

专论与综述

# 钢管及冷弯型钢用高性能铸造轧辊的研制开发

袁厚之, 刘行一

(山东省四方技术开发有限公司, 山东 济南 250101)

**摘要:**以高碳、高铬、高镍、高钨为特征,采用多元合金变质强化,通过铸造、热处理和机加工,山东省四方技术开发有限公司开发出了高性能高铬辊。材料基体组织为奥氏体、贝氏体或马氏体,碳化物主要是 $M_7C_3$ ,含量20%左右,显微硬度可达HM 1 800,并呈不连续的条块状、颗粒状和菊花状。抗拉强度540 MPa,冲击韧性7.5 J/cm<sup>2</sup>,距表面120 mm处硬度达HRC 59.3。用于矫直辊及焊管轧辊,材料利用率达77.5%以上。同时指出,轧辊制造的发展趋势是高性能、高合金化、以铸代锻及双金属结构等。

**关键词:**高铬合金轧辊;铸造轧辊;钢管;冷弯型钢;HFW/ERW焊管

中图分类号:TG333.17

文献标识码:A

文章编号:1004-4620(2012)03-0001-03

## 1 前言

近年来,我国大量引进、新建先进的钢管生产机组,拥有世界上所有先进的轧管机机型和大型焊管机组,其中不乏世界首创<sup>[1]</sup>。我国已成为世界上最大的钢管生产国和消费国,钢管轧辊消耗量世界最大。先进的钢管生产机组和高级别合金钢管的生产对轧辊提出了更高的要求。

轧辊材质设计是机组设计最基本的部分之一,其中钢管矫直辊、HFW/ERW焊管和冷弯型钢轧辊传统使用材料均为合金锻钢。美国使用D2、H13;德国使用X155CrVMo121、X40CrMoV5-1;日本使用SKD11、SKD61;中国使用Cr12MoV、3Cr2W8V、Cr12、9Cr2Mo、GCr15。

D2、X155CrVMo121、SKD11与Cr12MoV基本相似,为高碳、高铬冷作模具钢。该钢种冶炼、锻造和热处理要求高、难度大,处理不好易在使用中出现问題。D2、X155CrVMo121、SKD11锻钢轧辊在使用中,尤其是激冷激热工况下,均出现过辊面开裂、辊轴松动等现象。

国内Cr12MoV锻钢轧辊仅局限于少量的小规格焊管轧辊采用,多数机组仍沿用Cr12、3Cr2W8V、9Cr2Mo、GCr15等低档次锻钢轧辊,耐磨性能差,不仅使用寿命为上述进口锻钢轧辊的1/2~1/3,而且有时影响生产。如国内最大的不锈钢焊管生产厂引进机组,使用传统国产锻钢轧辊,易“粘钢”,易“擦伤”钢管表面,无法正常生产。又如国内最大的

排辊成型500 mm×500 mm×20 mm方矩管机组,轧辊采用GCr15材质,使用仅1个多月轧辊表面就磨损出多道凹陷,划伤钢管。

钢管矫直辊、HFW/ERW焊管和冷弯型钢轧辊属异型轧辊,具有形状复杂、规格品种繁多而批量很少的特征,尤其是HFW/ERW焊管和冷弯型钢轧辊基本上1张图纸只生产1、2件产品。成品大的可达8~10 t/件,小的只有5~10 kg/件,使用锻造工具钢制造很难形成模锻,内孔一般也无法锻出。一般轧辊材料利用率50%左右,孔型深的轧辊材料利用率低于50%,甚至只有40%。D2、X155CrVMo121、SKD11、Cr12MoV等材料可锻温区窄、锻造难度大,往往需要多次加温。因此材料利用率低、能耗高。

该类轧辊形状复杂、壁厚差异大,性能要求高,因此热处理难度大。在使用中还要进行多次修复重用,因此除要求具有高强度、高硬度、高耐磨性和抗冷热疲劳性外,还要有足够厚的硬度一致的工作层,即对材料的淬透性能要求高。

近几年板带辊研究多、文章多、专利多、进步大;钢管及冷弯型钢轧辊研究少、文章少、专利少。1985~2009年中国拥有轧辊方面的专利共3 425件,主要是板带辊,按拥有数量分前10名中有5家外国公司;异型轧辊(主要指钢管及冷弯型钢轧辊)专利只有161件,仅占轧辊专利总数的4.7%。

