

## 钒对 25CrMnB 钢履带板耐磨性能的影响

邓通武

(攀钢集团研究院有限公司, 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 攀枝花 617000)

**摘要** 针对现有履带板容易因快速磨损而造成早期失效的问题,以 25CrMnB 作为对比钢,分别添加了 0.08%、0.12% 和 0.16% 的 V,在实验室采用 150 kg 中频真空感应炉冶炼并浇铸成 50 kg 的钢锭,钢锭经过箱式电阻炉加热后轧制成 12 mm 厚扁钢。通过耐磨性试验、析出相分析方法,研究了不同钒含量对其耐磨性能的影响。结果表明,随着钢中钒含量的增加,钒的析出物数量增加,试验钢的硬度和耐磨性均大幅提升,当钢中 V 含量由 0.004% 增加到 0.16% 时,试验钢的 HRC 硬度值从 36.5 提高到 43.5,与 25CrMnB 钢相比,其相对磨损率由 100% 降低到 88.2%,相对磨损率降低了 11.8%。

**关键词** 25CrMnB 钢 钒 履带板 耐磨性

## Effect of Vanadium on Wear Resistance of Track Shoe of Steel 25CrMnB

Deng Tongwu

(PanGang Group Research Institute Co Ltd, State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000)

**Abstract** Concentrating on the problem that the existing track shoes are vulnerable to rapid wear and tear caused early failure, in this paper, 25CrMnB is used as the comparative steel, added 0.08%, 0.12% and 0.16% vanadium respectively, smelted and cast into 50 kg steel ingots in a laboratory using a 150 kg medium frequency vacuum induction furnace. The steel ingot is heated by a box type electric resistance furnace and rolled into a flat steel of 12 mm thickness. The effects of different vanadium contents on the wear resistance is studied by wear resistance test and precipitation phase analysis. The results show that, with increasing vanadium content in the steel, the amount of vanadium precipitates increases, and the hardness as well as wear resistance of the test steel are significantly improved. When the vanadium content in the steel increases from 0.004% to 0.16%, the HRC hardness value of the test steel increased from 36.5 to 43.5, compared with 25CrMnB steel, and the relative abrasion rate decreases from 100% to 88.2%, and the relative abrasion rate decreased by 11.8%.

**Material Index** Steel 25CrMnB, Vanadium, Track Shoe, Wear Resistance

履带板是履带式工程机械的关键部件之一。作为整车与地面直接接触的部件,其工作环境极其恶劣,不但与土壤、砂石等直接接触,而且承受着整个机体重量和复杂工况带来的挤压、弯曲等交变应力,从而导致履带板的严重磨损和变形,甚至发生断裂。而目前断裂和快速磨损是履带板最为常见的失效形式,因此,要求履带板具有较高的耐磨性。近年来,随着履带板材质向低合金钢方面的快速发展,23MnB、25MnB 和 25CrMnB 成为了最为常用的履带板钢牌号,断裂失效得到了较大改善,但耐磨性方面进步却不显著。碳是提高钢材硬度和耐磨性较为经济、有效的元素,但从履带板钢的使用及发展历程看<sup>[1-2]</sup>, 太高的碳含量对履带板的使用寿命反而不利,容易出现淬火裂纹,从而导致履带板的断裂和崩块。为此,本文研究了钒对履带板耐磨性能的影响。

### 1 试验材料及方法

#### 1.1 试验材料

试验材料的制备:150 kg 中频真空感应炉冶炼→浇铸成 50 kg 钢锭→钢锭去保温帽及尾部→箱式电阻炉加热(加热温度为 1 200 °C,保温 1 h)→轧制成 12 mm 厚扁钢(Φ750 mm + Φ550 mm 两辊轧机)→轧后自然空冷。

采用以上方法制得的试验钢主要化学成分见表 1,其中 1# 试样为现有 25CrMnB 履带板钢的化学成分,作为对比钢,钢中的钒为试验原料的残余钒;2#~4# 试样除钒含量有所变化外,其余元素含量基本相当。

#### 1.2 磨损试验

履带板工程机械通常是在沙石环境中作业,因此,采用了 MLS-23 型湿砂橡胶轮式磨损试验机进行磨损试验,以尽可能接近其实际使用状态。橡胶轮邵氏硬度为 70,石英砂规格为 40~80 目,试样为 57 mm × 25.5 mm × 6 mm 的块状,每个编号 3 块,试样状态为淬火 + 回火(将试样毛坯加热至(880 ±

