

高速钢及半高速钢轧辊

刘德富¹ 尹钟大²

(1. 北满特殊钢集团有限责任公司, 齐齐哈尔 161041; 2. 哈尔滨工业大学材料学院, 哈尔滨 150001)

摘 要 评述了高速钢及半高速钢轧辊的发展过程、性能特点、显微组织、制造工艺及发展趋势。高速钢及半高速钢轧辊多制成铸造复合辊, 已在带钢热轧机上得到广泛应用, 目前已开始用于带钢冷轧机, 具有较高的耐磨性和热稳定性, 淬硬层深, 使用寿命长, 可减少换辊次数, 提高轧机效率。

关键词 高速钢 半高速钢 轧辊

中图分类号 TG335 11 **文献标识码** A

HIGH SPEED AND SEMI HIGH SPEED STEEL ROLLS

L U Defu¹, Y N Zhongda²

(1. Beiman Special Steel Co., Ltd., Qiqihar 161041; 2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

ABSTRACT The development of the HSS (high speed steel) and SHSS (semi high speed steel) rolls, their properties, microstructure, manufacturing process and their future developments are discussed. Most of the HSS and SHSS rolls are cast composite rolls. They are used widely on the hot strip mills. Recently they are used on cold strip mills too. They have good wearability, deep hardened layer and long service life. Thus the number of rolls change can be reduced and the efficiency of the mill can be increased by use of them.

KEY WORDS high speed steel, semi high speed steel, roller

1 高速钢轧辊的性能特点

高速钢轧辊具有如下优点:

- (1) 是除碳化钨以外耐磨性最好的合金;
- (2) 可控制其氧化特性, 适应每台轧机的应用;
- (3) 热强性好;
- (4) 轧制的产品表面非常光滑;
- (5) 轧役周期可延长很多。

1996 年交付使用的高速钢轧辊应用在 F1~ F3 机架有 85 % ~ 100 %, 在 F4~ F6 机架有 40 % ~ 50 %, 最后机架小于 10 %。可以说这是第一代高速钢轧辊, 都是铸造的复合轧辊。当时这些轧辊在使用中出现一些问题, 如裂纹、剥落等。

到 1999 年, 高速钢轧辊在带钢热轧中的应用已很普遍, 高速钢轧辊已发展到第三代, 在第一代轧辊中所存在的问题已经解决^[1], 尤其值得注意的是高速钢轧辊已开始用作带钢冷轧机工作辊。

高速钢轧辊具有较高的耐磨性和热稳定性, 在

高温下仍能保持较高的硬度, 具有较深的淬硬层, 在工作层范围内从轧辊表面向心部方向 50 mm 的深度处硬度降小于 3HS^[1]。在 600 °C 的温度下硬度可保持 HRC63。由于显微组织的优越性, 使得 HSS 热轧工作辊的耐磨性比常规热轧工作辊提高 3~ 5 倍。高速钢轧辊在回火马氏体或贝氏体基体上分布着弥散的碳化物。这种轧辊的韧性和保持表面粗糙度的能力很好。在带钢热轧机的成品机架上使用 HSS 轧辊大大降低了磨损, 减少了换辊次数, 板形和平整度更好。事实表明, 从维护和使用性能看, 这种轧辊代表了带钢热轧机工作辊的主要发展方向。

2 半高速钢 (SHSS) 轧辊的性能特点

高速钢作为切削工具或作为冷作模具使用, 由于工作条件恶劣, 对钢的耐磨性和红硬性要求很高。为保证较高的耐磨性和红硬性, 高速钢中的合金元素含量很高。为节约合金元素而尝试减少高速钢中的合金元素含量, 并使其仍然保持足够的二次硬化效果, 在大致相同的热处理工艺下, 可以得到与高速钢相同的硬度, 从而可以代替高速钢使用。

作为轧辊材料的半高速钢的化学成分与传统的半高速钢不同。文献[2]对作为热轧工作辊的材料按

收到修改稿日期: 2003-06-05

联系人: 刘德富, 高级工程师 (教授级),

XU Dexiang009@sina.com

所含 C、Mn、W、V 等合金元素的总量进行如下分类:

