

结晶器铜板 Ni-Co 电镀层的耐磨性

耿 哲¹, 刘 阳¹, 张宏杰², 李 曙¹

(1. 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016; 2. 鞍钢附企一炼钢冶金修造厂, 辽宁 鞍山 114011)

摘 要: 针对含 Co 质量分数不同的 Ni-Co 电镀层, 通过扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射仪(XRD)和显微硬度表征其组织结构和硬度, 采用高温销/盘磨损试验机评价其在室温和 280 ℃ 时与 35CrMo 钢销或 Si₃N₄ 陶瓷球配副时的耐磨性。结果表明: 随 Co 质量分数增加, 结晶取向变化、晶粒细化和固溶强化作用将镀层硬度从 2.03 GPa 提高至 3.96 GPa, 增强抵抗硬质点犁削的能力。280 ℃ 试验后, 镀层的磨损量相比室温成倍增加, 与钢销对摩后, 1.5%Co 镀层磨痕表面粘附钢销材料, 其磨损量低于硬度较高的 27%Co 镀层; 与陶瓷球对摩后, 27% 的 Co 质量分数促进磨损过程中生成 Co 的氧化物和形成耐磨的摩擦反应层, 使镀层磨损量相比 1.5%Co 镀层下降 65.4%。结合结晶器使用工况考虑, 27% Co 有利于提高 Ni-Co 电镀层的耐磨性。

关键词: Ni-Co 电镀层; 耐磨性; 结晶器铜板; 摩擦反应层

中图分类号: TG174.44; TG115.58 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2013)06-0093-07

Wear Resistance of Ni-Co Electrodeposited Coatings on Copperplate of Crystallizer

GENG Zhe¹, LIU Yang¹, ZHANG Hong-jie², LI Shu¹

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016; 2. No. 1 Steelmaking Plant of Anshan Iron and Steel Co., Anshan 114011, Liaoning)

Abstract: Ni-Co electrodeposited coatings containing different amounts of Co were investigated. Their microstructure and hardness were characterized by scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD) and micro-hardness tester. The wear behavior of Ni-Co coatings rubbing with 35CrMo steel pins or Si₃N₄ ceramic balls was evaluated by a pin-on-disk tribometer at room temperature and 280 ℃. The results show that the coating hardness increases from 2.03 GPa to 3.96 GPa and the wear resistance against hard particles plowing is enhanced because of the change of crystal orientation, grain refinement and solid solution strengthening when the Co content increases. The wear volumes of coatings are several times higher at 280 ℃ than that at 25 ℃. After rubbing with a steel pin, the worn track of 1.5%Co coating is adhered by the pin material, resulting in the wear volume abnormally lower than 27%Co coating with higher hardness. After rubbing with a ceramic ball, 27% Co content can promote the generation of cobalt oxides and the formation of tribofilm during the frictional process, making the volume loss of coating decrease by 65.4% compared with 1.5%Co coating. As the working conditions of crystallizer are considered, 27% Co content is beneficial for improving the wear resistance of Ni-Co coatings.

Key words: Ni-Co electrodeposited coating; copperplate of crystallizer; wear resistance; tribofilm

0 引 言

Ni-Co 电镀层因高温强度和热稳定性好, 热膨胀系数与 Cu 接近, 且内应力低, 应用在较高温度下服役的连铸结晶器铜板表面可获得耐磨效果^[1-3]。

在结晶器 280 ℃ 左右的工作条件下, 耐磨性直接影响铜板模具的使用寿命, 开发更耐磨的结晶器铜板 Ni-Co 电镀层一直是研究热点^[4-6]。Co 含量改变电镀 Ni-Co 层的组织结构和力学性能, 从而影响

收稿日期: 2013-09-18; 修回日期: 2013-10-20

作者简介: 耿哲(1985—), 男(汉), 江苏宝应人, 博士生; 研究方向: 特殊工况下材料的摩擦磨损行为

网络出版日期: 2013-11-07 14:58; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20131107.1458.014.html>

引文格式: 耿哲, 刘阳, 张宏杰, 等. 结晶器铜板 Ni-Co 电镀层的耐磨性 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(6): 93-99.

