

钒添加对离心复合铸造 ICDP 轧辊组织和性能的影响

万敏^{1,2}, 王玮³, 张涛^{1,2}

(1. 河北机电职业技术学院, 河北邢台 054000; 2. 邢台市检定装置智能化技术创新中心, 河北邢台 054000;

3. 冀中能源邢台矿业集团有限责任公司 金兴塑料包装分公司, 河北邢台 054000)

摘要: 在传统ICDP轧辊工作层材质中添加1.6%的合金元素钒, 生产出钒元素强化型E-ICDP轧辊。通过对添加V前后两种轧辊材料硬度、显微组织和磨损情况进行检测、比较和分析发现添加合金元素钒改变了显微组织中碳化物和石墨的形态和分布, 基体中形成的细小、弥散分布的MC型碳化物可以提高基体耐磨性、降低热裂纹扩展速度。统计对比了这两种轧辊在不同轧线的使用性能, 结果表明E-ICDP轧辊较ICDP轧辊平均每毫米轧制量提升11.37%、平均单次轧制量增加6.22%、平均单次磨削量降低4.61%。较高的耐磨性、较慢的裂纹扩展速度和较高的基体强度是E-ICDP轧辊轧制性能优于ICDP轧辊的主要原因。

关键词: ICDP轧辊; 钒; 显微组织

作者简介:

万敏(1981-), 女, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为材料热加工工艺。电话: 15030982210, E-mail: wanmin1214@163.com

中图分类号: TG113.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

11-1404-06

基金项目:

河北机电职业技术学院科研基金项目(Z22026)。

收稿日期:

2023-06-09 收到初稿,

2023-09-08 收到修订稿。

无限冷硬双金属离心复合铸造轧辊(Indefinite Chill Double Pours Rolls), 简称ICDP轧辊, 广泛应用于热连轧、CSP轧机的精轧后段工作辊以及炉卷轧机、中宽厚板轧机的工作辊。ICDP轧辊具有较高合金含量及较好的耐磨性、抗热裂性。辊身工作层是采用离心铸造工艺生产的无限冷硬铸铁材质, 辊颈及芯部是采用重力铸造工艺生产的具有较好强韧性的球墨铸铁^[1]。

随着轧钢技术的不断发展、轧制钢材等级的不断提升以及钢铁企业对轧线运行效率要求越来越高, 轧线迫切需要耐磨性更高、单次在机轧制时间更长的轧辊。在性能表现更加优异的高速钢、半高速钢等新材质轧辊替代传统的高铬铸铁、高铬铸钢材质轧辊被广泛应用到热连轧的精轧前段和粗轧机架后, 轧机在延长换辊周期、减少换辊次数、提高轧制效率方面取得了一定的成效, 此时用于精轧后段的ICDP轧辊耐磨性和抗热裂性不足成为制约轧线效率进一步提升的主要因素。

ICDP轧辊的使用性能是由辊身工作层(Work-layer)的显微组织所决定的。大量高硬度的碳化物存在为轧辊提供了耐磨相, 但过多的、硬度高、脆性大的碳化物相在组织中会导致热裂纹的产生并快速扩展, 造成轧辊磨削量大、剥落等事故发生。少量具有高导热率石墨的存在可以吸收轧制过程中产生的热量、降低热裂纹产生的几率, 石墨还可以起到轧辊表面润滑剂的作用, 降低轧辊和轧材间的摩擦, 减少粘钢发生的几率, 但石墨含量过高会造成轧辊表面硬度低、耐磨性变差。碳化物和石墨的含量、尺寸、形态和分布等都会影响轧辊的使用性能。

多位研究者从变质处理、合金成分调整、热处理工艺调整、颗粒增强、模具优化等^[2-9]方面开展了研究, 以期获得最佳的ICDP轧辊工作层组织和更优异的性能。在传统型ICDP轧辊工作层中添加V、Nb等强碳化物形成元素, 在基体中析出细小、弥散分布的MC型碳化物, 可以显著的提高轧辊的耐磨性已经在轧辊行业得到了共识, 这种新型的ICDP轧辊被称为改进型ICDP(Enhanced-ICDP), 简称E-ICDP。

