

# RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗 H13 钢的高温耐磨性

徐永礼<sup>1</sup>, 覃海泉<sup>2</sup>, 庞祖高<sup>2</sup>, 徐宇<sup>2</sup>, 徐仁强<sup>2</sup>, 郑勇<sup>2</sup>

(1. 广西水利电力职业技术学院, 南宁 530023; 2. 广西大学 材料科学与工程学院, 南宁 530004)

**摘要:** 目的 研究 RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗 H13 钢的高温耐磨性, 为避免铝型材挤压模具的早期磨损失效提供表面强化的新工艺。方法 把多元共渗试样及对比试样进行高温摩擦磨损实验, 然后利用金相显微镜、扫描电镜、能谱分析仪、X 射线衍射仪等设备进行检测分析。结果 淬火试样和软氮化试样均存在较严重的磨粒磨损和粘着磨损现象, 渗层有微裂纹, 高温摩擦系数曲线有明显的波动和峰值, 磨损率分别为  $21.20 \times 10^{-13}$ ,  $11.30 \times 10^{-13} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ , 在 560 °C 保温 4 h 后的显微硬度分别为 584, 1018HV0.1。RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗试样以微量氧化磨损和微量粘着磨损形式出现, 渗层无裂纹, 高温摩擦系数曲线平缓, 磨损率仅为  $2.96 \times 10^{-13} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ , 显微硬度高达 1334HV0.1。结论 RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗 H13 钢具有较强的耐高温耐磨性。

**关键词:** 多元共渗; 高温耐磨性; 摩擦系数; 磨损率

中图分类号: TG174.445

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2015)04-0060-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.04.011

## Wear Resistance at High Temperature of H13 Steel after RE-N-C-S-V-Nb Multi-element Penetrating

XU Yong-li<sup>1</sup>, QIN Hai-quan<sup>2</sup>, PANG Zu-gao<sup>2</sup>, XU Yu<sup>2</sup>, XU Ren-qiang<sup>2</sup>, ZHENG Yong<sup>2</sup>

(1. Guangxi College of Water Resources and Electric Power, Nanning 530023, China;

2. School of Material Science and Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To investigate the wear resistance at high temperature of H13 steel by RE-N-C-S-V-Nb multicomponent permeating treatment, in order to provide new technology to avoid premature wear of aluminum extrusion die. **Methods** The high temperature wear property of compound deposition samples and control samples was tested and then the samples were detected by means of optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), X-ray energy dispersive spectroscopy (EDS), and X-ray diffraction. **Results** It was found that quenched samples and tufftriding samples all had severe abrasive wear and adhesive wear phenomenon, microcracks appeared on the permeation layer, the high temperature friction coefficient curve had obvious fluctuations and peaks, the high temperature wear rate for the two kinds of samples was respectively at  $21.20 \times 10^{-13}$ ,  $11.30 \times 10^{-13} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ , The microhardness at 584HV0.1 and 1018HV0.1 after incubation for 4 h at 560 °C. The RE-N-C-S-V-Nb compound deposition sample had mostly micro oxidation wear and adhesive wear, no microcracks appeared on the permeation layer, the high temperature

收稿日期: 2014-11-27; 修订日期: 2014-12-21

Received: 2014-11-27; Revised: 2014-12-21

基金项目: 广西研究生教育创新计划资助项目(YCSZ2014025); 广西自然科学基金资助项目(2013GXNSFAA019303)

Fund: Supported by the Guangxi Graduate Education Innovation Program Funded Projects (YCSZ2014025) and the Guangxi Natural Science Foundation (2013GXNSFAA019303)

作者简介: 徐永礼(1956—), 男, 广西人, 副教授, 主要研究方向为现代模具设计与制造技术。

Biography: XU Yong-li(1956—), Male, from Guangxi, Associate professor, Research focus: modern mold design and manufacturing technology.

friction coefficient curve was gentle, the high temperature wear rate was only up to  $2.96 \times 10^{-13} \text{ m}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ , 1334HV0.1 at microhardness. **Conclusion** H13 steel after RE-N-C-S-V-Nb multi-element penetrating has a strong high-temperature wear resistance.