(1) 热作模具钢 (HWDs): 6% ~ 8%, 用于粗轧机架;

(2) 半高速钢 (SHSS): 8% ~ 15%, 用于成品机架;

(3) 高速钢 (HSS): > 15%, 用于成品机架。

表 1 给出了各类钢合金元素含量的大致范围。

3 高速钢及半高速钢轧辊的显微组织及其对性能的影响

有报导^[3]对高速钢 (HSS)、高 Cr 铸铁及加 Ni 麻口铸铁热轧工作辊的显微组织及热疲劳性能进行对比研究。选用钢种化学成分如表 2。试验所用的试料都取自离心铸造法生产的复合轧辊的表层。HSS 轧辊和高 Cr 铸铁轧辊经 950~1050 加热, 空冷淬火后, 于 450~600 回火 2 次。加 Ni 麻口铸铁轧辊未经淬火处理, 只是在 450~600 回火 1 次。在显微组织观察中选用成分为: 3 g K₃Fe(CN)₆+10 g NaOH+100 mL H₂O 腐蚀剂。经其腐蚀可使试

样中各种类型的碳化物显示不同的颜色和对比度。

表 1 各类钢的合金元素含量范围^[2]

Table 1 Alloy classification %						
钢种	C	Cr	Mn	V	Co	W
HWDs	0.5~1.0	4.0~6.0	0.5~1.5	< 0.50	< 0.50	< 0.50
SHSS	0.5~1.0	4.0~8.0	1.5~3.0	0.5~1.5	< 0.50	< 0.50
HSS	1.0~1.7	5.0~10.0	2.0~5.0	1.0~4.0	< 5.0	< 5.0

结果表明高速钢轧辊中具有 3 种类型的碳化物, M₇C₃ (灰色), MC (白色), M₆C (黑色); 高 Cr 铸铁轧辊中的碳化物为 M₇C₃; 含 Ni 麻口铸铁中碳化物为 Fe₃C。

电镜观察表明: HSS、高 Cr 铸铁试样基体为回火马氏体以及细小的二次碳化物。但高 Cr 铸铁中粗大的二次碳化物较 HSS 中多。加 Ni 麻口铸铁中为回火马氏体与少量二次碳化物。3 种轧辊中各种类型碳化物的体积分数、硬度及基体硬度列于表 3。

表 2 试验轧辊材料的化学成分

Table 2 Chemical composition of the HSS, HiCr, and Ni-grain rolls %

轧辊	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	V
HSS	2.0	1.00	1.00	5.00	1.00	2.50	0.040	0.020	4.0
高 Cr 铸铁	2.8	1.00	1.07	15.60	1.28	1.27	0.034	0.017	-
加 Ni 麻口铸铁	3.2	0.83	0.68	1.93	3.60	0.32	0.048	0.016	-

表 3 三种轧辊中碳化物体积分数、碳化物及基体硬度

Table 3 Volume fraction and microvickers hardness of carbides and matrix in three rolls

轧 辊	碳化物		基 体	
	类型及体积分数	显微硬度 VHN	显微组织	显微硬度 VHN
HSS	MC, 5 %	3054	回火马氏体+ 二次碳化物	646
	M ₇ C ₃ , 51 %	1698		
	M ₆ C, 1.5 %	1478		
高 Cr 铸铁	M ₇ C ₃ , 26.5 %	1624	回火马氏体+ 二次碳化物	513
加 Ni 麻口铸铁	Fe ₃ C, 37 %	1040	回火马氏体	525
	石墨, 4.3 %	-		

试验结果表明 HSS 轧辊具有最高硬度和强度, 所含碳化物体积分数最低, 热疲劳寿命最长。文献 [4] 报导一种用于带钢热轧的高碳高速钢复合轧辊, 用连续铸造法制成, 其化学成分 (%) 为 C 1.5~3.5, Cr 2~7, Mn < 9, W < 20, V 3~15。这种轧辊中的碳化物主要为 MC (HV 3000)、M₇C₃ (HV 2500)、M₆C (HV 2000)。其耐磨性比铸铁轧辊和高铬铸铁轧辊好, 而断裂韧性 K_{IC} 大致相同。钢中所含各种碳

