

32Cr2Mo2NiVNb 钢盐浴氮化工艺

高志恒¹, 付扬帆²

(1. 海装重庆军代局, 重庆 400042; 2. 西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: 目的 将盐浴氮化工艺用于 32Cr2Mo2NiVNb 钢的表面处理。方法 采用盐浴氮化工艺处理 32Cr2Mo2NiVNb 钢, 通过对金相组织、力学性能、断口形貌、耐蚀性能、高温耐磨性能等的测试分析, 研究该工艺对 32Cr2Mo2NiVNb 钢组织和性能的影响, 验证该工艺对 32Cr2Mo2NiVNb 钢的适用性。结果 32Cr2Mo2NiVNb 钢盐浴氮化后, 基体组织为均匀的细针状索氏体+少量游离铁素体, 渗氮层深度约为 0.23 mm, 化合物层深度均匀, 约为 17 μm , 渗氮层疏松度、氮化物、脆性评级均达到 1 级; 表面硬度为 1011HV0.3, 较氮化前提高 153.4%; 抗拉强度、拉伸断口形貌均无明显变化, 断后伸长率、断面收缩率、冲击吸收能量仅小幅降低; 耐中性盐雾时间为镀硬铬试样的 6.3 倍; 经 190 s 高温磨损的表面磨痕细小均匀, 磨损失重较镀硬铬试样降低 62.8%。结论 盐浴氮化工艺不损害 32Cr2Mo2NiVNb 钢组织、强度等, 仅使塑性、韧性指标小幅降低, 相较于镀硬铬工艺, 可显著提高 32Cr2Mo2NiVNb 钢的耐蚀性、高温耐磨性, 对 32Cr2Mo2NiVNb 钢的工艺适用性良好。

关键词: 32Cr2Mo2NiVNb 钢; 盐浴氮化; 金相组织; 力学性能; 耐蚀性; 高温耐磨性

中图分类号: TG174.445 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)10-0068-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.10.012

Salt-bath Nitriding Process for 32Cr2Mo2NiVNb Steel

GAO Zhi-heng¹, FU Yang-fan²

(1. Representative Bureau of Naval Equipment Department in Chongqing, Chongqing 400042, China;

2. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: **Objective** To develop a new salt-bath nitriding process for 32Cr2Mo2NiVNb steel surface treatment. **Methods** The 32Cr2Mo2NiVNb steel was treated with the new salt-bath nitriding process. The influences of the new salt-bath nitriding process on the microstructure and mechanical properties of 32Cr2Mo2NiVNb steel were concluded based on the analysis of several tests such as salt spray test and hardness test. The applicability of the salt-bath nitriding process for 32Cr2Mo2NiVNb steel was verified in this paper. **Results** After the salt-bath nitriding process, the 32Cr2Mo2NiVNb base material was composed of uniform fine needle-like sorbite + small amount of free ferrite, the depth of the nitriding layer was about 0.23 mm, and the compound layer showed an even thickness of about 17 μm . The level of the brittleness, nervation and wave-like nitrid, porosity of nitrided case all reached grade I. The hardness of 32Cr2Mo2NiVNb steel surface after salt-bath nitriding treatment was 1011HV0.3, which was 250% of the surface

收稿日期: 2015-08-25; 修订日期: 2015-09-15

Received: 2015-08-25; Revised: 2015-09-15

作者简介: 高志恒(1961—), 男, 山东人, 高级工程师, 主要研究方向为武器装备管理。

Biography: GAO Zhi-heng(1961—), Male, from Shandong, Senior engineer, Research focus: naval equipment management.

