

热处理对中频感应重熔 NiCrBSi 涂层抽油光杆性能的影响 *

田 斌¹, 王成彪¹, 胡 斌², 岳 文¹, 刘家浚³

(1. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083; 2. 山西太钢不锈钢股份有限公司, 太原 030003; 3. 清华大学 机械工程系, 北京 100084)

摘 要: 采用火焰热喷涂-中频感应重熔技术在 20CrMo 抽油光杆基体表面制备 NiCrBSi 涂层并进行热处理, 采用扫描电镜、显微硬度计、X 射线应力测试仪、万能试验机和疲劳试验机等仪器, 研究了热处理工艺对涂层光杆组织、硬度、表面应力、力学性能和疲劳性能等方面的影响。结果表明, 中频感应重熔 NiCrBSi 涂层的制备和热处理对光杆基体表层组织、硬度和表面应力影响较大, 热处理温度对涂层的硬度影响不显著; 涂层制备和热处理会显著降低杆体的疲劳性能, 重熔处理工艺的抗拉强度最大但塑性指标很差, 并在疲劳试验中出现典型脆性断口, 高温热处理工艺可以使涂层光杆获得较好的拉伸力学性能; 普通 20CrMo 抽油光杆以磨损、腐蚀和疲劳断裂为主要失效原因, 而 NiCrBSi 涂层/20CrMo 光杆疲劳性能的显著降低可能成为其失效的主要原因。

关键词: 中频感应重熔; NiCrBSi 涂层; 热处理; 拉伸力学性能; 疲劳性能

中图分类号: TG174.44

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2011)06-0035-06

Influence of Heat Treatment on Properties of NiCrBSi Coatings on Polished Rods Prepared by Medium Frequency Induction Remelting

TIAN Bin¹, WANG Cheng-biao¹, HU Bin², YUE Wen¹, LIU Jia-jun³

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083; 2. Shanxi Taigang Stainless Steel Co., Ltd., Taiyuan 030003; 3. Mechanical Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: NiCrBSi coatings were prepared on the 20CrMo polished rods by flame spraying and medium frequency induction remelting. And then treatment was carried out on the samples. The influence of heat treatment on properties of NiCrBSi coatings on polished rods, including metallographic structures, hardness, surface residual stress, tensile properties and fatigue properties, was studied by SEM, micro-hardness tester, X ray residual stress tester, universal experimental machine and fatigue testing machine. The results show that the coating preparation and heat treatment affect the metallographic structures of near-surface of the substrate obviously. The influence of heat treatment on coating hardness is slight. The coating preparation and heat treatment sharply reduces the fatigue cycle numbers of the 20CrMo polished rods. The remelted rods without other heat treatment show the best tensile strength, the worst plastic strength, and brittle fatigue fracture. Heat treatment of high temperature can get better tensile properties and normal fracture appearance. The wear, corrosion and fatigue fracture are the main failure modes of the 20CrMo polished rods. Worse fatigue properties of NiCrBSi coating may be the main failure reason of the NiCrBSi coating/20CrMo polished rods.

Key words: medium frequency induction remelting; NiCrBSi coatings; heat treatment; tensile properties; fatigue properties

0 引 言

镍基合金具有优异的耐磨耐蚀性能, 已被广泛应用于机械、采矿和油田等领域。油田抽油机所用的抽油光杆是一个影响抽油机效率的关键

部件, 特别是近年来国内各大油田目前大都已经进入高含水期, 油井产出液腐蚀性和含砂量日渐增强, 普通抽油光杆等零部件已经难以适应油田现场的要求, 因此解决其磨损和腐蚀问题非常迫切^[1-2], 在抽油杆光杆表面制备 NiCrBSi 喷焊涂层已经被国内外石油行业广泛接受和认可^[3-5]。目前研究人员对镍基合金涂层进行了大量的研究并获得了丰富的成果, 主要体现在以下几个方

收稿日期: 2011-09-21; **修回日期:** 2011-10-28

基金项目: * 中央高校基本业务费自由探索项目(2010ZY51, 2011YXL020); 国际合作重点项目(2010DFR50070)

