

TiB₂ 含量对 Ni 基感应熔覆涂层组织与性能的影响

黄本生, 李天宁, 熊万能, 明柯宇, 高钰枭

(西南石油大学 材料科学与工程学院, 成都 610500)

摘要: **目的** 采用高频感应熔覆技术, 在 35CrMo 钢表面制备 TiB₂ 增强 Ni 基涂层, 并研究 TiB₂ 添加量对 Ni 基涂层的组织、硬度以及耐磨性的影响规律。**方法** 利用光学显微镜和扫描电子显微镜观察 Ni 基涂层的微观组织形貌。利用 EDS 能谱分析仪对熔覆层不同区域的显微组织进行成分分析, 并结合 X 射线衍射仪对涂层进行物相分析。利用 HXD-2000TM/LCD 显微硬度计对试样的截面进行硬度测试。在 MDW-100 型磨损试验机上进行销盘副磨损实验, 评价涂层的耐磨性。**结果** 感应熔覆 Ni 基涂层无裂缝、气孔等缺陷, 与基体形成冶金结合。涂层的主要物相为 γ -Ni、Ni₂B、CrB、Cr₂₃C₆ 等。添加 TiB₂ 颗粒后, 熔覆过程中 TiB₂ 颗粒并未发生分解。随着 TiB₂ 添加量的增加, Ni 基涂层的硬度逐渐增大, 耐磨性逐渐增强, 添加 15%TiB₂ 颗粒的涂层硬度最大, 摩擦系数最小。与不添加 TiB₂ 的涂层相比, 在相同的磨损条件下, 添加 15%TiB₂ 的涂层硬度提高了 15.88%, 摩擦系数降低了 16.5%, 磨损量减少了 43.15%。**结论** TiB₂ 颗粒的添加使得涂层的硬度增大, 耐磨性增强。与此同时, 添加 15%TiB₂ 颗粒的涂层性能最为优异。

关键词: 感应熔覆; 镍基涂层; TiB₂; 显微硬度; 耐磨性

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)06-0075-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.06.012

Influence of TiB₂ Content on Microstructure and Properties of Ni-based Induction Cladding Coating

HUANG Ben-sheng, LI Tian-ning, XIONG Wan-neng, MING Ke-yu, GAO Yu-xiao

(School of Materials Science and Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare Ni-based coatings enhanced by TiB₂ on 35CrMo steel by using frequency induction cladding technology, and study the law of influence of TiB₂ content on microstructure, hardness and abrasion resistance of Ni-based coatings. Microstructure morphology of Ni-based coatings was observed with optical microscope and scanning electron microscope. Chemical composition of microstructure in different areas of cladding layer was completed with EDS energy dispersive spectrometer. Phase of the coatings was analyzed by combining X-ray diffractometer. Hardness of the coating cross-section was measured with HXD-2000TM/LCD microhardness tester. Pin-on-disk abrasion test was performed on MDW-100 abrasion machine to evaluate abrasion resistance of coatings. The Ni-based coatings treated by induction cladding were free from such defects as cracks and pores, and exhibited metallurgical bonding to substrate. The coatings were mainly composed of γ -Ni, Ni₂B, CrB, Cr₂₃C₆, etc. TiB₂ particles added did not decompose during the cladding process. With the increase of TiB₂ addition, both hardness and abrasion resistance of Ni-based coatings gradually increased. Hardness of the coating

收稿日期: 2017-12-29; 修订日期: 2018-01-31

Received: 2017-12-29; Revised: 2018-01-31

基金项目: 西南石油大学大学生课外开放实验项目

Fund: Supported by Southwest Petroleum University Students Open-door Experimental Project

作者简介: 黄本生 (1969—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为材料制备与加工、材料表面工程。

Biography: HUANG Ben-sheng (1969—), Male, Doctor, Professor, Research focus: material preparation and processing, material surface engineering.

with 15% TiB₂ addition was the highest and its friction coefficient was the lowest. Compared with the TiB₂-free coating, under the same wear conditions, hardness of the coating containing TiB₂ increased by 15.88%, friction coefficient decreased by 16.5%, and wear loss decreased by 43.15%. The addition of TiB₂ particles increased both hardness and abrasion resistance of the coatings. Meanwhile, the coating containing 15% TiB₂ particles exhibits the best coating performance.

KEY WORDS: induction cladding; Ni-based coating; TiB₂; microhardness; abrasion resistance

作为油田抽油杆的基体材料,由于特殊的服役环境,35CrMo 合金结构钢常常受到不对称循环载荷的作用以及产出液中 CO₂ 和 H₂S 等腐蚀介质的腐蚀,易发生疲劳断裂和腐蚀疲劳断裂^[1]。如今,中国大规模陆地油田的开采作业已经进入第二个发展阶段,石油的含水量也呈现上升趋势,而油井产出液的含水量直接影响了抽油杆的磨损性能。高含水石油的开采背景对抽油杆的磨损性能指标提出了更高的要求^[2-4],因此通过合理的表面改性技术,对 35CrMo 钢的表面硬度指标和耐磨性能进行增强具有深远的研究意义。