**KEY WORDS:** multicomponent permeating; high temperature wear resistance; friction coefficient; wear rate

H13 钢(即 4Cr5MoSiV1 钢)是一种空冷硬化热作模具钢,具有较高的韧性、冷热疲劳性和热强性,被广泛应用于铝型材挤压模具。H13 钢自身的这些性能在高温、高压、高摩擦的铝型材挤压工作环境下却远远达不到相应的使用技术要求,模具表面常以磨损、断裂、冷热疲劳等形式早期失效<sup>[1]</sup>。近年来,模具的磨损破坏失效占失效形式的 60% ~ 80%。目前企业普遍采用气体氮化或软氮化(即 N, C 共渗)等工艺来改善模具高温磨损性能,虽有较好的效果,但这些工艺中的白层深、脆性大问题还没有完全得到解决<sup>[2]</sup>。鉴于此,文中选取 RE, N, C, S, V, Nb 等元素进行多元共渗进行表面改性和强化,以期获取铝型材挤压模具的最高耐磨性,为提高模具高温耐磨性提供表面强化的新工艺。

## 1 实验

### 1.1 试样制备

选取国产供货态 H13 钢,经锻造和球化退火后线切割成  $\phi 25 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  规格,制备 3 种试样:RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗试样、软氮化试样、淬火试样。RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗试样配方及热处理工艺见表 1、表 2。软氮化试样配方选择 55% 尿素+35% 碳酸钠+10% 氯化钾(均为质量分数),共渗温度为 570 °C,经

表 1 RE-N-C-S-V-Nb 共渗配方

Tab.1 Formula of RE-N-C-S-V-Nb multi-permeation

	质量分数 / %							
	N-C-S 基盐	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al	RE	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	NaF
预渗	100							
多元 共渗		58	6	6	6	5	10	9

表 2 RE-N-C-S-V-Nb 盐浴多元共渗热处理工艺

Tab.2 Heat treatment of RE-N-C-S-V-Nb multicomponent thermochemical process

	温度/°C	保温时间/h	次数
预渗	570	3.5	1
淬火	1030	1.2	1
回火	575	4	2

1030 °C 淬火+560 °C 2 次回火处理。淬火试样经 1030 °C 淬火+560 °C 2 次回火处理。

### 1.2 高温耐磨性测试

高温摩擦磨损实验在广州金属研究所 UMT-3 型摩擦试验机上进行。实验参数按铝挤压加工生产参数选择。将高温摩擦温度定为 500 °C,磨球旋转半径设定为 9 mm,载荷为 15 N,时间为 20 min,摩擦速度为 200 r/min,摩擦方式为干摩擦球-盘旋转。摩擦系数由摩擦磨损试验机自带的 Multi-specimen Test System 生成,每个试样测量 5 次后,取平均值作为磨损量。在 560 °C 保温 4 h 后,实测它们的显微硬度。

## 2 结果与分析

### 2.1 试样组织

H13 钢经 RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗后,试样组织形貌如图 1 所示。渗层由化合物层与扩散层组成。渗层平整,厚度均匀致密,且化合物层与扩散层连接紧密。经 X 射线衍射分析发现,渗层的化合物层和扩散层(距表面 25 μm 处)主要由 NbN, VN, NbC, V<sub>8</sub>C<sub>7</sub> 等钒和铌的碳氮化物构成<sup>[3]</sup>,如图 2 所示。

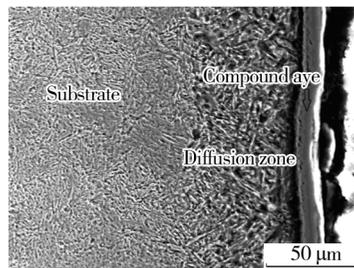


图 1 RE-N-C-S-V-Nb 共渗层 SEM 形貌

Fig.1 Profile morphology of H13 steel after multi-permeation

H13 钢经软氮化处理后,试样的组织如图 3 所示。渗层由化合物层(白亮层)和扩散层(深色区域)组成,组织主要为 Fe<sub>3</sub>N-ε, Fe<sub>4</sub>N-γ' 相和含氮的渗碳体 Fe<sub>3</sub>(C, N) 及孔隙加少量氧化物<sup>[4]</sup>。

