

离心铸造高碳半钢辊环开裂失效分析

万 敏^{1, 2},李宝秀^{1, 2},杨秀霞^{1, 2},王晋涛¹,林 鹏^{1, 2}

(1. 河北机电职业技术学院,河北邢台 054000;2. 邢台市模具材料技术创新中心,河北邢台 054025)

摘要: 通过硬度检测、成分检测、金相检测、装配应力计算并结合实际铸造工艺参数,对首次上机使用时出现径向贯穿型断裂的高碳半钢液平辊环进行了失效分析。结果表明,辊环内层出钢温度过低、内外层浇注间隔时间过短,造成的辊环内层合金含量高、硬度高、脆性变大,过盈装配应力过大,导致辊环内孔形成径向裂纹并快速扩展形成贯穿型断裂。实践验证表明,规范出钢温度和浇注间隔工艺参数,增加辊环内层的硬度、成分检测,可有效避免径向贯穿型断裂的发生。

关键词:水平辊环;高碳半钢;失效分析;裂纹;

由于高碳半钢优异的耐磨性和抗热裂性,其被广泛应用于H型钢的轧制,在 现代化万能型钢轧机上作为水平辊环和立辊环使用。图1为典型H型钢万能轧机辊 系示意图。

如图1所示,一架万能轧机机架由 上下组合水平辊和左右两侧的立辊环 组成,而组合水平辊是由锻钢辊轴和 水平辊环采用过盈装配的方式组合在 一起。

水平辊环在轧制过程中,辊环外 圆和端面被H型钢包围起来,处于一 种非常复杂的应力状态,如辊环与H型 钢接触下压时的轧制应力、热应力、接 触应力等^[1]。辊环本体质量差、装配过 盈量选择不合理或轧制过程出现卡钢



图1 H型钢万能轧机辊系示意图

等,都有可能造成辊环开裂,导致轧 Fig. 1 Sketch of the H-beam universal mill roll system 线异常停机^[2]。因此,研究辊环开裂机理与产生的原因对于保证轧线正常运行是 非常重要的。

1 事故具体情况

某钢厂H型钢轧线在轧制H400钢材时发现编号为H1027号的水平辊环开裂, 该辊环为装配后首次上机,仅轧制1 093 t钢材。辊环开裂造成轧线停机2 h,现场 一支H型钢腹板部位发现连续、规律的凸起。

1.1 辊环生产和装配流程

该辊环规格为:外径1 250 mm,内径560 mm,高度398 mm。材质为高碳半 钢,辊环外圆硬度要求HSD 58~63,设计外层厚度225 mm。

辊环生产流程包括钢液冶炼、毛坯铸造、热处理、机械加工及过盈装配等部

分。辊环毛坯采用立式离心复合铸造工艺生产,外层为耐磨性、抗热裂性较好的

作者简介: 万敏(1981-),女,高级 工程师 硕士 主要研究

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:TG247 文献标识码:A 文章编号:1001-4977(2022) 12-1580-05

收稿日期: 2022-08-19 收到初稿, 2022-10-17 收到修订稿。 高碳半钢材质,而内层通常采用韧性较好的石墨钢材 质,成分范围如表1所示。铸造时,首先浇注外层钢 液,随着离心机转动逐渐实现从外到内的顺序凝固。 当凝固厚度达到工艺设计要求后,浇注芯部钢液,外 层和芯部实现良好的冶金结合^[3]。整个浇注过程和凝 固过程中离心机均处于运转状态,待内外层钢液完全 凝固后离心机停转[4-5]。

铸造毛坯辊环经过退火、粗加工、热处理、精加 工后达到可装配状态,成品辊环采用过盈装配的方式 和锻钢辊轴组装到一起成为水平辊^[6]。

Table 1 Common chemical compositions of the horizontal roll ring for the H-beam $w_{\rm B}/\%$	表1	H型钢用水平辊环常用化学成分	
	Table 1 Common chemic	al compositions of the horizontal roll ring for the H-beam	<i>w</i> _B /%

