

## 机械能助渗锌对高强钢组织及其力学性能的影响

马青华, 付大海, 郦智斌

(海军装备技术研究所, 北京 102442)

**摘要:** 针对耐候高强钢易钝化和强度要求高的特点, 介绍了相应的机械能助渗锌工艺; 通过分析渗锌层结构和渗锌层元素分布规律, 研究渗锌过程对基体组织的影响; 通过渗锌热处理前后的拉伸力学试验对比分析, 研究渗锌热处理对高强钢力学性能的影响; 通过渗锌试样腐蚀后的拉伸力学试验分析, 研究渗锌层腐蚀对高强钢力学性能的影响。从而在基体组织和力学性能两方面验证了机械能助渗锌技术在高强钢构件上应用的安全性。

**关键词:** 高强钢; 机械能助渗锌; 防腐蚀; 力学性能

**中图分类号:** TG156.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-9289(2010)04-0074-04

### The Influence of Structure and Mechanical Performance in Application of Zincing by Aid of Mechanical-energy on the High-tensile Steel

MA Qing-hua, FU Da-hai, LI Zhi-bin

(Navy Equipment Technology Institute, Peking 102442)

**Abstract:** This paper introduces the improving technics of Zincing by aid of mechanical-energy according to the traits of high-tensile steel easy to be passivated and with high intension. The influence to substrate structure in Zincing was studied by analyzing structure and distribution of elements of Zincing coating. The influence of Zincing in mechanical performance of high-tensile steel was also studied by contrasting the tensile break before and after Zincing-disposal. Moreover, the influence of Zincing-coating corrosion to mechanical properties of high-tensile steel was carried out through tensile tests. This study verified the application safety of Zincing by aid of mechanical-energy technology through the structure and mechanical tests of substrates.

**Key words:** high-tensile steel; Zincing by aid of mechanical-energy; anticorrosion; mechanical-performance

## 0 引言

机械能助渗锌技术是在机械运动中完成渗锌热扩散的表面工程技术<sup>[1-2]</sup>,可在钢铁构件表面形成厚度均匀、硬度高、耐磨性好、防腐蚀性能优异的合金化渗层,经后处理和涂层配套,达到耐腐蚀、耐碰撞、耐磨损的构件长效防腐蚀要求,可作为海洋环境钢铁构件腐蚀治理的技术手段<sup>[3]</sup>。

海洋船舶常使用耐候高强钢,这类钢表面易钝化,渗锌热处理时耐高温氧化膜会阻碍热扩渗,因而需要改进其机械能助渗锌工艺。高强钢构件强度高,须防止渗锌热处理和渗锌层腐蚀电化作用导致材料力学性能下降,因而需要研究机械能助

渗锌技术应用对高强度钢构件组织与力学性能影响,验证其应用安全性。需要判定:①渗锌热处理的高温是否导致基体力学性能变化。②元素扩渗是否导致基体组织成分变化。③渗锌层腐蚀过程中是否对高强钢产生氢脆。虽然渗锌层在海水中自腐蚀电位(为-780 mV, SCE参比电极,下同。)高于一些高强钢-850 mV左右的安全电位<sup>[4-6]</sup>(对力学性能开始产生影响的最高电位),但渗锌层是渗锌层/钢材电偶对的阳极(钢为自腐蚀电位-680 mV),其对高强钢力学性能的潜在影响需实验验证。

通过渗锌热处理前后的拉伸力学试验对比分析渗锌热处理对高强钢力学性能的影响,通过腐蚀试样的拉伸力学试验对比分析腐蚀对高强钢力学性能的影响。并通过分析渗锌层结构和渗锌层元素成分

分布规律来研究渗锌过程对基体组织的影响。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

试验材料为40 MPa高压气瓶钢材,该钢材为典型的耐候高强钢,成分见表1。该钢种中元素含量较高的为Ni、Cr、Mn、Si、Mo。虽然P和S对耐蚀性能影响较大,但含量较低,故不作分析。Mn和Mo对耐蚀性影响不大,也不作分析,Ni和Cr对钢材表面致钝性影响较大,而Si在渗剂中存在。因此,对渗锌层中元素扩散规律的分析,除分析Zn外,还需要分析Fe、Ni、Cr、Si等元素。

表1 试验高强钢的主要成分(质量分数/%)

Table 1 Composition of testing high-tensile steel (w/%)

成分	C	Mn	Si	P	S
含量/%	0.09~0.14	0.3~0.6	0.17~0.37	≤0.035	≤0.03
成分	Ni	Cr	Mo	V	Fe
含量/%	2.6~3.0	0.9~1.2	0.2~0.27	0.04~0.10	余量