高频感应熔覆技术^[5],是一种成熟、稳定的表面改性处理技术,具有生产效率高、成本低、成分可控、熔覆层表面平整等特点,很适合用于抽油杆的改性处理。与此同时,相较于激光熔覆、氩弧熔覆、等离子熔覆、热喷涂熔覆等熔覆技术,高频感应熔覆还具有生产效率高、成本低、熔覆层表面平整、后加工量少等优点^[6-8]。贺定勇、王振廷、许新军等^[9-10]对 Ni 基感应涂层的研究结果表明,Ni 基感应涂层主要由 γ -Ni、Cr₂₃C₆、Cr₇C₃、CrB、Ni₃B 和 Ni₂Si 等组成,由碳铬、硼铬、硼镍等化合物构成的第二相使镍基涂层具有较高的硬度和耐磨性。但在一些特殊环境下,单纯的镍基涂层已难以满足实际需求,因此,制备具有更高硬度和耐磨性的感应熔覆涂层成为了近些年来研究的热点之一。目前,可通过添加高熔点、高硬度的硬质颗粒来改善涂层性能^[11],其中 TiB₂ 具有熔点高、硬度高、摩擦系数低、抗磨损性好等特点,很适合作为增强相应用于涂层制备工艺^[12-19]。

综上所述,本文采用高频感应熔覆技术,在 35CrMo 钢表面制备不同 TiB₂ 含量的 Ni 基复合涂层,借助 OM、SEM、EDS、XRD、显微硬度计和摩擦磨损试验机测试分析方法研究不同 TiB₂ 添加量对 Ni 基金属涂层组织和性能的影响。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

基体材料为国内油田抽油杆常用材料 35CrMo 钢。涂层材料选用自熔性 Ni60A 合金粉末,其粒径为 30~40 μm ,化学成分如表 1 所示。增强颗粒选用稳定性较好的 TiB₂,其粒径为 45 μm 。

表 1 Ni60A 合金粉末的化学成分
Tab.1 Chemical composition of Ni60A alloy powder

Elements	C	Si	B	Cr	Fe	Ni
wt%	≤1.0	3.0~5.5	3.5~5.0	15~18	≤5.0	Others

1.2 涂层制备

对 35CrMo 钢进行打磨除锈、除油处理,并用酒精清洗后吹干备用。将一定量的 TiB₂ (质量分数分别为 0%、5%、10%、15%、20%) 与 Ni60A 合金粉末混合,并用行星式球磨机研磨。随后在研磨完成后的混合粉末中加入粘接剂(松香+松节油),将粉末调成糊状后将其涂覆于经过预处理的 35CrMo 钢表面,涂层厚度约为 1.2~1.5 mm。涂覆完成后,将试样置于室温下自然干燥 8 h,然后将其放入烘干炉进行烘干(200 $^{\circ}\text{C}$, 2 h)。最后,将烘干后的试样放置于高频感应加热器中进行感应加热,得到厚度约为 1.0 mm 的涂层试样。

1.3 测试方法

采用光学显微镜和扫描电子显微镜观察感应熔覆涂层的微观组织形貌。利用 EDS 能谱分析仪对熔覆层不同区域的显微组织进行成分分析,并结合 X 射线衍射仪对涂层进行物相分析。利用显微硬度计对试样的截面进行硬度测试(载荷值为 500 g,加载时间 10 s)。利用磨损实验机进行销盘副(大削盘摩擦副)磨损实验,评价涂层的耐磨性,具体的实验方法为:将不同 TiB₂ 含量的镍基涂层试样制备成尺寸为 $\phi 8 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的圆柱销试样,以淬火处理后的 12CrMoV 硬质合金材料为摩擦环(硬度 61~62HRC),原油作为磨损介质,对试样进行法向加载磨损试验(20 N, 90 r/min, 30 min),观察磨损试验完成后不同涂层的表面形貌。

2 结果分析

2.1 微观组织及成分分析

熔覆界面的显微组织如图 1 所示。可以看出,熔覆试样截面分为基体层、涂层,并在中间结合处出现一条“亮白带”——扩散转移带(DTB),这是熔覆层

粉末材料与基体材料互相扩散迁移的结果。DTB 的出现说明熔覆层与基体形成了良好的冶金结合,且熔覆组织均匀致密^[20-22]。同时可以看出,熔合线附近涂层组织较远离熔合线区域的组织粗大,这主要是由于感应熔覆后试样冷速不均造成的,表面冷却速度较快,故形成的组织细小。此外,随着涂层粉末中 TiB_2

含量的改变,熔覆后涂层的组织也有较大差异,这与涂层中大量弥散分布的第二相颗粒有关。当涂层中未添加或添加少量 TiB_2 时,涂层组织粗大;当涂层中 TiB_2 含量增加时,涂层组织为典型的胞状树枝晶,同时也有等轴晶出现,其中 TiB_2 质量分数为 15% 时,熔覆涂层的组织最细小。