摩擦磨损性能^[7-9]。高钴($\omega_{\text{Co}} > 80\%$)镀层在较高温度下的耐磨性虽然很好,但其内应力大、抗热裂性能差,性价比也不佳。研究表明并不需太高的 Co 含量,镀层的耐磨性也会有明显提高^[8],故而在结晶器铜板 Ni-Co 电镀层的实际应用中,Co 含量一般控制在 30% 以下^[2]。但是对较低 Co 含量的 Ni-Co 电镀层的高温磨损行为和磨损机制的研究目前尚未见系统的报道。对表面耐磨技术应用而言,在保证耐磨性要求的前提下尽量减少 Co 用量,对电镀过程的环境保护和可持续发展都具有重要意义^[10]。

文中选择 Co 质量分数不同的 4 种 Ni-Co 电镀层,分别与 35CrMo 钢销或 Si_3N_4 陶瓷球配副进行销/盘磨损试验,研究其在室温和 280 °C 时的耐磨性,并探索磨损机制,为 Ni-Co 电镀层在结晶器铜板上的应用提供试验依据。

1 样品与试验方法

磨损试验在 GW/ML-MS 型高温销/盘试验机上进行,Ni-Co 电镀层作盘试样,对磨副为钢销和陶瓷球。盘试样基材为纯 Cu,尺寸 $\Phi 50 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,表面由鞍钢附企一炼钢冶金修造厂设计镀液组成及工艺条件,并采用组箱式设备^[2]电镀厚度 0.4~0.5 mm 的 Ni-Co 层,Co 含量(质量分数)分别为 1.5%、3%、9% 和 27%,镀层经磨削后

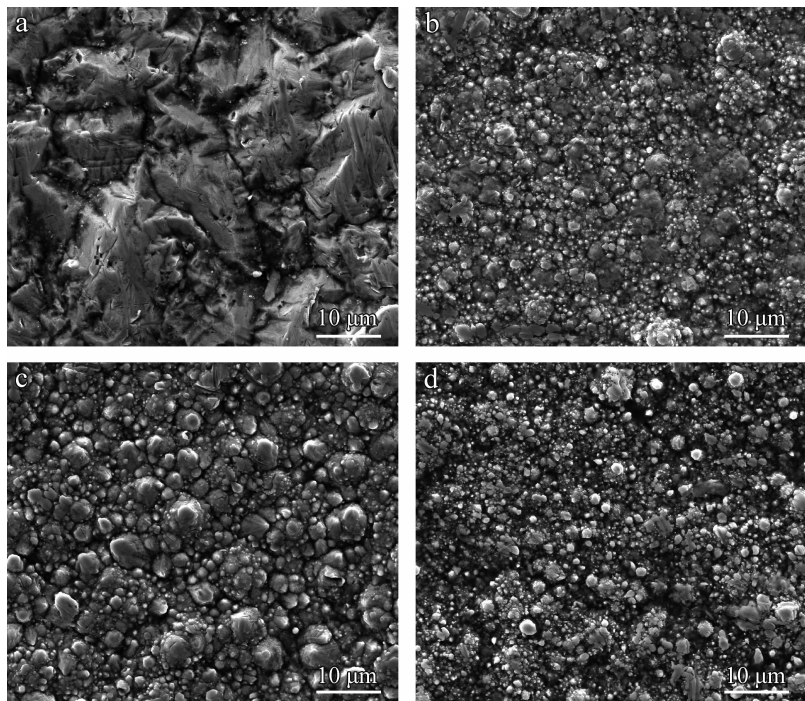
表面 R_a 为 $0.1 \mu\text{m}$ 。35CrMo 钢销试样直径为 6 mm,摩擦面是高为 1 mm 的球冠,球的直径是 10 mm,表面 R_a 为 $0.4 \mu\text{m}$,退火态硬度为 2.5 GPa; Si_3N_4 陶瓷球直径为 6.35 mm, $R_a < 0.1 \mu\text{m}$,硬度 HRA > 95 。试验参数为:大气环境,温度为室温和 280 °C,载荷 8.4 N,转速 120 r/min(相对线速度 0.1 m/s),磨损时间 1.5 h。镀层的磨损量以磨痕体积计量,采用 2206B 型表面粗糙度仪测量磨痕圆周上 10 个点的截面轮廓,通过积分计算磨痕截面面积取平均值,再乘以磨痕中线周长得到。每个磨损试验重复 3 次,结果取平均值。