作者简介: 田 斌(1981—), 男(汉), 山西榆社人, 博士生。

面:镍基涂层的磨损和腐蚀性能^[6-8]、不同制备方法涂层性能的研究^[9-13]以及涂层对抽油杆基材和涂层试样疲劳性能的影响等^[14-16]。

对于抽油光杆来说,由于需要长时间承受拉伸和弯曲等交变载荷,其综合性能,特别是力学性能和疲劳性能非常重要,NiCrBSi 涂层制备后对杆体的影响也很关键。然而由于现有行业标准中对涂层光杆拉伸力学性能和疲劳性能的测试方法没有明确规定,采用小尺寸标准试样制备涂层后的研究结果对实际涂层光杆的借鉴意义局限较多,而抽油光杆的实物直径较大,要进行 1:1 的实物实验难度很大。因此,到目前为止针对实际抽油光杆制备镍基合金涂层后的拉伸力学和疲劳性能的试验研究还很少。文中以 20CrMo 抽油光杆实物为研究对象,采用工业化成熟度很高的火焰热喷涂-中频感应重熔技术在光杆基体表面制备 NiCrBSi 涂层,并比较系统地研究了热处理工艺对涂层光杆组织、硬度、表面应力、力学性能和疲劳性能等方面的影响。

1 试 验

1.1 试验材料

抽油光杆基材选用油田常用的 20CrMo,具体成分及含量如表 1 所示。NiCrBSi 粉末成分及含量如表 2 所示。粉末粒度为 47~80 μm。

表 1 20CrMo 的组成(质量分数/%)
Table 1 Composition of 20CrMo (w/%)

元素	C	Si	Mn
质量分数	0.17~0.24	0.17~0.37	0.40~0.70
元素	Cr	Ni	Mo
质量分数	0.80~1.10	≤0.3	0.15~0.25
元素	Cu	P	S
质量分数	≤0.20	≤0.025	≤0.025

表 2 NiCrBSi 粉末的组成(质量分数/%)
Table 2 Composition of NiCrBSi power (w/%)

元素	C	Si	Cr
质量分数	<0.30	2.00~3.00	5.00~8.00
元素	B	Fe	Ni
质量分数	1.50~2.50	<5	余量

1.2 试验方法

光杆试样直径 28.6 mm,经调质处理,切割

为 0.5 m 长的短杆。首先采用 248 μm(60 目)砂带对光杆基材进行净化和粗化处理,完全去除其表面氧化斑后,采用氧-乙炔喷枪,将 NiCrBSi 粉末喷涂到预热至 150~180 ℃的光杆基材上,然后采用中频感应设备进行重熔和热处理,最后采用 80 μm 砂带进行磨抛处理,得到厚度为 0.20 mm、粗糙度 Ra 为 0.8 μm 的试样。

喷涂工艺参数:氧气压力 0.8~1.0 MPa,乙炔压力 0.08~0.11 MPa,喷枪和光杆间距 100~150 mm,杆体移动速度 18~20 mm/s,杆体转速 1.5 r/min。中频感应设备功率为 160 kW,电流频率 5 kHz,感应线圈为单匝,直径 40 mm,线圈铜管直径 12 mm。热处理工艺试验的样品包括基体、重熔处理(960~980 ℃加热并立即从宽度为 20 mm 的连续喷水线圈中间通过以防止涂层出现熔流)、重熔后低温热处理(200~300 ℃)和高温热处理(500~600 ℃)等,最后得到的试样分别记作 M(基体)、B(重熔处理)、D(重熔后低温热处理)和 G(重熔后高温热处理)。

1.3 测试仪器

采用 JSM-6460LV 型扫描电子显微镜及其自带能谱仪观察分析涂层截面形貌和元素分布;采用 MH-6 型显微硬度计和自带光学显微镜分别对基体和涂层的硬度以及基体组织进行测定和观察,硬度测定加载载荷为 2 N;采用日本理学电机产 MSF-2M 型 X 射线应力测试仪在试样表面上任选三个点采用等倾法进行表面残余应力测试,其管电压为 30 kV,管电流 10 mA,铬靶 K_α特征辐射,辐射面积 4 mm×4 mm,无滤波片,设备测量误差为±20 MPa;采用 WE(W)-1000 型液压万能试验机在室温条件下对试样进行拉伸力学性能测试;采用 MTS 810.15 型疲劳试验机在室温条件下对试样的拉-拉疲劳性能进行测试,加载频率 4 Hz,正弦波,载荷比 R=0.1,试验应力 700 MPa,并采用光学相机记录疲劳试样断口的宏观形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 涂层形貌和基体组织