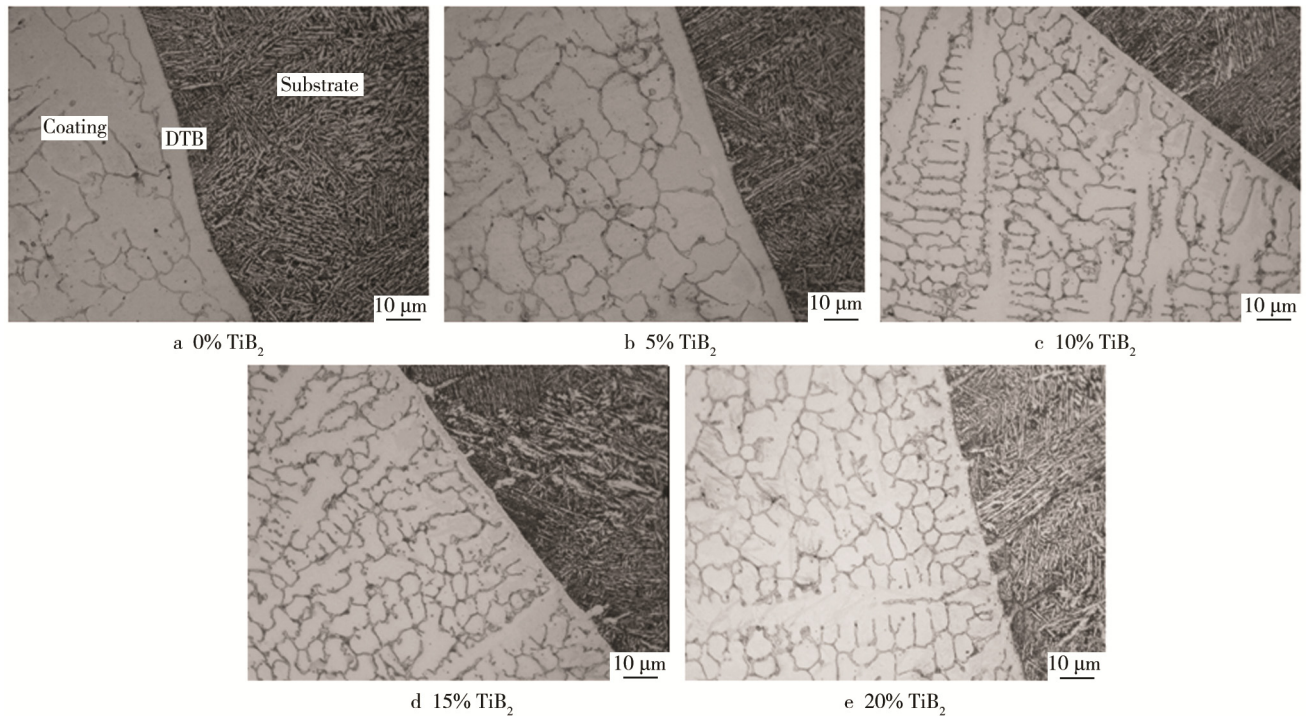


图 1 TiB_2 含量不同时所得涂层的显微组织

Fig.1 Microstructure of coatings with different TiB_2 mass fraction

2.2 物相分析

为进一步探究 Ni 基涂层的化学组成,利用 X 射线衍射仪对不同含量的 TiB_2 复合涂层进行了物相分析,结果如图 2 所示。由图可知,未添加 TiB_2 时, Ni 基涂层主要由 γ -Ni、 Ni_2B 、 CrB 及 Cr_{23}C_6 构成。随着 TiB_2 含量的增加,涂层中出现 TiB_2 ,与此同时涂层中的其他物相并没有发生变化,只有其物相所对应衍射峰的强度有所改变。这说明高温下 TiB_2 没有与 Ni 合金粉末发生反应,同时合金粉末也没有出现进一步的分解或形成新的物相。

2.3 成分分析

为探究涂层中各元素的分布情况,对“Ni+15% TiB_2 ”合金粉末所制得的涂层进行面扫描分析,结果如图 3 所示。由图 3a 可知,涂层主要分 1 处的涂层中硬质相、2 处的涂层基体以及 3 处的涂层表面枝状结晶三个部分。还可以看出, Ni 元素虽然遍布涂层,但主要分布于涂层基体区域(图 3b); B 元素主要分布于涂层表面的枝状结晶区域(图 3f); Cr 元素主要分布于涂层表面枝状结晶和硬质相区域(图 3c); C 元素虽然遍布涂层,但主要分布于硬质相区域(图