### 1.2 渗锌工艺

试样机械能助渗锌的工艺如下。(1) 渗前表面处理。要求试样表面无油、无锈、无氧化皮,呈金属本色,可采取手工除锈、机械除锈或喷砂抛丸除锈,不可酸洗,避免氢脆。(2) 渗锌加工。试样运动的方式见文献[1]。渗锌温度为380 °C,保温时间30 min。强化渗锌过程中的排氧与除氧,避免构件表面形成耐高温氧化膜。控制温度,避免温度太高导致钢铁基体相变。(3) 渗后检测。包括①目测:渗锌层呈灰白色,外观完整;②测厚:采用金相显微镜或非磁性涂层测厚仪测量,厚度50~100 μm;③附着力敲击锤试验,渗层没有脱落现象。(4) 渗后处理。即对渗层表面的游离锌进行铬酸盐化学转化膜处理。

### 1.3 试验方法

金相试样制备:割取高压气瓶钢材块样,线切割制成小板试样,用200目砂纸打磨光亮后,进行机械能助渗锌,控制渗锌层厚度60 μm左右,镶嵌后打磨、抛光,用硝酸酒精浸蚀,吹干。

金相试验方法:用金相显微镜分析渗层截面结构,并用JXA-8800型扫描电镜沿渗层垂直方向自里向外进行Si、Cr、Fe、Ni、Zn等元素的能谱分析。

力学试样制备:标准拉伸试样(Φ5),解剖高

压气瓶取出钢材块样后,线切割制成条状,车成圆柱,两端车出螺纹,中间磨细至规定的尺寸误差范围并抛光到规定的表面光洁度要求。

力学试验方法:将拉伸样品分为两组,每组为未处理的对比分析原样(a)、渗锌处理样(b)、渗锌+后处理样(c)3种,各3个平行试样。

将第一组试样按GB/T228-2002进行常温拉伸试验,分析热处理对材料力学性能的影响。

将第二组试样两端的螺纹部分采用石蜡封住保护起来,采用湛江港海水进行3个月的室内海水浸泡腐蚀试验。观察腐蚀现象,并对腐蚀试验后的试样按GB/T228-2002进行常温拉伸试验,断裂面积按腐蚀前的截面积计算,分析渗锌层腐蚀对材料力学性能的影响。

## 2 结果与讨论

### 2.1 渗锌对基体组织的影响

渗锌试样金相试验结果见图1。

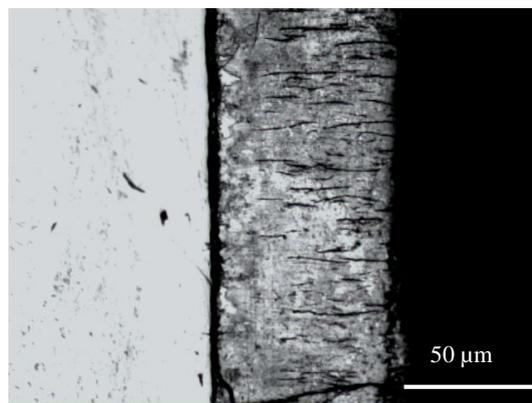


图1 高强钢渗锌金相照片(×200)

Fig.1 Metallographic photo of zincing high-tensile steel

由图1可见:①渗锌层层状特征明显、结构完整、厚度均匀,渗锌层与基体间分界明显,没有组织相混的现象;②渗锌层上的裂纹是砂轮机磨料冲击渗层组织造成的,可见渗层呈脆性,基体呈韧性,两者脆性对比差异明显。③硝酸酒精处理使渗锌层与基体金属结合处腐蚀产生界面感,渗层与基体金属冶金结合,界面的粗线纹是由渗锌层/基体金属间的电化学腐蚀引起的。

图2为能谱及扫描电镜观察结果,该图的上部分能谱分析图是下部分扫描电镜图中直线位置的线扫描结果,反映从基体内部穿过渗层到外部的

元素成分含量变化情况。由图 2 可见：①锌分布曲线反映出渗锌仅为表面扩散的特征，锌仅在表面渗层中存在，没有扩散到基体金属内部组织中，也就是说渗锌过程中，锌热扩散没有影响到基体金属内部组成。②渗锌层中成分均一，内部组织结构均一，渗锌层中含量较高的为铁和锌，主要为锌铁合金。③铬、镍和硅随着铁一起进入渗锌层，这些元素含量低且均一，在渗层中没有形成微阴极区。铬和镍在渗层中均匀存在，理论上对提高渗层的耐蚀性有益。