表 1 试验钢的化学成分 / %  
Table 1 Chemical composition of experimental steel / %

试样编号	C	Si	Mn	P	S	Cr	B	V
1 <sup>#</sup>	0.23 ~ 0.28	0.15 ~ 0.35	1.10 ~ 1.40	≤ 0.020	≤ 0.015	0.40 ~ 0.50	0.000 5 ~ 0.003 0	0.004
2 <sup>#</sup>	0.23 ~ 0.28	0.15 ~ 0.35	1.10 ~ 1.40	≤ 0.020	≤ 0.015	0.40 ~ 0.50	0.000 5 ~ 0.003 0	0.082
3 <sup>#</sup>	0.23 ~ 0.28	0.15 ~ 0.35	1.10 ~ 1.40	≤ 0.020	≤ 0.015	0.40 ~ 0.50	0.000 5 ~ 0.003 0	0.121
4 <sup>#</sup>	0.23 ~ 0.28	0.15 ~ 0.35	1.10 ~ 1.40	≤ 0.020	≤ 0.015	0.40 ~ 0.50	0.000 5 ~ 0.003 0	0.159

10)℃保温 30 min 进行水淬,冷至室温;再将淬火试样毛坯加热至(220 ± 10)℃保温 30 min 后取出空冷。磨损试验分为预磨和正式磨损试验,具体试验方法如下:

(1) 预磨损试验:将试样逐个进行清洗、退磁,采用 1 kg 水和 1.5 kg 石英砂磨损 1 000 转,试验转速为 181 r/min,试验载荷为 68.6 N,形成一道初始磨痕,再将试样用无水乙醇清洗干净、吹干,并称量,作为试样的初始质量。

(2) 正式磨损试验:将预磨好的试样采用与预磨相同的试验方法进行正式磨损试验,要确保正式磨损试验产生的磨痕和预磨的初始磨痕在同一处,磨损 1 000 转后取出用无水乙醇清洗干净、吹干,并称量,作为试样的磨后质量。

(3) 磨损量计算:初始质量-磨后质量。

### 1.3 析出相分析

分别采用电解法和碳膜萃取复形法对钒的析出相进行测定和分析。采用电解法测定了钒的固溶析出量,试验方法为取 Φ10 mm × 100 mm 电解样,通过电解法获得碳氮化物,电解液为 1 g 氯化锂 + 5 g 磺基水杨酸 + 94 ml 甲醇,溶解后作为电解液,在 0℃以下电解。采用碳膜萃取复形法将析出物进行萃取,然后采用 JEM2100 高分辨电镜对试样中的析出物进行观察,主要观察析出物的形貌、大小、分布特征等。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 钒含量对耐磨性的影响

表 2 为磨损试验结果,其中 1<sup>#</sup>样作为对比钢,相对磨损率为 100%,2<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>均与其进行比较;表 3 为硬度检验结果;钒含量对硬度和相对磨损率的影响见图 1。

从表 2 和图 1 可以看出,随着钢中钒含量的增加,其磨损量和相对磨损率降低,当钢中的钒含量为 0.08%、0.12% 和 0.16% 时,比现有 25CrMnB 履带钢的磨损量均有所减少,相对磨损率分别降低了 5.8%、9.1% 和 11.8%。

文献[3-4]表明,在静磨料磨损条件下,试验钢

磨损机理为切削磨损,耐磨性主要受硬度影响,硬度越高,耐磨性越好。从表 3 和图 1 中可以看出,随着钢中钒含量的增加,其硬度随之增加,钢中钒含量由 0.004% 增加到 0.16% 时,其 HRC 硬度值由 36.5 增加到了 43.5,其相对磨损率也随着硬度的增加而降低。

表 2 磨损试验结果  
Table 2 Testing result of wear resistance

试样编号	磨损量/g		相对磨损率/%
	实际	平均	
1 <sup>#</sup>	1-1	0.447 4	100
	1-2	0.459 4	
	1-3	0.458 3	
2 <sup>#</sup>	2-1	0.427 7	94.2
	2-2	0.428 8	
	2-3	0.429 2	
3 <sup>#</sup>	3-1	0.414 4	90.9
	3-2	0.415 4	
	3-3	0.410 4	
4 <sup>#</sup>	4-1	0.400 5	88.2
	4-2	0.401 0	
	4-3	0.402 9	