化物的硬度不同, 对钢的耐磨性的贡献也不同。

表 4 给出了几种轧辊材料中碳化物的硬度及形貌特点 (铸态)^[5]。高碳高速钢中含有细小的先共晶 MC 型碳化物, 主要是 VC, 共晶 M₆C 碳化物, 主要由 Fe、C、Mn 和 W 等形成, 分布于细小的晶界处, 基体为回火马氏体和贝氏体。

高碳高速钢轧辊用于带钢热轧机成品机架, 使用性能与传统的高合金铸铁轧辊比较有如下优点:

- (1) 耐磨性至少高出 5 倍;
- (2) 保持表面粗糙度的能力至少高 4 倍;
- (3) 强度至少是 2 倍。

表 4 碳化物的物理性能

Table 4 Physical properties of carbides			
碳化物类型	硬度 HV	显微组织形态	轧辊材料
Fe ₃ C	840	网状	高合金铸铁
Cr ₇ C ₃	2 100	网状	高 Cr 铸铁
VC	2 800	颗粒	高速工具钢
M ₆ C	1 500~ 1 800	片状/细小	高速工具钢

高速钢轧辊中通常含 V，以增强耐磨性，Cr 增强抗氧化性及硬度，钼和钨形成碳化物增强红硬性，有时加入 Co 以改善高温硬度。高速钢轧辊的性能

表 5 HSS 轧辊的化学成分

Table 5 Chemical composition of HSS rolls								%
	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Co
URMAC	0.9~ 1.7	0.7~ 1.0	0.9~ 1.0	5~ 15	2~ 5	2~ 8	4~ 8	0~ 8
URVAC	1.7~ 2.2	0.7~ 1.0	0.9~ 1.0	3~ 15	2~ 5	2~ 8	4~ 8	0~ 5

线膨胀系数等物理参数。实践证明高速钢轧辊的应用是成功的，降低了轧制成本，提高了产品质量。

对半高速钢轧辊组织及性能的研究报导很少。文献 [8] 报导了对一种半高速钢冷轧辊材料的试验研究。钢的化学成分如表 6。这是目前所见到的报导中合金元素含量最低的半高速钢。用 100 kg 真空感应炉熔炼，于 1 100~ 900 间锻造成 ϕ 80 mm 圆棒，经球化退火后进行各项试验。

表 6 试验用钢的化学成分

Table 6 Chemical composition of the steel tested								%
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	
0.92	0.78	0.36	0.014	0.003	4.92	2.01	1.01	

试验钢于 1 020 淬火后的回火曲线如图 1，不论是经过冷处理还是未经冷处理的试样都具有二次硬化的特点。二次硬化的峰值硬度对应于残余奥氏体体积分数的急剧减少。未经冷处理的试样二次硬化的峰值硬度为 HV 740，高于经过冷处理的试样的 HV 720。经过冷处理的试样，其中的残余奥氏体量减少，因而在 450 回火时就达到了二次硬化的硬度峰值，而未经冷处理的试样要在 500 回火才能达到硬度峰值。

依赖于所含碳化物的类型及硬度，这些碳化物可能是凝固过程中形成的一次碳化物，也可能是回火过程中析出的二次碳化物。绝大多数一次碳化物主要分布于凝固过程中形成的晶界处，导致较低的断裂韧性和热疲劳性能。

文献 [6] 报导了对轧辊用高碳高速钢 K_{rc} 及力学性能的研究。结果表明 K_{rc} 值、抗弯强度随碳含量增加呈直线下降，随钒含量增加而增大。

对碳化物含量、形态及精细结构的研究表明，在铸造状态下， $M_{23}C_6$ 型碳化物呈板条状， M_6C 型碳化物呈圆棒状， $M_{7-8}C_3$ 型碳化物呈大块菊花状。

