

高速钢复合轧辊的研究现状及进展

刘海峰 刘耀辉

吉林工业大学材料科学与工程学院 长春 130025

摘 要: 论述了高速钢复合轧辊的制造工艺和材质的研究进展及发展趋势, 认为今后对高速钢复合轧辊的研究重点应放在高碳高钒(钼)系高速钢的成分设计、组织控制和优化复合轧辊界面结构上。

关键词: 高速钢, 复合轧辊, 研究进展

中图分类号: TG333

Present Status and Development of High

Speed Steel Compound Roll

Liu Haifeng Liu Yaohui

Jilin University of Technology Changchun 130025

ABSTRACT: The present status and development of high speed steel (HSS) compound roll were summarized in material and manufacturing, and it was suggested the study of HSS compound roll should be focused on composition design, structure control and optimizing the interface structure

KEY WORDS: high speed steel, compound roll, research development

如何提高轧辊的性能和使用寿命, 以适应轧钢企业发展的需要是当前的重要课题。近年来, 国内外对轧辊材料进行了大量研究, 在将高速钢用于制造新一代复合轧辊方面取得了突破性进展^[1~6]。另一方面, 由于轧材尺寸、轧制速度和压下量的提高, 使得采用铸铁材料为芯材的复合轧辊已明显不能满足要求, 采用锻钢作为芯部材料是目前的发展趋势^[7]。以上两方面的进展正推动着轧辊用高速钢材质和高速钢轧辊制造工艺方面的研究。本文作者介绍了高速钢复合轧辊的研究现状和进展, 认为复合轧辊的成形工艺, 外层材料成分设计和结合界面将成为今后的研究重点。

1 轧辊用高速钢

80 年代以前, 锻造高速钢已用于制造轧机的工作辊和中间辊, 其材质为标准类型的钨钼系高速钢, 如 M2, M4 以及高碳类型的 T15^[8]。采用高速钢作为新一代复合轧辊的外层材质仅是近十几年的事情,

因此当前轧辊用高速钢正处于研制、开发和生产应用的热点阶段。

1.1 轧辊用高速钢的设计思想

综合考查轧辊材质的发展历史, 一个明显的趋势就是合金元素的总含量不断提高, 目前一般可达 15 % 以上^[9~13]。目前, 在轧辊材料高合金化方面进行的大量工作就是试图用大量细小弥散分布的高硬度碳化物和高稳定性的基体来提高轧辊的性能。表 1 列出了不同材质中碳化物的形态和硬度, 其中 MC 型碳化物的硬度最高。轧辊用高速钢的成分设计就是围绕如何获得大量均匀、弥散分布的 MC 型碳化物而展开的。H. F. Fishmeister^[14]的研究结果表明, 高含量的钒和钼(强碳化物形成元素)及高碳对形成 MC 型碳化物是有利的。这就决定了轧辊用高速钢不可能采用常规高速钢, 其成分基础应是高碳高钒(钼)系高速钢。表 2 列出了目前几种研制中的高速钢复合轧辊外层材料的成分(质量分数。以下未专门注明者, 均为质量分数)。

表 1 轧辊材质中碳化物的形态和硬度

Table 1 Shapes and hardnesses of carbides in roll materials

轧辊材质	碳化物类型	形 态	硬度(HV)
高镍铬轧辊	Fe_3C	网状	840~1100
高铬铸铁轧辊	Cr_7C_3	菊花状	1200~1600
	M_{23}C_6	粒状(二次)	1200
高速钢轧辊	MC	粒状	3000
	M_2C	棒状和羽毛状	2000
	M_6C	鱼骨状和细板条状	1500~1800

表 2 高速钢复合轧辊外层材料成分/%

Table 2 Outer material compositions of HSS compound roll/%

C	Si	Cr	Mo	W	V	Co	Nb	文献
2.0~4.0		5.0~20.0	2.0~15.0		4.0~6.0		1.0~2.0	[15]
1.5~2.5		2.0~10.0	2.0~10.0		2.0~10.0			[16]
1.10	<0.4	3.8	4.5	5.3	3.0			[17]
1.25	<0.4	4.5	5.5	6.5	4.5			[17]
1.7~2.2	0.7~1.0	3~15	2~6	2~8		0~5		[16]
2.0		4.0(6.0)	2.5		6		0(1.0)	[16]