采用 Magix Pro PW2440 型 X 射线荧光光谱仪测定镀层的成分;采用 XPert Pro 型 X 射线衍射仪(XRD)分析镀层的物相组成;采用 AMH43 显微硬度仪(载荷 50 g,保持 15 s)测定镀层截面的显微硬度;采用 Inspect F50 扫描电镜(SEM)观测镀层表面和磨痕表面形貌,并用能谱仪(EDX)分析磨痕表面成分;采用 JY HR800 拉曼光谱仪测定磨痕内外表面的氧化物相,激光波长为 632.8 nm。

2 结果与讨论

2.1 镀层的组织结构和硬度

图 1 为不同 Co 含量的 Ni-Co 电镀层的表面



(a) Ni-1.5Co (b) Ni-3Co (c) Ni-9Co (d) Ni-27Co

图 1 不同 Co 含量的 Ni-Co 电镀层表面形貌

Fig. 1 SEM morphologies of Ni-Co coatings with different Co content

形貌,可见 Ni-1.5Co 镀层的晶粒粗大,呈现多面体特征;Ni-3Co 镀层的晶粒仍以多面体为主,但尺寸明显减小;Ni-9Co 镀层的晶粒形状由多面体变为圆锥和球体的混合,同时有一些晶粒团聚成较大的团簇;Ni-27Co 镀层的晶粒为球形且非常细小。可见随 Co 含量增加,Ni-Co 镀层的晶粒形状由多面体逐渐变为球形,且有晶粒细化的倾向。

由 XRD 结果(图 2)可见:Ni-1.5Co 镀层的(200)峰非常强,表明镀层晶粒具有强烈的(100)择优取向;Ni-3Co、Ni-9Co 和 Ni-27Co 镀层的(200)峰强度明显减弱,反映 Co 含量的增加能抑制镀层(100)组织结构的形成^[11-12];同时衍射峰的位置均向低角方向偏移,说明较高 Co 含量促使镀层中形成 Ni-Co 固溶体。

Ni-Co 电镀层的截面显微硬度测量结果如表 1 所示。Ni-1.5Co 镀层的硬度最低,这是因为镀层中的晶粒粗大且具有(100)择优取向。随 Co 含量增加,Ni-Co 镀层的硬度逐渐升高,这与镀层在结晶过程中晶粒取向改变和晶粒细化密切相关;此外,Co 的固溶强化作用对硬度的提高也有贡献。

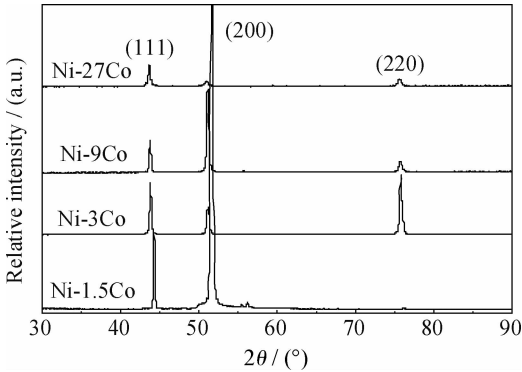


图 2 Ni-Co 电镀层的 XRD 图谱
Fig. 2 XRD patterns of Ni-Co coatings

表 1 Ni-Co 电镀层的显微硬度

Table 1 Microhardness of the Ni-Co coatings

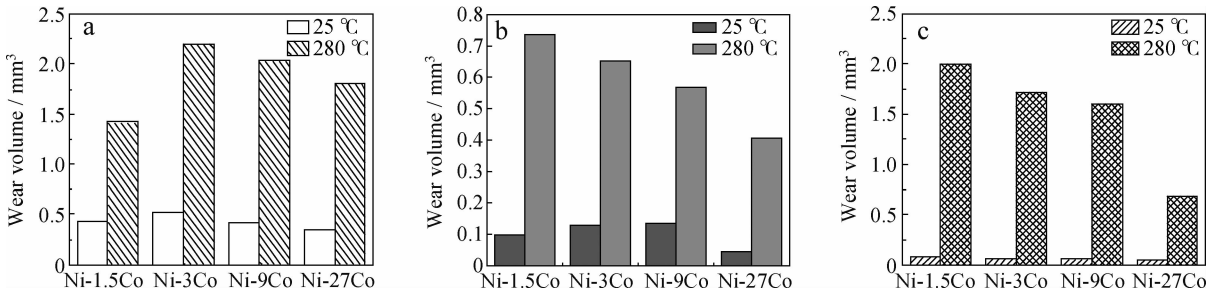
Coating	Ni-1.5Co	Ni-3Co	Ni-9Co	Ni-27Co
Microhardness/GPa	2.03	2.64	3.14	3.96