位置	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Ni	Mo
外层	1.70~1.90	0.30~0.80	0.60~1.10	≤0.03	≤0.03	0.50~2.50	0.80~1.50	0.20~0.60
内层	1.10~1.30	1.30~1.60	0.50~1.00	≤0.03	≤0.03		0.20~0.60	0.10~0.30

1.2 辊环的开裂情况

辊环开裂形貌如图2所示,整个辊环截面呈径向 贯穿型断裂,辊环外圆上的裂纹与辊环轴线平行。断 面形貌显示,整个断面颜色一致,无明显的油渍、水 渍、锈蚀痕迹。断面组织致密,未发现明显肉眼可见 的疏松、夹渣等缺陷。

2 轧辊检测

对该失效辊环进行现场和实验室检测,使用便携



图2 辊环开裂形貌 Fig. 2 Cracking appearance of the roll ring

式硬度计、超声波探伤仪、便携式合金分析仪、金相 显微镜等对该辊环的表面硬度、内部质量、化学成分 和金相组织进行了分析。

2.1 现场检测

2.1.1 硬度检测

图3是失效辊环检测点位置示意图。在辊环外圆和 端面分别选择四条母线进行硬度检测。外圆每条母线 上选取平均分布的3个检测点;端面是在半径方向从外 圆到内孔每10 mm选择一个检测点。硬度检测均采用五 次取平均值。

表2显示了辊环外圆硬度检测结果,12个点硬度范 围为HSD 59.8~62.1,硬度分布较为均匀,均匀性HSD 3以内,无明显的峰谷值。

表3显示了辊环端面硬度检测结果,该辊环设计 工作层厚度为225 mm, 在220~230 mm, 端面硬度平 均值为HSD 57.88~58.13,通过硬度可判定该处仍是外 层。

根据工艺设计,自225 mm后,辊环硬度将快速降



Fig. 3 Schematic diagram of the inspection points of the roll ring

表2 辊环外圆部位硬度(HSD)检测结果 Table 2 Hardness (HSD) test results of the roll ring outer circle

		-		
内孔距外圆距离/mm	0	90°	180°	270°
100	61.2	60.6	61.0	60.4
200	60.4	60.8	59.8	61.2
300	61.5	62.1	60.5	60.7

低至HSD 40~45水平,但该辊环的硬度检测结果与设计 要求不一致,在230~280 mm,硬度仍处于较高水平, 直到310 mm处,才出现明显的硬度降低。

2.1.2 探伤检测

采用超声波探伤仪对该辊环内部质量进行检测, 结果显示:①辊环内部无论工作层还是内层,均无明

語浩



序号	距外圆距离/mm	0	90°	180°	270°	平均值
А	10	61.3	62.1	61.8	62.2	61.85
В	50	60.7	60.5	61.5	60.4	60.78
С	150	58.8	59.4	59.9	58.8	59.23
D	200	59.2	58.2	59.4	58.9	58.93
Е	210	57.9	59.2	58.3	58.4	58.45
F	220	58.4	58.4	58.5	57.2	58.13
G	230	58.2	58.6	57.4	57.3	57.88
Н	240	57.8	56.7	55.7	56.1	56.58
Ι	250	56.4	57.0	56.2	56.5	56.53
J	280	54.8	53.6	54.6	53.0	54.00
Κ	310	49.1	50.2	48.1	48.1	48.88
L	330	45.1	47.0	45.3	46.0	45.85
-						

表3 辊环端面部位硬度(HSD)检测结果 Table 3 Hardness test results of the roll ring end face

显的缺陷反射,可判定该辊环内部无夹渣、裂纹等铸 造缺陷; ②辊环径向、轴向两个方向超声波穿透底波 清晰可见,无明显底波衰减。探伤检测显示辊环内部 质量正常。

2.2 成分分析

采用便携式合金分析仪对端面的成分进行分析, 根据检测结果整理了不同距离合金含量的变化情况, 见图4所示。自225 mm之后,Cr、Ni含量开始有所下 降,但310 mm之前,仍在1%以上,含量处于较高水 平。Mo含量没有明显变化。