1.2 合金化元素的确定

1.2.1 碳含量的确定

为了给合金碳化物提供足够的碳,轧辊用高速钢的碳含量远大于常规高速钢(C 0.8%左右),一般为1.5%~3.5%。如何确定高速钢中的碳含量是一个相当困难的问题。目前主要是依靠理论和试验相结合的方法来确定轧辊用高速钢的碳含量。平衡碳理论^[18~20]在几种常规高速钢的成分上得到了验证。但并不具备普遍性。

1.2.2 钒和铌含量的确定

当含钒或铌的高速钢开始凝固时,首先析出以钒或铌为主要成分的MC型碳化物^[21~24]。在一次碳化物中,碳化钒和碳化铌的形态和体积对性能最有利。S Karagoez等^[25]的研究结果表明,铌与碳的亲合力比钒与碳的大,因而更易形成MC型碳化物。但只加入铌的高速钢不具备回火二次硬化能力。此外,在铸造成形过程中铌系的MC型碳化物较钒系的MC型碳化物粗大,故而在早期轧辊用高速钢的研究中,一般采用高碳高钒系高速钢,不加入铌。复合添加钒和铌的优点是相当显著的,因为铌的夺碳能力强于钒,可以使更多的钒溶于基体之中,以获得良好的回火二次硬化效果。目前的问题是如何确定在给定的工艺条件下钒和铌复合添加的最佳比例,及

怎样尽量控制形成粗大的NbC。郭国超^[26]的先期研究结果表明,在常规铸造条件下,变质处理是一种有效的措施。

1.2.3 其它合金元素含量的确定

从高速钢的发展历史来看,钨是促进高速钢抗回火性和红硬性的首选元素。钼的作用和钨类似,但1%的钼大致可以取代1.8%的钨。共晶态的 M_{12}C 呈棒状或羽毛状,易于分散。但若用钼完全取代钨,在随后的热处理过程中会加剧氧化和脱碳,因此在一般情况下将钨和钼混合加入。

高速钢的淬透性主要取决于铬,因而常规高速钢的铬含量一般不低于4%。另外考虑铬是保证抗氧化性的重要元素,所以在轧辊用高速钢中铬含量一般不低于5%。

1.3 轧辊用高速钢的组织

轧辊用高速钢的凝固形式为:L (MC+ γ + M_2C)。对于凝固组织中除MC型碳化物以外的其它类型碳化物,不同的研究者得出了不同的结果。宫坂善和^[27]的研究结果表明:凝固组织中其它类型的碳化物主要是 M_6C 、 M_2C 和 M_{7-8}C_3 。浜田贵成等^[21]在凝固组织中发现了 M_{12}C 型碳化物。许多研究^[22~24,27,28]都致力于钒(铌)含量对MC型及其它类型碳化物数量及分布的影响,以及钨当量(将其它合金元素的加

入量都折算成钨当量)对碳化物类型及形态的影响。由于彼此的工艺方法和成分相差较大,得出的结论也就不同,但趋势是一致的,即随钒含量提高,MC 型碳化物数量不断增多。轧辊用高速钢热处理后的显微组织为回火马氏体的基体中分布着MC+M₆C 碳化物^[7,30]。

1 4 轧辊用高速钢的力学性能

图 1 示出不同材质轧辊的抗拉强度和断裂韧性^[30]。可见与常规无限冷硬、高铬铸铁和半钢相比高碳高速钢的抗拉强度最高;除半钢之外,其余几种材料的断裂韧性大致相同。

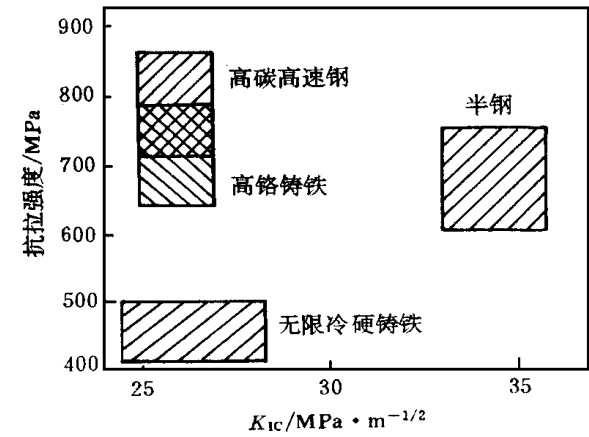


图 1 复合轧辊材质的抗拉强度与断裂韧性
Fig 1 Tensile strength and fracture toughness of compound roll material