2.2 镀层的磨损行为

不同 Co 含量的 Ni-Co 电镀层与 35CrMo 钢销或 Si₃N₄ 陶瓷球配副,经室温和 280 ℃ 试验后磨损体积测量结果如图 3 所示。Si₃N₄ 陶瓷球磨损轻微,其磨损量未在图中示出。

由图 3(a)(b)可见,与 35CrMo 钢销对摩时,Ni-Co 镀层经 280 ℃ 试验后的磨损体积比室温试验成倍增加,但是在两种温度下磨损量随 Co 含量的变化规律类似,即 1.5%Co 时较低,3%Co 时最高,之后随 Co 含量增加而逐渐下降。值得注意的是,尽管 1.5%Co 镀层的硬度最低,但其磨损体积在室温下低于 3%Co 镀层,在 280 ℃ 时甚至低于硬度最高的 27%Co 镀层。销的磨损体积在室温时较低,在 280 ℃ 时与 1.5%Co 镀层对摩后的磨损体积最高,且随镀层 Co 含量增加,销的磨损体积逐渐下降。由图 3(c)可见,与 Si₃N₄ 陶瓷球对摩时,Ni-Co 镀层经室温试验后的磨损量变化不大且均很轻微,而 280 ℃ 时较低 Co 含量镀层的磨损体积是室温的 20 余倍,随 Co 含量增加磨损体积迅速下降,27%Co 镀层只是室温的十余倍,相比 280 ℃ 时 1.5%Co 镀层的磨损量下降 65.4%,表明增加 Co 含量有利于提高 Ni-Co 电镀层在 280 ℃ 时的耐磨性。

对比镀层与 2 种对摩副的磨损行为,可推测除硬度的影响外,摩擦副材料之间通过机械、物理与化学作用产生的氧化物和摩擦反应层,明显影响镀层的摩擦磨损性能。



(a) Ni-Co coating (rubbing with 35CrMo steel pin) (b) 35CrMo steel pin (c) Ni-Co coating (rubbing with Si₃N₄ ball)

图 3 室温和 280 ℃ 时 Ni-Co 镀层和 35CrMo 钢销的磨损体积

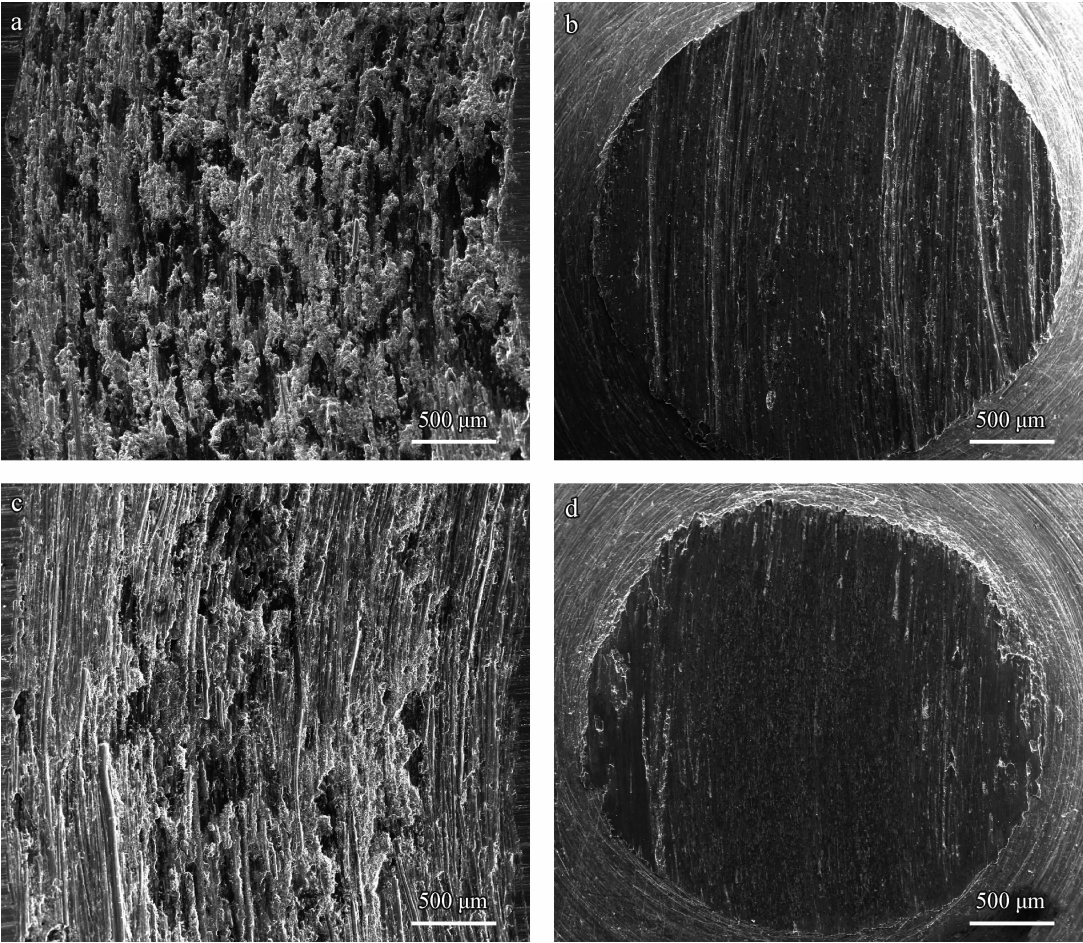
Fig. 3 Wear volume of Ni-Co coatings and 35CrMo steels at room temperature and 280 ℃