FORCAST 在开始试制高速钢轧辊 9 年之后，推出其第 4 代高速钢轧辊^[7]，化学成分如表 5。

测定了钢的热扩散系数、导热系数、弹性模量、

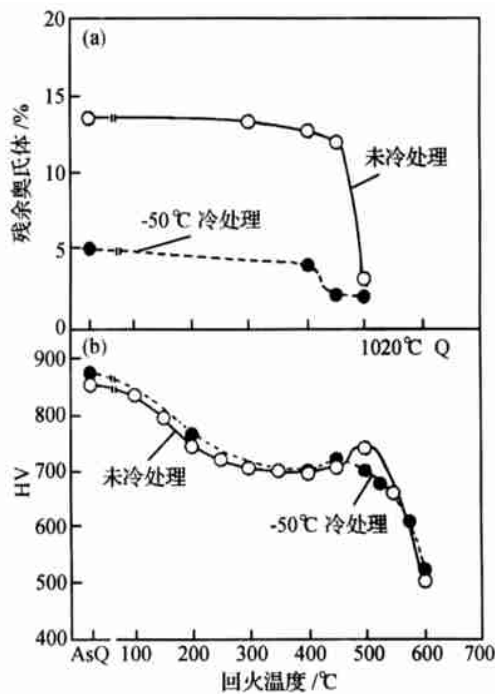


图 1 回火温度对硬度和残余奥氏体量的影响
Fig. 1 Effect of tempering temperature on hardness and volume % of \mathcal{A} .

二次硬化的效果来自 2 方面：一是回火过程中析出的碳化物粒子；二是回火过程中使残余奥氏体转变为马氏体。回火过程中析出的弥散分布的 Cr、Mo、V 碳化物粒子可增强钢的耐磨性。回火后

试样硬度依赖于各相硬度及体积分数, 认为遵从混合定律, 即:

$$HV = af(FM) + bf(TM) + cf(MR)$$

其中 a 、 b 、 c 分别表示各相的硬度, $f(FM)$ 、 $f(TM)$ 、 $f(MR)$ 分别表示回火中新生成的马氏体、回火马氏体和残余奥氏体的体积分数。

4 高速钢及半高速钢轧辊的制造工艺

高速钢轧辊多采用复合式, 即轧辊的工作层用高速钢制造, 芯部用锻钢、铸钢、灰铸铁或球墨铸铁制造, 以一定的冶金方法把工作层和芯部结合起来制成轧辊^[1]。

围绕着外层与芯部结合的问题, 高速钢轧辊的制造技术不断发展。早期高速钢复合轧辊主要用离心铸造法制造, 后来为克服离心浇铸所产生的偏析, 又出现了连续浇铸复合 (CPC) 法、电渣熔铸复合 (ESRC) 法、热等静压 (HIP) 法、喷射 (O spray) 法^[2]。

高速钢复合轧辊表面工作层热处理需加热到较高的温度, 如 1150℃, 这样高的温度对芯部材料的组织和性能不利, 甚至会使芯部熔化。这就需要采用适当的热处理工艺, 以兼顾工作层和芯部的性能。同时, 人们对芯部材料的选择进行了大量研究, 以保证其在工作层相同的高温下热处理仍能获得较好的性能。解决这一问题还有另一条途径, 采用差温炉热处理。差温炉的加热速度很快, 当把轧辊外部工作层加热到 1100℃ 以上时, 芯部仍保持较低一些的温度, 这就使得表面高速钢工作层和芯部材料都达到比较适合的淬火温度。此时进行淬火处理, 可使表面层和芯部都获得理想的组织和性能。

半高速钢轧辊最初也是制成复合轧辊, 到 1992 年日本日立公司已生产 150 支以上的半高速钢复合轧辊, 并在冷轧机上使用, 轧辊直径为 250~630 mm, 在实际轧制中取得了良好效果。与常规的含 5%Cr 和 10%Cr 的整体锻钢轧辊相比较磨损减少, 疲劳层浅, 轧辊消耗显著减少, 生产相同数量的冷轧带钢, 轧辊消耗仅为 5%Cr 钢轧辊的 21%。

