、2Cr13 钢和 H13 钢与 M2 高速钢在柴油中对磨时的平均摩擦因数分别为 0.111、0.122 和 0.132。与 18Cr2Ni2 钢相比, 2Cr13 钢和 H13 钢的磨损率明显降低, 分别只有 18Cr2Ni2 钢的 67% 和 55%。仅从耐磨性的角度考虑, H13 钢是替代 18Cr2Ni2 针阀体用材较好的材料。但考虑到针阀体的用材在不同应用场景下有不同的要求, 选择针

阀体的材料时须综合考量。

2) 18Cr2Ni2 钢的磨损率最大, 主要是由于 18Cr2Ni2 钢的硬度低造成磨粒磨损严重。此外, 渗碳层硬度梯度过陡, 一定程度加剧了疲劳磨损。三者之中, H13 钢的耐磨性最好, 这主要得益于 H13 钢高的硬度、合适的渗碳层深度以及硬度梯度。2Cr13 钢渗碳层的硬度和心部硬度均低于 H13, 导致磨粒磨损大于 H13 钢。同时, 2Cr13 钢的渗碳层较浅, 易引起表层大面积的剥落, 疲劳磨损进一步恶化。

参考文献

- [1] MOON S, HUANG W D, WANG J. First observation and characterization of vortex flow in steel micronozzles for high-pressure diesel injection [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, 105: 342-348.
- [2] 禹林业, 孙鹏, 钱进, 等. 新一代针阀体用二次硬化合金钢的强韧性研究 [J]. *上海金属*, 2025, 47 (1): 56-61.
- [3] 李炎铮, 云晓雪, 赖承班, 等. 添加 1%Mo 提高针阀体用钢 18Cr2Ni2 的强韧性 [J]. *材料导报*, 2021, 35 (12): 12130-12135.
- [4] 刘兴跃. 18CrNi8 长型针阀体热处理工艺研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
- [5] 陈茂涛. 船用燃烧重油柴油机 18CrNi8 针阀体热处理工艺研究 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2016.
- [6] 云晓雪, 曹彦文, 陈卓, 等. 两种针阀体用钢的连续冷却转变特性对比研究 [J]. *上海金属*, 2021, 43 (3): 71-76.
- [7] 何昌林, 云晓雪, 刘湘江, 等. 合金元素对针阀体用钢淬火组织及性能的影响 [J]. *材料科学与工程学报*, 2021, 39 (1): 58-63.
- [8] 吴晓春, 左鹏鹏. 国内外热作模具钢发展现状与趋势 [J]. *模具工业*, 2013, 39 (10): 1-9.
- [9] 任吉, 燕云, 田家龙, 等. La 处理对 H13 热作模具钢中夹杂物的影响 [J]. *特殊钢*, 2024, 45 (4): 117-123.
- [10] 李进, 周许, 苏超, 等. 热处理工艺对 H13ESR 大型模具钢锻圆组织性能的影响 [J]. *特殊钢*, 2025, 46 (1): 87-91.
- [11] 郭浩, 李志龙, 王彪, 等. 回火温度对高碳 H13 钢渗碳层组织及硬度的影响 [J]. *金属热处理*, 2025, 50 (4): 277-282.
- [12] 戴尚义, 吴博雅, 刘辰辰, 等. H13 钢的室温拉伸试验及晶体塑性模拟研究 [J]. *上海金属*, 2025, 47 (5): 42-49.
- [13] Dhokey N B, Shinde T, Bawane K K, et al. Effect of cryosoaking period and soft-tempering temperature on wear behavior of AISI H13 steel [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2025, 34 (12): 12166-12173.
- [14] 苏勇, 石丁瑞, 于兴福, 等. 固溶处理对一种高碳 H13 钢硬度和耐磨性的影响 [J]. *材料研究学报*, 2026, 40 (1): 72-80.
- [15] 杜勇, 郭鲤, 叶志飞. 热作模具钢高温磨损行为及氮化处理对其耐磨性的影响 [J]. *热加工工艺*, 2026, 55 (2): 131-135.
- [16] 陶新, 孔洁, 白琴, 等. 淬火温度对 12Cr13 马氏体不锈钢显微组织和硬度的影响 [J]. *上海金属*, 2023, 45 (4): 71-77.
- [17] Zhou S M, Zhu Z P, Yang H, et al. Synergistic effect study on Cl⁻ and SO₄²⁻ for 2Cr13 used in a low-pressure cylinder of steam turbines at peaking unit [J]. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2025, 75 (5): 752-760.
- [18] 樊译, 周健, 迟宏宵, 等. 钼元素对 2Cr13 型高氮耐蚀塑料模具钢组织与性能的影响 [J]. *机械工程材料*, 2024, 48 (3): 23-28.
- [19] 丁子珊, 赖泽标, 李一治, 等. 2Cr13 基体表面粗糙度对 Ti 掺杂 MoS₂ 薄膜摩擦磨损性能的影响 [J]. *表面技术*, 2025, 54 (13): 96-106.
- [20] Wang C Y, Zhang Q W, Xu L J, et al. Obvious corrosion resistance of 2Cr13 martensitic stainless steel subjected to thermo-mechanical laser shock peening and subsequent slight polishing [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2026, 39 (2): 103799.
- [21] 张玮炜, 张金鹏, 齐瑾, 等. SCu6100A 铝青铜的摩擦磨损特性及磨损机制 [J]. *上海金属*, 2025, 47 (3): 58-66.
- [22] Peter J. Blau, Ermakov Boris Sergeevich. *Friction Science and Technology-From concepts to applications* [M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2009.
- [23] Zhang S C, Pan Q L, Yan J, et al. Effects of sliding velocity and normal load on tribological behavior of aged Al-Sn-Cu alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26 (7): 1809-1819.
- [24] 杨瑞, 任文洋, 张铮, 等. 回火温度对 40CrNiMo 钢耐摩擦磨损及抗氧化性能的影响 [J]. *上海金属*, 2024, 46 (4): 47-52.