2009年实施的中国国家标准《铸铁轧辊》和《铸钢轧辊》,都只包括“板、带、热轧型钢”轧辊,不包括钢管及冷弯型钢轧辊。

山东省四方技术开发有限公司研制并生产的高铬铸造轧辊(简称SDSF高铬辊),在轧辊性能、使用寿命、制造方法和制造成本等方面都具有更大的优势,节能节材效果显著。

SDSF新型轧辊在国内已大面积推广应用,涵盖全部无缝钢管骨干企业和多家大型HFW/ERW焊管

收稿日期:2012-03-26

**作者简介:**袁厚之,山东省四方技术开发有限公司法人代表兼总经理,国务院政府特殊津贴专家、中国金属学会轧辊学术委员会委员、中国金属学会钢管学术委员会委员、2009年版国家标准《铸钢轧辊》和《铸铁轧辊》评审专家、中国钢协冷弯型钢协会专家委员会轧辊专家、山东省第一批工程技术应用研究员、山东省专业技术拔尖人才。从事冶金设备用耐磨、耐热金属新材料、新工艺、新产品的研究与开发,多次获国家、省部级科技奖,获多项发明专利。

及冷弯型钢企业,无缝钢管矫直辊国内应用推广面积达80%,目前已出口亚洲、欧洲、非洲等多个国家。此项技术有完全自主知识产权,获2项发明专利和1项实用新型专利;“钢管及冷弯型钢用新型轧辊的研制与应用”项目已获得中国冶金科学技术奖二等奖、山东省科技进步二等奖、济南市技术发明一等奖。为创造中国品牌的高档次轧辊打下了良好基础。

## 2 新型轧辊研发原则

研发轧辊关键在于使轧辊适合使用的工作环境,符合工作环境的要求并尽可能地达到理想状态;同时也不可过分追求材料的高性能而使制作成本太高,否则很难推广;工艺过程尽可能简单易行,而且应充分考虑节能、节材。依此原则制定出新型铸造高铬轧辊的设计方案。

### 2.1 轧辊材质

近10 a轧辊技术发展迅速,工作层材料向高合金、高耐磨性等方向发展。高碳高速钢轧辊是问世时间短、发展速度快、前景广阔的热轧辊材料,但由于制造方法、装备等因素限制,不适用于本研究。

若使用D2、X155CrVMo121、SKD11或Cr12MoV材料,采取铸造成型,由于组织形态比锻造要差,无法避免偏析、碳化物不均匀等缺陷,其使用性能比锻造轧辊有一定差距,无法满足需求。

高铬铸铁轧辊在20世纪90年代以前已广泛应用于板带热轧机上,但由于在抗热裂性、耐磨性等方面也有一定的局限,近年来受到高速钢轧辊的严重挑战,在热轧机上的使用数量不断减少<sup>[2]</sup>。照搬板带高铬轧辊也无法满足需求。

综合各种因素,材质设计确定采用新型高铬材料,以提高性能,拓宽应用领域。

### 2.2 制造工艺设计

成型工艺设计确定为铸造,针对轧辊形状复杂、规格多、批量小和高铬材料铸造性能差的问题,探索并开发了铸造新工艺,实现了复杂形状轧辊的优质成型;同时开发了热处理和机械加工工艺。