图 1(a)(b)为涂层光杆 B 试样在不同放大倍数下的截面形貌,可见该 NiCrBSi 涂层厚度约 200 μm,涂层表面孔洞较少,涂层与基体界面处结合良好,有约 1 μm 厚的白色过渡层。能谱仪

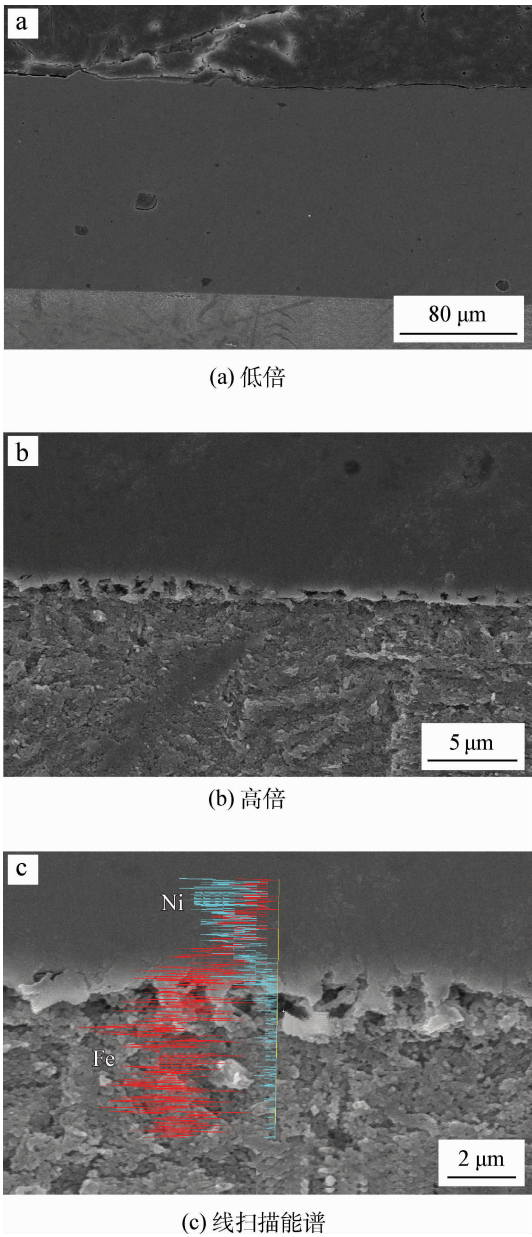


图 1 光杆 B 试样的截面 SEM 形貌和线扫描能谱图
Fig. 1 SEM images and line scanning energy spectrum of cross section of polished rod B sample

分析表明(见图 1(c)),该过渡层内有 Ni 和 Fe 元素的相互扩散。涂层光杆经过热处理工艺处理后涂层形貌无明显变化,这主要是由于 NiCrBSi 合金涂层为高热稳定性涂层,试验中的热处理温度相对较低,不会对其产生明显影响。

对光杆基体截面的心部、中部(1/2 半径处)和边部 3 个部位的金相组织进行了分析,如表 3 所示。可见,基材试样 M 的组织比较均匀。涂层光杆基体组织受影响部位主要在边部和中部,心部基本没有变化。试样的边部和中部组织变化与热处理对应关系良好,试样 B 出现了马氏体组织,试样 D 转变为回火马氏体,试样 G 对应部位的组织转变为回火索氏体,组织与基体 M 基本一致。

基体组织的变化规律与中频感应加热处理工艺有关,由于中频感应加热的集肤效应,其有效加热深度在 8 mm 左右,主要集中在光杆近表层和中部,心部基本不受影响,因此在热处理过程中只有光杆基材的边部和中部发生了较为明显的淬火和回火过程。

2.2 硬度

图 2 为不同热处理工艺条件下光杆试样的截面硬度。图中点 1、2 和 3 分别代表杆体的心部、中部和边部 3 个部位,点 4、5 和 6 分别代表从基体附近区域涂层到涂层外表面大致等分的 3 个部位。