近年来, 制造整体锻造高速钢和半高速钢轧辊的初步尝试已有报导^[2], 采用整体锻造法试制的半高速钢和高速钢轧辊用作带钢热轧机工作辊。对轧辊的质量要求如下。

(1) 辊身外层: 均匀弥散分布的高合金碳化物马氏体基体、细晶粒组织、能满足要求的高温性能;

(2) 过渡层: 组织和性能过渡平稳、避免急剧变化;

(3) 轧辊芯部: 碳化物不要连续分布、避免宏观偏析、力学性能满足要求。

(4) 辊颈: 经适当热处理得到要求的力学性能。

采用固定感应加热淬火, 选择适当的加热参数, 使表层奥氏体化并淬火得到较高的硬度, 使芯部仍保持较好的韧性。然后经高温回火, 表层得到高硬度, 并且轧辊中残余应力很小。

对 $\phi 70$ mm 的 SHSS 钢轧辊的横向低倍组织分析表明, 整个截面上组织均匀, 没有偏析或内部缺陷。外层组织为细小的马氏体基体上弥散分布着合金碳化物, 过渡区存在贝氏体, 芯部仍保持轧辊预备热处理后的组织。1997 年将这种半高速钢轧辊用于带钢热轧机的成品机架 F1~F5, 轧辊规格为 $\phi 70$ mm \times 1700 mm \times 4572 mm, 平均毫米轧制量为 6000~8500 t/mm。从 F1 机架换下来的半高速钢轧辊表面粗糙度为 20~30 RA, 而相比之下, 铸造轧辊则为 80~100 RA。

5 高速钢及半高速钢轧辊的应用

铸造高速钢轧辊主要用于带钢热轧机工作辊。加拿大 Dofasco 公司从 1992 年起在带钢热轧机上使用高速钢轧辊, 当时从 4 家轧辊制造厂共购进 24 支 HSS 轧辊。在此后的 6 年内 Dofasco 共消耗 HSS 轧辊 200 多支。到 1999 年时 F1~F4 机架全部采用 HSS 轧辊, F5 机架 40% 采用 HSS 轧辊。使用的轧辊购自不同的制造厂, 制造方法也不相同。对其性能进行比较认为, 连续铸造高速钢轧辊性能优于离心铸造高速钢轧辊。使用高速钢轧辊后, 轧辊消耗明显减少, 轧机工作效率提高, 带钢产品表面质量明显改善。

美国 Inland 公司在 2032 mm 带钢热轧机上使用高速钢轧辊, 成功地减少了换辊耽搁的时间, 促进了轧机尽快达到最初设计的生产目标。在成品机架的前几架可以取代高 Cr 铸铁轧辊。轧辊消耗降低, 费用消耗比使用普通轧辊大为减少。

近年来国内也试制了高速钢复合轧辊^[9], 采用合金球墨铸铁或铸钢为芯部材料, 用离心铸造法制成高速钢复合轧辊, 用于热轧窄带钢轧机成品机架, 综合使用寿命比原来使用的高镍铬铝铸铁轧辊提高 10 倍以上。

6 结语

半高速钢轧辊的制造和应用具有 2 方面特点, 一是主要制成铸造的复合轧辊, 二是主要应用于带钢热轧机工作辊。近年来高速钢轧辊开始用于带钢冷轧, 整体锻造高速钢、半高速钢轧辊的研究开发

