

分类号 TF3

学号 1004330108

西安建筑科技大学

学位论文

链篦机篦床主要零部件失效原因

分析与改进试验

作者 易林根

指导教师姓名 张聪惠 教授

彭 兵 高级工程师

申请学位级别 工程硕士 专业 名称 冶金工程

论文提交日期 2013.05 论文答辩日期 2013.05

学位授予单位 西安建筑科技大学

答辩委员会主席

杨西荣

评 阅 人

华建社

谢玉松

声 明

本人郑重声明我所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的科研成果。尽我所知，除了文中已经标明引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果，也不包含本人或其他人在其它单位已申请学位或为其它用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的所有贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了致谢。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名：易林根

日期：2013.5.16

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解西安建筑科技大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或者其它复制手段保存学位论文。

（保密的论文在论文解密后应遵守此规定）

论文作者签名：易林根

指导教师签名：张聪慧

日期：2013.5.16

本人授权中国学术期刊（光盘版）杂志社将本学位论文收录到有关“学位论文数据库”之中，并通过网络向社会公众提供信息服务。同意论文提交后滞后：☐半年；☐一年；☐二年发布。

论文作者签名：易林根

指导教师签名：张聪慧

日期：2013.5.16

注：请将此页附在论文首页。

链篦机篦床主要零部件失效原因分析与改进试验

专 业：冶金工程

硕 士 生：易林根

指导教师：张聪惠 教授

彭 兵 高级工程师

摘 要

自 2000 年首钢迁安球团厂链篦机-回转窑球团生产线截窑改造成功以来,我国链篦机-回转窑球团进入了一个高速发展时期。然而在生产中,由于链篦机的零件材料选取不当和结构设计缺陷,极易造成篦床零部件快速失效,从而引发生产事故,严重制约了生产效率的提高。随着新钢公司的发展,目前高炉球团矿配比已达到 15%左右,但是球团厂月产量只有 7~9 万吨,远未达到设计产能,每月需外购球团 2~3 万吨。外购球团矿比公司自产球团矿每吨价格高出 80~150 元,给企业造成了不小的负担。为增加自产球团矿产量,充分发挥设备潜力,提高企业经济效益,降低链篦机故障率是新钢球团厂目前迫切需要解决的问题。

新钢公司球团厂篦床零部件氧化烧损、变形、断裂是链篦机事故的主要原因。针对此问题,本文采用外观检查观察、成份分析、金相分析、力学试验、热膨胀测试等方法,探讨零部件失效机制;研究了耐热钢的抗氧化规律、各元素对耐热钢组织和性能的影响、材料的焊接性能;对零件材质、结构、链篦机设备进行了改进试验。主要结论如下:

(1) 小轴在工作中承受 600℃以上的高温与 135.67MPa 以上的剪应力,20CrMo 材质的小轴在此工作环境下易发生蠕变与断裂失效现象。在 2Cr13 中加入 3%左右的 Ni 与 4%左右的 Mn,可提高小轴的高温组织稳定性,满足制作小轴零件材质要求。

(2) 原篦板结构单薄,而且 ZG30Cr26Ni5 材料在高温下的耐磨性、抗氧化性差,易发生快速磨损,导致篦条断裂失效。ZG35Cr24Ni7SiN 最高使用温度可达 1100℃,而且高温强度高,抗氧化性能好,适合用作篦板、侧板零件材质。

(3) 侧板的氧化烧损失效主要由于篦床布料不均及操作不当造成;链节的断裂失效主要由于主轴链轮在高温下发生松动移位所致。采用 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢材料制作溜料板、调节摆头皮带机摆幅等措施,可确保篦床布料均匀,减缓侧板烧损失效的发生。通过在主轴二侧加装锁紧螺母,能有效防止链轮高温下松动外移。

(4) 在机尾增设篦板自动强制复位装置,能自动检测到未复位的篦板并强制其回位,可避免篦床空料,对篦床的运行能起到良好的保护作用。

关键词：链篦机；耐热钢；零件失效原因分析；改进试验

Failure analysis and improvement research of chain grate parts

Specialty: Metallurgical Engineering

Candidate: Yi Lingen

Supervisors: Professor Zhang Conghui

Professor Engineer Peng Bing

Abstract

Since the production process of chain grate machine - rotary kiln pellets was successfully put into use in Shougang Qian in 2000, this technology has been greatly developed in our country. But in practice, chain grate parts are easily to fail because of improper selection of materials and design deficiency, which results to great economic loss for the company. In Xinyu Steel, the blast furnace pellets ratio has reached 15%. But the production quantity of pellets is only 70000 ~ 90000 tons for one month, which is far from the design capacity. And 20000 ~ 30000 tons of pellets are needed to buy from other company every month, which leads to economic burden since the higher price. In order to increase self-produced pellets production and economic efficiency, it is necessarily to reduce the fault rate.

In Xinyu Steel, oxygenation loss of grate bed parts, deformation and fracture are the main reason for failure for the parts of chain grate machine. In the present study, visual inspection, mechanical testing, chemical element analysis, metallographic analysis, linear expansion calculation were used to explore the failure mechanism in detail. The antioxidant regularity of heat resistant steel, the influence of various elements on the microstructure and mechanical properties of heat resistant steel constituent, and the material welding performance were examined. Based on the analysis, improvement experiments were carried out. The main conclusions are as follows:

(1) The working temperature is higher than 600 °C and the shear stress can be higher than 135.67 MPa for the small shaft when it is used. In this condition, 20CrMo is easy to creep and fracture. And the 2Cr13 with addition of 3%Ni and 4% Mn can improve the microstructure stability at high temperature, which satisfies the performance requirement of small shaft parts.

(2) The old grate plate structure was thin, and ZG30Cr26Ni5 exhibited poor abrasion

resistance and oxidation resistance at high temperature, which easily leads to failure. While ZG35Cr24Ni7SiN can work at 1100°C and shows better mechanical properties and oxidation resistance, so it is suitable to make grate plate and side panel parts.

(3) The reason for oxidation burning of side panel mainly lies in the uneven distribution of pellets and the improper operation. The fracture failure of links is due to the displacement because of the loose of parts at high temperature. 1Cr18Ni9Ti austenitic stainless steel was used as slipping plate and the swing scale of the belt machine was adjusted to proper level, and so a better distribution of pellets can be achieved. Lock nuts were equipped on both sides of the main shaft, and chain loose was prevented.

(4) The addition of mandatory automatic reset device in the end of the chain grate machine can force grate plate return and avoid empty of grate bed, it is also can play a good protective effect for the grate bed.

