基于 In,Cu 单镀液和纳米 MoS_2 复合镀液电刷镀层的抗粘着磨损性能研究

陈元迪

（广州航海学院 船舶工程系，广州 510725）

摘 要：目的 在 Cr12MoV 模具钢上电刷镀制备出多种具有自润滑性和减磨性能好的涂层，筛选出与奥氏体不锈钢对磨时抗粘着磨损性能优秀的镀层，改善模具的抗粘着磨损性能。**方法** 采用电刷镀方法制备 In，Cu 单镀液镀层及 Ni-W（D）-MoS_2（纳米）和 Cu-MoS_2（纳米）复合电刷镀镀层，对 4 种镀层与 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢进行对磨磨损实验，载荷为 100 N，磨损时间为 300 min，并分析磨损质量损失，同时采用扫描电镜观察分析各镀层的抗粘着磨损实验结果。**结果** 4 种镀层都不同程度地提高了抗粘着磨损能力，但 Cu 单镀液镀层和 Cu-MoS_2（纳米）复合镀层在磨损实验的前 150 min 磨损质量损失明显，磨损质量损失率分别达到 0.105%和 0.136%，而 In 和 Ni-W（D）-MoS_2 镀层都很小，分别为 0.024 57%和 0.031 74%，体现出更良好的抗粘着能力和耐磨性。**结论** 在被加工工件的强度不高时，Cu 镀层和 Cu-MoS_2（纳米）复合镀层仍然具有一定的抗粘着磨损性能，而在被加工工件为具有较明显加工硬化现象的强度较高的奥氏体不锈钢时，In 和 Ni-W（D）-MoS_2 镀层具有更好的抗粘着磨损性能，其中 Ni-W(D)-MoS_2 镀层表现出了最优秀的综合耐磨性。

关键词： In 镀层；Cu 镀层；Ni-W(D)-MoS_2 复合镀层；Cu-MoS_2 复合镀层；纳米 MoS_2；奥氏体不锈钢；电刷镀；粘着磨损；模具修复

中图分类号： TQ153 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3660(2016)01-0089-07

DOI： 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.01.014

Adhesive Wear Resistance of Brush Plated Coatings Based on In, Cu Single Coating Solution and Nano MoS_2 Composite Coating Solution

CHEN Yuan-di

(Ship Engineering Department, Guangzhou Maritime Institute, Guangzhou 510725, China)

ABSTRACT: Objective To prepare various coatings with good self-lubrication and antifriction performance on Cr12MoV steel by brush plating, select coating with excellent adhesive wear resistance to the frictional wear produced between the coating and austenitic stainless steel, and improve the adhesive wear resistance of mould. **Methods** The Cu, IN single coatings and the nanometer

收稿日期： 2015-09-26；**修订日期：** 2015-11-01

Received：2015-09-26；**Revised**：2015-11-01

基金项目： 广州航海学院创新强校工程建设项目（特色创新类）（201414B06）

Fund: Supported by Innovate and Strengthen University Project of Guangzhou Maritime Institute (201414B06)

作者简介： 陈元迪（1957—），男，副教授，主要从事船舶金属材料及金属机械零件的表面修复及改性，以及焊接技术应用等方面的教学和科研。

Biography: CHEN Yuan-di (1957—), Male, Associate professor, Research focus: surface repair and modification of metal materials, and applications of welding technology.

MoS_2/Ni-W(D), MoS_2/Cu composite coatings were prepared by brush plating, and the friction wear test of the coating and austenitic stainless steel was conducted, with a load of 100 N and a wear time of 300 minutes. The wear mass loss was analyzed, and meanwhile the wear results were observed and analyzed by SEM. **Results** The adhesive wear resistance of all coatings were improved to varying degrees, but the wear mass loss was obvious for the Cu coating and Cu-MoS_2 composite coating within 120 minutes, with mass loss rates of 0.105% and 0.136%, respectively. The mass loss rates of the In coating and the Ni-W (D)-MoS_2 composite coating were 0.024 57 and 0.031 74, respectively, showing excellent adhesive and wear resistance. **Conclusion** The Cu coating and Cu-MoS_2 composite coating had certain adhesive wear resistance when the strength of workpiece was relatively low, while the In coating and the Ni-W (D)-MoS_2 composite coating showed better abrasive resistance for workpieces with high strength and obvious strain hardening, among which the Ni-W(D)-MoS_2 composite coating showed the best comprehensive abrasive resistance.