2.3 氧化产物和摩擦反应层的作用

在 280 ℃条件下高、低 Co 含量 Ni-Co 电镀层与 35CrMo 钢销对摩后的磨痕形貌和成分检测结果如图 4 和表 2 所示。

Ni-1.5Co 镀层的磨痕表面存在较多的深色区域(图 4(a)),EDX 分析表明深色区域中 Ni、O 含量较高并有较多 Fe,钢销磨痕表面的深色区域

则含较高的 O、Fe 并有少量 Ni。显然 1.5%Co 镀层在与钢销摩擦的过程中表面出现摩擦反应层,由于环境和摩擦热的作用,材料发生转移,其中对摩材料向镀层的粘着为主要倾向,摩擦反应层起到保护镀层的作用;同时,与其配摩的钢销磨痕表面则存在大量宽且深的犁沟(图 4(b)),说明其受到镀层表面摩擦反应层的严重犁削而磨损剧烈。



(a) Ni-1.5Co coating (b) pin (rubbing with Ni-1.5Co coating) (c) Ni-27Co coating (d) Pin (rubbing with Ni-27Co coating)

图 4 280 ℃时 Ni-Co 镀层和 35CrMo 钢销的磨痕形貌

Fig. 4 Worn surface morphologies of Ni-Co/35CrMo pair at 280 ℃

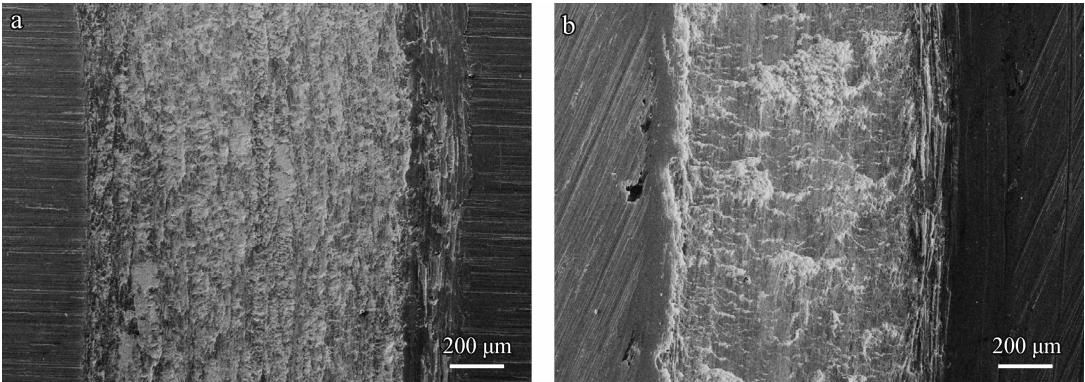
表 2 图 4 中镀层和钢销磨痕表面深色区域的成分(体积分数/%)

Table 2 Composition of the dark film on the worn surface of coatings and pins in Fig. 4(a/%)

Sample (rubbing pair)	Chemical composition			
	O	Fe	Co	Ni
Ni-1.5Co coating	38.76	18.26	1.01	41.97
35CrMo pin (Ni-1.5Co)	50.09	38.87		10.61
Ni-27Co coating	33.99	21.54	11.77	32.43
35CrMo pin (Ni-27Co)	46.29	27.80	7.31	18.29