Keywords: chain grate machine; heat resistant steel; failure analysis; improvement experiment

目 录

1 绪 论	1
1.1 引言	1
1.2 链篦机—回转窑球团生产的发展与工艺特点	2
1.2.1 链篦机—回转窑球团生产发展简史	2
1.2.2 链篦机—回转窑球团法生产工艺特点	3
1.3 链篦机及篦床设备结构特点	4
1.3.1 链篦机	4
1.3.2 篦床	5
1.4 链篦机篦床生产应用现状与耐热钢的发展应用	6
1.4.1 链篦机篦床生产应用现状	6
1.4.2 耐热钢的发展应用	6
1.5 课题的应用背景及研究的主要内容	7
1.5.1 课题提出背景	7
1.5.2 本课题研究的目的及主要内容	7
1.5.3 本课题研究的创新点	8
2 篦床零部件失效原因分析	10
2.1 小轴失效原因分析	10
2.1.1 宏观形貌分析	10
2.1.2 化学成分分析	10
2.1.3 力学性能分析	11
2.1.4 小轴高温下热膨胀伸长量计算	13
2.1.5 小轴失效原因分析结论	14
2.2 篦板失效分析	14
2.2.1 宏观形貌分析	14
2.2.2 化学成分分析	15
2.2.3 硬度检测	15
2.2.4 金相分析	16
2.2.5 篦板失效原因分析结论	16

2.3 链节失效原因分析	17
2.3.1 宏观形貌分析	17
2.3.2 化学成分分析	17
2.3.3 链节受力分析	18
2.3.4 设备检查	18
2.3.5 链节失效原因分析结论	18
2.3.6 主轴链轮位置发生移动后的维修尝试	18
2.3.7 防止链节断裂失效临时工艺控制措施	19
2.4 侧板失效原因分析	19
2.4.1 宏观形貌分析	19
2.4.2 化学成分分析	20
2.4.3 侧板工况分析	20
2.4.4 侧板失效原因分析结论	20
3. 设计与选材必须考虑的几个因素	21
3.1 耐热钢的抗氧化规律	21
3.2 耐热合金中各元素对耐热钢组织和性能的影响	22
3.3 零件选材的经济可行性	24
3.4 材料的焊接性能	24
3.4.1 篦床的日常维护要求篦床零件必须具有良好的焊接性能.....	25
3.4.2 小轴二端的固定设计要求其必须具有良好的焊接性能.....	25
3.5 链篦机篦床工况.....	26
4. 改进与试验.....	27
4.1 小轴改进方案	27
4.2 篦板改进方案	27
4.2.1 材质改进	27
4.2.2 结构改进	29
4.3 侧板失效改进措施	30
4.4 链篦机设备改进	30
4.4.1 增设篦板强制复位装置	30
4.4.2 改进链篦机主轴链轮固定结构	31

4.5 零件改进后新做备件质量控制	32
4.5.1 新做小轴备件质量检测	32
4.5.2 新做篦板备件质量检测	33
4.6 实验过程及效果	34
4.6.1 小轴及篦板改进效果	34
4.6.2 篦板强制复位装置使用效果	34
4.6.3 链篦机主轴改进实施效果	35
4.6.4 生产工艺控制改进措施	37
5. 结束语	38
6 结 论	39
致 谢	40
参考文献	41

1 绪 论

1.1 引言

迄今为止，全球铁矿资源中，已探明的品位大于40%的铁矿石约8500亿吨。我国铁矿储量居世界第5位，其中含铁50%以上的富矿却仅占已探明储量的4%左右，绝大部分为含有害杂质（Ps、Pb、Zn、As）的贫矿。这类矿石须细磨、精选、球团后才能入炉冶炼。铁矿资源的变化，人造块矿的优越性，极大地促进了球团技术的发展。我国铁矿资源以贫矿为主，细磨精矿粉更适合生产球团矿。球团矿通过低于混合物料熔点的温度下进行高温固结，使生球发生收缩而且致密化，从而使生球具有良好的冶金性能（如强度、还原性、膨胀指数和软化特性等），以此保证高炉冶炼的工艺要求^[1]。球团矿具有强度高、粒度均匀、形状规则、含铁品位高、还原性好等优点，在高炉冶炼中可起到增产节焦、改善炼铁技术经济指标、降低生铁成本、提高经济效益的作用。为适应钢铁工业快速发展，高炉精料技术和合理炉料结构的要求，近年来，球团矿作为优质原料，得到青睐和高度重视，一些钢铁厂正在积极筹建和扩大球团矿产能。

目前铁矿球团的主要生产方法有带式焙烧机、链篦机一回转窑和竖炉。竖炉方式是最早使用的球团焙烧方式，但由于受工艺限制，受热不均匀，设备规模小，产品质量差，现在几乎不用^[2]。带式球团焙烧方式的工业化使用比竖炉略迟。它采用简单的设备对球进行干燥、预热、焙烧和冷却，因此设备构成简单，操作也较容易。由于设备也能大型化，目前仍有很多厂采用^[3]。但带式焙烧机投资及运行成本高，必须用高热值煤气或重油作燃料来保证焙烧气体中的氧化气氛，这使得带式焙烧机只能建在钢铁厂内，并受煤气平衡、设备制造材料、总图布置和环保等诸多因素限制^[4]。链篦机一回转窑球团焙烧方式由链篦机-回转窑和环冷机构成。球团焙烧工序的干燥及预热、焙烧、冷却分别采用相应的设备进行。因此，各工序容易控制，且具有球团质量均匀，强度高，生产设备能力大等优点^[3]。对各种铁矿和燃料适应性强，调节焙烧制度灵活，尤其是使用回热系统后大大改善了热能利用。链篦机-回转窑以煤粉为能源，可建在矿山或港口，运输便利，减少钢铁生产环境污染，有利于节能降耗和可持续发展。因此，发展链篦机-回转窑球团受到我国越来越多的重视。随着钢铁工业的发展，要求球团工艺不仅能处理磁铁矿，而且能处理赤铁矿、褐铁矿、含铁粉尘、硫酸渣等，另外随着我国高炉大型化和合理高炉炉料需要高质量酸性球团矿的要求，极需建设一批大型球团厂。2000年7月18日首钢对原生产金属化球团的链篦机-回转窑设备彻底改造为生产氧化球团矿生产装置，

并于当年10月18日顺利投产，2001年产量就达到102.36万吨，实现了预期效果^[3]。在首钢球团厂链篦机-回转窑生产线截窑改造成功和取得良好技术经济指标的基础上，链篦机-回转窑生产技术更为人们所青睐。我国不少企业开始了较大规模的球团矿生产工厂的建设。并着手在港口（进口矿石）建设球团厂的规划和可行性研究^[4]。此后，我国掀起了新建链篦机-回转窑球团矿生产工厂的热潮。2009年底，全国已建成140多条链篦机-回转窑生产线，产能占我国球团产能的一半以上。主要单窑生产规模以100万t/a~240万t/a产量为主。目前，单窑产能规模最大的是武钢鄂州球团厂链篦机-回转窑球团生产线，年生产500万吨。

链篦机作为生产氧化和金属化球团的主要设备，生产中它要承受周期性变化的高温作用，工作条件恶劣。其采用耐高温材质的零部件要求高、数量大；其中篦床零部件链节、小轴、篦板、侧板等数量最多，它始终处于高温（800~1000℃）与低温（200~300℃）交变的工况下工作。能否承受恶劣的工作环境是关系到整台链篦机能否正常工作的关键^[6, 7]。因此，要求篦床零部件采用耐热合金钢制作，如设备设计选材不当，极易发生氧化烧损、蠕变变形、断裂等失效现象，引发事故故障，一旦停机停产将造成巨大的经济损失。因此，紧跟发展形势，深入研究链篦机等球团生产设备，研究篦床零部件材料的力学性能、抗氧化性能、耐热性能，制定合理的链篦机热工制度，优化链篦机零部件设计，对减少链篦机事故故障、提高作业率、改善各项经济技术指标具有重要意义。