本论文以轧辊制造企业批量生产的传统型ICDP轧辊和添加少量钒元素的改进型E-ICDP轧辊为对比研究对象, 通过轧辊本体取样, 研究了钒元素对ICDP轧辊工作层

组织、硬度、耐磨性和抗热裂性的影响，并对两批轧辊在轧线的实际轧制性能进行了分析对比。

1 试验材料及方法

1.1 轧辊生产及试样制备

所选择轧辊辊身直径为700 mm，报废辊身直径610 mm，辊身长度1 780 mm，辊身HSD硬度要求78~83。表1为传统型ICDP轧辊和改进型E-ICDP轧辊的设计化学成分。李贵茂等^[8]研究发现，当V元素含量

为1%时，高镍铬钼铸铁合金中碳化物比较细小，当V元素含量增大到2%时，碳化物变得粗大。吴来磊^[10]对添加1%到5%V的无限冷硬铸铁材料的组织和性能进行了研究，研究表明在500~520 ℃二次回火热处理后，添加1%到2%V合金后无限冷硬铸铁的HRC硬度可达到57~58，硬度略高于添加3%到5%V合金后的硬度。结合其他学者的研究成果和前期开展的基础研究工作，本研究设计了添加1.60%V元素的改进型E-ICDP轧辊。表1为传统型ICDP轧辊和改进型E-ICDP轧辊的外层成分，两种轧辊辊芯均为成分相同的球墨铸铁。

表1 两种ICDP轧辊化学成分
Table 1 The Chemical Composition of two ICDP

位置	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Fe
ICDP外层	3.00~3.20	1.20~1.40	0.70~0.80	≤0.025	≤0.002	1.20~1.40	4.10~4.30	0.25~0.35	-	其余
E-ICDP外层	3.00~3.20	1.20~1.40	0.70~0.80	≤0.025	≤0.002	1.20~1.40	4.10~4.30	0.25~0.35	1.60	其余

轧辊外层在卧式离心机上铸造，辊身部分采用HT200金属型作为模具，离心机转速600 r/min，外层浇注温度1 320~1 330 ℃，待外层铁液完全凝固后，将轧辊辊颈部分的模具与辊身部分模具快速组装，底颈部分采用砂/ZG35铁型覆砂型作为模具，最后采用重力浇注的方法填充芯部铁液^[8]。通过芯部铁液浇注温度和辊身外层凝固后温度的准确配合，可以实现轧辊外层和芯部的良好结合。

铸造轧辊毛坯开箱后直接进入热处理炉，485~505 ℃保温300 h。热处理后的轧辊根据图纸要求加工至成品状态，加工成成品后对轧辊进行硬度、超声波探伤及尺寸检测。检测试样分别从两种材质轧辊上通过车床切取试环样，然后利用线切割等设备将试环切割出适用于金相检测、磨损试验、热疲劳试验的试样。

1.2 试验及检测方法

对经过研磨抛光的金相试样首先进行未腐蚀状态下观测，利用光学显微镜对试样的石墨含量、形态和分布进行分析。然后采用光学显微镜、扫描电镜及能谱仪对4%硝酸酒精腐蚀后的试样进行金相组织和微区成分分析。在光学显微镜下，利用图像分析仪对碳化物、石墨的颗粒大小、含量进行了定量分析。采用覆膜法对所有轧辊进行辊身本体金相检测。

采用销盘式磨损试验机进行干滑动摩擦磨损试验，以GCr15材质制作对磨试样，通过磨损失重量对比计算两种材料的相对耐磨性。试验采用销-盘摩擦副，如图1所示，销为ICDP轧辊试样，尺寸为 $\Phi 5$ mm × 10 mm。磨损试验机的旋转速度为45 r/min，磨损试样在盘中心和边部之间以5 mm/min的速度移动，载荷200 N，磨损时间120 min。

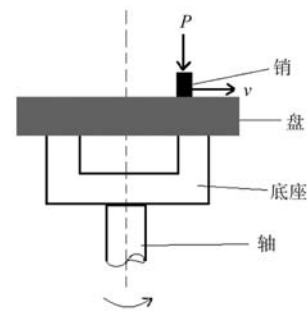


图1 磨损试验示意图
Fig. 1 Sketch map of friction wear testing

采用RFTM-1热疲劳试验机进行冷热疲劳试验，设定3 s升温至550 ℃、喷水冷却6 s，以研究热裂纹的产生和扩展。采用EQUOTIP硬度计在轧辊辊身均匀选取的四条母线上进行硬度检测，每条母线上检测五个点，取其平均值作为硬度试验数据。两批轧辊同期投入轧线使用，对轧辊的使用记录进行统计分析，对比分析在机磨损量、下机磨削量、事故损失和综合毫米轧制量等数据。