KEY WORDS: In coating; Cu coating; Ni-W(D)-MoS_2 composite coating; Cu-MoS_2 composite coating; nano-MoS_2; austenitic stainless steel; brush plating; adhesive wear; mould repair

在各类板材成形加工过程中大量使用各种成形模具,这类模具的表面磨损失效是其主要损坏形式。粘着磨损一直是硬度不高的不锈钢板材成形加工中很容易发生的磨损失效方式,这种磨损失效的第一阶段是降低被加工工件表面质量,使表面光洁度下降,第二阶段就是模具表面的损坏。电刷镀技术可在材料表面获得多种电沉积单镀液镀层和复合合金镀层,形成不同性能的合金表面,在零件的维修中已得到了广泛的应用[1—2]。其突出优点是工艺灵活、镀层多样、性能良好等。单镀液镀层和合金复合镀层在提高零部件的表面抗磨损性能方面都有成功的应用,其中 Ni-W 及 Ni-W (D)合金镀液具有良好的与基层的结合力和高的硬度,在提高零部件的表面抗磨损性能方面得到了广泛的研究和很多成功的应用[3—5]。目前抗粘着磨损镀层多采用化学镀 Ni-P-MoS_2 镀层,也起得了很好的效果,但这种方法要对镀层进行热处理以使 Ni-P 基体镀层发生晶化,以更好地发挥 Ni-P-MoS_2 复合镀层的优点。这在磨损工件的现场修复时并不实用,而且在对镀层晶化热处理时可能会对修复工件的性能产生不利影响[6—7]。

文中针对滚压不锈钢管成形模具的粘着磨损失效进行了分析,选择了 In,Cu 两种单镀液和两种添加入 MoS_2 纳米粉末形成的复合合金镀液 Cu-MoS_2 和 Ni-W (D)-MoS_2,在模具钢 Cr12MoV 上制备了 4 种镀层,实验分析了 4 种镀层与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的对磨抗粘着磨损情况。据分析可知,合理选择镀层能明显提高模具的抗粘着磨损性能,使模具的使用寿命得到延长。

1 模具磨损失效分析和镀层设计

1.1 模具磨损失效分析

不锈钢管冷卷扎成形加工时的成形模具材料一般为 Cr12MoV,硬度为 63 ~ 63.5HRC。用来冷卷扎不锈钢管的材料为 1Cr18Ni9Ti,属于奥氏体不锈钢,其硬度约为 30HRC,两者硬度差较大。这种不锈钢的屈服强度却比较高,在滚扎成形时所需的能量较大,原因是奥氏体不锈钢在变形过程中产生加工硬化的速度很快,导致了在加工过程中强度迅速提高[8]。

不锈钢管滚扎成形时,多对不同尺寸的模具以 30 r/min 转动,使不锈钢板逐渐变形、成形,在此过程中模具与钢板都受到了巨大的正压力和滑动摩擦力。在这两个力的持续作用下,较软的金属表面产生强烈的塑性变形,在正压力下就可能在摩擦副间产生固相焊合现象。如果外力大于这个焊合点处的结合力,在结合点处就会产生剪切断裂,这个断裂面往往发生在强度较低的金属侧,这时强度高一侧的金属表面就粘着了从较软侧金属上撕裂下来的金属,从而产生了粘着磨损[8—9]。

根据上述分析,采用在模具表面刷镀一层具有较好减磨性和自润滑作用的镀层,就能较好地提高抗粘着磨损性能,有效防止因粘着磨损对被加工工件的表面产生损坏,进而防止模具的损坏,提高产品的表面加工质量,同时延长了模具的使用寿命。

1.2 镀层设计及制备

根据上述对模具表面磨损机理的分析,设计了两类镀层进行比较实验。

1) Cu 和 In 单镀液刷镀层。这两种镀层都具有良好的自润滑性能,是常用的减磨和抗粘着磨损镀层,但都属于软基体镀层且性能单一。

2) 添加纳米 MoS_2 粉末的复合镀液。这类镀液能充分发挥电刷镀的特点。

一种是 Cu-MoS_2 镀层,在 Cu 镀液中添加 20 g/L 的纳米 MoS_2 粉末。Cu 镀层与绝大多数金属表面都

有良好的结合力,Cu 本身的自润滑性能就比较好,而 MoS_2 也是自润滑性能很好的材料。这种镀层属于软基体软质点型,两种自润滑性能比较好的材料组成的复合镀层抗粘着磨损能力应该比较好。