1.2 链篦机-回转窑球团生产的发展与工艺特点

1.2.1 链篦机-回转窑球团生产发展简史

链篦机-回转窑最早应用于水泥工业。美国爱里斯-哈默斯公司通过试验证明可以用这种设备生产铁矿球团，并于1960年在亨博尔特球团厂建成了世界上第一套生产铁矿球团的链篦机-回转窑。当这种新的球团工艺一问世就得到世界各铁钢、矿业部门的重视，并获得迅速发展^[8]。1960年链篦机-回转窑的生产能力仅占世界球团矿总生产能力的3.7%，1964年以后就成倍地增长，到1980年其生产能力已达到总生产能力的40%^[9]。至2003年底，全球约有20个国家在生产球团矿，年总生产能力约3.181亿t。其中，链篦机-回转窑年生产能力为8910万t，占总生产能力的28.01%^[10]。

我国链篦机-回转窑氧化球团的开发较晚，直到1978年才在沈阳立新铁矿建成1.8m×20.5m链篦机-Φ2.5m×24m回转窑试验装置；1982年在承德钢铁厂建成2.4m×23.75m链篦机-Φ3.5m×30m回转窑球团车间，年产球团矿40万吨^[9]。首钢在迁安矿业公司于1986年建有一套用于生产海绵铁的4m×52m链篦机-Φ4.7m×74m回转窑生产装置，长期

不能正常生产，1989年改生产高炉球团矿，由于工艺不合理，造成能耗高、产量低，产品质量也达不到标准。因此，首钢于2000年按照球团矿的工艺要求，对该链篦机-回转窑设备又进行了全面改造，取得了巨大成功，并实现了预期效果^[11]。这几套链篦机-回转窑氧化球团装置的建成投产和连续的生产实践，为我国的链篦机-回转窑氧化球团的发展，特别是在设计、施工、设备制造和生产操作方面提供了成熟的经验和可靠的依据。随后，鞍钢弓长岭铁矿、武钢程潮铁矿、柳钢和昆钢等地先后建成了一批100~200万吨级的中型链篦机-回转窑氧化球团厂及一批小型链篦机-回转窑氧化球团厂，还有一批100~500万吨级的大中型链篦机-回转窑氧化球团厂正在建设中。我国链篦机-回转窑氧化球团进入了一个迅猛发展时期。截止2006年底，国内已经投产和在建的链篦机-回转窑氧化球团产能达5950万吨，其中200万t/a以上能力的生产线共14条，100万~200万t/a能力的有12条。这可以看出我国链篦机-回转窑球团设备向大型化发展的一个趋势。依靠我国自己的力量，建设300万~500万t/a能力链篦机-回转窑球团已有了充足的经验和技術储备^[12]。2006年~2020年中国钢铁工业科学与技术发展指南提出，“中国高炉炉料中球团比约12%，从当前优化炉料结构发展趋势看，中国应大力发展球团生产，并全面提高球团生产水平。”球团技术的发展目标要“实现装备大型化，形成以不小于200万吨年产量的链篦机-回转窑为主体的球团生产工艺与装备，加快淘汰小竖炉球团工艺装备。”^[13]因此，我国链篦机-回转窑球团仍具有广阔的发展前景。

1.2.2 链篦机-回转窑球团法生产工艺特点

链篦机-回转窑球团法（图1.1新钢链篦机-回转窑工艺设备运转功能示意图）的特点是将含铁生球布在慢速移动的链篦机篦板上，生球在链篦机上处于相对静止状态，在这里进行干燥和预热，然后再送入回转窑内。球团在回转窑内不停地滚动，进行高温固结，生球的各个部位都受到均匀的加热。由于球团在窑内不断滚动，使球团矿中精矿颗粒接触更加紧密，所以焙烧效果好，生产的球团矿质量也好，适合处理各种铁矿原料。而且可以根据生产工艺的要求来控制窑内的气氛，这种方法不仅可用于生产氧化性球团矿，而且还可以生产还原性球团矿，以及综合处理多金属矿物^[14]。

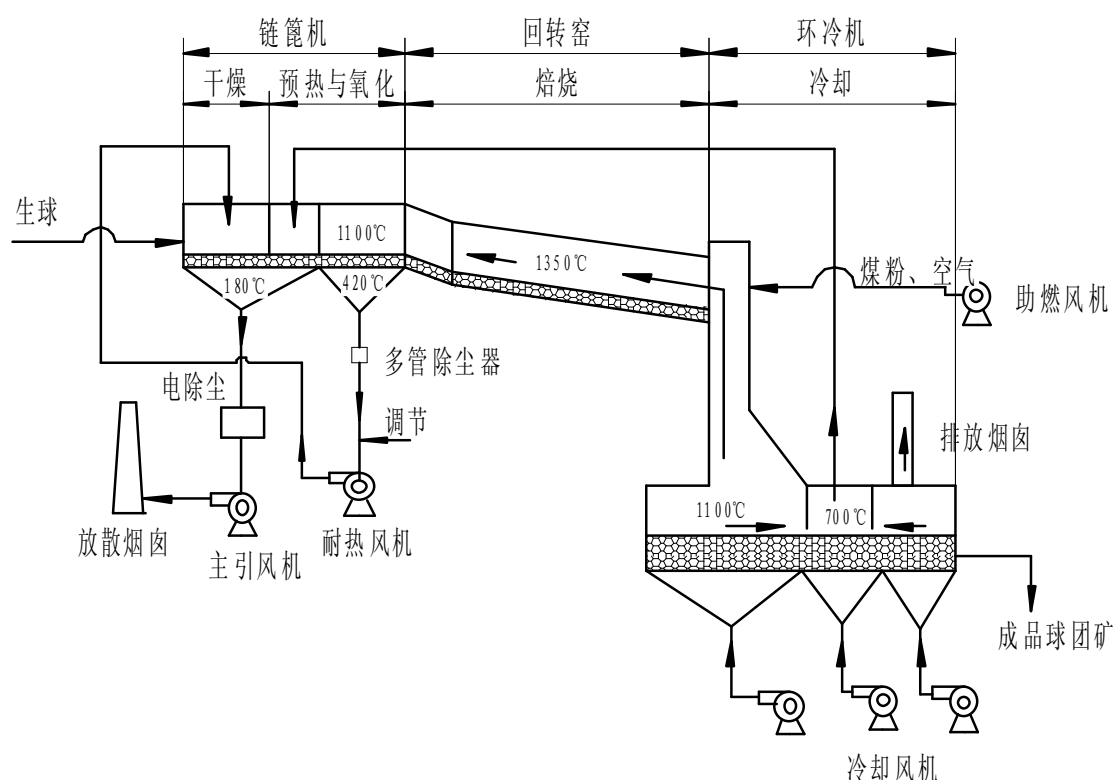


图 1.1 新钢链篦机—回转窑工艺设备运转功能示意图

Fig.1.1 Schematic diagram of the Xinyu steel grate-kiln process equipment operation function

1.3 链篦机及篦床设备结构特点

1.3.1 链篦机

链篦机-回转窑球团法的主要设备由链篦机、回转窑和环冷机组成，而链篦机则是最关键设备。链篦机主要由运行部分、上部炉罩、骨架、风箱、灰箱、铲料板、下回程密封装置、润滑和水冷等系统组成。其中运行部分由主轴及传动装置、篦床装置、上托轴装置、下托轴装置、尾轴装配、中部密封装置、滑轨、支梁和张紧装置等组成^[15]（见图 1.2）。而篦床装置又是链篦机运行部分的核心。