2 试验结果及分析

2.1 显微组织

图2是ICDP和E-ICDP两种轧辊的金相组织，对比两种轧辊的金相组织后发现，E-ICDP轧辊中石墨主要呈点球状和蠕虫状，石墨含量为2.67%，如图2a；而传统的ICDP轧辊中石墨主要呈片状、蠕虫状和团状，石墨含量为2.81%，如图2c。图2b和图2d分别显示了两种ICDP轧辊辊身组织，基体组织均为贝氏体+少量马氏体、残余奥氏体，两种轧辊中均含有23%~25%的形

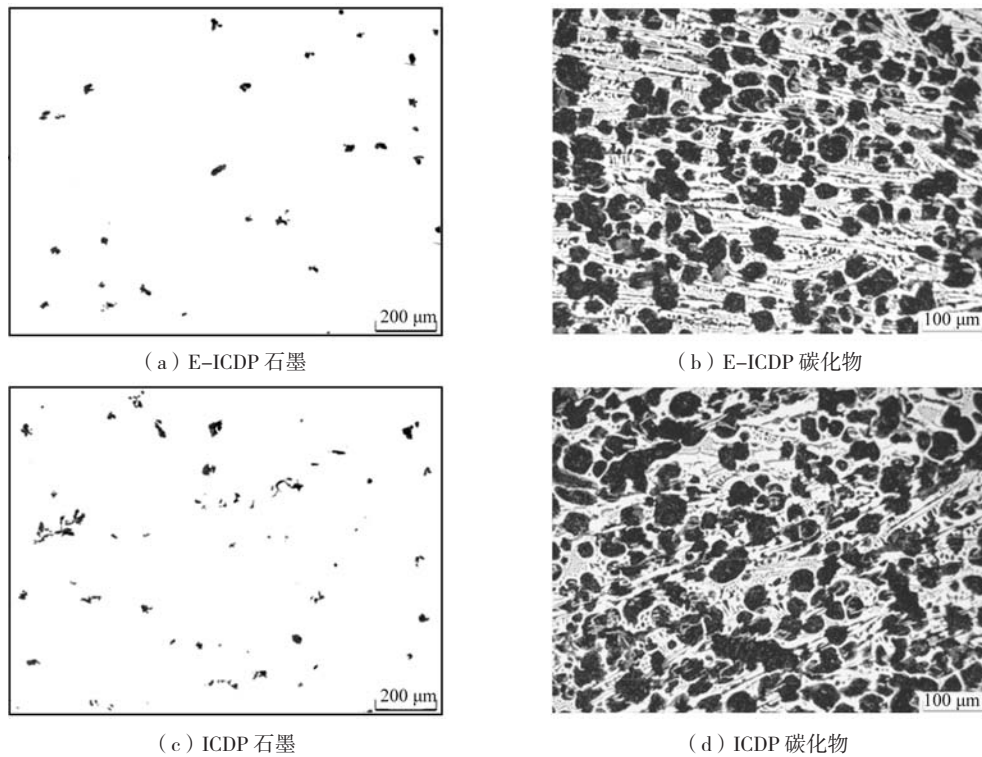


图2 两种ICDP轧辊材质的微观组织

Fig. 2 Microstructure of the E-ICDP and ICDP

态、数量和分布无明显差异的共晶碳化物。

图3是E-ICDP轧辊试样扫描电镜组织照片, 利用能谱对不同形态碳化物成分进行了分析, 结果如表2所

示。图3a中显示基体中分布的颗粒状碳化物A为含钒元素的MC型碳化物, 板条状和棒状的碳化物分别为 M_2C 或 M_7C_3 型碳化物。

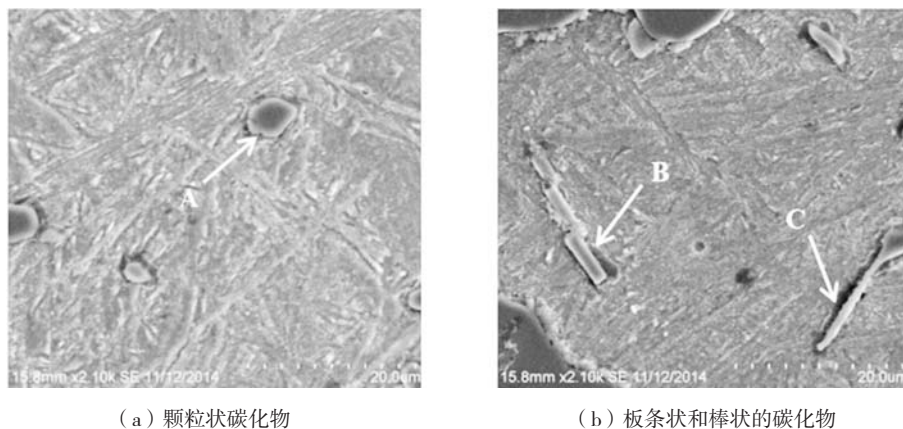


图3 E-ICDP扫描电镜照片

Fig. 3 SEM image of E-ICDP roll

表2 E-ICDP碳化物能谱分析结果
Table 2 The EDS analyzing results of carbides
in E-ICDP roll at%

检测点	C	V	Mo	Cr	Fe
A	47.69	48.43	1.51	1.49	0.88
B	28.32	2.57	5.79	35.33	27.99
C	30.53	1.20	50.31	3.37	14.59

2.2 轧辊硬度