可见,不同热处理过程对基体的影响主要集中在中部和边部,尤其以边部最为显著,其中 B 试样的边部硬度达到 451 HV_{0.2},低温热处理后试样 D 的边部硬度显著降低,而高温热处理后试样 G 的边部硬度降低到了基体的水平。低温热处理对重熔后的涂层硬度影响较小,高温热处理使涂层硬度小幅提高,幅度在 60 HV_{0.2} 左右。

表 3 试样不同部位金相组织对比

Table 3 Metallography comparison of different parts of samples

试样	心部	中部	边部
M(基体)	屈氏体+铁素体+索氏体	索氏体+少量屈氏体+铁素体	索氏体+少量屈氏体
B(重熔处理)	索氏体+铁素体+屈氏体	马氏体+屈氏体+少量火索氏体+铁素体	马氏体+少量屈氏体
D(重熔后低温热处理)	屈氏体+铁素体+索氏体	回火马氏体+屈氏体+少量索氏体+铁素体	回火马氏体+少量屈氏体
G(重熔后高温热处理)	索氏体+铁素体+屈氏体	回火索氏体+屈氏体+铁素体	回火索氏体+少量屈氏体

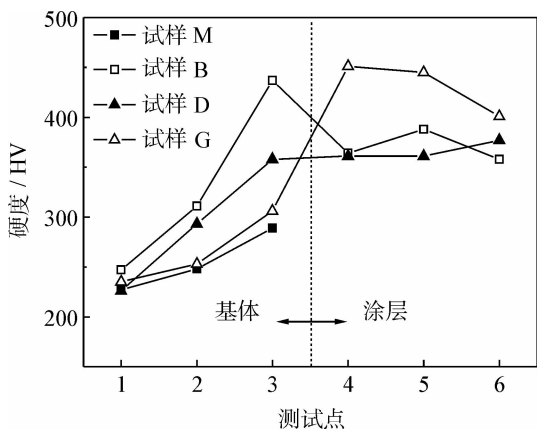


图 2 不同热处理工艺试样的截面硬度

Fig. 2 Hardness of cross section of samples after different heat treatment

2.3 表面残余应力

图 3 为不同热处理工艺试样的表面应力。试样的加工和涂层的制备过程使光杆表面产生了不同程度的压应力, 试样 B 和 D 的压应力最大, 试样 M 作为基材压应力最小, 而经过高温热处理的试样 G 与基体表面的压应力接近。这表明涂层重熔热处理过程有利于压应力的产生, 低温热处理可以进一步提高压应力, 而高温热处理则使表面压应力得到大幅释放。

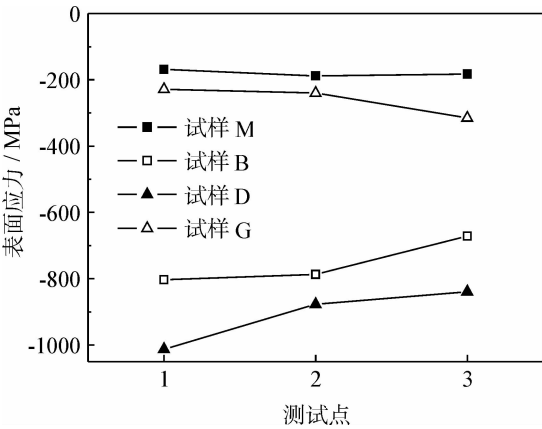


图 3 不同热处理工艺试样的表面应力

Fig. 3 Surface stress of samples after different heat treatment

2.4 拉伸性能

表 4 比较了不同热处理工艺下试样的拉伸力学性能。制备涂层后光杆试样 B 的抗拉强度得到显著提高, 但延伸率和断面收缩率显著降低, 出现脆断的现象。经过热处理后, 随热处理温度的提高, 涂层光杆试样的抗拉强度逐渐下降, 延伸率和

断面收缩率相应不断上升, 其中试样 G 的拉伸力学性能指标已经可以达到 SY/T 5029-2006 中对普通 H 级钢制抽油光杆塑性的要求 (延伸率 $\geq 10\%$, 断面收缩率 $\geq 45\%$)。