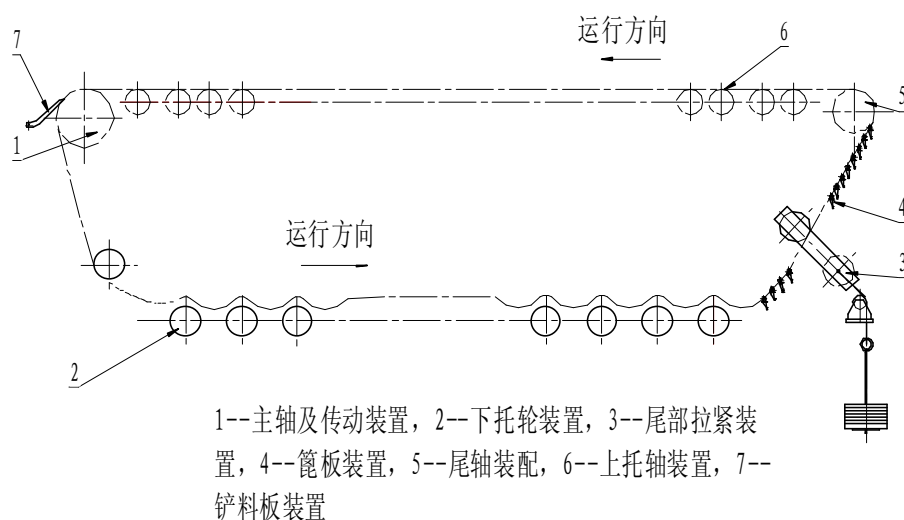


图 1.2 链篦机运行示意图

Fig.1.2 Schematic diagram of the chain grate machine operation

1.3.2 篦床

篦床是由小轴、链节、篦板、侧板、定距管和小轴套等连接在一起形成的一个连续的链条结构，实际上相当于由多条单排链组合而成的大链条。图1.3为新钢球团厂B4.0×38m链篦机局部篦床零件装配结构图（见图1.3）。

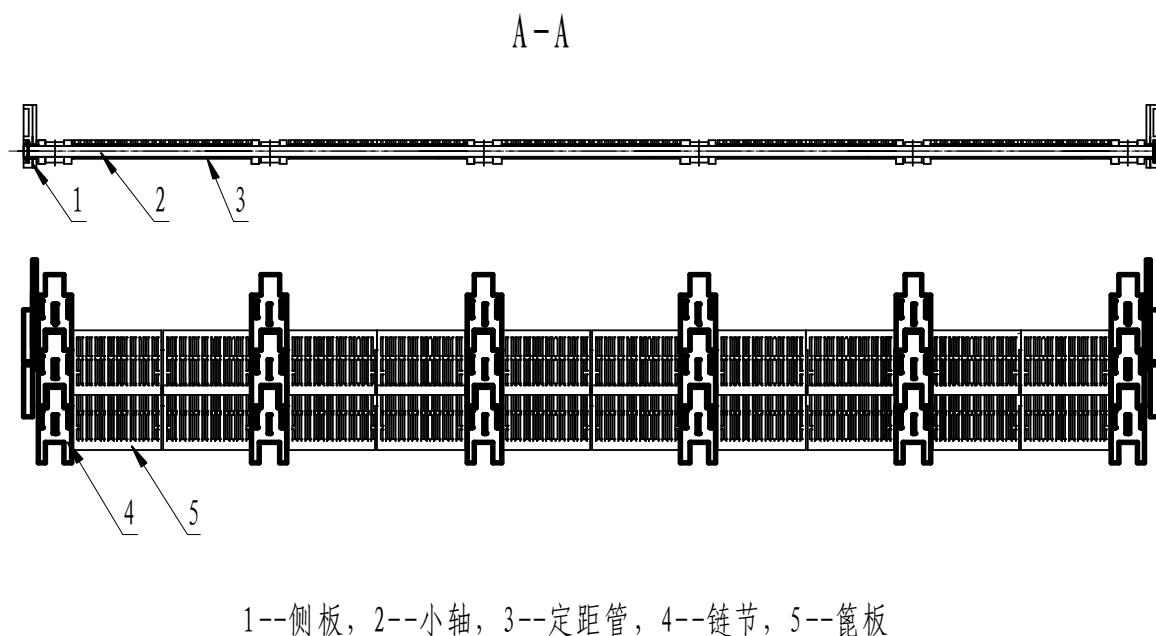


图1.3 篦床零件装配图

Fig.1.3 Grate bed parts assembly diagram

篦床是链篦机用于输送球团矿的核心部件，它始终处于高温（800~1000℃）与低

温(200~300℃)交变的工况下工作。工作中,链篦机连续将布在篦床上的生球料层以设计好的缓慢速度经过干燥段、预热段,生球料层在输送链的带动下在链篦机上脱水、干燥、预热并开始氧化,干球温度达到1000℃以上,由铲料板卸入回转窑中进行焙烧。高温、氧化性气氛、干燥过程中生球爆裂产生的大量粉尘、矿粉与燃料中带入的硫在氧化燃烧时产生二氧化硫有害气体等均会对篦床的使用寿命产生重要影响。由于工作中篦床零部件需要承受高温、高粉尘、腐蚀性气体等恶劣环境共同作用,又要承受巨大的工作载荷。因此,对篦床的零部件的设计选材要求较高,零件材质既要具有较好的高温力学性能,又要具有较好的耐热、耐磨、耐腐蚀性能。小轴、篦板、侧板和链节要求采用耐热合金钢精密铸造,并经过固溶化处理,使合金中各相得到充分溶解,以强化固溶体,提高材质的持久强度和蠕变强度。

1.4 链篦机篦床生产应用现状与耐热钢的发展应用

1.4.1 链篦机篦床生产应用现状

篦床是链篦机的主要部分,它的作用是对布在其上的料球进行干燥、预热。它的工作条件比较恶劣,温度变化大,由20~1000℃左右,而且要承受巨大的拉力。新建的链篦机一回转窑生产线,绝大多数在试生产或使用中链篦机都产生了一些严重的事故或故障。其中篦床使用寿命短就是链篦机最主要的故障之一。北京威克冶金有限责任公司球团厂耐热钢链节,使用寿命要求为1.0~1.5年,但不到8个月就发生了断裂,严重影响了正常生产^[16]。承钢链篦机在使用初期,链篦机篦床在机头处转下来时已烧得发红,大约500~600℃,因篦床使用的链节、小轴、定距管等都是普通合金钢,承受不了高温,很快拉弯变形^[17]。新钢链篦机在试产阶段,篦床在链篦机机头处被大面积损坏,投产后生产过程中常发生小轴弯曲、链节断、篦板与侧板严重烧损失效。

1.4.2 耐热钢的发展应用

零部件长期在高温环境下使用,工况条件恶劣,不仅要求材料具有良好的抗氧化性和热强性,还要兼有较好的高温磨料磨损抗力^[18, 19]。抗磨耐热钢具有良好的高温抗氧化性、耐磨性和热强性,被广泛应用于冶金、电力、建材、化工等工业部门热工设备的高温金属构件^[20]。20世纪50年代,我国的高温材料主要依赖进口。基于庞大的国内市场需求,我国首先引进国外的耐热钢和高温合金,进而消化、吸收,发展了我国自己的耐热钢、高温合金和钛合金^[21]。长期以来,为提高耐热钢的高温性能,同时降低其生产成本,主要通过多元合金化方法,以锰、氮等代镍,降低镍含量;采用表面处理技术,使