2 复合轧辊的制造工艺

2 1 离心铸造法

离心铸造法^[11,29,31~35]的主要特点是将液态外层材料和芯材以一定的时间间隔浇入铸型内。离心旋转时间、芯部铁液浇注间隔时间、浇注温度及防止内层材料和外层材料之间界面氧化是此类轧辊制造成败的关键。

采用离心铸造法制造高速钢复合轧辊,其设备简单、成本低,但生产工艺参数要求较高,还存在着相当多未解决的关键技术问题,尽管针对这些问题提出了相应的解决方法(见表 3),但是由于离心铸造的特殊性,无论如何设计轧辊的外层成分,外层材料总是存在着一定的不均匀性。虽然采用三层结构能改善界面结合状态和提高芯材强度,但同时又增加了工艺复杂程度。从提高外层材料耐磨性出发,希望提高淬火温度,但淬火温度过高会使界面烧损。而且

芯材所用的铸造材料,其强度已不适应某些新型轧机(如ME 轧机)的要求,不过由于离心铸造法的优点相当突出,而且生产成本较低,通过合理设计合金成分和工艺参数所生产的高速钢复合轧辊可以满足大多数轧机的需要,因而在相当长的一段时间内离心铸造高速钢复合轧辊仍将处于主要地位。

表 3 离心铸造高速钢复合轧辊存在的
技术问题及解决方法

Table 3 Technical problems and solutions in HSS compound roll made by centrifugal casting	
存在问题	解决方法
外层组织不均匀	合适的化学成分和快速凝固
组织硬度低	快速加热和快速冷却的热处理制度
结合界面差	低合金中间层
芯部材料强度低	低合金中间层

2 2 电渣重熔法

电渣重熔(ESR)法^[36]是在作为芯材的圆柱状韧性合金锻钢的周围放置同心水冷铸模,并在锻钢和铸模之间放置由高合金钢制成的自耗电极,自耗电极熔化后即作为外层材料连续填充此空间。而且可以通过采用不同的自耗电极制成具有梯度分布的结合界面,以改善界面特性。ESR 法的缺点是成本较高、难以制造较大的轧辊。

2 3 连续浇注成形法

连续浇注成形(CPC)法^[7,37]是先将轧辊辊芯垂直放在水冷铸型中,然后将熔融的外层高碳高速钢钢水注入碳钢芯轴与水冷结晶模之间。液态的外层钢水在与锻钢芯部熔合后开始凝固。将凝固部分连续向下拉拔,实现连续铸造外层,形成具有高碳高速钢外层和锻钢芯部的复合轧辊。图 2 为 CPC 法的工艺简图。为了保证外层与芯部充分作用,形成良好的界面结合,该设备可同时对芯轴和液态金属进行加热。

CPC 法具有以下特点: 熔融的金属自下而上凝固,有利于液体金属的补缩;使以前用连续铸造法不能生产的材料,如过共晶材料的生产成为可能;可生产多种截面形状的铸件。因此采用 CPC 法制造的轧辊内外层材质选择范围宽、结合强度高、产品成本低(比 ESR 法低 1/2,比埋弧堆焊法低 2/3)。此外,CPC 法不仅可以制造新轧辊,还可以修补旧轧辊,是目前轧辊制造中比较先进和具有良好发展前景