Ni-27Co 镀层与 Ni-1.5Co 镀层相比,磨痕表面的犁沟较多且较深,代表摩擦反应层的深色区域较小(图 4(c)),说明硬度较高的镀层表面难于嵌入硬质的摩擦产物,受到对摩副钢销的犁削而磨损较重;此时钢销的磨损量较小。EDX 分析表明镀层磨痕表面深色区域出现一定量的 Co,判断存在 Co 的氧化物;钢销磨痕表面深色区域的 Ni、Co 含量较多,表明镀层材料较多地向钢销表面黏着转移形成摩擦反应层(图 4(d)),能保护钢销表面而犁削镀层。因此摩擦反应层的粘附方式对镀层的耐磨性产生重要影响。

氧化产物和摩擦反应层对 Ni-Co 镀层耐磨性的影响可通过与 Si₃N₄ 陶瓷球对摩的试验进一步证实。280 ℃ 试验后的高、低 Co 含量镀层的磨痕形貌和成分如图 5 和表 3 所示。图 5(a)显示 1.5%Co 镀层的磨痕较宽,表面的摩擦反应层以 NiO 为主,表面比较粗糙,反映该摩擦反应层难以抵抗陶瓷球硬质点的犁削。图 5(b)显示 27%Co 镀层的磨痕较窄,表面形成较为连续的摩擦反应层,EDX 分析判断膜层中含有较多 Co 的氧化物;该摩擦反应层表面比较平整光滑,没有明显的犁沟,能够抵抗硬质点的犁削,从而提高镀层的耐磨性。



(a) Ni-1.5Co coating (b) Ni-27Co coating
图 5 Ni-Co 镀层 280 ℃ 时与 Si₃N₄ 球对摩后的磨痕形貌

Fig. 5 Morphologies of worn surfaces of Ni-Co coating after rubbing with Si₃N₄ balls at 280 ℃

表 3 Ni-Co 镀层在 280 ℃ 与 Si₃N₄ 球对摩后的磨痕内外表面的成分(体积分数/%)

Table 3 Compositions of surface inside and outside the worn track of coatings after rubbing with Si₃N₄ balls at 280 ℃ (a/%)

Sample	Chemical composition		
	O	Co	Ni
Ni-1.5Co coating surface		1.71	98.29
Ni-1.5Co worn track	60.10		39.90
Ni-27Co coating surface		27.11	72.89
Ni-27Co worn track	62.90	11.52	25.58

采用拉曼光谱测定 280 ℃ 试验后的高、低 Co 含量镀层磨痕内、外表面氧化物的相组成,证明了氧化产物的形成,结果如图 6 所示。

280 ℃ 试验后,Ni-Co 镀层磨痕外区域氧化轻微,仅出现极少量 NiO 和 Co 的氧化物。1.5% Co 镀层与 35CrMo 钢对摩后,磨痕表面出现较多 NiO 和一定量的 Fe₃O₄,它们能抵抗钢销的犁削,减轻镀层的磨损;与 Si₃N₄ 球对摩后,镀层磨痕表

面出现较多 NiO 和少量 Co 的氧化物,它们难以抵抗陶瓷球硬质点的犁削使镀层磨损严重。

27%Co 镀层与 35CrMo 钢对摩后,磨痕表面出现较多 NiO、Fe₃O₄ 和一定量 Co 的氧化物,此时镀层硬度的提高使氧化产物多粘附于钢销表面而犁削镀层;与 Si₃N₄ 球对摩后,镀层磨痕表面的摩擦反应层含有较多 NiO 和 Co 的氧化物,说明 Co 含量的提高促进磨损过程中氧化产物的生成,