其耐热温度大大提高,从原来的700~900℃提高到900~1200℃,从而大大拓展了应用领域^[22, 23]。

1.5 课题的应用背景及研究的主要内容

1.5.1 课题提出背景

已建成投产的链篦机-回转窑-环冷机球团生产线,在生产实践中,大都遇到了链篦机设备故障多,备件消耗大等问题,而篦床零部件的提前失效与突发故障是其主要原因。为减少事故故障,提高链篦机的利用系数,国内部分球团厂采用每二年左右对链篦机进行一次设备大修,将篦床整体更换。设计产能120万吨/年的球团生产线,更换一次链篦机篦床的费用将达500万元以上。

在我国,虽然经过多年的研究应用、生产实践改进,链篦机-回转窑-环冷机球团生产技术日臻完善;但是,链篦机因设备结构设计缺陷,篦床零件材质选择不当、操作维护技能不足、原燃料条件不同、生产工艺规程制定不合理等造成篦床零部件快速失效引发的事故故障仍然较多,篦床零部件的消耗较高。因此,结合球团生产线的实际情况,分析掌握篦床主要零部件失效的原因,制定有效的控制措施,实施科学合理的设备技术改进,使篦床零件达到甚至超过原设计服役周期,能产生极高经济效益,具有重要的现实意义。

新钢公司球团厂120万吨/年链篦机-回转窑-环冷机球团生产线是新钢公司三期技改的重点工程之一,于2005年11月16日建成投产,产品全部供给公司一铁厂9[#]、10[#]高炉使用。通常篦床零部件设计使用寿命为12~18个月,而该厂篦床使用寿命不足半年,就发生小轴严重弯曲变形、断裂,篦板篦条严重磨损、断裂,侧板严重烧损,链节频繁断裂等问题。篦床故障多,备件消耗量巨大,对生产造成了严重影响,月产量只有7~9万吨,远未达到设计产能。新钢公司高炉球团矿配比15%左右,每月球团矿缺口2~3万吨,该部分球团矿必须对外采购,但外购球团矿比公司自产球团矿价格高80~150元。为增加经济效益,提高自产球团矿产量,发挥设备潜力,降低链篦机事故故障是新钢球团厂目前迫切需要解决的问题。而篦床零部件氧化烧损、变形、断裂等失效问题是链篦机事故故障的主要表现形势。

1.5.2 本课题研究的目的及主要内容

跨入二十一世纪以来,伴随着我国链篦机-回转窑球团技术的蓬勃发展,链篦机设备也得到了大规模的应用。链篦机是在高温上工作的一种热工设备,主要零部件采用耐

热合金钢制成。因各球团厂设计选型、生产原料、操作技术水平各不相同，链篦机在试产或生产使用中发生的篦床损坏事故各种各样且屡见不鲜。篦床主要零部件损坏失效是各种事故的主要表现形式。为保证链篦机正常运行，对篦床主要零部件失效原因进行研究分析，制定相应的改进措施，是避免事故故障，提高设备作业率，降低球团矿生产成本，得到质量符合要求的球团矿的重要途径。

本课题研究的主要内容包括：

(1) 以新钢公司球团厂120万吨/年链篦机-回转窑球团生产线链篦机篦床为研究对象，对篦板、链节、小轴、侧板的化学成份与力学性能等进行试验分析研究，分析耐高温材质中各元素对材料的高温性能的影响，研究篦床零件的合理选材，研究链篦机设备结构设计上存在的问题。

(2) 根据研究结论，选择适当的零件材料，测绘与改进零件结构，改进链篦机设备。

(3) 在上述条件下，解决新钢公司球团厂链篦机主要零部件非正常损坏失效问题。绘制篦床零件图，为新钢公司球团厂委托篦床零件加工制作、进厂检验提供依据。

1.5.3 本课题研究的创新点

二十一世纪以来，我国球团工业处于高速发展时期，链篦机-回转窑球团生产线的建设基本以工程总包的方式进行，许多同类型同规模的球团厂基本是以样本复制的方式进行，这样，不可避免地复制了许多初始设计缺陷。篦床作为链篦机上的关键设备，其零部件失效事故也在许多球团厂重演。为防止事故重复发生，深入研究篦床设备，并采取正确的应对措施迫在眉睫。

本课题研究的创新点体现在：

(1) 目前，我国链篦机-回转窑球团技术的蓬勃发展，链篦机设备得到了大规模的应用，而各球团厂链篦机在试产或生产过程中故障频发，篦床零件提前失效情况严重。依据新钢球团厂链篦机篦床使用现状，对篦床主要零部件失效情况进行研究分析，得出结论，并进行改进实验，对指导新钢球团厂链篦机设备管理，促进球团生产发展具有现实意义，对国内同类型、同规模的球团厂也有一定的借鉴作用。

(2) 本课题以新钢球团厂链篦机篦床主要零部件失效情况进行分析研究与改进试验，虽然工程设计总包单位不同，链篦机设计与耐热钢选材不同，导致篦床零部件失效的原因不尽相同，但是链篦机热工制度差异不大，篦床工作环境基本一样，因此，本课题部分研究结论适用于其它球团厂链篦机。

(3) 篦床零部件失效造成的事故经济损失巨大，如对新钢球团厂链篦机篦床零部

件失效原因、处理经验有充分认识，可对国内同类型同规模的链篦机—回转窑球团设计与生产使用单位提供一定的指导作用。

2 篦床零部件失效原因分析

2.1 小轴失效原因分析

2.1.1 宏观形貌分析

通过对失效的小轴进行宏观形貌观察和分析发现:小轴与链节轴孔侧发生了蠕变变形错位,蠕变变形方向平行篦床运行方向,严重的发生断裂,小轴在轴孔处有明显磨损;小轴中间部位发生拱起弯曲变形(见图 2.1)。小轴明显伸长,轴头高出侧板 20mm 左右,且冷却后不能缩回(见图 2.2)。蠕变变形量在篦床两侧链节处最大,弯曲变形也主要发生在篦床两侧。



图2.1 弯曲变形的小轴



图2.2 高温膨胀伸长后的小轴一侧

Fig.2.1 A small shaft bending deformation

Fig.2.2 High temperature expansion shaft side elongation
after

2.1.2 化学成分分析

在失效的小轴样品上取样进行化学成分测试,结果见表 2.1。根据测试结果,查阅标准:GB/T 3077-1988,该样品对应钢种为 20CrMo、25CrMo。该钢种热强性较高,在 500~520℃时,热强性仍高,淬透性较好,无回火脆性,冷应变塑性,可加工性及焊接性均良好,一般在调质或渗碳淬火状态下使用,用于制造在非腐蚀性介质及工作温度低于 250℃、含有氮氢混合物的介质中工作的高压管及各种紧固件、较高级的渗碳零件,如齿轮、轴等。该钢种中 Cr、Ni 含量极低,其高温强度、抗氧化性和耐腐蚀性差,易

发生高温蠕变变形。小轴实际工作温度最高达 600℃ 以上，该小轴样品材质不能满足工作要求。

表 2.1 小轴化学成分分析结果 (wt%)

Table 2.1 The analysis results of small chemical components (wt%)