通讯作者: 付扬帆(1987—), 男, 重庆人, 工程师, 主要研究方向为金属材料及其表面处理技术。

Corresponding author: FU Yang-fan(1987—), Male, from Chongqing, Engineer, Research focus: metal materials, surface treatment of metal materials.

hardness without salt-bath nitriding treatment. The tensile strength and the fracture morphology showed no significant change after salt-bath nitriding treatment. The tensile length after fracture, the reduction of cross-section area and impact absorption energy were slightly decreased. The time of resistance to neutral salt spray was 6.3 fold as high as that of the sample coated with hard chromium. The surface wear scars after wear at high temperature for 190 s were fine and uniform, and the wear weight loss was reduced by 62.8% as compared to the sample coated with hard chromium. **Conclusion** The salt-bath nitriding process did not damage the microstructure and mechanical properties of 32Cr2Mo2NiVNb steel, with only slight decreased in plasticity and toughness indexes, and could significantly improve the corrosion resistance and high-temperature wear resistance of 32Cr2Mo2NiVNb steel as compared to hard chromium plating. The new salt-bath nitriding process was well suitable for surface treatment of 32Cr2Mo2NiVNb steel.

KEY WORDS: 32Cr2Mo2NiVNb steel; salt-bath nitriding; microstructure; mechanical property; corrosion resistance; high-temperature wear resistance

Cr-Ni-Mo-V 系高强度合金结构钢因其良好的综合性能,被广泛应用于汽车、机械、船舶、兵器等行业。32Cr2Mo2NiVNb 钢是针对高温、磨损、腐蚀场合专门研制的钢种,为有效强化其表面,现主要采用镀铬工艺,但该工艺存在镀层与基体结合力差、高温磨损失效快、镀层耐蚀性差等缺点^[1-2]。盐浴氮化工艺采用低温熔融盐溶液,在稀土催渗条件下,使 N、C、RE 等元素快速高效地渗入金属表面而形成渗层,可在显著改善表面耐磨、耐蚀性的同时,避免镀铬带来的严重环境污染等问题,是一种理想的代铬工艺。近年来,随着盐浴氮化技术的发展,它在提高耐磨性方面与高频淬火、渗碳淬火、镀铬、离子渗氮等工艺相比存在的优势愈发明显,同时在提高耐蚀性方面也显示出替代黑化、磷化等工艺的巨大潜力^[3-15]。

1 试验

32Cr2Mo2NiVNb 钢的名义化学成分为 0.32C-2Cr-2Mo-1Ni-0.29(V+Nb)-Fe。冶炼工艺为:真空感应熔炼+电渣重熔。热处理工艺为:1050℃×75 min 正火+1040℃×75 min 淬火(油冷)+650℃×3 h 回火。金相组织为:均匀回火索氏体+少量游离铁素体。

试样先经除锈、丙酮超声清洗除油处理,再清水清洗并烘干,预热后直接放入盐浴炉。盐浴炉中添加固体稀土催渗剂。盐浴过程中控制 CNO⁻摩尔分数为 32%~38%,氮化温度为 580℃,氮化时间为 3 h。

采用 OLYMPUS-BX60M 型光学金相显微镜观察金相组织。采用 HVA-10A 型小负荷维氏硬度计测试渗氮层脆性,载荷为 98.07 N,加载时间为 7 s,保载时间为 10 s。采用 HM-MT1000 型显微维氏硬度计测试表面及截面显微硬度,载荷为 2.94 N,保载 15 s。采用 CSS44100 型电子万能试验机进行拉伸试验,拉伸速率为 5 mm/min。采用 JB30B 型冲击试验机进行冲

击试验,选用 2 mm 摆锤刀刃,试样开 U 型缺口。采用 Quanta 200 型环境扫描电子显微镜观察断面形貌。采用 MMS-1G 型高温高速销盘摩擦磨损试验机进行高温磨损试验,测试温度为 550℃,载荷为 100 N,线速度为 40 m/s。采用 KD-60 型盐雾试验机进行中性盐雾试验(NSS 试验),pH 值为 6.7~7.2,试验温度为 35℃。