对两种ICDP轧辊各随机选择10支轧辊进行硬度检测, 每支轧辊分别测量 0° 、 90° 、 180° 、 270° 四条母线上均匀分布的5个点共计20个点的硬度, 每种轧辊共计检测200个点。对所有硬度统计分析见图4。

从硬度检测分布图分析, ICDP轧辊的平均HSD硬度值为80.39, 而添加V元素的E-ICDP轧辊的平均HSD

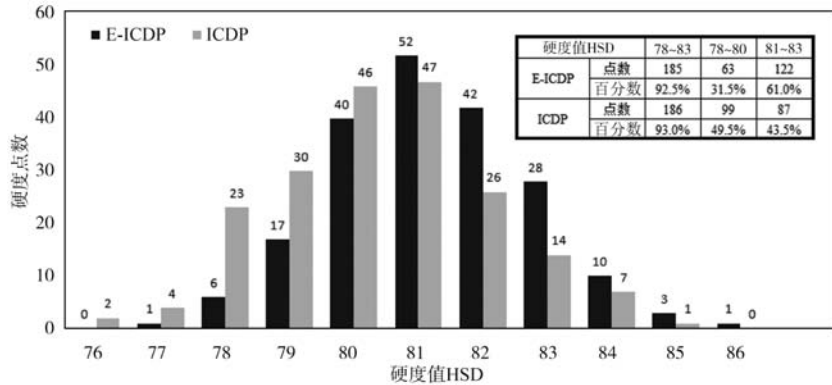


图4 轧辊辊身硬度分布

Fig. 4 The distribution of roll barrel hardness

硬度为81.245，后者较前者硬度略高。对于相同类型轧辊，通常硬度与耐磨性呈正向相关，硬度越高耐磨性越好，反之亦反。

图4中对两种轧辊的硬度检测统计结果进一步统计，ICDP和E-ICDP硬度值达到HSD 78~83范围的累计分别为186个点和185个点，达标率分别为93.0%和92.5%，该结果表明添加少量的V元素对ICDP轧辊5HSD范围的硬度达标率影响不大。但在HSD 78~83范围内，两种轧辊的硬度分布呈现出明显的不同，ICDP轧辊有99个点的HSD硬度为78~80，而E-ICDP轧辊分布在该硬度范围的点仅有63个，相反硬度检测结果在HSD 81~83的高硬度区E-ICDP轧辊有122个点，而ICDP轧辊分布在该硬度范围的仅有87个点。因此，根据以上硬度分布推测，当轧辊硬度要求范围小于HSD 5时，V元素的添加就会影响轧辊的硬度检测合格率，此时就必须对热处理温度和时间进行调整，以确保轧辊硬度合格。

2.3 磨损性能

图5显示了两种ICDP材质干滑动磨损实验结果。试样1-4的取样部位分别为辊身表面、距辊身15 mm深、距辊身30 mm深和距辊身45 mm深。E-ICDP轧辊的相对耐磨性普遍分布在4.23~4.66，平均值为4.480，相同磨损条件下，ICDP轧辊的平均相对耐磨性为2.615。