H13 钢淬火+回火后组织为回火马氏体、回火托氏体和残余渗碳体的混合组织<sup>[5]</sup>,显微组织如图 4 所示。

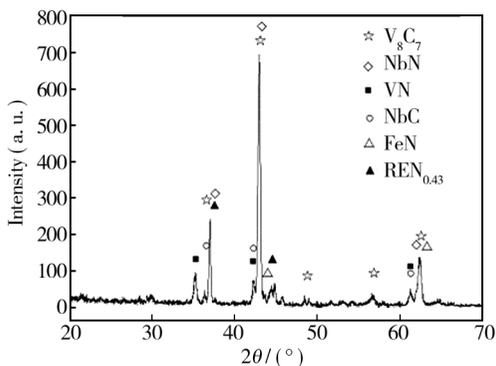


图2 渗层的X射线衍射谱

Fig. 2 X-ray diffraction patterns

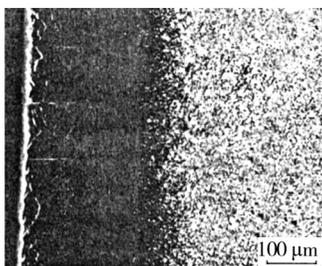


图3 软氮化层显微组织(500×)

Fig. 3 Microstructure of tuffriding layer (500×)

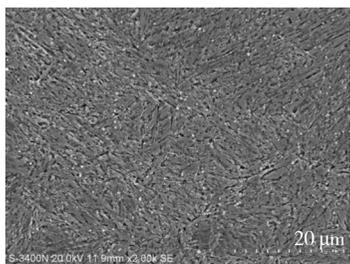


图4 560 °C回火后的显微组织(2000×)

Fig. 4 Microstructure after tempering at 560 °C (2000×)

## 2.2 磨损形貌

淬火试样在高温摩擦试验下的磨损形貌如图5所示。可以看到,试样表面有大量的氧化物颗粒和粘着物,并出现许多剥落区域。由于粘着物是高温下氧化物颗粒被磨球压实并拖带而形成,因此剥落区域是被氧化物颗粒显微切削的结果<sup>[6]</sup>。可见淬火试样表层组织致密度较差,耐磨损性能不高,在高温摩擦时容易被磨损并氧化。磨损以氧化磨损和严重的磨粒磨损为主,伴随着严重的粘着磨损。

其截面形貌如图6所示,可见无论摩擦时表面有没有形成氧化膜,受到对磨球的高温高压作用后,均产生向钢基体方向发展的纵向裂纹,但有氧化膜的情

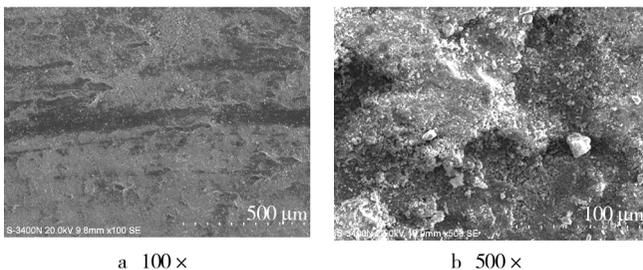


图5 淬火试样高温摩擦的磨损形貌  
Fig. 5 Surface morphology of quenched H13 steel samples after high temperature friction test

况下,钢表面的压应力被氧化膜吸收缓解,裂纹数量较少<sup>[7]</sup>。裂纹的出现与回火马氏体强度、硬度较高而塑性、韧性较低的特性有关。在高温摩擦下,表面产生了脆性大的Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>氧化膜。由于该氧化膜热膨胀系数与基体的偏差大,导致表面皱褶和微裂纹出现,破坏了钢的连续性,一旦氧化物磨粒进行裂纹,表层极易被剥离,造成钢表面的不平整和磨损量的急剧增加。

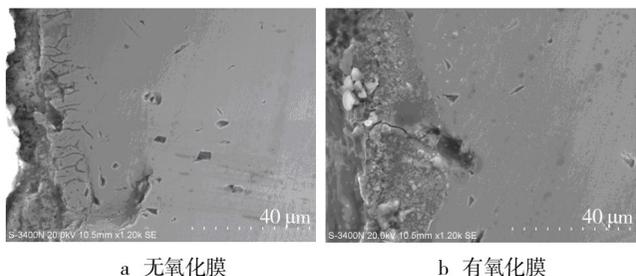


图6 淬火试样高温摩擦截面形貌  
Fig. 6 Profile morphology of quenched samples after high temperature friction test; a) with oxide film; b) without oxide film

软氮化处理试样在高温摩擦试验下的磨损形貌如图7所示。可以看出,试样表面同样出现粘着区和剥落区,但较淬火试样而言,粘着区域较多,剥落区较浅,氧化物颗粒也较少。分析发现,软氮化处理试样渗层能阻隔磨球和钢基体直接接触,摩擦生成的氧化物相应减少,此外渗层使得氧化物颗粒难以压入试样表面,有效保护基体。软氮化H13钢在高温摩擦下以较严重的氧化磨损和磨粒磨损为主。