另一种是 Ni-W(D)-MoS_2 合金镀层,将 20 g/L 的纳米 MoS_2 加入 Ni-W(D)镀液中形成复合镀液。Ni-W(D)镀层具有较高的硬度和良好的耐磨性,与基件表面也有良好的结合力,而 MoS_2 具有良好的减磨性和自润滑性能,作为添加剂加入到不同基材中可明显改善原基材的表面自润滑性和耐磨性能[10—12],利用它的这些性能来改善与不锈钢对磨时产生的粘着磨损。

在基本镀液中加入纳米 MoS_2 粉末,由于 MoS_2 是疏水性物质,添加后不易形成均匀的分散悬浮物,必须添加表面活性剂。相关资料表明,采用阳离子表面活性剂对 MoS_2 的分散效果比较好[13]。同时在整个刷镀过程中,使用超声波振动仪尽可能使纳米 MoS_2 粉末能始终较均匀地分散悬浮在镀液中,以确保镀层成分的均匀性。

制备了 5 副对磨件,在 2 个 Cr12MoV 模具钢试件上分别刷镀上 Cu 和 In 单镀液镀层,另外 2 个 Cr12MoV 模具钢试件上分别刷镀上 Cu-MoS_2 和 Ni-W(D)-MoS_2 合金镀层,另一个 Cr12MoV 模具钢不刷镀任何镀层,对磨件都是 1Cr18Ni9Ti 不锈钢。

刷镀工艺过程为:表面准备→电净→清水冲洗→1 号强活化液活化→清水冲洗→3 号弱活化液活化→清水冲洗→特殊 Ni 打底刷镀→清水冲洗→分别刷镀 4 种合金工作层。

电刷镀参数经优化后选定为:电净的工作电压为 10 V,正极性接法;1 号活化的工作电压为-2 V,反极性接法;3 号活化的工作电压为-9 V,反极性接法;电刷镀特殊 Ni 的工作电压为 12 V,时间为 3 ~ 4 min,正极性接法;电刷镀合金工作层的工作电压为 6 ~ 10 V(根据不同的镀液电压有所不同,Ni-W(D)-MoS_2 镀层刷镀电压约为 10 V,其他镀层均为 6 ~ 7 V),正极性接法,时间约 35 min,整个镀层厚度为 8 ~ 13 μm。

刷镀电流密度为 20 ~ 50 A/dm^2,刷镀时阳极相对于工件的运动速度为 7 ~ 8 m/min,刷镀液的温度为 28 ℃。

2　磨损试验及结果分析

2.1　磨损试验及结果

在 MPX-2000 销盘式摩擦磨损试验机上进行对磨实验,并对镀层磨损情况做了数据和扫描电镜分析。滑动摩擦磨损试件采用中径为 ϕ27 mm 的环-环试样,上试样为 Cr12MoV 钢,刷镀不同的合金镀层,转速为 550 r/min,载荷为 100 N。对摩试样为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢,硬度为 30HRC,采用 10# 号机油作为润滑剂,磨损实验时间为 300 ~ 360 min,分 8 次称量。

图 1 是 5 副对磨件的磨损实验分析曲线,由实验曲线分析可看出:

1) 1#试件是 Cu 单镀液镀层,5#试件是 Cu-MoS_2 复合镀液镀层,这两种镀层在开始的 120 min 内磨损质量损失都明显高于另外两种镀层,在 300 min 时的磨损质量损失率分别达到 0.1128% 和 0.144%。过了这个磨损期后就趋于平稳了,说明其仍有一定的抗粘着磨损能力。

2) 2#试件是 In 单镀液镀层,4#试件是 Ni-W(D)-MoS_2 复合镀层,这两种镀层与 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢对磨时都表现出了很小的磨损质量损失,300 min 时的质量损失率分别为 0.024 57% 和 0.031 74%。表现出具有很好的耐磨性和良好的抗粘着磨损性能,尤其是 Ni-W(D)-MoS_2 在 100 min 后几乎没有磨损,体现了更优异抗粘着磨损性能。

3) 3#试件是未镀镀层的 Cr12MoV 试件在磨损到 120 min 后质量不但没有减小反而还增加了,说明 120 min 后未镀镀层的 Cr12MoV 试件与 1Cr18Ni9Ti 试件之间产生了粘着磨损的第一阶段——“物料转移”,所以 Cr12MoV 试件的质量反而有增加。