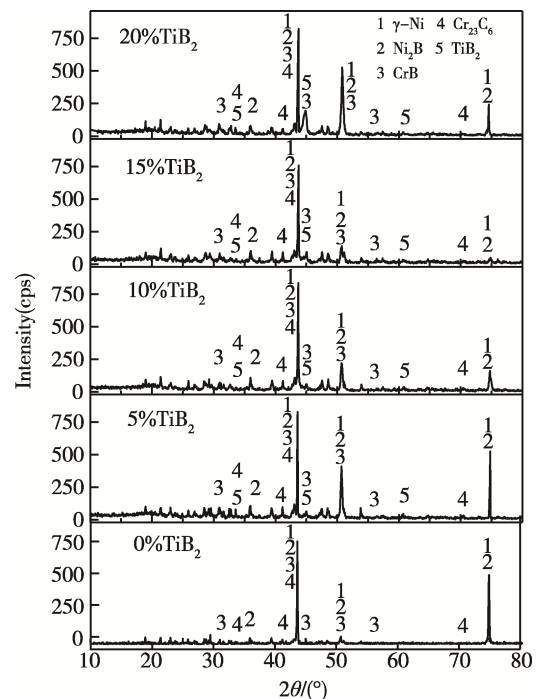


图 2 熔覆层 XRD 分析

Fig.2 XRD analysis of cladding coating

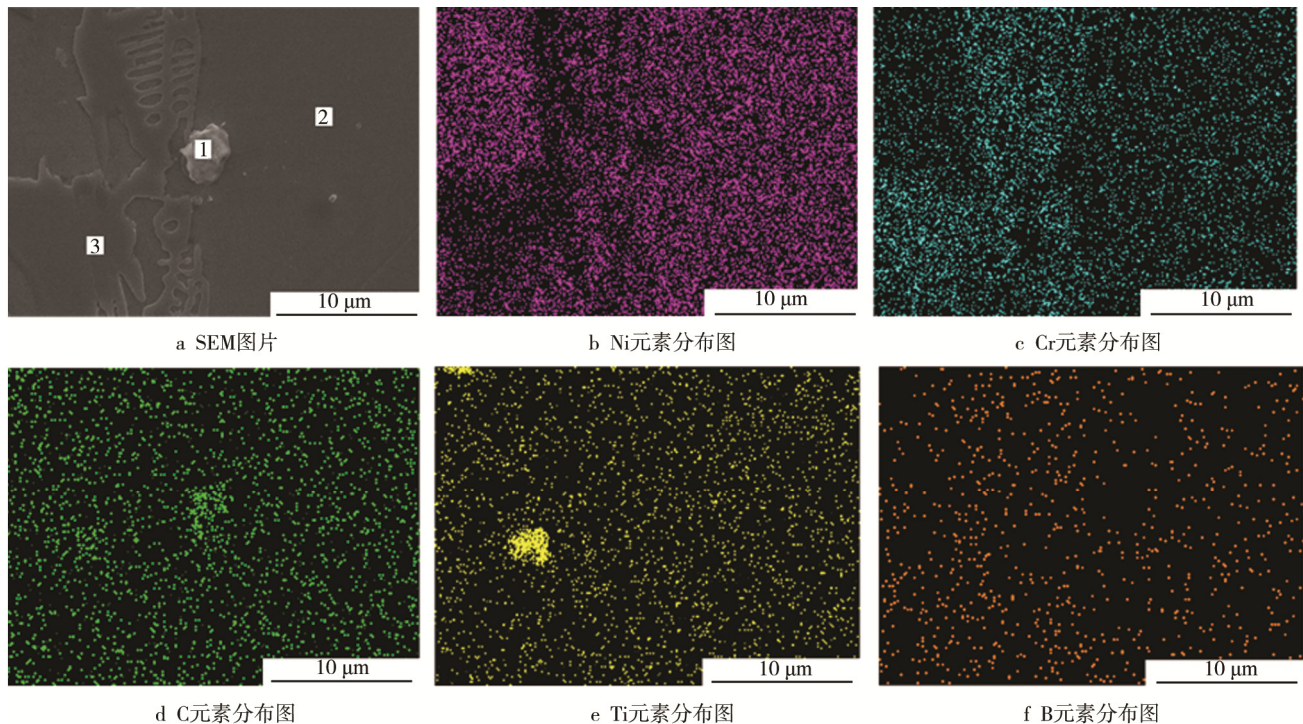
图 3 Ni+15%TiB₂合金涂层的面扫描结果

Fig.3 EDS map scanning results of Ni+15%TiB₂ alloy coating: a) SEM image, b) distribution diagram of Ni element, c) distribution diagram of Cr element, d) distribution diagram of C element, e) distribution diagram of Ti element, f) distribution diagram of B element

3e)。结合 XRD 结果及图 3d 可知, TiB₂ 颗粒在涂层熔化时并未分解, 但其在涂层的浅灰色区域发生了团聚。

对 TiB₂ 质量分数为 15% 的合金涂层进行点扫描分析, 结果见表 2。点扫位置包括图 4 中 I 点处的涂层中硬质相、II 点处的涂层基体、III 点处的涂层表面枝状结晶三个部分。I 点位于涂层硬质相上, 测得该点处 C 与 Cr 原子数目的比值接近 6:23, 固块状物主要为硬质相 Cr₂₃C₆ 和 γ-Ni 的固溶体。II 点位于涂层的基体部位, 结合 XRD 的结果可知, 涂层基体部分主要是 Fe、Cr 等原子溶于 γ-Ni 的固溶体。III 点位于涂层表面枝状结晶处, 该处 Ti 和 B 的原子质量分数较高, 而且其原子数目比接近 1:2, 其主要物相为 TiB₂。

图 5 是 Ni60A 粉末中掺杂质量分数 15%TiB₂ 颗

表 2 Ni+15%TiB₂合金涂层的 EDS 点扫描结果
Tab.2 EDS spot scanning results of Ni+15%TiB₂ alloy coating

Area	Elements/at%					
	B	C	Ti	Fe	Ni	Cr
I	—	10.52	0.08	2.24	56.48	30.68
II	—	8.48	0.16	2.13	72.05	17.18
III	34.10	3.97	12.29	1.75	39.63	8.26