其截面形貌如图8所示。从图8a可以看出,摩擦后表层组织与基体间存在微裂纹。当裂纹在反复压应力作用下扩展到一定深度时,表面碳氮渗层被剥落成分离状态<sup>[8]</sup>,如图8b所示。软氮化渗层与基体间裂纹的出现,与软氮化渗层的Fe<sub>3</sub>N-ε相、Fe<sub>4</sub>N-γ'相、Fe<sub>3</sub>(C,N)组织的韧性不足而硬脆性有余有关。

在高温摩擦的反复作用下,渗层内应力越来越大,导致微裂纹的形成并产生剥离现象,这也是高温摩擦后粘着区域和剥落区较多的原因。

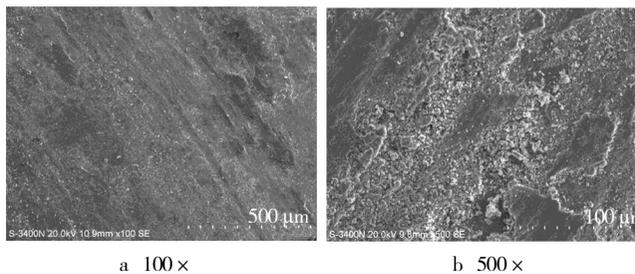


图7 软氮化试样高温摩擦的磨损形貌

Fig.7 Surface morphology of tuffriding H13 steel samples after high temperature friction test

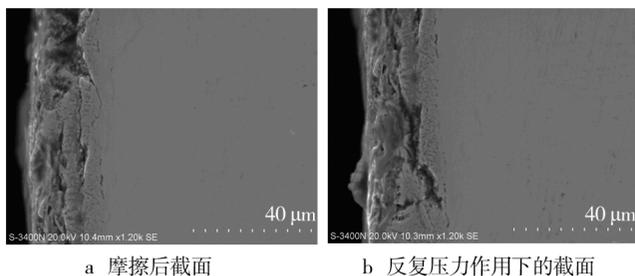


图8 软氮化试样高温摩擦后截面形貌

Fig.8 Profile morphology of tuffriding H13 steel samples after high temperature friction test

RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗试样高温摩擦试验下的磨损形貌如图9所示。可以看出,试样表面有氧化物被压实致密后的鱼鳞状粘着磨痕,磨痕周围有白色细小的氧化物,无明显的沟槽和剥落区域,表面的平整度较高。这表明多元共渗试样的磨损结果是微量氧化磨损和微量粘着磨损。

其高温磨损后的截面形貌如图10所示。可以看出,多元共渗层外面压实了一层薄的氧化膜,渗层基本形态保持不变,在1200倍下看不到有裂纹的产生。

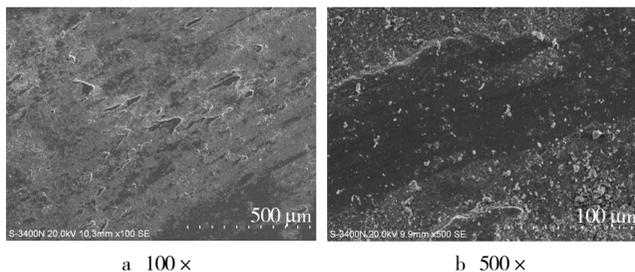


图9 RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗试样高温摩擦的磨损形貌

Fig.9 Surface morphology of multi-permeated H13 steel samples after high temperature friction test

由此可知,在实验条件下,渗层有较好保护基体的能力。这种能力与高硬度、高韧性的  $V_8C_7$ , VN 和 NbC, NbN 碳氮化物渗层有关<sup>[9]</sup>,它们的存在改变了试样的高温耐磨性能,使钢表面不容易出现磨损和剥落现象。

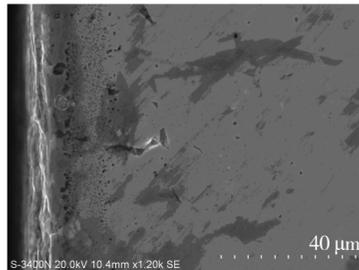


图10 多元共渗试样高温摩擦后截面形貌

Fig.10 Profile morphology of multi-permeated H13 steel samples after high temperature friction test