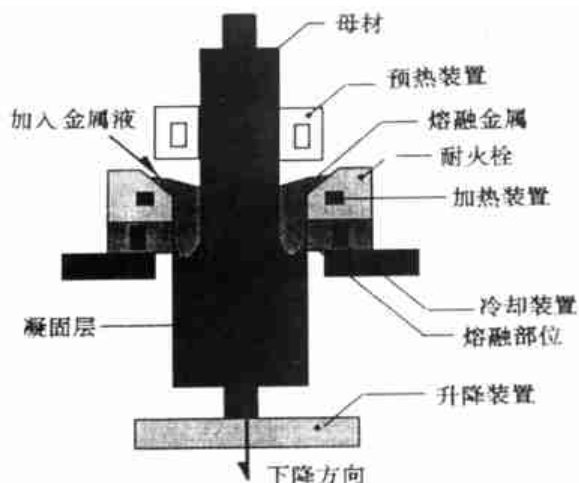


图 2 CPC 法示意图

Fig 2 Schematic drawing of CPC

景的工艺。

2.4 喷雾沉积法

喷雾沉积法^[38, 39]是由英国 O spray 公司推出的一项新技术, 故又称 O spray 法。O spray 法的工艺过程为: 金属液体在雾化器中被高速气流雾化成细小颗粒, 然后迅速飞向接收器, 并在其上沉积成形。采用 O spray 法生产的高碳高速钢轧辊的使用寿命为普通铸造轧辊的 2~3 倍。其不足之处在于生产成本较高, 工艺复杂, 不利于轧辊的大批量生产。

2.5 热等静压法

鉴于铸造复合轧辊外层材料的碳化物粗大、分布不均匀及成分偏析等缺点, 日本^[40, 41]及我国钢铁研究总院^[42]研究了用热等静压 (HIP) 法制造复合轧辊。轧辊外层的高速钢采用粉末冶金法预先成形, 这种轧辊在采用比普通铸造材料更高的碳含量和合金含量情况下, 仍能保持良好的碳化物形态, 有利于提高轧辊的耐磨性。但该方法只适合于生产较小型的轧辊, 而且生产成本低、设备昂贵。

3 复合轧辊的结合界面

可用以下两点来评价复合轧辊的质量: 工作层显微组织及耐磨性是否满足要求; 能否获得满足工作要求的界面结构^[43]。良好的界面结构应该能够有效地调节材料的内应力分布, 并且能够有效地传递应力载荷, 充分发挥两种材料的性能优势。对 CPC 法等工艺制造的复合轧辊的界面研究应该集中在液、固相相互作用及形成的结合界面上。但当前对液—固界面相互作用及导致的界面结合的研究并不

充分。吴春京等^[44]对采用 CPC 法制造复合轧辊的制造工艺过程进行了数值模拟, 提出了界面良好熔合的判断, 但对熔合良好的界面结构未进行描述。

许多研究者^[45~47]都对液、固相作用的结合界面的结合机理和界面形貌进行了研究, 但他们在试验中所采用的外层材料均为铸铁。因此系统地研究在液、固相作用条件下, 高速钢与结构钢结合界面的结构及其影响因素具有重要的理论价值和实际意义。本课题组对此已经进行了先期研究, 并取得了初步进展^[26]。研究结果表明控制镶铸比及液、固相作用时间是获得良好界面结合的重要保证。

4 结 语

综上所述, 复合轧辊的发展趋势正逐步向高速钢复合轧辊发展。到下世纪, 目前正在使用的主力轧辊——高铬铸铁复合轧辊将逐渐被高速钢复合轧辊所取代。今后对高速钢复合轧辊的研究应该主要集中在以下三个方面: 工艺方法及设备。上述各种工艺方法各有所长, 离心铸造法因其低廉的生产成本, 在较长时间内仍将占据主力地位, 必须加强对其的研究。而在另一方面, 新型轧机的使用要求采用以锻钢为芯材的复合轧辊, 以提高其强韧性。采用连续浇注成形法制造这种复合轧辊, 工艺简单, 轧辊性能较好, 综合费用比较低, 因此应该加强对该方法的工艺和设备的研究; 各种合金元素对外层材料中碳化物的形成、形态和组织的影响; 合理的设计复合工艺, 以便获得最佳的界面结构, 充分发挥出两种材料的优势。

参 考 文 献

- 1 邵素云, 王 刚, 宋 威 轧钢, 1996, 2: 37
- 2 Kudo T, Kawashima S, Kurahashi R. ISIJ, 1992, 32: 1190
- 3 Sano Y, Hattori T, Haga M. ISIJ, 1992, 32: 1194
- 4 Hashimoto M, Ootomo S, Yoshida K, et al. ISIJ, 1992, 32: 1202
- 5 Sano Y, Sorano H. Zairyo to Purosesu, 1991, 4(2): 446
- 6 伊东照雄, 金山行信, 增田义行. 材料与フ. ロ・ス, 1996, 9(2): 964
- 7 王贵明 冶金设备, 1995, 6: 30
- 8 Odin G, Terrasse R. Steel Used for Cluster Mill Work Rolls—Interest of Grades with High Vanadium Content. 30th Mechanical Working and Steel Processing Conference. Michigan, USA: 1988. 379
- 9 刘春杰 钢铁研究, 1989, 4: 39