2 结果与分析

2.1 金相组织

图 1 为经盐浴氮化工艺处理的 32Cr2Mo2NiVNb 钢金相组织。如图 1a 所示,基体组织仍为均匀的细

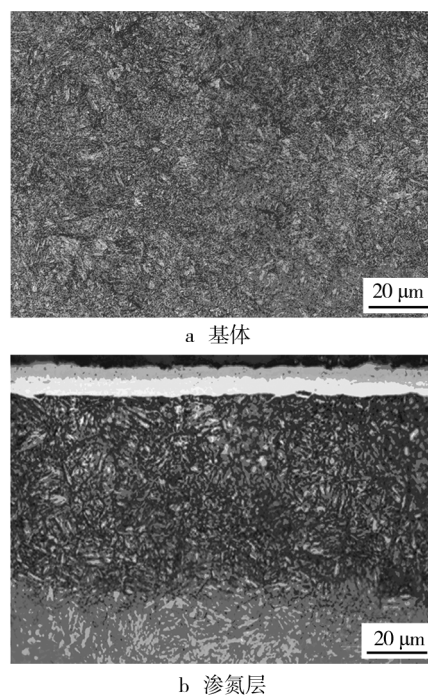


图 1 盐浴氮化 32Cr2Mo2NiVNb 钢金相组织

Fig. 1 Microstructure of 32Cr2Mo2NiVNb steel after salt-bath nitriding treatment

针状索氏体+少量游离铁素体,说明盐浴氮化过程未明显改变基体组织。如图1b所示,渗氮层主要由化合物层(白亮区域)和扩散层组成,化合物层深度均匀,约17 μm 。整个渗氮层致密性好,光镜500倍放大条件下无细点状微孔,对比GB/T 11354—2005《钢铁零件渗氮层深度测定和金相组织检验》中“渗氮层疏松级别图”,认定渗氮层疏松评级为1级。渗氮层中仅有极少量呈脉状分布的氮化物,对比GB/T 11354—2005中“渗氮层氮化物级别图”,认定氮化物评级为1级。

2.2 渗氮层脆性

依据GB/T 11354检测渗氮层的脆性,压痕如图2所示。由图2可见,在光镜100倍放大条件下,压痕边角完整无缺,符合GB/T 11354—2005“渗氮层脆性评级图”中的1级标准,认定渗氮层脆性评级为1级。

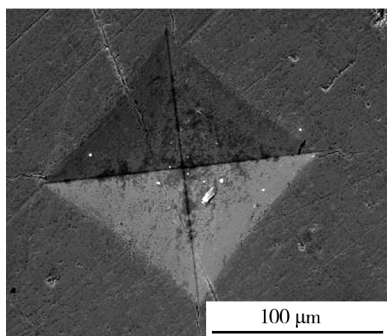


图2 维氏硬度压痕

Fig. 2 Vickers hardness indentation

2.3 显微硬度

表1为盐浴氮化前后的32Cr2Mo2NiVNb钢表面硬度测试结果。由表1可知,32Cr2Mo2NiVNb钢盐浴氮化前(回火态)表面硬度平均值为399HV0.3,经盐浴氮化后的表面硬度平均值达到1011HV0.3,提高了153.4%。分析认为,在渗氮过程中产生的晶格畸变、形成的高硬度合金氮化物、弥散氮化物阻碍滑移等因素的共同作用下,表面硬度得以显著提高。

表1 盐浴氮化前后的32Cr2Mo2NiVNb钢表面硬度

Tab. 1 Surface hardness of 32Cr2Mo2NiVNb steel before and after salt-bath nitriding treatment

| 试样 状态 | 维氏硬度(HV0.3) | | | | | 平均值 (HV0.3) |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 1 [#] | 2 [#] | 3 [#] | 4 [#] | 5 [#] | |
| 盐浴氮化前 | 403 | 403 | 399 | 389 | 401 | 399 |
| 盐浴氮化后 | 1006 | 1013 | 1014 | 1010 | 1013 | 1011 |