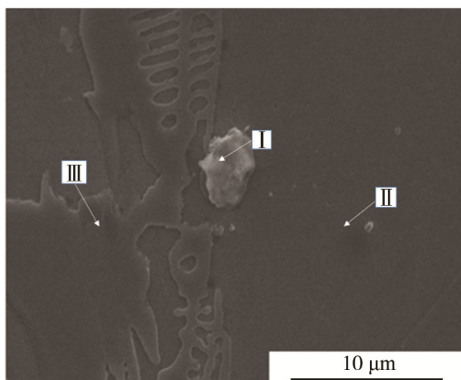
图 4 Ni+15%TiB₂合金涂层的 EDS 点扫描图

Fig.4 EDS spot scanning image of Ni+15%TiB₂ alloy coating

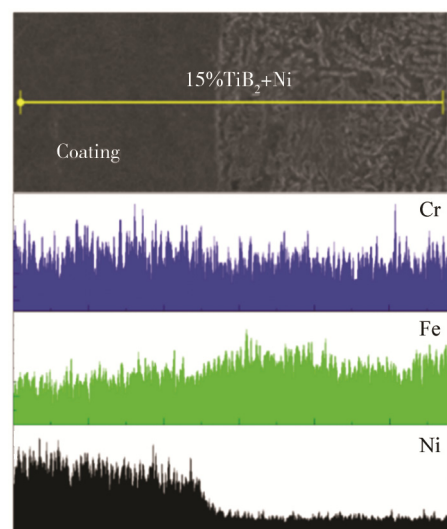
图 5 Ni+15%TiB₂合金涂层 EDS 线扫描

Fig.5 EDS line scanning results of Ni+15%TiB₂ alloy coating

粒的涂层与基体结合处线扫描结果。由图可知, Ni 元素的浓度在 DTB 处有较大变化, 但未出现陡然下降的情况, 因此 Ni 元素在扩散迁移带处有少量的扩散, 其扩散方向为涂层向基体。由于基体和涂层中均含有 Cr 元素, 但 DTB 处的 Cr 元素的浓度却几乎未发生变化, 故 Cr 元素并未发生扩散现象。Fe 元素的浓度在 DTB 区域内逐渐变化, 说明在该区域内 Fe 元素发生了扩散, 并且其扩散方向为基体向涂层。由此可知, DTB 是 Fe、Ni 元素在涂层与基体的界面处相互扩散的产物。

2.4 硬度结果分析

图 6 是镍基涂层横截面上由涂层表面向基体方向的显微硬度测试结果。DTB 左侧为涂层硬度变化曲线, 右侧为基体硬度。由图可知, 涂层的显微硬度从表及里呈现下降趋势, 且越靠近 DTB, 其硬度值越低。出现这种硬度变化的原因主要有, 在高温熔覆过程中, DTB 处于高温熔池, 基体中的 Fe 元素进入结合层, 产生稀释作用, 高温部分的第二相进入 γ -Ni 的固溶体中, 而在冷却过程中第二相来不及析出, 导致结合处硬度较低。熔覆层中低熔点的共晶相在熔覆温度时首先开始熔化, 而熔点较高的硬质相则在熔池中上浮, 导致硬度越靠近 DTB 越低^[23]。而 Cr、Ni 等元素的化合物以及添加的 TiB_2 颗粒, 由于密度较小上浮并在涂层表面析出, 从而形成花状、枝晶状和块状的共晶体, 引起固溶强化。涂层表面由于温度的急剧变化, 发生细晶强化, 使得涂层的表面硬度显著提高。

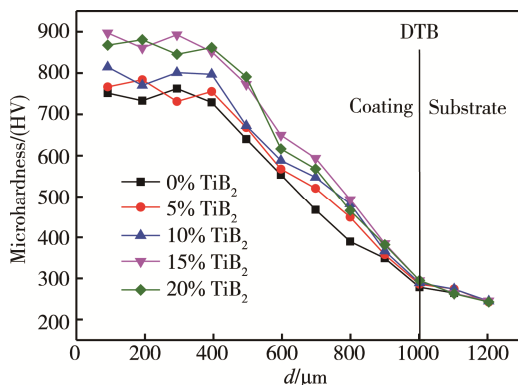


图 6 不同 TiB_2 含量时所得涂层的显微硬度
Fig.6 Microhardness distribution curve of coatings at different TiB_2 content

对比不同 TiB_2 颗粒添加量的涂层的显微硬度可以看出, 随着 TiB_2 颗粒添加量的增多, 涂层的显微硬度增加, 并在 TiB_2 质量分数为 15% 时达到最大, 而质量分数为 20% 时的显微硬度最大值略有下降。原因是随着 TiB_2 颗粒添加量的进一步增加, 复合涂层的合金元素含量减少, 硬质相与基体之间的结合减

弱, 从而导致涂层硬度降低。对比不添加和最佳添加量的涂层硬度值可以发现, 当 TiB_2 的质量分数为 15% 时, 显微硬度提高了 15.88%。

2.5 磨损性能分析

图 7 为不同 TiB_2 含量的涂层的摩擦系数折线图。由图可知, 在相同的摩擦条件下, 未添加 TiB_2 颗粒的涂层摩擦系数最大, 随着 TiB_2 颗粒添加量的增加, 涂层的摩擦系数呈现先降低后升高的趋势, 并在 TiB_2 颗粒质量分数为 15% 时摩擦系数最低。涂层的磨损量变化趋势与摩擦系数变化趋势类似, 也是随着 TiB_2 颗粒添加量的增加先降低后升高。在 TiB_2 颗粒质量分数为 15% 时磨损量最小, 其值为 44.27 mg, 而未添加 TiB_2 颗粒的涂层的磨损量为 77.87 mg, 添加质量分数 20% TiB_2 颗粒时磨损量又上升为 50.67 mg, 其原因是此时硬质颗粒与基体的结合作用降低, TiB_2 更容易从基体上剥离, 参与磨粒磨损过程, 从而加剧了涂层的磨损^[24]。添加质量分数 15% TiB_2 颗粒的涂层的磨损量比未添加时下降了 43.15%。