成份	C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo
实测结果	0.26	1.42	0.227	-	-	0.148
20CrMo 钢 标准	0.17~0.24	0.80~1.10	-	0.17~0.37	0.40~0.80	0.15~0.25
25CrMo 钢 标准	0.22~0.29	0.90~1.20	-	0.17~0.37	0.50~0.80	0.15~0.30

2.1.3 力学性能分析

A、硬度检测

从使用过的小轴样品中切取布氏硬度试样，对材料进行硬度检测，按照 GB/T3299—1991，GB/T231.1-2009 硬度试验的要求，用直径为 5mm 的硬质合金球在 750kN 的试验条件下保持 10~15s 进行测试，将 3 次测量结果平均，（见表 2.2）结果表明，该材料的布氏硬度约为 224HB，而标准 20CrMo 钢的力学性能指标为 197HB，对比结果说明，材料的在使用过程中出现了硬化现象。

表 2.2 小轴硬度检测结果

Table 2.2 Shaft hardness test results

测点序号	1 [#]	2 [#]	3 [#]	平均值
布氏硬度值 (HBW5/750)	222	224	226	224
20CrMo 钢标准值	-	-	-	197

B、拉伸试验

为检验小轴材料的力学性能，从样品中切取试件，按照 GB/T228-2010 拉伸试验标准加工成拉伸试件（图 2.3），进行拉伸试验。试验结果（见表 2.3）。由试验结果可知，强度低于 20CrMo 钢标准，并计算出屈强比为 0.6，低于 20CrMo 钢屈强比（0.77），可见材料的可靠性较差，易于发生弯曲变形。

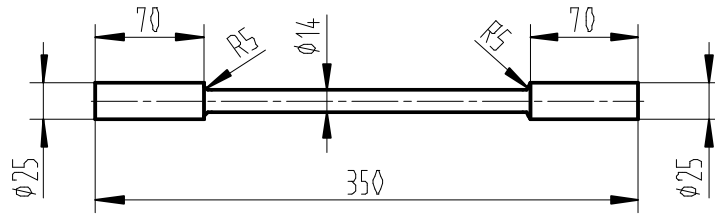


图 2.3 小轴拉伸试样图

Fig.2.3 Small tensile specimen map

表 2.3 小轴拉伸试验结果

Table 2.3 The results of small tensile test

试验项目	实测值	20CrMo 钢标准值
下屈服强度 ReL(MPa)	404	≥ 685
抗拉强度 Rm(MPa)	671	≥ 885
断后伸长率 A(%)	8.5	≥ 12
断面收缩率 Z(%)	9	≥ 50

C、小轴与链节受力分析

整个链篦床是由 6 条单排链、440 根小轴组合而成的大链条。链轮齿数 $Z=16$ ，链节中心距 $P=200\text{mm}$ ，输送球团料厚 170mm ，生球堆密度 2.2 t/m^3 ，工作周期为 45min 。正常运行速度为 1.95m/min 。驱动方式为在主轴二侧由二套传动性能参数相同的 BHFD190-115-0.93-7.5 $\times$ 2 三环减速机同时驱动，减速机总传动比 $i=1170$ ，输出转速： $n_i=0.1\sim 0.91\text{r/min}$ ，正常工作转速： $n=0.5\sim 0.7\text{r/min}$ ，公称输出扭矩为 $115\text{KN}\cdot\text{M}\times 2$ ，额定输出功率为 $4\times 7.5\text{KW}$ 。主轴头轮节园直径为 $\Phi 1025.17\text{mm}$ 。

图 2.4 示出了小轴受力结构尺寸情况。可计算出

链节工作拉力（小轴所受剪切力）：

$$F = \frac{1}{6} \times \frac{1000P}{v} = \frac{1}{6} \times \frac{1000 \times 4 \times 7.5}{\frac{1.95}{60}} = 153876\text{N}$$

小轴截面积：

$$A_1 = \frac{1}{4} \times \pi d^2 = \frac{1}{4} \times \pi \times 38^2 = 1134\text{mm}^2。$$

图 2.5 示出了链节最小截面结构面积: $A_2=3608\text{mm}^2$

电机全额输出时小轴所受剪应力 τ :

$$\tau = \frac{F}{A_1} = \frac{153846}{1134} = 13567\text{MPa}$$

电机全额输出时链节所受拉应力 σ :

$$\sigma = \frac{F}{A_2} = \frac{153846}{3608} = 42.64\text{MPa}$$

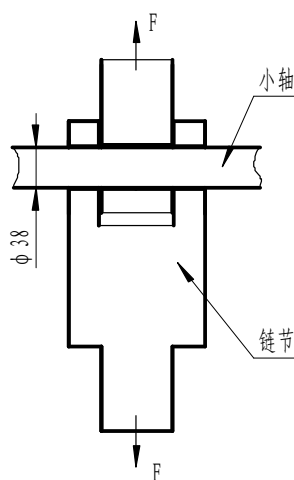


图 2.4 单排链上的小轴受力示意图

Fig.2.4 A small shaft single row chain force diagram

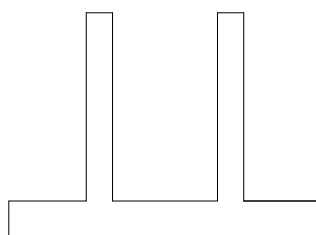


图 2.5 链节最小截面示意图

Fig.2.5 Schematic diagram of minimum cross link

2.1.4 小轴高温下热膨胀伸长量计算

物体受热膨胀的伸长量一般可用下式进行计算:

$$\Delta l = l_2 - l_1 = \alpha \times l_1 \times (t_2 - t_1) \quad (\text{公式 2-1})$$

Δl —受热膨胀伸长量, mm;

α —线膨胀系数，一般镍铬钢线膨胀系数为 $13\sim 15\times 10^{-6}\text{℃}^{-1}$ ，本文取 $13\times 10^{-6}\text{℃}^{-1}$ ；

t_1 —膨胀物体的初始温度， ℃ ；

t_2 —膨胀物体的终了温度， ℃ ；

l_1 — t_1 温度时物体的长度，mm；

l_2 — t_2 温度时物体的长度，mm；

小轴在正常生产条件下，运行至链篦机机头主轴处温度最高，可达 600℃ 左右，小轴在室温下长度为 4118mm ，根据公式 2-1 计算，小轴在高温时最大膨胀量为 31mm 左右。由于小轴高温强度差，因此高温时，在链条的拉力作用下极易发生变形。运行至下篦床时，虽然随着温度的降低，小轴逐渐收缩，但由于变形后的小轴不能顺利通过链节孔，以至于被拉长，产生塑性变形。通常下篦床温度为 $200\sim 250\text{℃}$ ，计算有 $18.1\sim 22.7\text{mm}$ 伸长后不能缩回，与观察到的轴头高出侧板部分长度相符。

2.1.5 小轴失效原因分析结论

由化学成分分析可知，小轴材质为 20CrMo 或 25CrMo，钢中铬含量低，抗氧化能力差，在高温与链篦机强大的驱动力作用下，强度下降，易发生蠕变变形，变形后，小轴热胀冷缩时不能顺利通过链节孔造成小轴胀弯、伸长后不能缩回。材料的高温强度低，塑性和韧性小，致使材料易于断裂。因此，小轴材质不能满足要求。同时，我们研究发现，有时篦板被干球卡死，卸料翻转后不能正常回位，重新布料时局部缺料，小轴在高温时因失去料层保护，局部高温更易引起胀弯。