表 4 不同热处理工艺试样的拉伸力学性能

Table 4 Tensile properties of samples after different heat treatment

试样	抗拉强度/ MPa	延伸率(200 mm 标距)/%	断面收缩率/ %
M	930	12.0	61.5
B	1 305	6.9	20.3
D	1 136	10.2	50.0
G	1 057	10.8	56.0

2.5 疲劳性能

由于大直径实物的疲劳试验所需时间太长, 费用太高, 为了较好较快的比较出不同热处理工艺试样的疲劳性能, 文中采用了远远高于实际应用中疲劳应力水平的苛刻条件, 来加速其疲劳断裂。最终在 700 MPa 的高应力水平下对 3-5 根试样进行实物拉-拉疲劳试验 (数据分散较大者采用 5 根试样), 得到不同试样的断裂周次并取平均值, 对其疲劳性能加以评价。图 4 为不同热处理工艺试样的疲劳性能对比。结果发现, 与 20CrMo 光杆基体相比, 涂层制备后光杆试样的疲劳性能显著下降, 试样 B、D 和 G 的下降幅度分别达 9.1%、25.9% 和 26.2%, 其中热处理后疲劳断裂循环周数进一步显著降低, 而试样 D 和 G 的疲劳断裂循环周数接近, 说明热处理温度对该应力水平下的疲劳性能影响不显著。

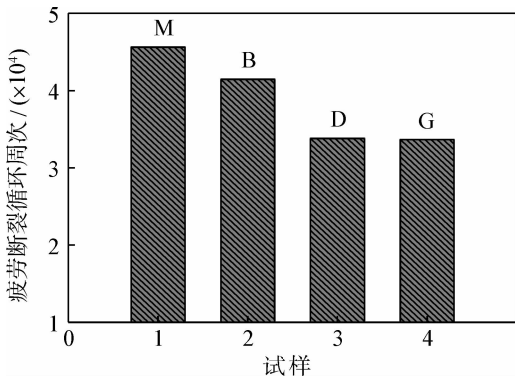


图 4 不同热处理工艺试样的疲劳性能对比

Fig. 4 Fatigue property compration of samples after different heat treatment

由以上试验结果可知,火焰热喷涂-表面感应加热重熔可以得到质量较好的 NiCrBSi 涂层,与 20CrMo 光杆基体能形成良好的扩散结合。镍基涂层可以使表面硬度显著提高,较好地改善了光杆的耐磨性能,加上镍基合金自身优异的耐蚀性能,可以有效地解决普通光杆的磨损和腐蚀问题。但涂层制备后 20CrMo 光杆试样的疲劳寿命出现显著下降,这与涂层自身较高的硬度、较差的韧性以及热处理对基体边部组织的影响有关。以试样 B 为例,虽然表面较高的压应力有利于抵制疲劳源的快速出现,但由于其表面硬度相对较高,基体边部组织同样以硬度较高的马氏体组织为主,因此其涂层表面的韧性较差。当 B 的涂层表面产生裂纹形成疲劳源后会直接向基体内部扩展,在进入基体表层的马氏体组织区域后扩展加速,因此裂纹在表层更容易发展,易于出现多处疲劳源而基本没有主疲劳源的现象,并最

终在基体边缘层出现整周的均匀扩展,使得横截面面积迅速变小,最终在拉应力作用下发生断裂。而 D 的表面压应力显著高于 G,但其边部组织也以硬度相对较高的回火马氏体为主,两个因素相互抵消,因此其疲劳断裂循环周次与 G 接近。

同样,不同热处理工艺下的疲劳性能也可以在疲劳断口的形貌上得到一定的验证。图 5 为不同热处理工艺试样疲劳断口宏观形貌。由图可见,基材 M 呈现典型的疲劳源-扩展区-瞬断区的断口形貌。涂层重熔试样 B 断口的扩展区非常小,呈现薄皮状,而断口整体呈非常平坦的脆断形貌,可见疲劳裂纹很容易扩展,基体边部基本没有对裂纹扩展形成有效的抑制。进行热处理后的 D 和 G 试样的断口形貌再次恢复到基材状态,与其韧性比 B 边部组织显著改善有关。其中低温热处理和高温热处理对断口形貌的影响区别不大。