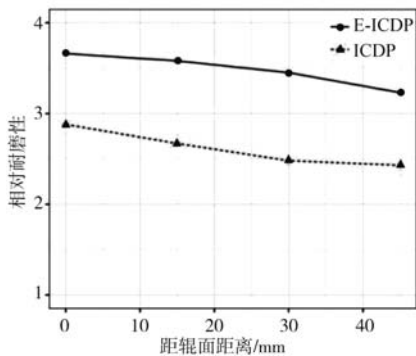


图5 各试样干滑动磨损相对耐磨性

Fig. 5 The relative wear-resistant of samples under dry sliding friction

根据前文的组织和硬度检测结果，添加V元素的E-ICDP轧辊组织中出现了很多小块状和小粒状的碳化物，特别是基体组织中均匀弥散分布的粒状碳化物有效地提高了基体的耐磨性，另外整体宏观硬度的升高也有助于提高轧辊材质的耐磨性。

2.4 热疲劳性能

分别对两组试样进行热疲劳试验，在相同试验条件下，E-ICDP轧辊试样的热裂纹长度和扩展速度均低于ICDP轧辊。从图6的结果可知，随着循环周次的增加，两种材质热裂纹扩展速率均呈现先加快后减慢的变化趋势。总体来看，E-ICDP轧辊的热裂纹扩展速度小于ICDP轧辊的扩展速度。

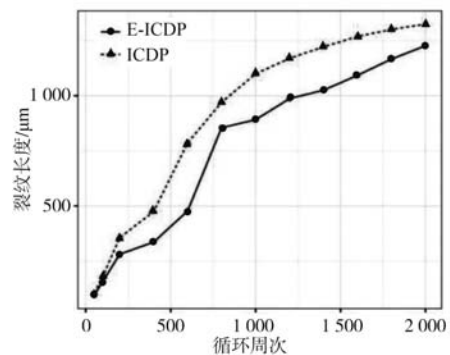


图6 E-ICDP和ICDP热疲劳裂纹扩展曲线

Fig. 6 Thermal fatigue crack growth curves of E-ICDP and ICDP

3 轧辊使用性能对比

选择某一轧线同一时期使用的12支E-ICDP轧辊和12支ICDP轧辊轧制和磨削数据进行对比分析，从轧制量、在机磨削量、下机磨削量和轧制异常损伤等方面对轧辊的使用性能进行对比。

3.1 毫米轧制量分析

毫米轧制量是反映轧辊工作层轧制表现的一个直观指标，在相同轧制条件下数值越大说明轧辊的性能

越好。其计算公式为:

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n C_{ton_i}}{\Phi_0 - \Phi_n} \quad (1)$$

式中: P_m 为毫米轧制量,表示平均每消耗1 mm轧辊可轧制的钢材重量,是显示轧线轧辊消耗量的重要指标之一; C_{ton_i} 表示轧辊第*i*次上机轧制重量; Φ_0 表示轧辊第一次上机前的辊身直径; Φ_n 表示轧辊第*n*次下机并磨削后的辊身直径。

根据表3中数据分析, E-ICDP轧辊的毫米轧制量为4 106 t/mm, 较ICDP轧辊高约11.37%。轧辊的毫米轧制量与吨钢轧制辊耗呈反比关系, 毫米轧制量提高可以有效降低轧线的轧辊消耗, 降低生产成本。E-ICDP的平均单次轧制量为2 978 t, 较ICDP轧辊高约6.22%。平均单次轧制量越高, 轧线生产过程中的换辊频次越低, 换辊造成的轧线停止运行时间越短, 轧线运行效率越高。在相同的轧制条件下, 轧辊的耐磨性、辊型保持能力、辊面质量与轧辊的在机单次轧制量正相关。

表3 两种轧辊轧制数据对比

Table 3 Comparison of rolling data between E-ICDP and ICDP

辊轧种类	统计支数	已使用工作层/mm	总轧制量/t	毫米轧制量/(t·mm ⁻¹)	总轧制次数	平均单次轧制量/t
E-ICDP	12	813	3 338 197	4 106	1 121	2 978
ICDP	12	825	3 041 726	3 687	1 085	2 803