2.2 篦板失效原因分析

2.2.1 宏观形貌分析

通过对失效的篦板样品进行宏观形貌观察和分析发现：篦板表面有许多腐蚀凹坑，篦条厚度变薄，最薄处不足 3mm （原设计 8mm ），磨损严重处篦条断开。（见图 2.6）



图2.6 篦条磨损断裂的篦板

Fig.2.6 Grate plate wear and tear of grate bars

2.2.2 化学成分分析

在失效的篦板样品上取样进行化学成分测试，结果见表 2.4。根据测试结果，与耐热铸钢 GB/T 8492—1987 中国国家标准，表 5-22 大型铸件用耐热铸钢钢号与化学成分（质量分数）（%）进行比较，确定样品钢号为 ZG30Cr26Ni5，除 Cr 偏低外，其它成分基本符合标准规定的 ZG30Cr26Ni5 钢成分要求。对照耐热铸钢的性能与用途，ZG30Cr26Ni5 钢承载情况使用温度可达 650℃，轻载荷时最高使用温度为 1050℃，在 650~870℃之间易析出 σ 相。根据新钢公司链篦机-回转窑氧化球团工程技术规格书，设计链篦机篦床上最下层的球团在离开链篦机进入回转窑的温度控制在 750℃左右，以使链篦机篦板不致承受过高的温度而损坏。因此，该篦板材质使用温度低于设计要求。

表 2.4 篦板化学成分分析结果（wt%）

Table 2.4 The analysis results of grate plate chemical composition

成份	C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	P	S	N
实测结果	0.31	21.85	4.75	-	-	0.095	-	-	-
ZG30Cr26Ni	0.20~	24.0~	4.0~	≤ 2.00	≤ 1.00	≤ 0.50	-	-	-
5 钢标准	0.40	28.0	6.0						

2.2.3、硬度检测

从使用过的篦板样品中切取布氏硬度试样（2 个），对材料进行硬度检测，按照 GB/T3299—1991，GB/T231.1-2009 硬度试验的要求，用直径为 10mm 的硬质合金球在 3000kN 的试验条件下保持 10~15s 进行测试，测量结果见表 2.5。

表 2.5 篦板硬度检测结果

Table 2.5 Grate plate hardness test results					
测点序号		1 [#]	2 [#]	3 [#]	平均值
布氏硬度值 (HBW10/3000)	1 [#]	253	293	260	269
	2 [#]	235	210	248	231

2.2.4 金相分析

在篦板磨损严重部位附近取样，经切割、刨削，制成 $8\text{mm} \times 20\text{mm} \times 30\text{mm}$ 试样，并通过磨光、王水浸蚀，用 DMIRM 金相显微镜观察试样的显微组织。图 2.7a 与 b 分别为篦板在放大 200 倍、500 倍的显微组织。试样的显微组织为铁素体+片状珠光体+粒状珠光体。

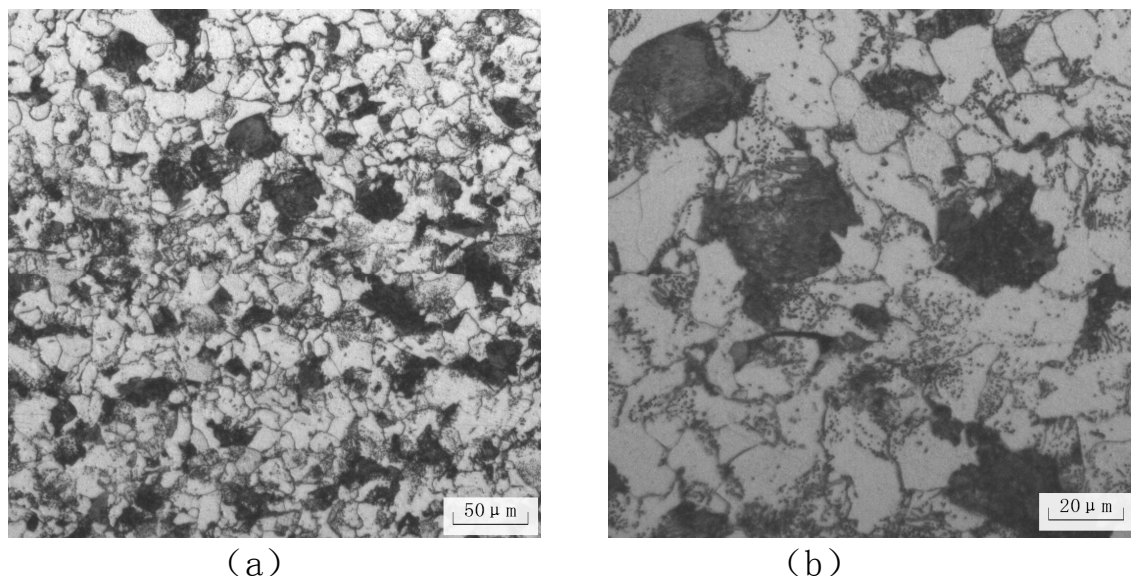


图 2.7 试样的显微组织

Fig.2.7 The microstructure of specimen

2.2.5 篦板失效原因分析结论

从成分分析可知，备件制作厂家给我厂提供的篦板所用材质不能满足工况环境要求。篦板结构设计也较单薄，高温下抗磨性、抗氧化性差。ZG30Cr26Ni5 钢属 HD 合金，根据铸造耐热钢室温下拉伸性能与硬度查得，其标准硬度为 223HB，实测硬度比标准稍高，说明材料在使用后出现了一定的硬化现象。从金相显微组织观察可知，篦板的基体组织为铁素体，由此可以判断，篦板长期在 750°C 以上高温下工作，高温强度低，脆性大，组织稳定性差，在外部载荷的作用下，极易产生篦条脆断失效。篦板高温硬度低，

篦板运行至链篦机铲料板处卸料时，在球团冲刷作用下磨损失效。

2.3 链节失效原因分析

2.3.1 宏观形貌分析

通过对失效的链节进行宏观形貌观察和分析发现：断口颜色鲜亮，可判断新鲜断口是在冷态转机时形成的。链节与主轴链轮啮合部位磨损严重。裂纹主要集中在链节滤缝开孔起始位置，并且多处于与链轮啮合終了部位，链节断裂失效只发生在南面第一排链条。（见图 2.7）



图 2.7 断裂失效的链节

Fig.2.7 Link failure

2.3.2 化学成分分析

在失效的链节样品上取样进行化学成分测试，结果见表 2.6。根据测试结果，与耐热铸钢 GB/T 8492—1987 中国国家标准进行比较，确定样品钢号为 ZG35Cr26Ni12，成分与标准规定的 ZG30Cr26Ni12 钢成分相符。该材料最高使用温度为 1100℃，高温强度高，抗氧化性能好，能广泛地用于许多类型的炉子构件。材质符合我厂设计要求。

表 2.6 化学成分分析结果 (wt%)

Table 2.6 Chemical analysis results.