## 3 高铬合金轧辊的组织与性能

### 3.1 化学成分

采用新型高铬材料,具有高碳、高铬、高镍、高钼的特征。这一成分体系既有别于国内外锻钢轧辊成分,又有别于板带高铬轧辊成分。

### 3.2 金相组织

SDSF高铬辊材料采用多元合金变质强化,细化了晶粒,改善了碳化物类型、形态和分布。碳化物主要是 $M_7C_3$ ,显微硬度可达HM 1 800,并呈不连续

的条块状、颗粒状和菊花状,碳化物含量20%左右。基体为奥氏体、贝氏体或马氏体,硬度和韧性结合较好,宏观硬度可达HRC 50~65。

D2、X155CrVMo121、SKD11等传统轧辊材料基体为马氏体, $M_7C_3$ 碳化物含量15%左右。

SDSF高铬辊材料目前已成为国内钢管矫直辊的首选材质,在国内外大型HFW/ERW焊管及冷弯型钢轧辊材质选定方面也得到了充分认可。

### 3.3 SDSF高铬辊性能

#### 3.3.1 力学性能

通过实物取样,SDSF高铬辊的力学性能(均为径向取样)见表1,并与同类轧辊的性能进行对比。

表1 SDSF高铬辊与传统材料同类轧辊硬度(HRC)及力学性能对比

牌号名称	状态	距表面不同距离处的硬度				$R_m$ /MPa	$a_k$ /( $J \cdot cm^{-2}$ )
		表面	30 mm	60 mm	120 mm		
D2	淬火、回火	59.5	59.6	59.9	59.8	733	3.1
X155CrVMo121	淬火、回火	58.2	58.8	57.9	57.0	711	3.0
SKD11	淬火、回火	57.7	57.3	57.1	54.6	750	3.5
SDSF高铬辊	去应力回火	58.8	58.4	58.6	58.0	500	13.5
	淬火、回火	60.1	59.9	59.5	59.3	540	7.5

#### 3.3.2 现场使用耐磨性能

现场使用耐磨性能均为同台设备、轧制相同钢管的统计结果。

1)用于热处理线矫直机上,轧辊半径方向磨损1 mm的热矫直量:SDSF高铬辊为1.2万t,X155CrVMo121锻钢辊矫直量为1.0万t。

2)用于 $\Phi 250$  MPM机组矫直机上,轧辊半径方向磨损1 mm的冷矫直量:SDSF高铬辊为3.82万支,X165CrMoV12KU锻钢辊及9Cr2Mo锻钢辊矫直量均为1.8万支。

#### 3.3.3 实验室耐磨性能

实验室耐磨性能试验材质、状态及编号如下: X155CrVMo121, 淬火、回火, A; D2, 淬火、回火, B; SKD11, 淬火、回火, C; SDSF高铬辊, 去应力回火, D; SDSF高铬辊, 淬火、回火, E。试验材料的体积磨损量结果见图1(3次试验结果的平均值)。

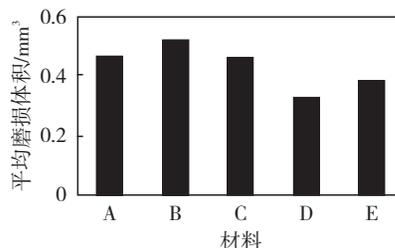


图1 试验材料平均体积磨损量

### 3.4 使用后SDSF轧辊和钢材表面质量

SDSF高铬辊在使用过程中越用越光滑,轧制的钢材表面也光亮。

## 4 SDSF 高铬辊制造工艺

SDSF 高铬辊主要制造工艺 1:原料→冶炼→铸造→毛坯→回火→粗加工→精加工。

SDSF 高铬辊主要制造工艺 2:原料→冶炼→铸造→毛坯→退火→粗加工→淬火、回火→精加工。

国内外同类产品锻造轧辊制造主要工艺:原料→冶炼→钢锭→锻造→辊坯→退火→粗加工→淬火、回火→精加工。

对比可知,SDSF 高铬辊制造工艺简单、节能。

## 5 节能节材分析

以国内一般较好水平中频熔炼炉冶炼、锻造、热处理和机加工计算吨钢电耗,并按我国目前发电能耗水平折算成每吨轧辊成品的标准煤消耗。

### 5.1 用作矫直辊及孔型浅的焊管类轧辊

以世界上最大的钢管矫直机轧辊为例,轧辊成品单重 4.584 t,结构见图 2。SDSF 高铬辊制造工艺 1 合计每吨成品综合能耗 879.4 kg 标准煤,材料利用率 87.5%;而国内外同类产品锻造轧辊制造工艺合计每吨成品综合能耗为 2 595 kg 标准煤,材料利用率 54.1%。SDSF 高铬辊每吨成品能耗仅为国内外同类产品锻造轧辊的 33.9%,材料利用率提高 33.4%。制造每吨成品轧辊可节约 704 kg 金属材料。

### 5.2 用作孔型深的焊管类轧辊

以世界上最大的  $\Phi 660$  HFW/ERW 焊管机组定径轧辊为例,轧辊成品单重 1.258 t,结构见图 3。SDSF 高铬辊制造工艺 2 合计每吨成品综合能耗 1 246 kg 标准煤,材料利用率 77.5%;而国内外同类产品锻造轧辊制造工艺合计每吨成品综合能耗为 4 407 kg 标准煤,材料利用率 35.5%。SDSF 高铬辊每吨成品能耗仅为国内外同类产品锻造轧辊的 28.3%,材料利用率提高 42%。制造每吨成品轧辊可节约 1 527 kg 金属材料。