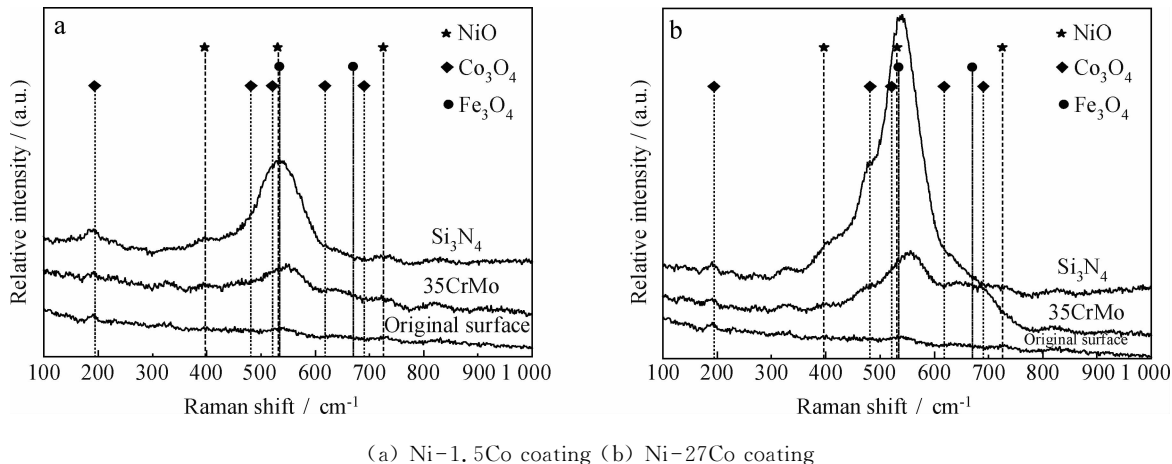


图 6 280 °C 时 Ni-Co 镀层磨痕内、外表面的拉曼光谱

Fig. 6 Raman spectra of surfaces inside and outside worn track on Ni-Co coating at 280 °C

并有利于形成连续的摩擦反应层,能抵抗陶瓷球的犁削,从而减轻镀层的磨损。

2.4 Co 含量与结晶器镀层耐磨性的关系

Co 含量较低的 1.5%Co 镀层硬度较低,与钢销的粘着倾向较高,在摩擦磨损过程中钢销材料会向镀层表面转移,同时镀层和钢销材料在环境和摩擦热的作用下发生氧化,并在镀层磨痕表面形成摩擦反应层,如图 4(a)所示。摩擦反应层能保护镀层表面,隔开金属间的直接接触,并起到耐磨作用,使 1.5%Co 镀层的磨损较轻。1.5%Co 镀层与 Si₃N₄ 陶瓷球对摩时,表面的 NiO 薄膜难以抵抗硬质陶瓷颗粒的犁削,且 NiO 自身也可能成为磨粒而使镀层磨损严重。钢厂在实际拉坯过程中,结晶器铜板表面不仅与新生钢坯间存在反复的摩擦磨损,而且也会与 SiO₂、CaO 等保护渣频繁接触,因此根据文中 1.5%Co 镀层与 Si₃N₄ 陶瓷球的磨损试验结果不难理解,这些硬质炉渣颗粒会造成镀层磨损严重,使低 Co 含量镀层的实际使用寿命降低。

随 Co 含量增加,镀层的硬度提高,此时摩擦反应层难以附着在镀层表面而较多地粘附于钢销表面,见图 4(c)(d)。较少的摩擦反应层不能完全保护镀层表面,使其遭受钢销的犁削而留下较多犁沟。但是与 Si₃N₄ 陶瓷球对摩的结果表明,适当提高 Co 含量有利于在镀层磨痕表面形成摩擦反应层,起到承载作用并能抵抗硬质颗粒的犁削,有效地保护了镀层。因此综合考虑两方面因素,Co 含量增加提高镀层的硬度,且促进摩擦反应层的形成,使抵抗钢销和硬质颗粒犁削的能力

增强,对提高镀层的耐磨性有利。钢厂的实践结果也表明 Co 含量较高的 Ni-Co 电镀层具有更好的耐磨性,能明显提高过钢量,与文中试验结果一致。

综上所述并结合现场使用情况分析, Ni-1.5Co 镀层的晶粒粗大,硬度较低,在摩擦磨损过程中磨痕表面易受到钢销和硬质颗粒的犁削,虽然摩擦反应层会起到一定的保护作用,但在实际使用过程中,结晶器受到炉渣等硬质颗粒的划伤而磨损严重。适当增加 Co 含量,电镀层晶粒细化,硬度提高,在摩擦磨损过程中镀层表面抵抗钢销和硬质颗粒犁削的能力增强;同时较高的 Co 有利于镀层表面形成耐磨的摩擦反应层,明显减轻镀层磨损。因此控制 Co 含量使结晶器的 Ni-Co 电镀层具有更好的耐磨性,才能保证更高的技术经济效益。