3.2 磨削量分析

该轧线规定, 每次下机正常磨削量不高于1 mm, 将磨削量高于1 mm的定义为异常磨削。表4对两类轧辊的磨削情况进行了统计。

从表4中可以看出, E-ICDP轧辊的磨削量超过1 mm的异常磨削次数比例和异常磨削量比例分别为11.51%和24.11%, 均低于ICDP轧辊。对正常磨削和异常磨削数据进行整体统计, E-ICDP轧辊的平均单次磨削量为0.725 mm, 较ICDP轧辊低约4.61%。异常磨削量的高低反映了轧辊的抗事故性, 抗事故性越优异, 在

机发生断辊、剥落等恶性轧辊事故的几率越低, 发生轧制异常后轧辊损耗越少, 轧线综合轧辊消耗越低。轧辊磨削记录显示, 异常磨削的主要原因是涡流检测不合格。轧线发生的甩尾、卡钢、粘钢等事故都可能会导致辊面出现裂纹, 随着轧制的进行这些初始裂纹在轧制力和热应力的作用会向辊身内部扩展, 下机磨削时辊面裂纹的存在会造成涡流检测裂纹值和软点值超标。为了避免轧辊发生断辊、剥落等恶性轧制事故, 必须增加磨削量将辊面异常全部去除后轧辊才可以继续上机使用。

表4 两种轧辊磨削数据对比

Table 4 Comparison of grinding data between E-ICDP and ICDP

辊轧种类	磨削次数			总磨削量/mm			平均单次磨削量/mm			异常磨削次数比例/%	异常磨削量比例/%
	正常	异常	全部	正常	异常	全部	正常	异常	全部		
E-ICDP	992	129	1 121	617	196	813	0.622	1.519	0.725	11.51	24.11
ICDP	940	145	1 085	590	235	825	0.632	1.556	0.760	13.92	28.48

4 讨论

E-ICDP轧辊使用性能优异的原因主要有以下几个方面。

(1) 较高的耐磨性。微观组织中碳化物和石墨的形态、数量和分布影响着无限冷硬铸铁轧辊的耐磨性, E-ICDP轧辊的微观组织中除了含有与ICDP微观组织中数量、形态和分布基本相同的大块共晶碳化物外, 其添加的V元素形成了大量细小、高硬度的VC颗粒作为耐磨质点弥散分布在基体上, 提高了基体的耐磨性。耐磨性越高, 轧辊在线磨损量越小, 在不影响轧材表面质量、厚度的前提下提高了E-ICDP轧辊的单次在机轧制量。

(2) 较慢的裂纹扩展速度。受轧制力和热应力的影响, 共晶碳化物/基体界面较VC颗粒/基体界面更

易形成初始裂纹。如图7所示, 裂纹沿VC/基体界面的扩展速度小于在棒状、块状或板条状共晶碳化物/基体界面的扩展速度, VC颗粒的存在可以阻断裂纹的扩展^[11]。图6的热疲劳试验显示E-ICDP的热裂纹扩展速度较ICDP轧辊慢, 轧制过程中E-ICDP轧辊辊面裂纹较

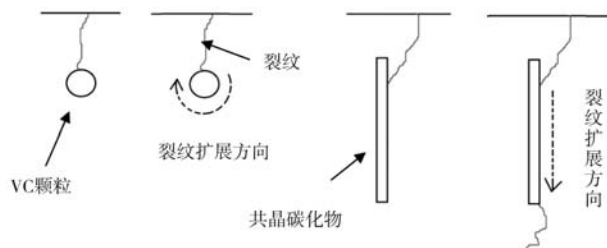


图7 裂纹沿碳化物/基体界面扩展示意图

Fig. 7 The schematic diagram of crack propagation along carbides/matrix interface

ICDP浅,下机后E-ICDP的修磨量较ICDP少。

(3) 较高的基体强度。结果表明,添加V元素后,轧辊基体强度会提高,也提升了基体组织对高硬度、高耐磨性碳化物的“固着能力”,可以阻止碳化物从轧辊基体组织中剥落,较好地保持了轧辊表面的耐磨性和粗糙度。

5 结论

(1) 添加少量V元素的E-ICDP轧辊基体组织为贝氏体+少量马氏体、残余奥氏体,组织中有大量的共晶碳化物,扫描电镜检测显示基体中含有细小、弥散分布的VC颗粒。检测结果显示E-ICDP轧辊的平均硬度值略高于ICDP轧辊。E-ICDP轧辊较ICDP轧辊显示出更好