表 3 试验钢 HRC 硬度值试验结果  
Table 3 Testing result of HRC hardness value of test steel

试样编号	1	2	3	平均
1 <sup>#</sup>	36.7	36.3	36.4	36.5
2 <sup>#</sup>	38.2	38.3	38.6	38.4
3 <sup>#</sup>	42.5	42.9	42.2	42.5
4 <sup>#</sup>	43.4	43.6	43.6	43.5

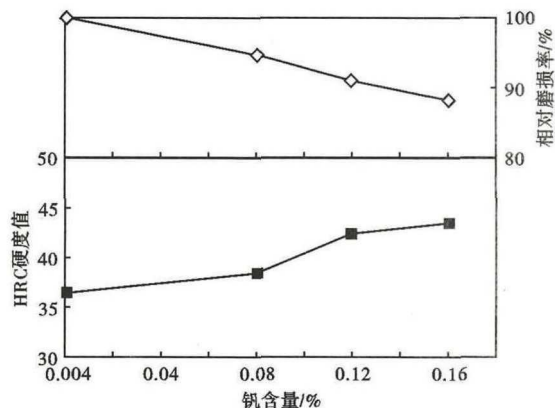


图 1 钒含量对试验钢硬度和相对磨损率的影响  
Fig. 1 Effect of vanadium on hardness and relative abrasion rate of test steel

钒是强烈的碳化物形成元素之一,一般认为钢中的钒,在通常情况下,沉淀强化起主要作用。钒首先是以VN方式析出,当N消耗完毕之后,剩余的钒将生成VC,但当钢中的N、C含量一定时,进一步增加钢中的钒,多余的钒将以固溶形式存在。因此,钒在钢中的作用主要取决于其存在形式。朱乃平等<sup>[5]</sup>的研究表明,在Fe-Mn-Al-(Cr)系奥氏体钢中, $V_4C_3$ 为主要强化相,沉淀强化作用随V含量的增加而增大。 $V_4C_3$ 是最硬最耐磨的金属碳化物,细小弥散分布的 $V_4C_3$ 可提高钢的蠕变和持久强度,提高基体显微硬度<sup>[6]</sup>。

表4为V的固溶析出检验结果,钒的析出量和析出比例变化情况见图2,从图2中可以看出,当钢中的钒极其微量时(1<sup>#</sup>),未检测出钒的析出物;随着钢中钒含量增加,渗碳体中的钒含量增加,当钢中钒增加到0.12%和0.16%时,其渗碳体中的钒含量约为0.02%;当钢中钒含量为0.08%~0.16%时,随着钢中钒含量的增加,析出钒的比例有所降低,分别为48.8%、43.0%和42.1%,但其析出数量却随之增加,分别为0.039%、0.052%和0.067%。

采用碳膜萃取复形法观察到的析出相形貌见图3,基本呈圆形或椭圆形颗粒状。从图3(a)中可以看出,钒的析出物数量较少,主要分布在晶内,而对比图3(c)可以看出,当钒含量增加到0.16%使,钒的析出量大幅增加,在晶界和晶内均有分布。从图3(b,d)中可以看出且析出物的尺寸均在50 nm

以下。

综合以上分析表明,随着钢中钒含量的增加,虽然钒析出相的比例降低,但其析出相数量随之增加,由于其硬度较高从而提高了试验钢基体的显微硬度,使其耐磨性能也随之得以改善。

表4 V的固溶析出试验结果/%

Table 4 Solid solution precipitation test result of vanadium/%

编号	化合N	渗碳体中V	析出V	总V	总N	析出V比例
1 <sup>#</sup>	0.003 6	0.004	0	0.004	0.004 8	0
2 <sup>#</sup>	0.003 2	0.007	0.039	0.080	0.004 2	48.8
3 <sup>#</sup>	0.002 7	0.023	0.052	0.121	0.003 7	43.0
4 <sup>#</sup>	0.002 8	0.021	0.067	0.159	0.003 9	42.1