3 结 论

(1) Co 含量影响 Ni-Co 电镀层的组织结构,随着 Co 含量增加,镀层结晶取向改变且有晶粒细化倾向。

(2) 摩擦反应层的形成影响镀层的耐磨性,较高的 Co 含量促进磨损过程中生成 Co 的氧化物,且有利于形成摩擦反应层,增强抵抗硬质点犁削的能力,从而提高镀层的耐磨性。

(3) 约 27%Co 含量的 Ni-Co 电镀层与 Si₃N₄ 陶瓷在 280 °C 时具有最高的耐磨性,可用于结晶器铜板上的表面防护,具有较好的应用前景。

参考文献

[1] 三谷和久, 桥田和夫, 周康. 改善连铸铜板耐磨性能的 Ni-Co 合金的特性 [J]. 连铸, 1999, (6): 34-36.

[2] 张宏杰, 方克明. 薄板坯连铸机结晶器铜板电镀镍钴合金 [C]. 板坯连铸技术研讨会, 济南, 2003: 35-42.

[3] Hibbard G D, Aust K T, Erb U. Thermal stability of electrodeposited nanocrystalline Ni-Co alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 433(1/2): 195-202.

[4] Lekka M, Lanzutti A, Casagrande A, et al. Room and high temperature wear behaviour of Ni matrix micro- and nano-SiC composite electrodeposits [J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(17): 3658-65.

[5] 侯峰岩, 任乔华, 高锦岩. 连铸关键设备再制造技术及应用 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(4): 31-35.

[6] 林兰芳, 林绿波, 戴品强. 微晶和纳晶 Co-Ni-Fe 合金摩擦磨损特性的比较 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(2): 83-87.

[7] Graca S, Colaco R, Kulik A J, et al. A displacement sensing nanoindentation study of tribo-mechanical properties of the Ni-Co system [J]. Applied Surface Science, 2008, 254

(22): 7306-13.

[8] Wang L P, Gao Y, Xue Q J, et al. Microstructure and tribological properties of electrodeposited Ni-Co alloy deposits [J]. Applied Surface Science, 2005, 242(3/4): 326-332.

[9] 侯峰岩, 路庆华, 谭兴海, 等. Co-Ni 合金镀层组织结构及性能研究 [J]. 材料热处理学报, 2007, 28(1): 123-126.

[10] 徐滨士, 梁秀兵, 张伟, 等. 建设工程研究中心, 提升再制造产业技术水平 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(4): 99-104.

[11] Li Y D, Pang H, Wang D, et al. Effects of saccharin and cobalt concentration in electrolytic solution on microhardness of nanocrystalline Ni-Co alloys [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(20): 4952-6.

[12] 许伟长, 戴品强, 郑耀东. 钴含量对电沉积纳米晶镍钴合金组织与力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1): 92-99.

作者地址: 辽宁省沈阳市沈河区文化路 72 号 110016
中国科学院金属研究所
Tel: (024) 2397 1775
E-mail: zgeng@imr.ac.cn

• 学术动态 •

第七届中国国际摩擦学会议(7th CIST)预通知

由中国机械工程学会摩擦学分会主办,中国矿业大学承办的第 7 届中国摩擦学国际会议(CIST 2014)将于 2014 年 4 月 28~30 日在中国徐州举行,会议主题为“面向可持续发展的摩擦学”。作为中国摩擦学系列国际学术会议,大会将邀请国内外摩擦学领域著名学者和企业代表参会,为来自世界各地的摩擦学工作者提供交流和展示的平台,共同研讨近年来摩擦学与技术研究的最新进展和未来发展方向。本次会议由清华大学雒建斌院士、中国石油大学(北京)张嗣伟教授、中国科学院兰州化学物理研究所薛群基院士担任学委会联合主席,中国矿业大学校长葛世荣教授、中国科学院兰州化学物理研究所刘维民教授和清华大学摩擦学国家重点实验室孟永刚教授担任组委会联合主席。会议主要设生物摩擦学与仿生、涂层和薄膜技术、空间摩擦学、润滑基础与技术、材料的疲劳与磨损、表面与界面工程、纳米摩擦学与纳米技术、摩擦化学、工业摩擦学及技术测试和微动磨损等 10 个会议专题。详情请参阅会议专题网站: <http://cist7.cumt.edu.cn>

会议联系人:张德坤,罗 勇; 0516-83591916, E-mail: cist7@cumt.edu.cn

(摘自中国表面工程协会设备材料工作委员会 网)