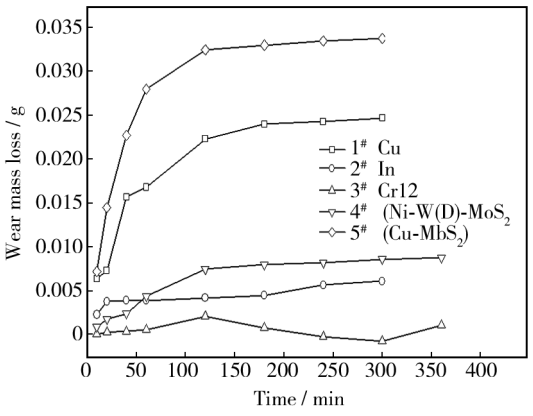


图 1　试件的磨损质量损失曲线

Fig. 1 Wear mass loss curves of test workpieces

图 2 是对应的摩擦系数随磨损时间变化曲线,由实验曲线分析认为:

1) 1#单镀液 Cu 镀层及 2#单镀液 In 镀层都表现出了开始时摩擦系数偏高,随后摩擦系数逐渐降低,

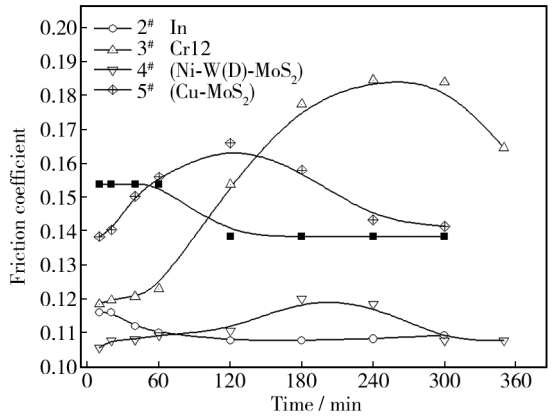


图 2 试件的摩擦系数变化曲线

Fig. 2 Friction coefficient curves of test workpieces

并保持稳定的趋势。因为两种镀层材料本身都是具有较好自润滑和减磨性的软性镀层,在磨合期过后就更好地体现出了这种特性。In 镀层的自润滑和减磨性更为优秀,体现出了很低的摩擦系数,这和质量损失曲线关系是对应的。

2) 4#及 5#曲线分别是 Ni-W(D)-MoS_2 及 Cu-MoS_2 复合镀层,它们的摩擦系数都表现出了随磨损时间增加逐渐增大,之后又逐渐减小的趋势。分析认为,在磨损初期镀层中的部分 MoS_2 纳米微粒团发生剥落,导致镀层表面粗糙度有所上升,随后进入稳定期,MoS_2 的自润滑和减磨性能得以更好表现,使得摩擦系数逐渐下降并保持稳定。Cu-MoS_2 镀层的摩擦系数明显比 Ni-W(D)-MoS_2 镀层高,导致其磨损较严重,这在质量损失曲线中得到了证明。

3) 3#曲线是 Cr12MoV 试件的摩擦系数曲线,开始时摩擦系数较小,在 60 min 后摩擦系数开始明显上升,到 240 min 左右达到最大值之后下降。摩擦系数的快速上升说明摩擦面的粗糙度明显增加,这是发生了粘着磨损导致的结果。一段时间后表面粘着物剥落,表面粗糙度又有所减小,摩擦系数随之减小。