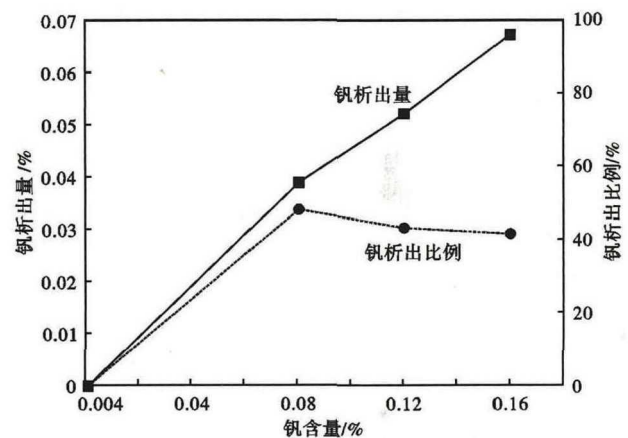


图2 试验钢钒的析出量和析出比例

Fig.2 Test steel vanadium precipitating amount and proportion

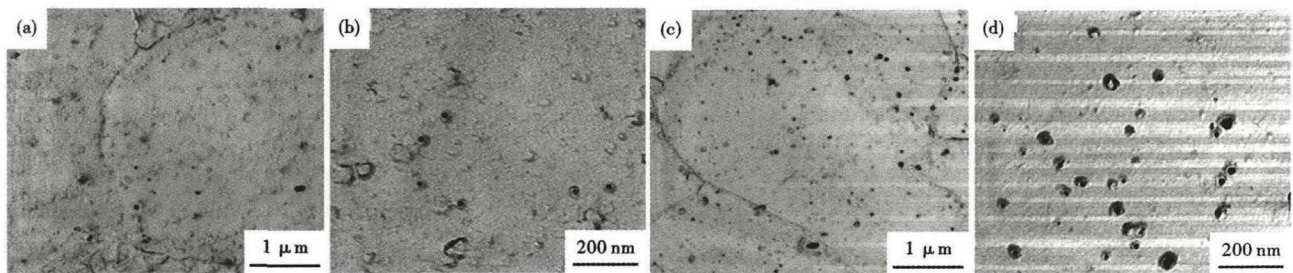


图3 试验钢V的析出相形貌:(a)(b)2<sup>#</sup>试样,0.08%V;(c)(d)4<sup>#</sup>试样,0.16%V

Fig.3 Morphology of vanadium precipitated phase in test steels: (a)(b)2<sup>#</sup> sample,0.08%V;(c)(d)4<sup>#</sup> sample,0.16%V

## 2.2 钒对力学性能的影响

履带板不仅要求较高的耐磨性,而且要求具有较高的强度和良好的冲击性能,因此,在研究钒对履带板耐磨性能的影响的同时,还研究了钒对履带板力学性能的影响,表5为试验钢力学性能检验结果。从检验结果可以看出,随着钒含量的增加,试验钢强度大幅提升,而韧塑性略有提高。这是由于钢中加

入适当的钒不仅可以起到固溶强化的作用,提高钢的强度,而且可以起到阻止奥氏体和铁素体晶粒长大,起到细晶强化的作用,从而在不降低韧塑性的情况下提高钢的强度。

在钢的加热过程中,奥氏体晶粒将随着加热温度的提高和保温时间的增加而长大,而加入适当的钒,可以析出大量细小弥散的碳氮化物,对奥氏体晶

界起到钉扎作用,能够有效组织奥氏体晶界的迁移,从而阻止奥氏体晶粒的长大。图 4 为奥氏体组织形貌,从检验结果看,随着钒含量的增加,奥氏体晶粒更加细小,当钢中钒含量由残余钒(0.004%)增加到 0.16%时,奥氏体晶粒由 6 级细化到了 8.5 级,效果极为明显。