图3为盐浴氮化工艺处理前后的32Cr2Mo2NiVNb钢截面硬度分布。依据GB/T 11354—2005中“比基体维氏硬度值高50HV0.3处的垂直距离为渗氮层深度”的规定,认定渗氮层深度约为0.23 mm。以距离表层0.06 mm处(氮化后此处位于扩散层)为第一测试点,由图3可知,氮化后此处硬度仍超过900HV0.3,相较氮化前提高近500HV0.3。在距表层0.25 mm范围内,氮化后的硬度下降较快;距表层超过0.25 mm后,硬度梯度趋于平缓,硬度值逐渐与氮化前的基体硬度一致。显微硬度测试结果表明,盐浴氮化工艺表层强化效果明显,并且32Cr2Mo2NiVNb钢在580 $^{\circ}\text{C}$ 具有高的回火稳定性,盐浴氮化过程对钢基体硬度基本无影响。

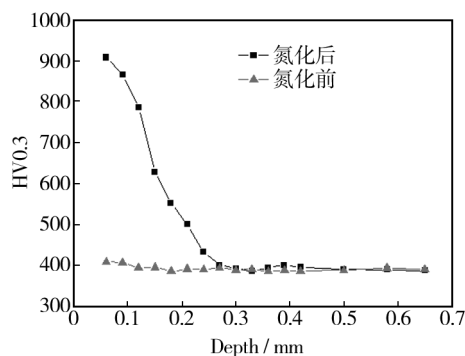


图3 截面显微硬度曲线

Fig. 3 Curves of cross-section microhardness

2.4 力学性能

表2为盐浴氮化工艺处理前后的32Cr2Mo2NiVNb钢力学性能。由表2可知,材料氮化后的强度与氮化前基本一致,断后伸长率、断面收缩率、冲击吸收能量降幅分别为19.1%、18.0%、12.3%。力学性能测试结果表明,盐浴氮化工艺不影响材料强度,经盐浴氮化处理后,材料的塑性和韧性仅有小幅降低。

表2 盐浴氮化前后的32Cr2Mo2NiVNb钢力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of 32Cr2Mo2NiVNb steel before and after salt-bath nitriding treatment

| 试样状态 | R_m /MPa | $R_{p0.2}$ /MPa | A /% | Z /% | KU_2 /J |
|-------|------------|-----------------|--------|--------|-----------|
| 盐浴氮化前 | 1396 | 1242 | 15.26 | 48.55 | 65 |
| 盐浴氮化后 | 1393 | 1239 | 12.34 | 39.79 | 57 |

2.5 断口形貌

盐浴氮化工艺处理前后的32Cr2Mo2NiVNb钢拉伸断口均呈现韧性断裂特征,为标准的杯锥形。氮化

后试样的断口纤维区面积略有减少,减少幅度约为 5% ~ 10%,断口放射线变细。图 4 为氮化前后试样的拉伸断口微观形貌,由图 4 可见,二者的拉伸断口微观形貌极为相似:断口纤维区为等轴韧窝、撕裂岭及少量二次裂纹;放射区有明显的放射线花样特征,

以韧窝韧性断裂为主,有少量解理面;剪切唇表面光滑,呈现典型的切断型断裂特征。断口形貌显示,盐浴氮化工艺对材料的拉伸断裂形式基本无影响,经氮化处理后,材料仍具有较好的韧性。