2.2 结果分析

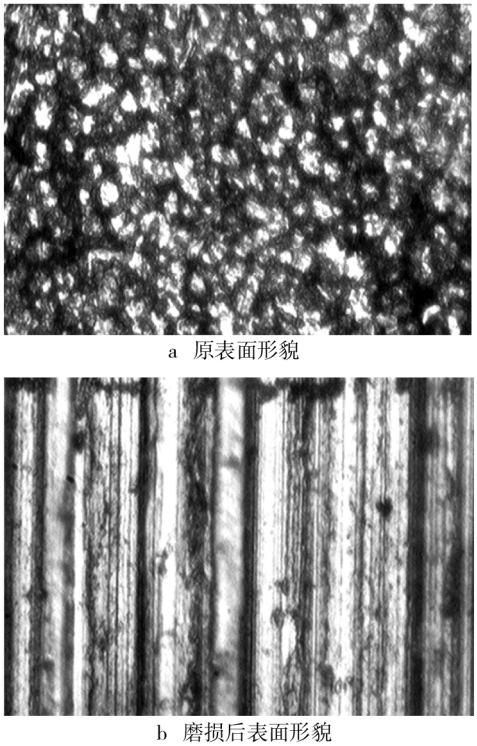
图 3 是 Cr12MoV 磨损表面形貌图,可以看出,不锈钢管滚扎成形模具的表面磨损呈现出了明显的粘着磨损特点,模具上的粘着物在反复轧制过程中产生了加工硬化形成硬质点,首先对被加工的不锈钢材表面产生划擦磨损,影响产品的表面光洁度。最后会在持续挤压摩擦过程中从模具上剥落下来,并从模具表面撕裂下部分材料在模具表面形成很小的麻点,最终导致模具失效损坏[14]。



图 3 Cr12MoV 磨损表面形貌图(400×)

Fig. 3 Worn surface of Cr12MoV(400×)

图 4 是 Cu 镀层表面及镀层磨损表面形貌图,Cu 具有较好的自润滑性,磨损表面图也表明没有明显粘着磨损特征,说明具有一定的抗粘着性能。又因硬度较低,磨损表面图显示出较明显的犁沟状磨损特征,表明抗磨粒磨损的能力较差,所以磨损量较大。在与 1Cr18Ni9Ti 这类加工硬化现象明显的奥氏体不锈钢对磨时,镀层的整体耐磨性能并不高,这种镀层只适合于工作载荷较低时工件表面抗粘着磨损的改善和修复。



a 原表面形貌

b 磨损后表面形貌

图 4 Cu 镀层微观形貌(400×)

Fig. 4 Microstructure of Cu coating(400×)

图 5 是 In 镀层表面及磨损表面形貌图,可以看出,磨损表面出现了均匀细小的磨损划痕,没有粘着

磨损痕迹,磨损质量损失量也很低。分析认为,In 有良好的自润滑和减磨性,和基层金属结合力良好,附着力强,其硬度很低,在摩擦过程中,In 镀层在摩擦力的作用下产生一种粘流态的流动层,相当于一层油膜,起到了良好的润滑作用,所以具有很好的抗粘着能力[15—16]。随时间推移,磨损量一直在缓慢增加,故在中低载荷时能表现出良好的抗粘着磨损能力,但在重载荷时可能因重载挤压使粘流状 In 镀层压从基体表面分离流失,最后会迅速破坏了 In 镀层的抗粘着磨损能力。

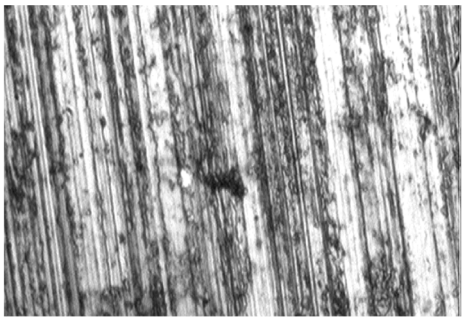
图 6 是 Cu-MoS_2 镀层及镀层磨损后的表面形貌图,可以看出,在与不锈钢的对磨实验中,Cu-MoS_2 镀层表面有较明显的粗大犁沟状的磨损痕迹,而且磨损量也比较大。

分析认为,Cu 基镀液层的硬度较低,对 MoS_2 纳米微粒的包裹和支撑力有限,导致整个 Cu-MoS_2 镀层的硬度不够。在磨损时 MoS_2 纳米微粒团较易迅速剥落导致磨损初期质量损失很快,所以这种软基体复合镀层在与强度较高且易出现加工硬化的对磨件对磨时的整体耐磨性能不佳。从图 6b 中可看出,这种镀层还是较明显地改善了抗粘着性能,可适用于低载荷时的工件表面抗粘着磨损的改善和修复。

图 7 是 Ni-W(D)-MoS_2 镀层及镀层磨损后的表面形貌图,其磨损表面形貌图显示出均匀细小的磨损痕迹,且 Ni-W(D)-MoS_2 镀层磨损质量损失很小,表现出了具有良好的抗粘着磨损能力及优良的耐磨性。分析认为,Ni-W(D)基体镀液层具有较高的硬度,其