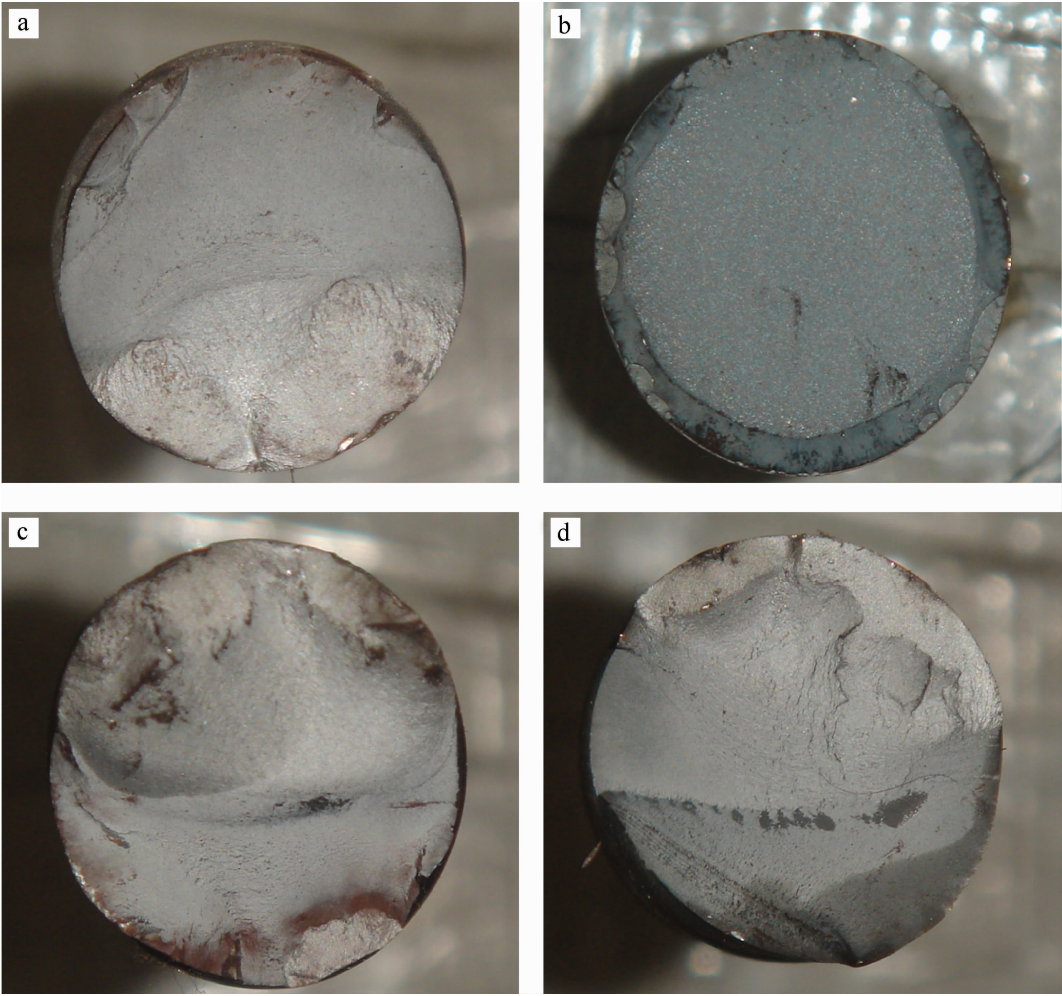


图 5 不同热处理工艺试样疲劳断口宏观形貌 (a) 试样 M (b) 试样 B (c) 试样 D (d) 试样 G

Fig. 5 Macro images of the fatigue fracture of samples after different heat treatment (a) M (b) B (c) D (d) G

结合 20CrMo 抽油光杆的实际情况, NiCrBSi 合金涂层会使光杆在大气环境中的疲劳性能明显下降, 因此涂层处理后的杆体试样失效的主要原因会从原来无涂层试样的磨损腐蚀失效转变为疲劳断裂失效, 在实际使用中存在较大的风险。综合镍基合金涂层的优异耐磨耐蚀性能、力学性能和疲劳性能等指标, 为保证油井长期稳定正常生产, 在实际应用中建议采用涂层重熔后高温热处理工艺。