的磨损性能和热疲劳性能。

(2) 对同一轧线同一时期使用的两种材质各12支轧辊的使用性能统计分析表明,E-ICDP轧辊的每毫米轧制量高达4 106 t/mm,较ICDP轧辊高约11.37%。E-ICDP轧辊的平均单次轧制量为2 978 t,较ICDP轧辊高约6.22%。

(3) E-ICDP轧辊的平均单次磨削量为0.725 mm,较ICDP轧辊低约4.61%。E-ICDP轧辊的异常磨削次数比例和异常磨削量比例分别为11.51%和24.11%,均低于ICDP轧辊。

(4) 较高的耐磨性、较慢的裂纹扩展速度和较高的基体强度是E-ICDP轧辊轧制性能优于ICDP轧辊的主要原因。

参考文献:

- [1] 文铁铮,郭玉珍.冶金轧辊技术特性概论[M].石家庄:河北科学技术出版社,1995.
- [2] 王卫国,李忠华.稀土对ICDP轧辊组织及抗热疲劳性能影响的研究[J].钢铁钒钛,2012,33(6):80-85.
- [3] 张建伟,袁乃博,黄德胜.改进型高镍铬铸铁轧辊的生产[J].铸造,2012,61(4):404-406.
- [4] 彭展南,杨帅.钒含量对含铌高镍铬无限冷硬铸铁组织及耐磨性的影响[J].金属热处理,2015,40(11):6-11.
- [5] 李晨辉,宋延沛,魏雪,等.热处理对RE-Nb变质无限冷硬铸铁组织与性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2014,34(6):623-625.
- [6] 李贵茂,柳艳,杜成武,等.变质处理对高镍铬钼铸铁复合轧辊工作层组织及性能的影响[J].铸造,2018,67(6):526-528.
- [7] 孙智刚,高伟,肖福仁,等.石墨及碳化物对高镍铬无限冷硬铸铁轧辊耐磨性的影响[J].材料热处理学报,2007,28(S1):94-97.
- [8] 李贵茂,柳艳,曹艺,等.合金化对高镍铬钼铸铁合金凝固组织及硬度的影响[J].热加工工艺,2019,48(2):58-60.
- [9] 万敏,杨秀霞,王晋涛,等.复合轧辊球墨铸铁辊芯铸模底箱优化设计及生产验证[J].铸造,2021,70(6):722-726.
- [10] 吴来磊.钨钼钒无限冷硬铸铁组织与性能及碳化物的力学特性[D].秦皇岛:燕山大学,2013.
- [11] XU Liujie, XING Jiandong, WEI Shizhong, et al. Investigation on wear behaviors of high-vanadium high-speed steel compared with high-chromium cast iron under rolling contact condition[J]. Mater. Sci. Eng. A, 2006, 434(1-2):63-70.

Effect of Vanadium Addition on the Microstructure and Properties of Centrifugal Compound Cast ICDP Roll

WAN Min^{1,2}, WANG Wei³, ZHANG Tao^{1,2}

(1. Hebei Institute of Mechanical and Electronic Technology, Xingtai 054000, Hebei, China; 2. Xingtai Calibration Device Intelligent Technology Innovation Center, Xingtai 054000, Hebei, China; 3. Jinxing Plastic Packaging Branch, Jizhong Energy Xingtai Mining Group Corporation Ltd., Xingtai 054000, Hebei, China)

Abstract:

The vanadium reinforced E-ICDP roll was produced by adding 1.6% vanadium alloyed element to the working layer of the traditional ICDP roll. The hardness, microstructure, and wear condition of the two roller materials were tested, compared, and analyzed. It was found that the addition of alloying element vanadium changed the morphology and distribution of carbide and graphite in the microstructure, and the formation of fine, dispersed MC type carbide in the matrix could improve the wear resistance of the matrix and reduce the speed of hot tearing propagation. The statistical comparison of the performance of two types of rollers in different rolling lines shows that the average millimeter rolling capacity of E-ICDP roller is 11.37% higher than that of ICDP roller, the average single rolling capacity is 6.22% higher, and the average single grinding capacity is 4.61% lower. High wear resistance, slower crack growth rate, and higher substrate strength are the main reasons why the rolling performance of E-ICDP roller is superior to that of ICDP roller.

Key words:

ICDP roll; vanadium; microstructure