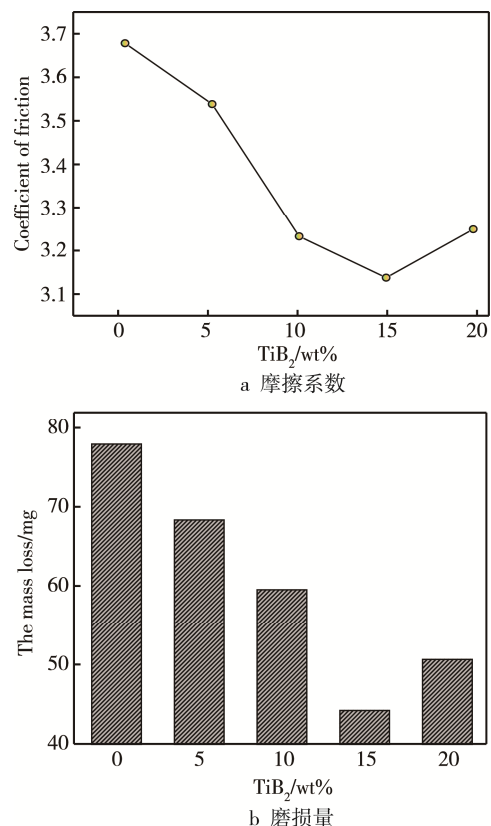


图 7 不同 TiB_2 含量合金涂层的摩擦磨损性能
Fig.7 Friction and wear properties of coatings with different TiB_2 content

图 8 是不同 TiB_2 含量时涂层的磨损形貌图。可以看出, 在 TiB_2 颗粒质量分数为 0%、5% 和 10% 时, 涂层的磨损形貌为明显的犁沟和较为严重的“挂蜡”现象, 初步判断其主要的磨损类型为磨粒磨损和粘着

磨损。为了进一步分析涂层的磨损类型,对质量分数 5%TiB₂ 合金涂层的磨损表面做 SEM 分析,并对 1 处(形状不规则的颗粒)进行点扫描,分析其元素组成,结果见图 9 及表 3。

根据实验结果可以发现,1 处主要元素为 Fe 元素, Ni 元素的含量很低,其表面为摩擦副发生了元素转移。因此 TiB₂ 颗粒质量分数为 0%、5%和 10% 时,其表面摩擦磨损的类型主要为磨料磨损和粘着磨损,随着 TiB₂ 颗粒添加量的增加,粘着磨损现象减

弱。而在 TiB₂ 颗粒质量分数为 15%和 20%时,涂层的磨损形貌主要为划痕和麻坑,因此此时的磨损类型主要为磨料磨损和接触疲劳。随着 TiB₂ 颗粒添加量的增加,复合涂层的合金含量降低,硬质相与涂层间的结合减弱,导致摩擦磨损实验过程中涂层表面的硬质相发生脱落,在表面形成麻坑。TiB₂ 颗粒的硬度较高,具有较好的抗粘着磨损性,因此加入 TiB₂ 颗粒能有效地改善摩擦磨损时的切削机制,从而提高涂层的耐磨性能。