3 结 论

(1) NiCrBSi 涂层的中频感应加热重熔和热处理工艺对 20CrMo 抽油光杆基体表层组织、硬度和表面压应力影响较大, NiCrBSi 涂层形貌和硬度受热处理的影响不大。

(2) NiCrBSi 涂层会显著降低 20CrMo 光杆的疲劳性能, 热处理会进一步降低涂层光杆的疲劳性能, 这与涂层自身的硬度和韧性、表面压应力状态及光杆基体边部组织的变化有关。

(3) 重熔无热处理工艺的抗拉强度最大但塑性指标很差, 疲劳断口为脆断, 在实际生产中应避免采用该工艺。热处理可以显著改善涂层光杆的拉伸力学性能, 提高热处理温度可以获得更加优异的拉伸力学性能, 同时其疲劳断口的形态也更接近基体, 在实际应用中建议采用重熔后高温热处理工艺。

(4) 普通 20CrMo 抽油光杆以磨损、腐蚀和疲劳断裂作为失效的主要原因, 而涂层光杆的疲劳性能显著降低, 将使疲劳断裂成为 NiCrBSi 涂层/20CrMo 抽油光杆失效的主要原因。

参考文献

- [1] Liu Xinfu, Qi Yaoguang. A modern approach to the selection of sucker rod pumping systems in CBM wells [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011, 76: 100-108.
- [2] 吴则中, 李景文, 赵学胜, 等. 抽油杆 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- [3] 黄金德. 镍基自熔合金在光杆喷焊工艺上的应用 [J]. 石油矿场机械, 1986, 12(2): 55-57.
- [4] SY/T5029-2006, 抽油杆 [S].
- [5] API Spec 11B-2010, Specification for sucker rods,

polished rods and liners, couplings, sinker bars, polished rod clamps, stuffing boxes, and pumping tees [S].

- [6] 王宝阳, 王引真, 程国东, 等. 感应熔覆 Ni 基合金/碳化物熔覆层的组织与冲蚀磨损性能 [J]. 中国表面工程, 2009, 22(1): 42-45.
- [7] González R, Cadenas M, Fernández R, et al. Wear behaviour of flame sprayed NiCrBSi coating remelted by flame or by laser [J]. Wear, 2007, 262(3/4): 301-307.
- [8] 张春成. 抽油光杆激光表面耐磨损与防腐蚀性能研究 [D]. 硕士学位论文, 大庆石油学院, 2010.
- [9] 陈华辉, 徐彩云, 王振廷, 等. WC 颗粒增强 Ni 基合金复合涂层的热处理组织变化 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 64-68, 73.
- [10] 吕耀辉, 徐滨士, 向永华, 等. 灰口铸铁镍基等离子熔覆层组织和性能 [J]. 中国表面工程, 2009, 22(1): 46-48, 55.
- [11] 胡春莲, 侯尚林, 张富邦, 等. 熔焊工艺对自熔合金涂层组织的影响 [J]. 兰州理工大学学报, 2005, 31(4): 15-18.
- [12] Miguel J M, Guilemany J M, Vizcaino S. Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes [J]. Tribology International, 2003, 36: 181-187.
- [13] Nicolas Serres, Francoise Hlawka, Sophie Costil, et al. An investigation of the mechanical properties and wear resistance of NiCrBSi coatings carried out by in situ laser remelting [J]. Wear, 2011, 270: 640-649.
- [14] 周鹤法, 张晓东, 张强. D 级抽油杆用 20CrMo 钢疲劳试验 [J]. 石油机械, 1996, 24(4): 27-29, 39.
- [15] 林晨. 热处理对镍基合金碳化钨硬面涂层疲劳强度的影响 [J]. 金属热处理, 2006, 31(2): 37-40.
- [16] Jeongseok Oh, Jun Komotori, Jungil Song. Fatigue strength and fracture mechanism of different post-fused thermal spray-coated steels with a Co-based self-fluxing alloy coating [J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30: 1441-1447.

作者地址: 北京市海淀区学院路 29 号 100083
中国地质大学(北京)工程技术学院 2011 博士班
Tel: (010) 8233 4211
E-mail: paper-tianbin@163.com