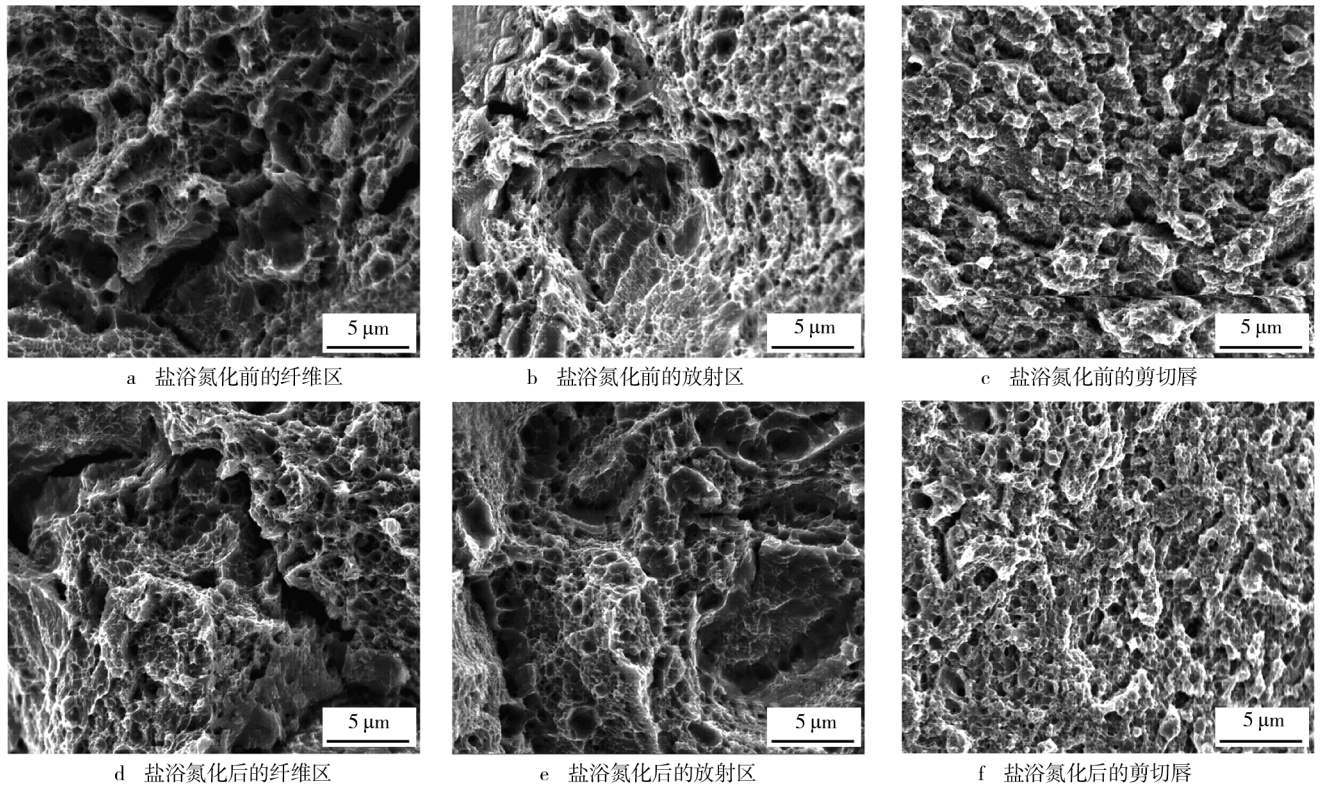


图 4 盐浴氮化前后 32Cr2Mo2NiVNb 钢的拉伸断口形貌

Fig. 4 Fracture morphology of 32Cr2Mo2NiVNb steel before and after salt-bath nitriding treatment: a) Fibre region morphology before salt-bath nitriding treatment, b) Radiation region morphology before salt-bath nitriding treatment, c) Cut lips morphology before salt-bath nitriding treatment, d) Fibre region morphology after salt-bath nitriding treatment, e) Radiation region morphology after salt-bath nitriding treatment, f) Cut lips morphology after salt-bath nitriding treatment