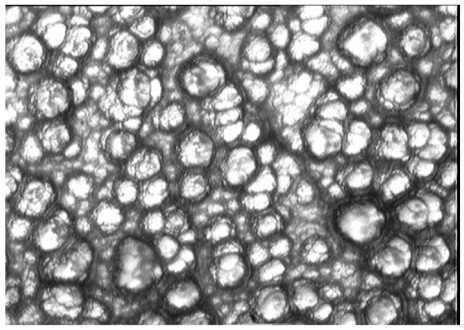
a 原表面形貌



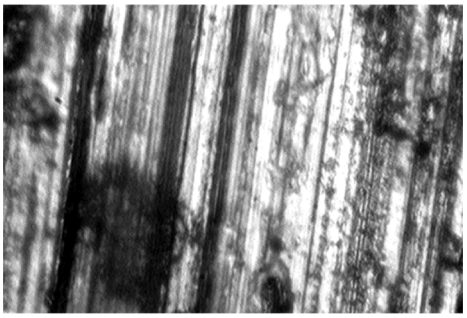
b 磨损后表面形貌

图 5　In 镀层微观形貌(400×)

Fig. 5 Microstructure of In coating(400×)



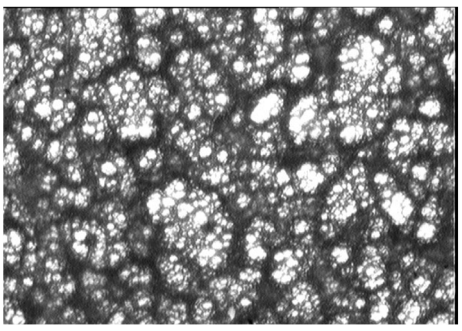
a 原表面形貌



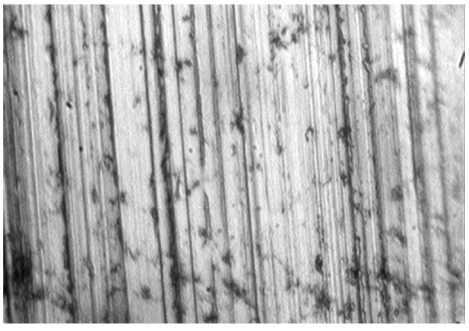
b 磨损后表面形貌

图 6　Cu-MoS_2 镀层微观形貌(400×)

Fig. 6 Microstructure of Cu-MoS_2 coating(400×)



a 原表面形貌



b 磨损后表面形貌

图 7　Ni-W(D)-MoS_2 镀层微观形貌(400×)

Fig. 7 Microstructure of Ni-W(D)-MoS_2 coating(400×)

显微硬度可达 794HV，两者混合后 Ni-W(D)镀层起到了很好包裹和支撑 MoS_2 纳米微粒的作用，形成硬基体软质点的复合镀层。同时 MoS_2 纳米微粒与金属表面具有很好的吸附力，并且具有很低的摩擦系数，一般只有 0.03 ~ 0.10[17—18]，这种 MoS_2 纳米微粒具有良好的自润滑性和减磨性，二者形成的复合镀层不但具有很好的耐磨性，同时具有良好自润滑作用而使得抗粘着能力明显提高[19—20]，使得 Ni-W(D)-MoS_2 复合镀层的表面粘着磨损情况得到明显改善，表现出了优良的整体耐磨性。这种使用两种力学性能完全不同的材料制备复合镀层来改善摩擦副间的磨擦磨损性能的方法得到了越来越多的应用[21]。

3 结论

1）单镀液 Cu，In 镀层都具有抗粘着能力，但 In 镀层能形成一层类似油膜状的粘流层，产生了极好的自润滑性，表现出了更为优秀的性能，在中低载荷的磨损中能明显提高模具的抗粘着磨损能力。

2）Cu-MoS_2 虽然也有一定的抗粘着能力，但由于 Cu 基体软，对 MoS_2 包裹和支撑能力比较弱，在对磨过程中，Cu-MoS_2 中的 MoS_2 微粒容易被迅速磨损脱落，导致耐磨性不佳，不适合于对磨件是强度较高和易产生加工硬化的工件加工。

3）硬基体软质点的 Ni-W(D)-MoS_2 镀层体现出比较优异的抗粘着能力和高的综合耐磨性。因为硬基体的 Ni-W(D)对 MoS_2 包裹和支撑能力强，形成结合能力很强的复合镀层，作为基体的 Ni-W(D)镀层具有高的硬度和良好的耐磨性，同时加入的软质点 MoS_2 纳米微粒具有良好的减磨性和自润滑作用，能显著地提高抗粘着性，在 4 个镀层中表现出了最好的综合抗粘着磨损能力。

参考文献

[1] 高万振，刘佐民. 表面耐磨损与摩擦学材料设计[M]. 北京：化学工业出版社，2014.
GAO Wang-zhen, LIU Zuo-ming. Surface Wear Resistance and Tribology Material Design[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.