工作刚刚开始, 所试制的轧辊于 1997 年用于带钢热轧机工作辊, 取得了较好的效果。整体锻造高速钢及半高速钢冷轧工作辊的研制必将是下一个发展目标, 在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 符寒光 高速钢轧辊研究的现状及展望 钢铁, 2000, 35 (5): 67~ 73
- 2 Ott G A. Development of Forged Steel Roll Metallurgy for Hot Strip Mills Ironmaking and Steelmaking, 2000, 27 (1): 11~ 14
- 3 SUNGHAK LEE, DO HYUNG KM, JAEHWA RYU, *et al.* Correlation of Microstructure and Thermal Fatigue Property of Three Work Rolls METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A, 1997, 28A (12): 2595~ 2608
- 4 Yoshikazu SANO, Toshiyuki HATTORI, Micho HAGA. Characteristics of High-carbon High Speed Steel Rolls for Hot Strip Mill ISIJ International, 1992, 32 (11): 1194~ 1201.
- 5 Hashimoto M, Kawakami T, Kutahashi R. Characteristics and Application of High-speed Tool Steel Rolls in Hot Strip Rolling 36th MW SP CONF. Proc., ISS-AME, Vol 34, 1995: 55~ 64
- 6 周 宏, 王金国, 贾树盛, 等 轧辊用高碳高速钢系合金的 K_{IC} 及力学性能 钢铁, 1997, 32 (8): 59~ 62
- 7 CALLAUD J C, DELAITER L. Metallurgy of HSS Roll Materials 36th MW SP CONF. PROC., ISS-AME, Vol 34, 1995: 27~ 31.
- 8 Tatsumi KMURA, Masatake ISHII, Keniti AMANO, *et al.* Secondary Hardening Characteristics and Those Effects on the Wear and Thermal Shock Resistance of 5 % Cr-Mo-V Steel Roll for Cold Strip Mill ISIJ International, 1992, 32 (11): 1224~ 1231.
- 9 宫开令, 董雅军, 高春利 高速钢复合轧辊的研制及生产 钢铁, 1998, 33 (3): 67~ 71.

(上接第 30 页)

- 2 Josef Andofer, Dietmar Auzinger, Gottfried Hribernik, *et al.* Modelling of Austenite Decomposition of Hot-rolled Plain Carbon Steels Under Complex Cooling Conditions. Steel Research, 2000, 71 (4): 118~ 123.
- 3 ZHAO Hui, LU Shouli, DOU Xiaofeng, *et al.* Model of Grain Growth in Low Carbon Steel After Hot Rolling. IRON AND STEEL, 1999, 34 (2): 51~ 53. (赵 辉, 鹿守理, 窦晓峰, 等. 低碳钢轧后冷却过程中的晶粒长大模型. 钢铁, 1999, 34 (2): 51~ 53.)
- 4 SUN C G, HAN H N, LEE J K, *et al.* A Finite Element Model for the Prediction of Thermal and Metallurgical Behavior of Strip on Run-Out-Table in Hot Rolling. ISIJ International, 2002, 42 (4): 392~ 400.
- 5 B. . . Effective System of Forced Cooling Hot-rolling Strip Coil. FOREIGN IRON AND STEEL, 1990, (3): 53~ 57. (B. . . 强制快速冷却热轧带钢卷的有效制度. 国外钢铁, 1990, (3): 53~ 57.)
- 6 M. A A. Influence of Cool Rate to Property Along Strip Length. FOREIGN IRON AND STEEL, 1990, (2): 54~ 59. (M. A A. 冷却温度对带钢长度方向质量的影响. 国外钢铁, 1990, (2): 54~ 59.)
- 7 Monsalve A, Celentano D. Finite Element Analysis and Experimental Validation of Microstructure Evolution During Coiling of Low Steel Sheet. Ironmaking and Steelmaking, 1999, 26 (6): 449~ 456.
- 8 Zhang Y T, Li D Z, Li Y Y. Modeling of Ferrite Grain Growth of Low Carbon Steels During Hot Rolling. ACTA METALLURGICA SINICA (ENGLISH LETTERS), 2002, 15 (3): 267~ 271.
- 9 L U Zhenyu, WANG Zhaodong, WANG Guodong, *et al.* Quantitative Analysis on Heterogeneous Microstructure Distribution Along Strip Width During Hot-Strip Rolling. IRON AND STEEL, 1994, 29 (9): 34~ 38. (刘振宇, 王昭东, 王国栋, 等. 热轧板带宽向组织不均匀的定量分析. 钢铁, 1994, 29 (9): 34~ 38.)