由三种试样形貌结果比较可见,RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗试样抗压能力强,耐高温摩擦性能最高,渗氮试样次之,淬火试样最低。RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗试样具有这样的性能,决定于钒铌碳氮化物组织,这些组织具有细晶强化的效果,使钢的力学性能稳定<sup>[10]</sup>。共渗成分中的 RE, S 元素在渗层中还分别起到增强剂和润滑剂作用,提供了较好的强韧度配合,从而使钢具有较强的耐磨能力。

## 3 讨论

### 3.1 摩擦系数

UMT-3 型摩擦试验机 Multi-specimen Test System 生成的三组试样的摩擦系数曲线如图11所示。它们的摩擦系数平均值均大于0.4,最后结果趋于相同。多元共渗试样的高温摩擦系数曲线更平缓,说明其表面自始至终减磨性能好,抗摩擦性强,有较强的抗氧化性。软氮化处理试样在摩擦前段的摩擦系数有明显的波动,之后才进入到稳定摩擦条件,其波动与初期氧化磨损和磨粒磨损的出现有关。淬火试样初期有一个较高的峰值,与其较大的磨粒磨损和粘着磨损有关。摩擦系数小,则摩擦力小,耐磨性好;反之,则较差<sup>[11]</sup>。

### 3.2 磨损率分析

在500℃高温摩擦下,三组试样5次测量取平均值的磨损质量损失见表3。

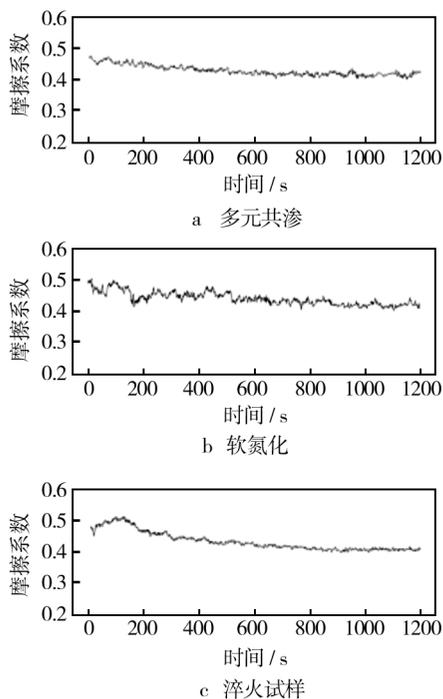


图 11 摩擦系数曲线

Fig. 11 The friction coefficient curves; a) multi-permeated H13 steel sample; b) tufftriding H13 steel sample; c) quenched sample

表 3 不同处理试样高温摩擦磨损质量损失

Tab.3 Weight loss of samples by different processes after high temperature friction test

试样	$M_0$	$M_1$	$M_s$
淬火处理	29 518.7	29 462.1	56.6
软氮化处理	29 092.0	29 061.6	30.4
RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗	29 955.3	29 947.4	7.9

mg

注:  $M_s$  为磨损质量损失量,  $M_0$  为原始试样质量,  $M_1$  为摩擦实验后质量。

依据表中磨损失重和摩擦试验机提供的滑程数据,取金属密度值为  $7.85 \text{ g/cm}^3$ 。磨损率  $W_s$  计算公式为:

$$W_s = \frac{V}{p} \cdot d$$

式中:  $d$  为摩擦滑程;  $p$  为摩擦压力。算得淬火处理试样  $W_s$  为  $21.20 \times 10^{-13} \text{ m}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ , 软氮化处理试样  $W_s$  为  $11.30 \times 10^{-13} \text{ m}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ , RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗试样  $W_s$  为  $2.96 \times 10^{-13} \text{ m}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。

可以看出,淬火处理试样高温磨损率较高,氮化处理试样磨损率次之,RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗后的试样磨损率最低。多元共渗试样的磨损率约为淬火

试样的 1/7,为氮化处理试样的 1/4,说明 RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗的 H13 钢具有较强的耐磨损性能。