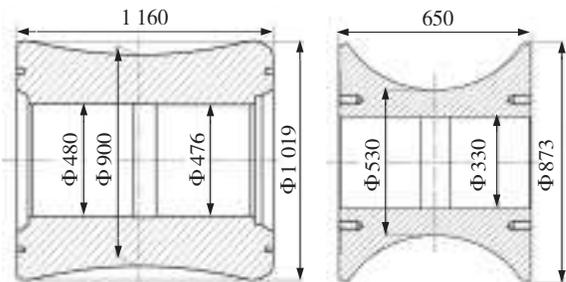


图2 钢管矫直机轧辊 图3 焊管机组定径轧辊

## 6 轧辊制造的发展趋势探讨

### 6.1 高性能、高合金化、以铸代锻

轧辊是轧钢生产中主要消耗备件之一,轧辊质

量不仅关系到轧钢生产成本和轧机作业率,而且在很大程度上影响轧材质量。随着轧钢技术的发展及轧机速度和自动化程度的不断提高,服役条件日趋苛刻,对轧辊的质量提出了更高的要求。改变材质是提高轧辊质量的重要措施,明显趋势是广泛使用合金元素且逐渐提高合金化程度,如 20 世纪 70 年代开始使用的高铬轧辊,80 年代末开始使用的高速钢轧辊。由于轧辊材质的高合金化,给锻造带来了很大困难。

新型的铸造工艺、装备逐渐得到开发并相继获得成功。进入 20 世纪 70 年代,世界各国先后掌握了轧辊离心铸造技术,自 1980 年以来国内众多单位成功地开发出离心铸造轧辊,替代进口并部分出口。离心复合铸造轧辊外层为高合金铸铁或铸钢,硬度高、耐磨、耐热裂性能好。

目前国内已成功生产离心复合铸造热轧板带支撑辊,每支辊重 80 多 t,取得良好使用效果<sup>[2]</sup>。已成功生产离心复合铸造冷轧板带工作轧辊,也取得了良好使用效果<sup>[3-4]</sup>。

高速钢轧辊在 20 世纪 80 年代以前采用锻造法生产,因合金含量高,锻造和热处理难度大,易造成组织不均匀、偏析等缺陷影响性能,因此锻造高速钢轧辊推广应用受限。

近年来铸造高速钢轧辊获得成功且发展较快,早期采用离心铸造法生产,随后相继开发了连续浇注外层成型法(CPC)、电渣重熔法(ESR)、液态金属电渣熔接法(ESSLM,在 CPC 法基础上加电渣净化)、喷射铸造法(Osprey)、热等静压法(HIP)<sup>[2]</sup>,使得高速钢轧辊得到快速发展。但这些方法多应用于圆柱形轧辊的生产。SDSF 研发的新型铸造高铬合金钢管矫直辊、HFW/ERW 焊管及冷弯型钢轧辊,使用性能和使用寿命达到国际先进锻造轧辊水平,取得了节能、节材的良好效果。

总之,轧辊的制造向高性能、高合金化发展,开展各种新型铸造方式及装备的研发,以铸造取代锻造是一个趋势。目前铸造高性能、高合金化轧辊已广泛应用于板、管、型、棒材的轧制,取代锻造轧辊,提高了轧辊的使用性能和寿命,取得了节能、节材的良好效果。

### 6.2 双金属复合和单金属结构

无论采用双金属复合还是采用单金属方式,都必须依据轧辊的形状、工作状态、要求的工作层厚度来决定,不能刻意追求复合方式。双金属复合的目的是节省贵重金属和增加轧辊的整体强度及韧性。双金属复合也有若干种方式,究竟哪种更符合钢管及冷弯型钢轧辊的需求,仍有待(下转第 7 页)

## 4 结 论

4.1 试验钢板淬火后组织为粒状贝氏体和少量针状铁素体, 淬火温度越高, 组织晶粒越细小; 回火后组织为粒状贝氏体和少量板条铁素体, 随回火温度的升高, 组织中板条合并、粗化现象明显, 位错密度减少, 钢板强度有所降低, 塑性和韧性提高。

4.2 基于实验室条件下试制的 16 mm 厚 F550 海洋平台用钢板, 经过性能、组织综合分析和对比, 最终

确定其最佳调质工艺为: 880 °C 温度下加热 120 min 后淬火, 630 °C 温度下加热 220 min 回火。调质处理后钢板的屈服强度为 580 MPa, 抗拉强度为 660 MPa, 断后伸长率 23%, -60 °C 冲击功稳定在 210 J 以上。各项性能均较理想, 完全满足船级社要求。

### 参考文献:

- [1] 杨才福, 苏航, 李丽, 等. 高性能铜沉淀硬化船体钢[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(增刊1): 211-215.
- [2] 冷光荣, 武会斌, 陈慰琼, 等. 热处理工艺对含铜超高强度船板钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2010, 35(1): 99-102.

## Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Properties of F550 Offshore Platform Steel

DU Xian-bin, ZHANG Peng, LI Yong-qiang, MA Heng, ZHOU Ping

(The Technology Center of Laiwu Iron and Steel Group Corporation, Laiwu 271104, China)

**Abstract:** The microstructure and properties of F550 offshore platform steel after different quenching and tempering treatment processes were analyzed. The influences of quenching and tempering parameters on the microstructure and properties were studied. The results showed that the higher the quenching temperature, the more fine grain. With the increase of tempering temperature, the structure became coarsening, the dislocation density decreased, steel plate intensity decreased, the plasticity and toughness increased. The best heat treatment parameters for 16 mm thick F550 steel plate are as follows: 880 °C × 120 min quenching, 630 °C × 220 min tempering. The microstructure of F550 steel plate after quenching and tempering treatment was granular bainite and a small amount of lath ferrite, the yield strength was 580 MPa, tensile strength was 660 MPa, elongation was 23%, and -60 °C impact energy was stable above 210 J.

**Key words:** offshore platform steel; F550; quenching and tempering; microstructure; property

(上接第 3 页)进一步的研究和实践。

1) 冶金结合方式: 离心、非离心复合铸造。目前大量的板带轧辊都采用冶金结合的离心复合铸造生产, 而且日趋成熟, 只不过工作层材料向高合金、高耐磨性等方向发展。

2) 镶嵌复合铸造方式: 如果复合面结合好, 也是一种很好的方法。在轧制负荷不大的情况下, 也获得了大面积的成功。

3) 机械结合方式: 钢管矫直辊几乎全部由过去的辊和轴整体锻造的形式改为辊套和轴分体, 通过过盈配合、组装的形式, 使用效果很好, 如 PQF 钢管轧机轧辊由整体式改为辊套和轴分体组装。

4) 表面工程方式: 镀、渗、喷、涂等都在不同的

零件上使用获得成功, 但往往由于实施后表面工作层太薄等, 限制了使用范围。

### 参考文献:

- [1] 杨秀琴. 中国钢管工业的现状、问题与发展前景[C]//中国金属学会轧钢学会钢管学术委员会五届三次年会论文集. 西安: 2007.
- [2] 符寒光, 邢建东. 高速钢轧辊制造技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [3] 绍顺才. 离心铸造轧辊制造、技术创新与发展[C]//中国钢铁工业协会, 中国金属学会. 2008 年轧辊制造与应用国际研讨会论文集. 上海: 2008.
- [4] 孙铎基. 铸造冷轧工作辊的研发和应用[C]//中国钢铁工业协会, 中国金属学会. 2008 年轧辊制造与应用国际研讨会论文集. 上海: 2008.

## Development of High Quality Casting Roll for Steel Pipe Straightening and Cold Roll Formed Steel

YUAN Hou-zhi, LIU Xing-yi

(Shandong Province Sifang Technical Development Co., Ltd., Jinan 250101, China)

**Abstract:** Through multialloy strengthening modification treatment, Shandong Province Sifang Technical Development Co., Ltd. has developed high quality casting roll which make a feature of high C, Cr, Ni and Mo content. The basic microstructure of material is austenite, bainite and martensite, the carbide is mainly  $M_7C_3$  and its content is about 20%, the micro hardness is up to HM 1 800, the microstructure is appeared as no continuous stripe state, block state, particle atate and chrysanthemum state, the tensile strength is 540 MPa, the impact toughness is 7.5 J/cm<sup>2</sup>, the hardness distanced 120 mm from surface is HRC 59.3. The utilization coefficient of material for producing roll is up to above of 77.5%. The article also point out that the developing trend of roll process is toward high quality, high alloying, replaced forging by casting, and bimetal structure, etc.

**Key words:** high chromium alloy roll; casting roll; steel pipe; cold roll formed steel; HFW/ERW welding pipe