2.3 金相组织分析

分别在辊环端面A点(距外圆距离10 mm)和K点(距外圆距离310mm)进行金相组织检测,如图5所示。检测结果显示,两处的组织基本为珠光体基体和碳化物。K点和A点相比其中碳化物含量略少,但高于正常碳化物含量水平。这与成分检测Cr含量偏高对应。



Fig. 4 Changes of the alloy content of the H1027 roll ring end face

3 辊环开裂分析及预防措施

3.1 基于检测和生产参数的分析

该辊环外层设计厚度为225 mm,正常生产参数 下,距离辊环外圆310 mm处(K点)应为普通的石墨钢 材质,其钢液成分中的Cr含量应小于0.3%,金相组织 中应含有大量的游离态石墨。但对现场检测结果进行 分析,发现该辊环内层存在明显的Cr含量偏高、硬度 偏高的现象,金相检测也发现内层存在碳化物含量较 高的现象。

(1)同批产品Cr含量对比。对同期生产的、在轧 线正常使用的同规格68支产品距离辊环外圆310 mm(*K* 点)处进行了Cr含量分析,结果见图6。结果显示,60 支辊环在*K*点的Cr含量低于0.30%,占比88.24%;67支 低于0.70%,占比98.53%;只有开裂的H1027号在*K*点 处Cr含量高于1.0%。

(2)同批产品生产过程对比。对现场使用的68支 辊环生产过程进行分析,对比了钢液熔炼温度、出炉 温度、内外层钢液浇注时间间隔、内层浇注速度、热 处理等生产工艺参数。

对比结果显示,H1027号辊环内层钢液出炉温度较 其他67支辊环低15~20 ℃,内外层钢液浇注时间间隔较 其他辊环短7~10 min,其他生产工艺参数基本相同。

(3)同批产品应力检测对比。对比同批次应力 抽检情况,发现内层钢液浇注温度偏高或出炉至浇注



Fig. 5 Comparison of metallographic microstructure of the outer layer and inner layer of the roll ring





时间偏短产品的应力检测值虽然在要求的应力值范围 内,但是整体趋势偏高于其他产品。

3.2 生产过程分析

辊环生产采用的是立式离心复合铸造工艺,当低 合金含量的内层钢液浇注时,必须有少量未完全凝固 的外层钢液,这种工艺可保证内外层钢液之间良好的 冶金熔合,可有效避免结合层缺陷和辊环使用过程中 的结合层开裂现象。但该生产工艺下,当内层钢液浇 注后,不可避免地要和外层未凝固的钢液充分混合, 外层钢液中含量较高的Cr、Ni等合金会在内层钢液中 不断扩散,导致内层钢液合金含量升高,钢液中的碳 化物形成元素Cr会以碳化物的形式留存在内层凝固组 织中。

辊环内层组织中碳化物的存在会大大降低内层的 塑性、提高内层的硬度,为了控制Cr元素在内层的扩 散,辊环生产中对内层钢液的浇注温度和浇注时间间 隔都有明确的要求。如果浇注温度过高或时间间隔过 短可能造成大量Cr元素进入内层,影响内层性能;如 果浇注温度过低或时间间隔过长则可能造成内外层钢 液结合质量变差,影响使用性能^[7]。

H1027辊环生产时,内层出钢温度较正常工艺要求 低15~20℃,在使用钢包无明显变化的情况下,钢液在 钢包中的温降基本一致,因此该辊环的内层钢液会更 快降低至正常内层浇注温度。现场操作人员为了保证 内层浇注温度,较工艺要求提前了7~10 min浇注了内层 钢液。此时外层钢液中未凝固比例和外层温度较正常 工艺时高,较高的温度有助于Cr元素的扩散、更多的 未凝固外层钢液为内层提供了充足的Cr元素,因此大 量的Cr元素进入了内层钢液。最终凝固后的直观表现 是内层钢液合金含量高、硬度高、金相组织中碳化物 多,导致整个辊环脆性增大。