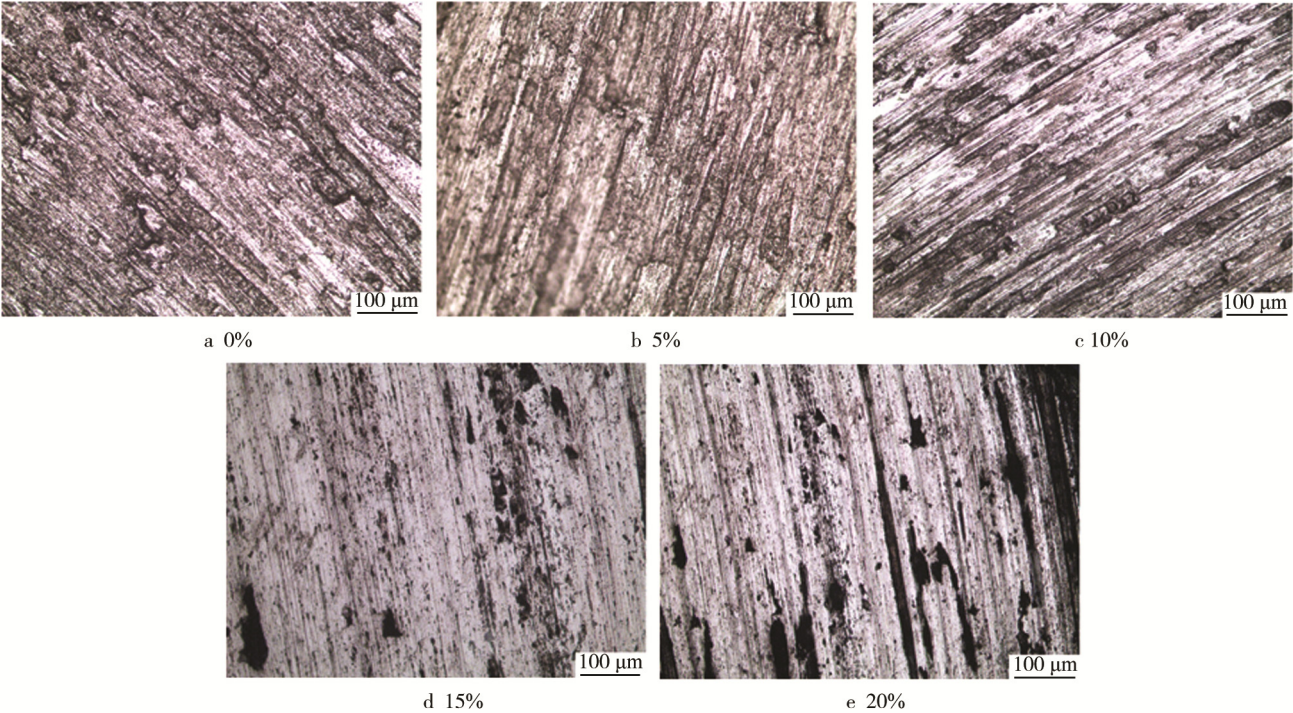


图 8 不同 TiB₂ 含量时涂层的磨损形貌
Fig.8 Wear morphology of coatings with different TiB₂ content

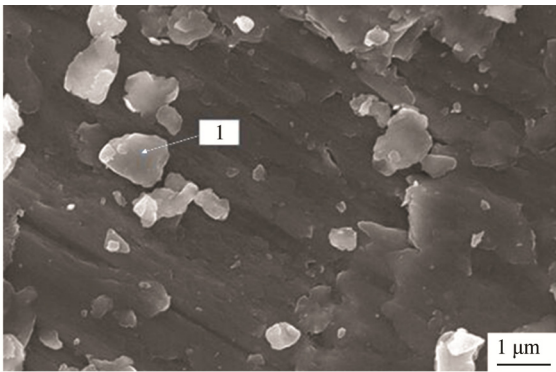


图 9 Ni+5%TiB₂ 合金涂层磨损形貌 SEM 照片
Fig.9 SEM image of worn morphology of Ni+5%TiB₂ alloy coating

表 3 Ni+5%TiB₂ 合金涂层磨损后 EDS 点扫描结果
Tab.3 EDS spot scanning results of worn morphology of Ni+5%TiB₂ alloy coating

Elements	C	O	Cr	Fe	Ni	Total
wt%	1.55	0.34	1.45	96.25	0.41	100.00

3 结论

利用高频感应熔覆技术,可以在 35CrMo 钢表面制备出性能良好的 Ni 基涂层,且 Ni 基感应熔覆涂层主要由 γ-Ni、Ni₂B、CrB、Cr₂₃C₆ 等构成。

添加 TiB₂ 颗粒的 Ni 基涂层,其 TiB₂ 颗粒在熔覆过程中并未发生分解,但发生团聚现象。熔覆过程中,熔覆层和基体间发生元素的扩散现象,主要扩散元素为 Fe、Ni 两种元素。

Ni 基感应熔覆涂层的硬度较高,耐磨损性能良好。在一定范围内,涂层的硬度以及耐磨性能随着 TiB₂ 颗粒添加量的增加而提高。TiB₂ 颗粒质量分数为 15%时,其性能最为优异,相比未添加 TiB₂ 颗粒的涂层,添加质量分数 15%TiB₂ 颗粒的涂层硬度提高了 15.88%,摩擦系数降低了 16.50%,磨损量减少了 43.15%。

参考文献:

- [1] KERMANI M B, MORSHED A B. Carbon Dioxide Corrosion in Oil and Gas Production—A Compendium [J]. Corrosion, 2003, 59(8): 659-683.
- [2] 马卫国, 杨新冰, 张利华, 等. 抽油杆管偏磨成因及解决措施研究综述[J]. 石油矿场机械, 2009, 38(2): 22-26.
MA Wei-guo, YANG Xin-bing, ZHANG Li-hua, et al. Research Summary of Cause and Solution for Sucker Rod and Tubing Side Wear[J]. Oil Field Equipment, 2009, 38(2): 22-26.
- [3] 王早祥, 隋允康, 张金中. 抽油杆和抽油管材料在油田污水介质中的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2004, 24(5): 467-469.
WANG Han-xiang, SUI Yun-kang, ZHANG Jin-zhong. Friction and Wear Behaviors of Sucker Rod and Tubing String in the Presence of Oil-field Wastewater as the Lubricating Medium[J]. Tribology, 2004, 24(5): 467-469.
- [4] 颜廷俊, 王奎升, 张金中, 等. 高含水原油对油管和抽油杆摩擦磨损性能的影响研究[J]. 摩擦学学报, 2004, 24(2): 177-180.
YAN Ting-jun, WANG Kui-sheng, ZHANG Jin-zhong, et al. Friction and Wear Behavior of Sucker Rod and Tubing String Lubricated with Oil-well Output Liquid of Different Water Contents[J]. Tribology, 2004, 24(2): 177-180.
- [5] 许新军, 丁浩, 朱世根. WC 增强镍基合金高频感应熔覆层的研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(12): 146-148.
XU Xin-jun, DING Hao, ZHU Shi-gen. Study on WC Reinforced Ni-based Coating Prepared by High Frequency Induction Heating Sintering[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(12): 146-148.
- [6] 王振廷, 周晓辉. 氩弧熔覆原位自生 TiC-TiB₂/Fe 复合涂层组织与磨损性能的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(1): 155-158.
WANG Zhen-ting, ZHOU Xiao-hui. Microstructure and Properties of TiC-TiB₂/Fe Composite Coating by Argon Arc Cladding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(1): 155-158.
- [7] 卢金斌, 王志新, 席艳君. Q235 钢等离子熔覆添加碳化钨铁基合金涂层的研究[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(4): 142-145.
LU Jin-bin, WANG Zhi-xin, XI Yan-jun. Study on NiCrBSi Steel/WC Composite Coating Prepared by Plasma Cladding on Q235 Steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2009, 30(4): 142-145.
- [8] XU M, ZHU S, DING H. Electrical Contact Strengthening of Induction-clad Ni-40%WC Composite Coatings on 40Cr Substrates[J]. Surface and Coating Technology, 2015, 279: 32-38.
- [9] 贺定勇, 许静, 马然, 等. 高频感应熔覆 WC 增强 Ni60 合金涂层性能研究[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(3): 138-141.
HE Ding-yong, XU Jing, MA Ran, et al. Properties of WC Reinforced Ni60 Coating Prepared by High Frequency Induction Cladding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008, 29(3): 138-141.
- [10] 钟娜. 磨耐蚀熔覆层的制备与组织性能研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2010.
ZHONG Na. Study on Microstructure and Properties of Anticorrosion and Antiwear Coatings Manufactured by High Frequency Induction Cladding onto Surface of Sucker Rod[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2010.
- [11] 黄本生, 陈鹏, 尹文锋, 等. TiN 含量对 Ni 基感应熔覆涂层组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(7): 38-42.
HUANG Ben-sheng, CHEN Peng, YIN Wen-feng, et al. Influence of TiN Content on Microstructure and Properties of Ni Based Induction Cladding Coating[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(7): 38-42.
- [12] 魏鑫. 45 钢表面感应熔覆 Ni60 涂层及 WC-Ni60 复合涂层的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
WEI Xin. Study on the Complex Coating of Ni60 and WC-60 on the 45 Steel Surface by Induction Cladding [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [13] WEI X, WANG G Q, CHANG Y F, et al. Study on WC-Ni60 Complex Coating by High Frequency Induction Cladding[J]. Materials Science Forum, 2011, 675: 1299-1302.
- [14] 慈文亮, 林晨, 陶洪伟. 碳化钨含量对高频感应熔覆涂层组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2014, 39(1): 95-98.
CI Wen-liang, LIN Chen, TAO Hong-wei. Effects of WC Content on Microstructure and Properties of High-frequency Induction Cladding Coating[J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(1): 95-98.
- [15] 崔洋. 超声辅助高频感应熔敷金属镍复合涂层的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
CUI Yang. Study on Ultrasonic Assisted High-frequency Induction Cladding of Nickel Composite[J]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [16] 龚佑品, 鲁玮瑗, 袁晓敏. 激光熔覆 TiB₂ 增强 Co 基合金涂层的组织与性能[J]. 激光技术, 2008(2): 122-124.
GONG You-pin, LU Wei-yuan, YUAN Xiao-min. Microstructure and Properties of TiB₂ Reinforced Co-based Alloy Coating by Laser Cladding[J]. Laser Technology, 2008(2): 122-124.
- [17] CHOI H, YOON B, KIM H, et al. Isothermal Oxidation of Air Plasma Spray NiCrAlY Bond Coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2002, 150(2): 297-308.
- [18] 李岩. 纯铜表面激光熔覆 TiB₂/Cu 涂层的工艺及摩擦磨损性能研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2012.
LI Yan. Technology and Friction-wear Behavior of Laser Clad Cu-TiB₂ Coating on Pure Copper[D]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metal,

- 2012.
- [19] 程汉池, 栗卓新, 崔丽. TiB_2 涂层制备及其性能的研究进展[J]. 航空制造技术, 2005(8): 78-81,87.
CHENG Han-chi, LI Zhuo-xin, CUI Li. Research Progress of Preparation and Properties of TiB_2 Coating[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005 (8): 78-81,87.
- [20] 张增志, 韩桂泉. 高中频感应熔涂 Ni60 涂层组织分析[J]. 材料工程, 2003(4): 3-5.
ZHANG Zeng-zhi, HAN Gui-quan. Analysis on Microstructure of Ni60 Coating by High and Medium Frequency Induction Cladding[J]. Journal of Material Engineering, 2003(4): 3-5.
- [21] LIU J, HAO H, GUO Z. Interface Morphology of Iron-base Self-fusing Alloy Coating with Induction-refusing[J]. Thermal Spraying-current Status and Future Trends, 1995, 1: 537-541.
- [22] CHANG J H, LIU T H, CHOU J M, et al. Microstructural and Micro Hardness Characteristics of Induction Melted Nickel-based Alloys[J]. Materials Chemistry and Physics, 2010, 120(2): 702-708.
- [23] YANG Hui-long, SUN Yu-fu. Microstructure and Properties of Fe-based Coating on Column Surface Formed by High Frequency Induction Cladding[J]. Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology, 2012(2): 40-43.
- [24] 高原, 王成磊, 黄家强, 等. 高频感应熔覆 Ni60 合金组织及耐磨性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(2): 309-312.
GAO Yuan, WANG Cheng-lei, HUANG Jia-qiang, et al. Microstructure and Wear Resistance of Ni60 Layer Prepared by High-frequency Induction Cladding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(2): 309-312.