[2] 徐滨士，刘世参. 表面工程新技术[M]. 北京：国防工业出版社，2002.
XU Bin-shi, LIU Shi-can, New Technologies of Surface Engineering[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.

[3] 揭晓华，陈元迪，谢光荣. 电刷镀 Ni-W(D)电刷镀层的滑动磨损特性研究[J]. 磨擦学学报，2002，22(3)：180—183.
JIE Xiao-hua, CHEN Yuan-di, XIE Guang-rong. Friction and Wear Behavior of Brush Plated Ni-W(D) Layer in Oil Lubrication Sliding Against a Mild Steel[J]. Tribology, 2002, 22(3): 180—183.

[4] 徐江，揭晓华，吴强. Ni-W(D)刷镀层再强化机理及磨损区元素偏聚现象的研究[J]. 表面技术，1999，28(5)：21—22.
XU Jiang, JIE Xiao-hua, WU Qiang. Study on the Ni-W(D) Brush Player Secondary Strengthen and Phenomenon of Element Enrichment on Wear Area[J]. Surface Technology, 1999, 28(5): 21—22.

[5] 唐睿，姜秉元. 化学镀 Ni-P 和 Ni-W-P 合金的结构及性能的研究[J]. 表面技术，2000，29(3)：5—7.
TANG Rui, JIANG Bing-yuan. Study on Structure and Performance of Electroless Ni-P and Ni-W-P [J]. Surface Technology, 2000, 29(3): 5—7.

[6] 徐方超，胡三媛，李长林，等. 化学复合镀 Ni-P-MoS_2 工艺的试验研究[J]. 中国农业大学学报，2004，9(3)：49—52.
XU Fang-chao, HU San-yuan, LI Chang-lin, et al. Technological Investigation of Ni-P-MoS_2 Electroless Composite Plating[J]. Journal of China Agricultural University, 2004, 9(3): 49—52.

[7] 曹剑. NI-P-MoS_2 化学复合镀层的制备及自润滑性能研究[J]. 机械设计与制造，2010(8)：123—125.
CAO Jian. Study on the Preparation and Self-Lubricating Property of Ni-P-MoS_2 Electroless Composite Plating[J]. Machinery Design and Manufacture, 2010(8): 123—125.

[8] 董耕野，何孝美. 不锈钢制管模具失效分析及防止粘着磨损对策[J]. 铸造技术，2007(8)：1149—1150.
DONG Geng-ye, HE Xiao-mei. Measures of Failure Analysis and Adhesion Abrasion for the Stainless Steel Piping Mold [J]. Casting Technique, 2007(8): 1149—1150.

[9] 高志，宋咚咚. 奥氏体不锈钢的耦合变形摩擦试验方法与试验研究[J]. 工程与试验，2014(3)：17—20.
GAO Zhi, SONG Dong-dong. Study on Coupled Friction and Deformation Experiment of Austenitic Stainless Steel[J]. Engineering & Test, 2014(3): 17—20.

[10] 于旭光. 纳米 MoS_2 的摩擦学特性[J]. 有色金属，2006，58(4)：5—8.
YU Xu-guang. Tribological Property of MoS_2 Nanomaterials [J]. Nonferrous Metals, 2006, 58(4): 5—8.

[11] 李方坡，王引真，潘蛟亮，等. MoS_2 含量对 Ni 基固体润滑涂层性能的影响[J]. 材料热处理学报，2007，28(4)：

135—138.
LI Fang-po, WANG Yin-zhen, PAN Jiao-liang, et al. Influence of MoS_2 Content on Properties of Self-lubricating Nickel-base Coatings[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, 28(4): 135—138.

[12] 郭国才. Zn-MoS_2 自润滑复合镀层的研究[J]. 表面技术, 2004, 33(4): 28—29.
GUO Guo-cai. Study on Self-lubricating Composite Coating of Zn-MoS_2[J]. Surface Technology, 2004, 33(4): 28—29.