- 10 王久彬, 徐志如, 刘凤云 钢铁研究, 1993, 1: 55
- 11 桥本隆, 片山博彰, 森川长, ほか 铸物, 1991, 63: 622
- 12 佟庆平, 铃木俊夫, 梅星高照 铸物, 1990, 62: 925
- 13 大成桂作, 小野幸德, 周宏, ほか 铁と钢, 1995, 81(9): 44
- 14 Fishmeister H F, Rield R, Karagoez S. Met Trans, 1988, 20A: 2133
- 15 市野健司, 小门智也, 丰冈高明, ほか 材料とフ. ロ・ス, 1996, 9: 1018
- 16 孙以容 宝钢技术, 1996, (5): 60
- 17 木原淳二 铁と钢, 1994, 80(7): N 383
- 18 Steven G, Nehrenberg A E, Philip T V. Trans A SM, 1964, 57: 925
- 19 郭耕三 高速钢及其热处理 北京: 机械工业出版社, 1982
- 20 肖纪美 高速钢金属学问题 北京: 机械工业出版社, 1978
- 21 浜田贵成, 周 宏, 村井典子, ほか 材料とフ. ロ・ス, 1993, 6: 136
- 22 工藤利博, 三井武吉 材料とフ. ロ・ス, 1996, 9: 1017
- 23 宫坂善和, 江南和幸, 谷川俊宏 材料とフ. ロ・ス, 1996, 9: 1368
- 24 宫坂善和, 江南和幸, 平井秀和 材料とフ. ロ・ス, 1993, 6: 512
- 25 Karagoez S, Fishmeister H F. Met Trans, 1987, 19A: 1395
- 26 郭国超 镶铸比对高碳高合金钢和 45# 钢结合界面的影响: [学位论文]. 长春: 吉林工业大学材料科学与工程学院, 1998
- 27 宫坂善和, 江南和幸, 谷川俊宏 铸造工学, 1997, 69: 201
- 28 平田克己, 前川敏良, 丹羽辙, ほか 材料とフ. ロ・ス, 1996, 9: 992
- 29 宫开令, 董亚军, 高春利 钢铁, 1998, 33(3): 67
- 30 大田拓己, 佐野义一, 杉村幸彦 素形材, 1990, 31(8): 13
- 31 张君利 中国铸造装备与技术, 1996, 2: 14
- 32 浜田晃, 赖户良登, 桥本隆, ほか 素形材, 1995, 36: 10
- 33 片冈义弘, 上田修三 材料とフ. ロ・ス, 1993, 6: 509
- 34 市野健司, 片冈义弘, 汤田浩二 川崎制铁技报, 1996, 28: 89
- 35 赖户良登, 森川长 材料とフ. ロ・ス, 1996, 9: 988
- 36 Schin izu M, Shitamura O, Matsuo S, et al ISIJ, 1992, 32: 1244
- 37 桥本光生 CPC プロ・スよに強靱ロールの開発, 制铁研究第 338 号, 1990: 62
- 38 Ikawa Y. ISIJ, 1990, 30(9): 756
- 39 Brooks R G, Leathan A G. Industrial Heating, 1990, 11: 46
- 40 草加腾司, 久田健男, 富冈达也 材料とフ. ロ・ス, 1993, 6: 513
- 41 草加腾司, 久田健男, 富冈达也 材料とフ. ロ・ス, 1993, 6: 514
- 42 陈飞雄, 强劲熙, 贾佐诚, 等 钢铁研究学报, 1997, 9(3): 15
- 43 殷光虹 现代轧辊金相图谱 北京: 机械工业出版社, 1993
- 44 吴春京, 沈定钊, 杨大可, 等 钢铁研究学报, 1995, 7(4): 19
- 45 鸭田秀一, 野口辙, 佐藤司, ほか 铸物, 1992, 64(4): 260
- 46 竹之内优, 冷水孝夫, 堀尾浩次 电气制钢, 1996, 67: 161
- 47 村木庸益 铸物, 1956, 28: 565