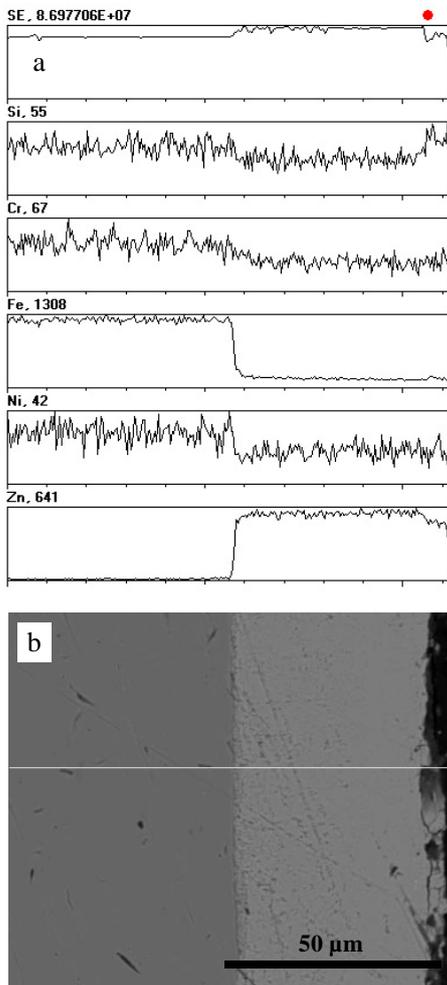


图2 高强耐候钢渗锌层能谱线扫描图 (a) 及SEM (b)  
Fig.2 EDAX line-scan (a) and SEM micrograph (b) of zincing high-tensile steel

## 2.2 渗锌对力学性能的影响

第一组试样力学试验结果 (20 °C) 见表 2 所示。结果表明：渗锌样与原样相比，拉伸强度均在 955 MPa 左右，渗锌过程及渗后处理对材料的抗拉

表 2 渗锌前后的抗拉强度  $R_m$ /MPa 比较

Table 2 Tensile strength  $R_m$ /MPa comparison before and after zincing-disposal

试样	原样	渗锌	渗锌+后处理
1	950	930	960
2	960	925	955
3	965	955	945
平均	958.3	936.7	953.3

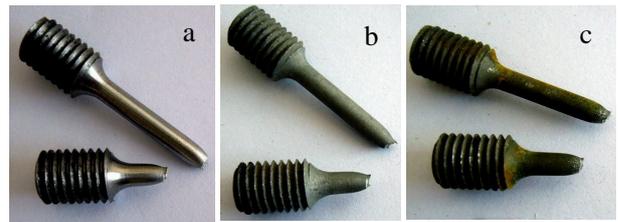


图 3 第一组试样拉断后形貌  
Fig.3 Rupture form of group 1 specimens

强度没有不良影响。微小的差别是后两种试样进行截面积计算时包括了渗层截面部分引起的。

对断裂端口观察可见：所有拉伸试验试样断裂后的断口形貌均呈现明显的韧窝，拉伸断裂处为锥状韧性断裂，未见脆性断裂特征。

第二组试样的腐蚀试验情况见表 3。

由海水浸泡对比试验结果可以看出，钢材渗锌保护效果较好，经渗后处理的保护效果更好。渗层腐蚀少对基体的影响必然小。

第二组试样腐蚀试验后力学试验结果 (26 °C) 见表 4。

表 3 试样海水浸泡 3 个月后的情况

Table 3 Zincing coating specimens dip in sea-water for 3 months

试样	腐蚀情况
原样	浸泡 8 h 明显腐蚀，3 个月后腐蚀严重
渗锌	颜色变暗，无腐蚀产物，保护较好
渗锌+后处理	几乎没有发生变化，保护极好

表 4 腐蚀后的抗拉强度  $R_m$ /MPa 比较

Table 4 Tensile strength  $R_m$ /MPa comparison after corrosion

试样	原样腐蚀	渗锌腐蚀	渗锌+后处理腐蚀
1	940	920	945
2	920	925	925
3	935	930	935
平均	931.7	925	935

由表4与表2对比可见,原试样腐蚀后,因截面积变小其抗拉强度略微变小;而渗锌样及其后处理样的抗拉强度变化极小,除截面积计算因素外,腐蚀前后的抗拉强度几乎无差别。表4中3种试样的抗拉强度均相近,渗锌样腐蚀与原样腐蚀相比,没有出现力学强度的明显变化。两方面对比相结合反映出渗锌层腐蚀对基体力学性能没有影响。