### 3.3 红硬性比较

H13 钢淬火试样、软氮化试样、RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗试样加热至  $560 \text{ }^\circ\text{C}$  保温 4 h 后的显微硬度曲线如图 12 所示。比较分析可以看出,在  $560 \text{ }^\circ\text{C}$  实验中,多元共渗试样表面硬度可高达  $1334\text{HV}0.1$ ,软氮化试样为  $1018\text{HV}0.1$ ,淬火试样为  $584\text{HV}0.1$ ,且多元共渗试样在渗层区域的硬度值都大于后两组试样,而基体上试样硬度趋于一致。这与多元共渗中的 NbN, VN, NbC,  $V_8C_7$  等钒的碳氮化物和铌的碳氮化物的热稳定性有很大关系<sup>[12]</sup>。在一定硬度范围内,耐磨性随红硬性的增加而明显提高,可见 H13 钢经 RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗后具有较高的耐磨性。

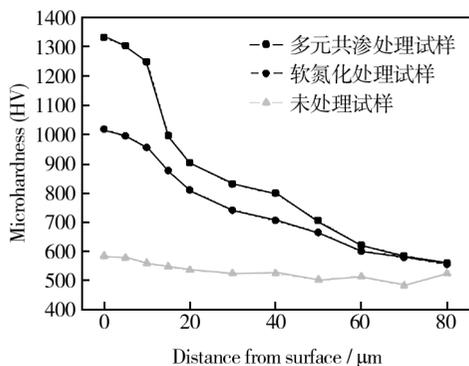


图 12 H13 钢不同处理试样  $560 \text{ }^\circ\text{C} \times 4 \text{ h}$  后显微硬度曲线  
Fig. 12 Microhardness curve of H13 steel samples by different processes at  $560 \text{ }^\circ\text{C} \times 4 \text{ h}$

### 3.4 多元共渗元素对耐磨性的贡献

RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗元素中,金属元素 V 是强碳氮化物形成元素,具有简单点阵 MC 型结构,形成的 VC, VN 熔点分别高达  $2830 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $2360 \text{ }^\circ\text{C}$ ,硬度分别达到  $1730\text{HV}$  和  $1520\text{HV}$ ,熔解温度  $\geq 1110 \text{ }^\circ\text{C}$ 。质点稳定性好,能改善脆性,韧性好,且弥散分布,具有细晶强化效果,因而能有效提高钢的热强性、红硬性和耐磨性<sup>[13]</sup>。Nb 碳化物形成元素仅排在 Ti, Zr 元素之后,是最强的碳氮化物形成元素之一,形成的 NbC, NbN 碳氮化物熔点分别高达  $3500 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $2300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,硬度分别达到  $2055\text{HV}$  和  $1396\text{HV}$ 。在钢的一般加热过程中基本不溶解,能提高钢的回火稳定性、抗氧化性和热疲劳性。稀土(RE)元素具有细化组织和催渗作用,能有效增加渗层的厚度,并且在提高渗层的硬度、耐磨性和抗氧化性的同时,使过渡层的硬度

变化减缓,增强了基体与共渗层的联系,为共渗层提供强有力的支撑作用<sup>[14]</sup>。S 元素在共渗过程以 FeS, FeS<sub>2</sub> 的硫化物形式存在,促使材料表面的油膜形成,这些的润滑作用能提高钢表面的高温耐磨性<sup>[15]</sup>。

## 4 结论

1) RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗 H13 钢试样在高温摩擦磨损时仅以微量氧化磨损和微量粘着磨损形式出现,而淬火试样和软氮化试样均以较严重的磨粒磨损和粘着磨损形式出现,表明多元共渗高温耐磨性强于淬火和软氮化工艺。

2) RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗 H13 钢试样高温磨损率仅为淬火处理试样的 1/7,软氮化试样的 1/4,表明其具有很强的耐高温耐磨性。

3) RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗 H13 钢具有的高温耐磨性源于质点稳定性好、细晶强化效果明显的 VN, NbN, NbC, V<sub>8</sub>C<sub>7</sub> 等碳氮化物。

## 参考文献

[1] 刘俊英,蒋伯平.热作模具钢的发展与应用[J].工程机械,2006(6):48—49.  
LIU Jun-ying,JIANG Bo-ping. Development and Application of Hot Die Steel[J]. Construction Machinery and Equipment,2006(6):48—49.

[2] UGUR S. Kinetics of Niobium Carbide Coating Produced on AISI 1040 Steel by Thermo-reactive Deposition Technique[J]. Materials Chemistry and Physics,2004,86(1):189—194.