2.6 耐蚀性能

按照国家标准 GB/T 10125—2012《人造气氛腐蚀试验——盐雾试验》进行中性盐雾试验,将表面开始出现腐蚀的时间(简称为腐蚀时间)作为试样耐蚀性的评价指标,结果见表 3。由表 3 数据可知,镀铬试样(镀硬铬,镀层厚度为 40 ~ 60 μm)耐中性盐雾时间仅为 22.5 h,而盐浴氮化试样的耐中性盐雾时间为镀铬试样的 6.3 倍。分析认为:通过渗氮获得了化合物层(ϵ -Fe₂₋₃N)及扩散层(N 在 α -Fe 中的固溶体),其中 ϵ -Fe₂₋₃N 化合物层本身在盐雾、大气、弱酸、浓碱等环境下都具有较好的耐蚀性,以此构成了表面耐蚀的基础,而本工艺获得的化合物层深度达到 17 μm,且致密性好,可在钢基体与盐雾间形成良好的物理隔绝。

表 3 中性盐雾试验结果
Tab. 3 Result of neutral salt spray test

| 编号 | 试样状态 | 腐蚀时间/h | 腐蚀时间平均值/h |
|-----|------|--------|-----------|
| 1-1 | 镀铬 | 22.5 | 22.5 |
| 1-2 | | 22 | |
| 1-3 | | 23 | |
| 2-1 | 盐浴氮化 | 143 | 142.6 |
| 2-2 | | 140 | |
| 2-3 | | 145 | |

2.7 高温耐磨性

图 5 为盐浴氮化及镀铬的 32Cr2Mo2NiVNb 钢在 550 ℃下测得的磨损时间-摩擦力矩曲线。由图 5 可见,镀铬试样(镀硬铬,镀层厚度 60 ~ 100 μm)在磨损

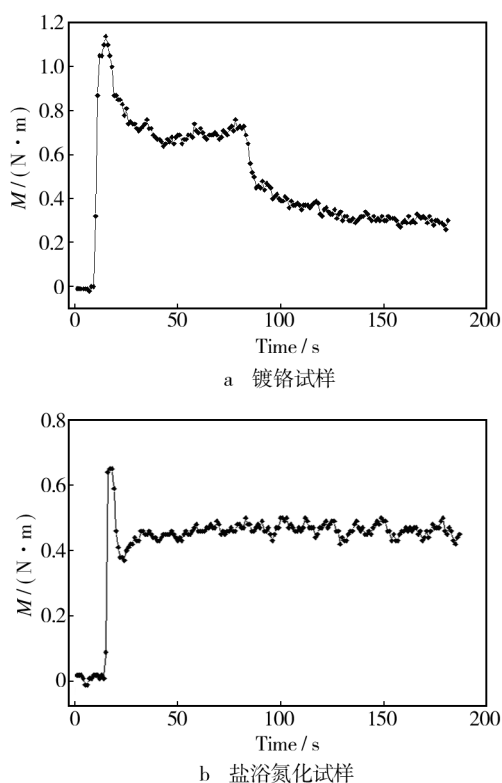


图5 磨损时间-摩擦力矩曲线

Fig. 5 Relationship between friction time and friction moment

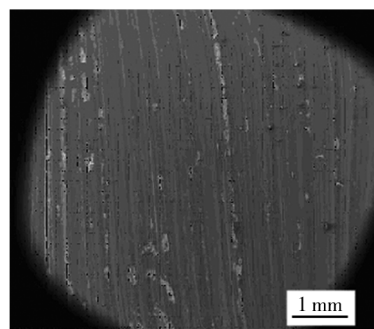
约80 s时,力矩急剧下降,表明镀铬层此时出现急剧剥落。高温磨损试验完毕后的表面SEM照片(图6a)也表明,经190 s摩擦磨损后,镀铬层已基本不存在,磨损表面的磨痕深且粗大,说明镀铬层出现剥落后不仅失去了对基体的保护作用,而且加剧了试样的磨粒磨损。与之形成对比的是,盐浴氮化试样试验完毕后,表面磨痕(图6b)细小、均匀,显示出良好的高温耐磨性。