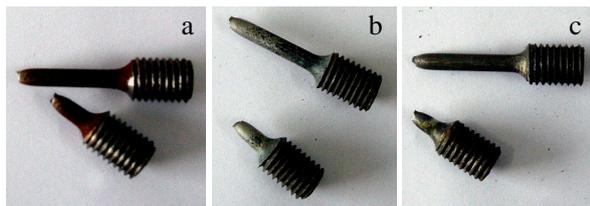


图4 第二组腐蚀试样拉伸后形貌

Fig.4 Rupture form of group 2 specimens after corrosion

图4为该组腐蚀试样拉伸试验断口形貌。观察表明,渗锌试样与原钢材试样一样,断面呈现韧性拉断韧窝,没有氢脆导致的脆性拉断痕迹。

### 3 结 论

(1) 耐候高强钢渗锌应避免温度过高引起钢材基体相变,加强渗锌过程中的排、除氧,防止钢材表面形成耐高温氧化膜,影响扩渗。

(2) 在机械能助渗锌的元素扩散过程中,锌元素只在渗层中存在,没有扩渗进入基体内部,因而没有影响基体内部组织。

(3) 机械能助渗锌处理和锌元素扩散均没有改变基体的力学拉伸性能,因而没有影响基体金属的抗拉强度。

(4) 渗锌层腐蚀对基体材料的抗拉强度和断面韧性没有影响,未见氢脆迹象,因而渗锌层腐蚀的电化学作用没有影响基体金属的力学性能。

(5) 综合机械能助渗锌对基体组织影响分析和对基体力学性能影响研究,证明机械能助渗锌技术在高强度钢构件上应用是安全的。

#### 参考文献:

- [1] 马青华,等. 机械能助渗锌及其海洋环境防腐蚀效果[J]. 中国表面工程, 2009, 99(6): 61-63.
- [2] 陈鹭滨,等. 机械能助渗的基本规律及其发展前景[J]. 金属热处理, 2004, 29(2): 25-28.
- [3] 唐绍铨. 论粉末渗锌技术及其发展前景[J]. 表面工程, 1996, 33(4): 21-25.

- [4] 章岳,等. 喷涂锌、铝对921船用高强钢应力腐蚀断裂的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1990, 10(1): 79-84.
- [5] 杨兆艳,等. 阴极极化对907钢氢脆敏感性的影响[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(10): 701-703.
- [6] Shin-ichi Komazaki, etc. Effect of applied cathodic potential on susceptibility to hydrogen embrittlement in high strength low alloy steel [J]. ISIJ International, 2003, 43(4): 475-481.

作者地址: 广东省湛江市人民大道南92号研究室 524001  
Tel: (0759) 2556 320

E-mail: Maqinghua@21cn.com

\*\*\*\*\*

(上接第73页)

#### 参考文献:

- [1] 于广锁, 龚欣, 刘海峰, 等. 多喷嘴对置式水煤浆气化技术[J]. 现代化工, 2004, 24(10): 46-49.
- [2] 许世森, 张东亮, 任永强. 大规模煤气化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [3] 刘孝弟, 王岳, 李兵科. 水煤浆气化炉工艺烧嘴有关问题的探讨[J]. 化肥工业, 2009, 36(2): 20-23.
- [4] 纪岗昌, 李长久, 王豫跃, 等. 超音速火焰喷涂Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr涂层磨粒磨损性能的研究[J]. 材料保护, 2002, 35(12): 23-25.
- [5] Laugier M T. Effect of hardness on erosion of WC-Co composites [J]. Materials Science, 1986, 21(10): 3548-3550.
- [6] Wang B Q, Luer K. Thermal spray industrial applications [J]. ASM International, Materials Park, OH-USA, Boston, 1994, 115-119.
- [7] Padture N P, Gell M, Jordan E H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications [J]. Science, 2002, 296: 281.
- [8] 邓建新, 丁泽良, 等. 陶瓷喷嘴及其冲刷磨损[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [9] 陶文铨, 杨世铭. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [10] 王卫泽, 张显程, 涂善东, 等. 一种带有镍-碳化钨涂层的水煤浆喷嘴及其制备方法[P]. 中国: 201010189120.2, 2010.6.

作者地址: 华东理工大学机械与动力工程学院 110016  
Tel: (021) 6425 2819

E-mail: wangwz@ecust.edu.cn