[3] 庞祖高,单朝军,韦芙丹. H13 钢 RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗层的组织与性能[J]. 金属热处理,2012(1):61—63.  
PANG Zu-gao,SHAN Chao-jun,WEI Fu-dan. Microstructure and Properties of RE-N-C-S-V-Nb Multi-alloyed Layer of H13 Steel[J]. Heat Treatment of Metals,2012(1):61—63.

[4] 李延辉,刘金水,周恺武,等. H13 模具钢低温盐浴氮碳钒共渗工艺研究[J]. 材料热处理,2006,35(10):37—39.  
LI Yan-hui,LIU Jin-shui,ZHOU Dian-wu, et al. Study on Vanadium-nitrocarburizing in Low Temperature Salt-bath for Die Steel H13[J]. Heat Treatment,2006,35(10):37—39.

[5] 李忠民. 4Cr5MoSiV1 铝合金压铸模零件高纯氮回充真空空气淬及高温回火[J]. 机械工人,2005(4):69—75.  
LI Zhong-min. 4Cr5MoSiV1 Aluminum Die Casting Parts, High Purity Nitrogen Backfilled Vacuum Gas Quenching and Tempering[J]. Machinery Workers,2005(4):69—75.

[6] 陈贵耕,陈听梁,赵忠义. 固体材料的摩擦与磨损[M]. 北京:国防工业出版社,1992.  
CHEN Gui-geng,CHEN Ting-liang,ZHAO Zhong-yi. Solid

Material Friction and Wear[M]. Beijing:Defense Industry Press,1992.

[7] 李小艳,王树奇,崔向红,等. Cr-Mo-V 精铸热锻模具钢组织和高温耐磨性的研究[J]. 特种铸造及有色合金,2007(6):459—461.  
LI Xiao-yan,WANG Shu-qi,CUI Xiang-hong, et al. Research on the Microstructure and the Wear Resistance at High Temperature of Cr-Mo-V Cast Steel[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys,2007(6):459—461.

[8] SUH N P. Tribological Technology[M]. Hague:Mirtinus Nijhoff,1982.

[9] 揭晓华,毛志远. 5CrNiMo 钢在高温磨损中的动态氧化行为[J]. 浙江大学学报(自然科学版),1998,32(6):769—776.  
JIE Xiao-hua,MAO Zhi-yuan. 5CrNiMo Dynamic Oxidation Behavior of Steel in High Temperature Wear[J]. Journal of Zhejiang University,1998,32(6):769—776.

[10] 庞祖高,黄柏嵩,单朝军,等. H13 钢 RE-N-C-V-Nb 多元共渗层形成机理及生长动力学[J]. 金属热处理,2013,38(3):17—20.  
PANG Zu-gao,HUANG Bai-song,SHAN Chao-jun, et al. Mechanism and Kinetics of RE-N-C-V-Nb Multi-component Thermo Chemical Treated Layer of H13 Steel[J]. Heat Treatment of Metals,2013,38(3):17—20.

[11] SADUMAN Sen. Influence of Chromium Carbide Coating on Tribological Performance of Steel[J]. Materials and Design,2006(27):85—91.

[12] 徐永礼,庞祖高,马宽猷,等. RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗 H13 钢的热疲劳性能研究[J]. 表面技术,2013,42(5):35—38.  
XU Yong-li,PANG Zu-gao,MA Kuan-you, et al. Research on the Thermal Fatigue Performance of H13 Steel by RE-N-C-S-V-Nb Multicomponent Permeating Treatment[J]. Surface Technology,2013,42(5):35—38.

[13] 胡庚祥,蔡珣,戎咏华. 材料科学基础[M]. 第3版. 上海:上海交通大学出版社,2010.  
HU Geng-xiang,CAI Xun,RONG Yong-hua. Materials Science[M]. 3rd Edition. Shanghai:Shanghai Jiaotong University Press,2010.

[14] 陶小克,彭日升,刘杰. 稀土对盐浴渗钒动力学的影响[J]. 中国稀土学报,2000(4):352—355.  
TAO Xiao-ke,PENG Ri-sheng,LIU Jie. Effects of RE on Vanadium Salt-bath Dynamics[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society,2000(4):352—355.

[15] 庞祖高,单朝军,韦芙丹. H13 钢 RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗成分优化[J]. 中国表面工程,2011,24(6):41—46.  
PANG Zu-gao,SHAN Chao-jun,WEI Fu-dan. Formula Optimization on RE-N-C-S-V-Nb Multi-elements Penetrating for H13 Steel[J]. China Surface Engineering,2011,24(6):41—46.