[13] 王德志,吴状志,梁汛,等. 表面活性剂对制备纳米 MoS_2 颗粒的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(3): 676—680.
WANG De-zhi, WU Zhuang-zhi, LIANG Xun, et al. Effect of Surfactants on Preparation of MoS_2 Nanoparticles[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(3): 676—680.

[14] 马丽心,刘义翔,刘文新. 粘着磨损及影响因素的研究[J]. 哈尔滨商业大学学报:自然科学版, 2001(1): 74—76.
MA Li-xin, LIU Yi-xiang, LIU Wen-xin. Study on Adherence Abrasion and Influenced Factors[J]. Journal of Harbin Commercial University: Natural Sciences Edition, 2001(1): 74—76.

[15] 司洪娟,徐滨士,王海斗,等. 纳米电刷镀 In 层真空辐照环境下摩擦学性能研究[J]. 工程材料, 2011(2): 79—83.
SI Hong-juan, XU Bin-shi, WANG Hai-dou, et al. Tribological Properties Research of Nano-electro-brush Plating In layer in Vacuum Radiation Environment[J]. Journal of Material Engineering, 2011(2): 79—83.

[16] 马国政,徐滨士,王海斗. 环境压强对电刷镀 In/Ni 固体润滑涂层摩擦学性能的影响[J]. 真空科学与技术学报, 2011, 31(2): 154—160.
MA Guo-zheng, XU Bin-shi, WANG Hai-dou. Influence of Environmental Pressures on Tribological Properties of In/Ni Lubricating Layers Deposited By Electrical Brushing[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2011, 31(2): 154—160.

[17] DONNET C, MARTIN J M. Super-low Friction of MoS_2 Coating in Various Environments[J]. Tribology International, 1999, 2(9): 123—128.

[18] 李斌,谢凤,张蒙蒙,等. 纳米二流化钼作为润滑油添加剂的摩擦学性能研究[J]. 润滑与密封, 2014, 39(9): 91—95.
LI Bin, XIE Feng, ZHANG Meng-meng, et al. Study on Tribological Properties of Nano-MoS_2 as Additive in Lubricating Oils[J]. Lubrication Engineering, 2014, 39(9): 91—95.

[19] LINCE J R. Tribology of Co-sputtered Nanocomposite Au/MoS_2 Solid Lubricant Films over a Wide Contact Stress Range[J]. Tribology Letters, 2004, 17: 419—428.

[20] LINCE J R, HILTON M R, BOMM A S. Metal Incorporation in Sputter-deposited MoS_2 Films Studied by Extended X-ray Absorption Fine Structure[J]. Journal of Materials Research, 1995, 10: 2091—2105.

[21] 王利捷,杨军胜. 钛合金表面 MoS_2/TiN 复合涂层的摩擦性能研究[J]. 表面技术, 2010, 39(2): 11—13.
WANG Li-jie, YANG Jun-sheng. The Study on Tribological Properties of MoS_2/TiN Composite Coating on the Surface of Titanium Alloy[J]. Surface Technology, 2010, 39(2): 11—13.

(上接第 74 页)

[20] 谢洪波,江冰,陈华三,等. 化学镀镍规律及机理探讨[J]. 电镀与精饰, 2012, 34(2): 26—30.
XIE Hong-bo, JIANG Bing, CHEN Hua-san, et al. Discussion on the Mechanism of Electroless Nickel Plating[J]. Plating and Finishing, 2012, 34(2): 26—30.

[21] 陈晋日. 铝、镁合金化学镀镍机理与工艺研究[D]. 长沙:湖南大学, 2012.
CHEN Jin-ri. Research on Mechanism and Process of Electroless Nickel Plating on Al and Mg Alloys[D]. Changsha: Hunan University, 2012.

[22] 张朝阳,魏锡文. 化学镀 Ni-Cu-P 合金的机理研究[J]. 表面技术, 2004, 33(2): 29—31.
ZHANG Chao-yang, WEI Xi-wen. Study on the Mechanism of Electroless Ni-Zn-P Plating Alloy[J]. Surface Technology, 2004, 33(2): 29—31.

[23] 高荣杰,杜敏. 海洋腐蚀与防护技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2011.
GAO Rong-jie, DU Min. Marine Corrosion and Protection Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.