表4为高温磨损试验后试样的失重情况。由表4可知,镀铬试样的平均质量损失为0.1836 g,而盐浴氮化试样的平均质量损失较之降低了62.8%。

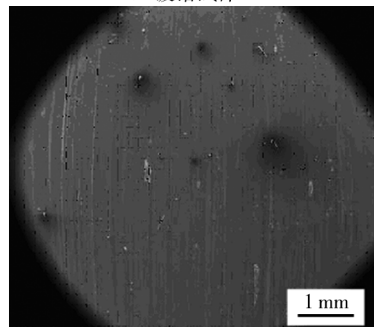
表4 高温磨损试验结果

Tab. 4 Result of high-temperature wear test

| 编号 | 试样状态 | 磨损前质量/g | 磨损后质量/g | 质量损失/g | 质量损失平均值/g |
|-----|------|---------|---------|--------|-----------|
| 1-1 | 镀铬 | 46.2153 | 46.0451 | 0.1702 | 0.1836 |
| 1-2 | | 46.2282 | 46.0317 | 0.1965 | |
| 1-3 | | 46.2211 | 46.0370 | 0.1841 | |
| 2-1 | 盐浴氮化 | 47.6002 | 47.5436 | 0.0566 | 0.0683 |
| 2-2 | | 47.6425 | 47.5620 | 0.0805 | |
| 2-3 | | 47.6333 | 47.5655 | 0.0678 | |



a 镀铬试样



b 盐浴氮化试样

图6 高温磨损试验后试样的表面形貌

Fig. 6 Surface morphology of the samples after high-temperature wear test

高温磨损试验结果表明,盐浴氮化工艺较镀铬工艺在耐高温磨损方面具有明显优势。分析认为:盐浴氮化工艺处理后,钢表面形成的化合物层在高温条件下仍具有较高的硬度,同时冶金结合的渗层避免了镀铬工艺存在的镀层与基体结合力差等缺陷,以此构成了高温耐磨的基础;此外,盐浴氮化工艺得到的扩散层硬度梯度适宜,也在一定程度上提高了材料的耐磨性能。

3 结论

1) 32Cr2Mo2NiVNb 钢经盐浴氮化后,基体组织为均匀的细针状索氏体+少量游离铁素体。渗氮层深度约0.23 mm,化合物层深度均匀,约17 μm。渗氮层疏松、氮化物、脆性评级均达到1级。

2) 32Cr2Mo2NiVNb 钢盐浴氮化后的表面硬度为1011HV0.3,较氮化前提高153.4%。氮化工艺对该钢的抗拉强度、拉伸断口等均无明显影响,经氮化处理后,材料的断后伸长率、冲击吸收能量仅有小幅降低。