同时,在轧制和冷却过程中,细小弥散的碳氮化钒析出相也是铁素体的形核剂,促使铁素体在较小

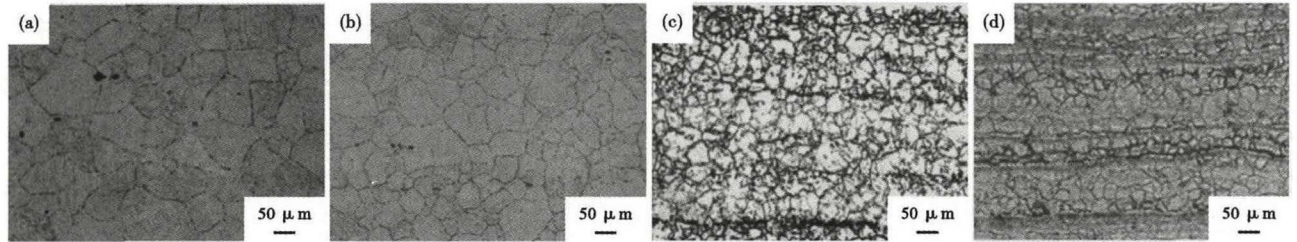


图 4 试验钢奥氏体组织形貌和奥氏体晶粒度:(a)1#试样,6.0 级;(b)2#试样,7.0 级;(c)3#试样,8.0 级;(d)4#试样,8.5 级  
Fig. 4 Microstructure morphology of austenite in test steel and rating of austenite: (a) sample No1, 6.0; (b) sample No2, 7.0; (c) sample No3, 8.0; (d) sample No4, 8.5

的过冷度下大量形成,并阻止其长大,从而细化铁素体晶粒,起到细晶强化的作用。在奥氏体-铁素体相变过程中,铁素体形核主要发生在原始奥氏体晶界上,由于钒的碳氮化物在奥氏体向铁素体转变期间的相界面析出,在晶界起到的钉扎作用也能够有效阻止铁素体晶粒长大,从图 3(c)的晶界处就能够发现一定量的钒析出相;从图 3(a, c)中的晶内还可以看到一定量的细小钒析出相,该质点可作为铁素体形核提供更多的形核位置,提高其形核速率。

试验结果表明,加入适量的钒,不仅可以提高履带板钢的耐磨性能,同时还对其力学性能起到一定的有益贡献。

### 3 结论

随着试验钢中钒含量的增加,钢中钒的析出相数量增多,硬度和耐磨性随之增加,当钢中钒含量由 0.004% 增加到 0.16% 时,试验钢的 HRC 硬度值从 36.5 提高到 43.5,与 25CrMnB 钢相比,相对磨损率降低了 11.8%。同时,钒的加入还起到了细晶强化效果,对试验钢的强度和韧性起到一定的有益

表 5 试验钢力学性能试验结果  
Table 5 Test results of mechanical properties of test steels

原试样号	$R_m$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%	$A_{KU}$ (常温)/J
1#	1 244	10.5	44	28, 29, 26
	1 249	10.5	45	
2#	1 329	12.0	44	31, 32, 28
	1 303	11.5	46	
3#	1 380	12.0	48	30, 32, 32
	1 382	12.5	51	
4#	1 446	12.5	52	35, 33, 31
	1 459	12.5	58	

作用。

### 参考文献

- [1] 陈小龙. 合金元素对 23MnB 履带钢基础性能的影响[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.
- [2] 邓通武. C、Mn、Cr 对中碳 MnB 钢 228 节距履带淬透性的影响[J]. 特殊钢, 2012, 33(6): 54.
- [3] Modi O P, Mondal D P and Prasad B K, et al. Abrasive Wear Behaviour of a High Carbon Steels: Effects of Microstructure and Experimental Parameters and Correlation with Mechanical Properties[J]. Materials Science and Engineering, 2003, A343: 235-242.
- [4] Sevim I and Eryurek I. Effect of Fracture Toughness on Abrasive Wear Resistance of Steels[J]. Materials and Design, 2006, 27(10): 911-919.
- [5] 朱乃平, 张彦生, 师昌绪. Fe-Mn-Al-Cr 系奥氏体钢的 V4C3 强化[J]. 金属学报, 1988, 24: SA22-SA28.
- [6] 程瑞国, 曾建辉, 李子海, 等. 钒钛耐磨铸钢生产工艺与性能研究[J]. 现代铸铁, 2012, 90(2): 90-92.

邓通武(1978-), 男, 硕士(2018 年重庆大学), 高级工程师, 2002 年东北大学(本科)毕业, 优特钢及棒线材新产品开发。  
E-mail: dengtw@sina.com

收稿日期: 2019-04-25