3.3 断裂原因分析

导致辊环开裂的原因有装配过盈量过大、铸造缺

陷扩展、辊环强度低、辊环整体脆性大等。对于辊环 径向贯穿型断裂, 钱健清、郑军等人对水平辊环的过 盈装配应力状态进行了计算^[8-9],分析认为辊环的开裂 通常是由于过盈装配应力过大造成的。根据材料力学 中厚壁圆筒计算理论,在径向压力为P时的过盈量为:

 $\delta = Pd (C_1/E_1 + C_2/E_2) \times 10^3$ (1)式中: P为配合面间的径向压力; d为配合的公称直 径; E₁、E₂分别为辊轴与辊环的弹性模量; C₁为辊轴的 刚性系数。

$$C_1 = (d^2 + d_1^2) / (d^2 - d_1^2) - \mu_1$$
 (2)

(3)

語浩

 $C_2 = (d_2^2 + d^2) / (d_2^2 - d^2) - \mu_2$ 式中: C_2 为辊环的刚性系数; d_1 、 d_2 分别为辊轴的内径 和辊环的外径, 辊轴为实心, 所以 $d_1=0$ mm; μ_1 、 μ_2 分 别为辊轴与辊环的泊松比。

根据以上公式计算,结合安全校核结果,该辊环 的相对过盈量为0.85‰~0.95‰,按辊环内径560 mm计 算,过盈量为0.476~0.532 mm。现场选择的过盈量为 0.52 mm,符合安全使用要求。

根据公式(1)计算,当过盈量 δ 和配合的公称直 径一定时, $(C_1/E_1+C_2/E_2)$ 值越小, 则径向压力P越 大。考虑到辊轴材料 C_1/E_1 基本不变,则辊环的 C_2/E_2 值 越小,则P越大。

辊环是一种内外层材质不同的离心复合铸造方 式生产的零件,其 C_2/E_2 值与内外层材料的强度、韧性 及成分分布都有关系,在实验室中无法进行准确的测 量。但根据经验,在内外层材质相同的情况下,内/外 层厚度比值越小,则C₂/E₂值越小,通常工艺设计过程 中,内/外层厚度比值不小于1/2,否则辊环装配后开 裂的风险会明显升高。根据成分、硬度及金相检测显 示,可以认定H1027号失效辊环外层厚度为310 mm, 则内外层的厚度比值由设计的0.53(120/225)降低到 0.11(25/310),在与其他辊环相同过盈量设计下,此 辊环装配后产生的径向压力P变大,辊环内径部位承受 的应力较其他辊环增大。

基于以上检测结果、生产工艺参数分析和装配应 力计算,可判定断裂是由辊环整体脆性大、内层部分 塑性差、辊环内层承受的过盈装配应力、残余应力及 轧制过程中的热应力叠加超过了内层材料的抗拉强度 导致的开裂。内层Cr含量高、碳化物含量多、硬度高 是造成辊环开裂的直接原因,生产过程中内层出钢温 度低、内外层浇注间隔过短是造成辊环开裂的根本原 因。

4 预防措施及实践验证

后续生产中,分别从工艺制定与执行层面和检 测标准方面进行改进。工艺执行方面,修订了工艺措

1584 70 (1893) (1970年 工艺技术

施,严格控制内层出炉温度及出炉一浇注间隔时间, 内层出钢温度较工艺标准值偏差10 ℃以上、内外层浇 注间隔较工艺标准值偏差1 min以上的,停止生产。

检测标准方面,对所有离心复合铸造工艺生产的 水平辊环增加内层固定点位硬度检测,点位的选择根 据外层设计厚度和辊环内圆径向连线的中点处。当内 层硬度低于HSD 45时,判定为合格;当内层硬度高于 HSD 45时,补充增加便携式合金分析仪成分检测,当 Cr含量低于0.7%时判定为合格,高于0.7%为不合格。 改进工艺和检测方法后,为该条轧线生产了132支同类 水平辊环,未再发生径向贯穿型断裂问题。 检测,结合过盈装配应力分析和计算,可判定断裂是 由辊环整体脆性大、内层部分塑性差、过盈装配应力 过大引起的。