3) 盐浴氮化32Cr2Mo2NiVNb 钢的耐中性盐雾时间达到142.6 h,为镀铬试样的6.3倍。

4) 盐浴氮化32Cr2Mo2NiVNb 钢经190 s高温磨

损试验后,表面磨痕细小均匀,磨损失重较镀硬铬试样降低 62.8%。

参考文献

- [1] 王立平,万善宏,曾志翔,等.代硬铬镀层材料及工艺[M].北京:科学出版社,2015.
WANG Li-ping, WAN Shan-hong, ZENG Zhi-xiang, et al. Materials and Technologies for Substituting Hard Chromium [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [2] SOPOKA S, RICKARDA C, DUNNB S. Thermal-chemical-mechanical Gun Bore Erosion of an Advanced Artillery System Part One: Theories and Mechanisms[J]. Wear, 2005, 25(8): 659—670.
- [3] 答建成,周细应,周涛,等.汽车零部件表面强化技术研究现状及展望[J].表面技术,2015,44(7): 68—74.
DA Jian-cheng, ZHOU Xi-ying, ZHOU Tao, et al. Research Status and Prospects of Surface Strengthening Technology of Auto Parts[J]. Surface Technology, 2015, 44(7): 68—74.
- [4] 陈磊,揭晓华,于能,等.气体软氮化工艺研究新进展[J].表面技术,2010,39(1): 81—83.
CHEN Lei, JIE Xiao-hua, YU Neng, et al. Research Progress of Gas Soft-nitriding Technology [J]. Surface Technology, 2010, 39(1): 81—83.
- [5] 徐永礼,覃海泉,庞祖高,等. RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗 H13 钢的高温耐磨性[J].表面技术,2015,44(4): 60—65.
XU Yong-li, QIN Hai-quan, PANG Zu-gao, et al. Wear Resistance at High Temperature of H13 Steel after RE-N-C-S-V-Nb Multi-element Penetrating [J]. Surface Technology, 2015, 44(4): 60—65.
- [6] RIDLEY N, MAROPOULOS S, PAUL H. Effects of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Cr-Mo-3.5Ni-V Steel [J]. Materials Science and Technology, 1994, 10(3): 239—249.
- [7] 何庆兵,吴护林,易同斌,等.均匀化退火对 32Cr2Mo2NiVNb 钢组织和性能的影响[J].金属热处理,2008,33(8): 124—126.
HE Qing-bing, WU Hu-lin, YI Tong-bin, et al. Effect of Homogenizing on Microstructure and Mechanical Properties of 32Cr2Mo2NiVNb Steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2008, 33(8): 124—126.
- [8] 邓永玖,周鑫森,祁标,等.42CrMo 钢销轴 QPQ 处理后的组织与性能[J].金属热处理,2015,40(5): 44—47.
DENG Yong-jiu, ZHOU Xin-miao, Qi Biao, et al. Microstructure and Properties of 42CrMo Steel Pin after QPQ Treatment [J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(5): 44—47.
- [9] 罗德福,李远辉,吴少旭,等. QPQ 技术高抗蚀机理探讨[J].金属热处理,2005,30(6): 28—30.
LUO De-fu, LI Yuan-hui, WU Shao-xu, et al. Discussion on the Mechanism of High Corrosion Resistance for QPQ Technology [J]. Heat Treatment of Metals, 2005, 30(6): 28—30.
- [10] YEUNG C F, LAU K H, LI H Y, et al. Advanced QPQ Complex Salt Bath Heat Treatment [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 66(3): 249—252.
- [11] HOFFMANN R. Nitrieren und Nitrocarbuieren Unterhalb 700 °C [J]. HTM, 1994, 5(5): 319—326.
- [12] 李惠友,罗德福,林训华,等. QPQ 盐浴复合处理技术[M].北京:机械工业出版社,1997.
LI Hui-you, LUO De-fu, LIN Xun-hua, et al. QPQ Salt Bath Treatment Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 1997.
- [13] 熊光耀,何柏林,周泽杰,等. QPQ 盐浴复合处理对 5CrMnMo 钢的组织与性能影响[J].热加工工艺,2006, 35(24): 43—45.
XIONG Guang-yao, HE Bo-lin, ZHOU Ze-jie, et al. Influence of QPQ Complex Salt Bath Treatment on Microstructure and Property of 5CrMnMo Steel [J]. Hot Working Technology, 2006, 35(24): 43—45.
- [14] 谢明强,李惠友,汪辉,等.深层 QPQ 处理的渗层组织和元素分布[J].金属热处理,2010,35(7): 21—25.
XIE Ming-qiang, LI Hui-you, WANG Hui, et al. Microstructure and Elements Distribution of Layer after Deep-layer QPQ Treatment [J]. Heat Treatment of Metals, 2010, 35(7): 21—25.
- [15] 吴少旭,谢明强,汪辉,等.钢件经 QPQ 处理后的抗蚀性[J].金属热处理,2011,36(7): 64—67.
WU Shao-xu, XIE Ming-qiang, WANG Hui, et al. Corrosion Resistance of Steel Parts after QPQ Treatment [J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(7): 64—67.