(2)生产过程中内层出钢温度过低、内外层浇注 间隔过短导致内层Cr含量过高、碳化物含量多、硬度 高、脆性大、塑性变差。

(3)结合生产实际,从工艺执行和产品检测方面 给出预防和改进措施:内层出钢温度较工艺标准值偏 差10℃以上、内外层浇注间隔较工艺标准值偏差1 min 以上的,停止生产;成品增加内层硬度和成分检测, 内层中点部位硬度高于HSD 45且Cr含量高于0.7%的产 品判定为不合格品。两方面的措施有效避免了辊环径 向贯穿型断裂的发生。

5 结论

(1)通过对贯穿型断裂辊环的硬度、成分和金相

参考文献:

- [1] 王保宏,白思诺. H型钢辊环异型离心铸造工艺研究 [J]. 中国铸造装备与技术,2007(6):19–21.
- [2] 张杰. 高碳合金半钢辊环端面裂纹及夹渣缺陷的形成与防止 [J]. 铸造设备与工艺,2017(6): 37-39.
- [3] SONG Nannan, LUAN Yikun, BAI Yunlong, et al. Computer simulation of core filling process of cast high speed steel roll [J]. China Foundry, 2009, 6 (4) : 314–318.
- [4] 刘宇,李崇,赵海军,等. ANSYS Workbench在高铬钢辊环生产中的应用 [J]. 中国铸造装备与技术, 2020, 55(4):74-78.
- [5] 白思诺,郭华楼,陈风林,等.轨梁用新型双金属辊环的研究[J].大型铸锻件,2022(4):5-8.
- [6] 乐庸志,钱国钢,曾明.提高铸铁轧辊心部强度的工艺研究 [J].铸造,2011,60 (1):80-82.
- [7] 孙绍恒,赵爱民,赵立波,等.高铬钢复合轧辊工作层离心铸造中大型夹杂物的分析与控制办法 [J].铸造,2016,65(3):211-215.
- [8] 钱健清. H型钢轧机水平辊环应力分析 [C]//中国金属学会2003年中国钢铁年会论文集, 2003: 15-17.
- [9] 郑军. 万能轧机水平辊复合热装技术的研究与应用 [C]//中国金属学会2006年全国轧钢生产技术会议论文集,2006:782-785.

Cracking Failure Analysis of Centrifugal Casting High Carbon Adamite Horizontal Sleeve

WAN Min^{1, 2}, LI Bao-xiu^{1, 2}, YANG Xiu-xia^{1, 2}, WANG Jin-tao¹, LIN Peng^{1, 2}

(1. Hebei Institute of Mechanical and Electroninc Technology, Xingtai 054000, Hebei, China; 2. Xingtai Mold Material Technology Innovation Center, Xingtai 054025, Hebei, China)

Abstract:

Through hardness testing, composition testing, metallographic testing, assembly stress calculation and combining with actual casting process parameters, the failure analysis of high carbon adamite horizontal roll ring with radial through fracture when it was first used on the machine was carried out. The results showed that low tapping temperature and short pouring interval time in the inner and outer layers of the roll ring resulted in high alloy content, high hardness and greater brittleness in the inner layer of the roll ring, and excessive interference assembly stress, which led to the radial cracks in the inner hole of the roll ring and rapid propagation to form through fracture. Practice showed that standardizing tapping temperature and pouring interval process parameters and increasing hardness and composition detection of the inner layer of the roll ring roll ring can effectively avoid the fracture.

Key words: horizontal sleeve; high carbon adamite; failure analysis; cracking