成份	C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	P	S	N
ZG35Cr26Ni12	0.20~	24.0~	11.0~	≤2.0	≤2.0	≤0.50	-	-	-
钢标准	0.50	28.0	14.0						
实测结果	0.25	25.35	11.16	-	-	0.141			

2.3.3 链节受力分析

根据化学成分测试结果,链节材质为 ZG35Cr26Ni12,属于 HH 型合金,根据《高温金属材料的性能、强度设计及工业应用》,HH 型合金在 590℃的屈服极限为 258MPa,,在高温时安全系数为 $n_s=1.2\sim 2.5$,本文取 $n_s=2.5$ 。因此,链节的高温时许用应力 $[\sigma]=\sigma_s/n_s=103.2\text{MPa}$,根据 2.1.3 计算结果,链节正常运转时所受拉应力 $\sigma=42.64\text{MPa}$ $<[\sigma]$ 。

2.3.4 设备检查

在设备降温冷却后,进入链篦机内部检查发现,南北二侧主轴链轮与链节无啮合间隙,南侧尤其严重。测量各链轮中心距,从南往北 5 挡链轮中心距数据分别为 785mm、783mm、780mm、781mm、783mm,查设计图纸,各挡链轮中心距均为 780mm,对比测量数据可知,链轮位置发生了移动。

2.3.5 链节失效原因分析结论

主轴链轮固定方式不合理,高温条件下,链轮发生了缓慢移位,链节在与其啮合过程中被逐渐磨损,强度下降,链轮位置移动后,在冷态转机时,小轴收缩,链节与链轮不能正常啮合,链节被链轮挤裂或崩断。因此,链节失效主要是由于主轴设计不合理,且高温下,生产操作,工艺控制不当造成。

2.3.6 主轴链轮位置发生移动后的维修尝试

由于链轮与轴的装配为过盈配合,每个链轮均有二个紧定螺钉固定经高温使用后不能取出,以及现场作业空小等原因,我们采用了多种方法仍不能将链轮回到原位置。要彻底解决问题,必须对主轴链轮固定方式做适当改进,制作好备件后整体更换。由于当时没有备件,为维持正常生产,只有采取临时措施现场对链轮进行修复。为保证链轮与链节的正常啮合,唯一可行的方法是采用手持砂轮机对链轮的齿面进行打磨。将二外侧

链轮的齿磨薄 3~5mm 后，链篦机在冷态下基本可正常运转。

2.3.7 防止链节断裂失效临时工艺控制措施

由于主轴链轮固定设计存在问题，在设备改进与更换前，虽然对链齿进行了修磨，但要确保其长时稳定运行，还必须采取有效的工艺操作控制措施，才能防止链节再次发生断裂失效。

因小轴、主轴与高温烟气距离不一样，且主轴设计有隔热保温，并通水冷却，所以工作时，小轴与主轴的温度是不一样的。通过计算可知，当机头烟气温度高于 300℃ 时，小轴受热膨胀比主轴多 6mm 左右，这时转机，链条与主轴链轮可保证正常啮合。因此，按机头烟气温度升高到 300℃ 以上转机、温度降至 300℃ 以下停机进行生产操作，能保证链篦机的长时安全正常运行。

直到 2012 年 6 月更换链篦机主轴之前，采用该方法进行操作，有效地防止了链节频繁断裂失效。

2.4 侧板失效原因分析

2.4.1 宏观形貌分析

通过对失效的侧板进行观察检查发现，侧板与球团矿接触面有腐蚀凹坑，局部烧穿缺损。（见图 2.8）



图 2.8 局部氧化烧损失效的侧板

Fig.2.8 Local oxidation burning loss of the side plate failure

2.4.2 化学成分分析

在失效的侧板样品上取样(2个)进行化学成分测试,结果见表2.7。根据测试结果,与耐热铸钢 GB/T 8492—1987 中国国家标准进行比较,成分与 ZG35Cr24Ni7SiN 钢标准成分基本相符。该材料最高使用温度为 1100℃,抗氧化性能好,能满足我厂使用工况环境。

表2.7 侧板化学成分分析结果 (wt%)

Table 2.7 The chemical analysis results of plate (wt%)									
成份	C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	P	S	N
实测结果 1 [#]	0.22	23.66	6.88	未测	未测	0.198	未测	未测	未测
实测结果 2 [#]	0.48	23.25	7.02	未测	未测	0.122	未测	未测	未测
ZG35Cr24Ni	0.30~	23.0~	7.00~	1.30~	0.8~		≤	≤	0.20~
7SiN 钢标准	0.40	25.5	8.5	2.00	1.50	-	0.040	0.030	0.28

2.4.3 侧板工况分析

侧板安装在篦床的二侧,在上篦床,侧板位于滑道的上方,与滑道形成一个滑动密封。侧板主要对篦床二侧漏球起密封作用。因侧板始终处于高温与低温的交变工况下工作。侧板旁边的球团料同时也对侧板起保护作用。当篦床二侧出现空料时,就会造成侧板在高温区域干烧,使侧板提前失效。

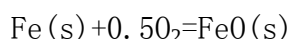
2.4.4 侧板失效原因分析结论

从成分检测结果可以断定,侧板材质满足要求。链篦机篦床两侧布料少而不均,当侧板运行至机头高温区时,侧板暴露在高温下干烧,有时工艺温度超过该材料的服役温度,是造成侧板失效的主要原因。

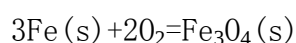
3 设计与选材必须考虑的几个因素

3.1 耐热钢的抗氧化规律

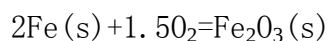
耐热钢是以Fe、Cr为主要元素的合金，另外常用元素还有Ni、Si等。耐热钢中Fe存在三个氧化反应^[24]。反应方程式及反应自由能（公式3-1^[31]）、（公式3-2^[31]）、（公式3-3^[31]）。根据Fe的氧化物O的比例，在足够长的时间内缓慢氧化，Fe的氧化物生成顺序 $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$ ，其中FeO很容易氧化，使得Fe的氧化层主要由 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 构成。而在低氧压（13Pa）下， Fe_2O_3 的形核速度较低，会形成相对较厚的 Fe_3O_4 ，有较高的氧化速度；在高氧压（ $0.132 \times 10^5 \text{Pa}$ ）下， Fe_2O_3 的形核和生长速度高，而当金属表面形成连续的 Fe_2O_3 层时，氧化速度显著降低。即Fe的氧化规律是，氧化初期，氧化速度较高，氧化层中 Fe_3O_4 比例较高；在氧化后期，氧化速度较低，氧化层中比例逐渐提高。



$$\Delta_f G^0 = -264000 + 64.59T \quad \text{J/mol} \quad (\text{公式3-1})$$

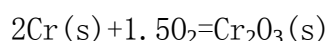


$$\Delta_f G^0 = -1103120 + 307.38T \quad \text{J/mol} \quad (\text{公式3-2})$$



$$\Delta_f G^0 = -815023 + 251.12T \quad \text{J/mol} \quad (\text{公式3-3})$$

耐热钢中通常有一定含量的Cr，Cr的氧化反应方程也较多，最常见的反应物是 Cr_2O_3 ，反应方程式如下：



$$\Delta_f G^0 = -11110140 + 247.32T \quad \text{J/mol} \quad (\text{公式3-4})$$

由（公式3-1）～（公式3-4）反应可知，当在1100℃时，四个反应方程的 ΔG 分别是-175308.24 J/mol，-681041.15 J/mol，-470334.89 J/mol，-770532.54 J/mol，其中，Cr的氧化反应 ΔG 值最小，反应最易进行。图3.1^[31]为耐热钢表面的氧化层。由图3.1可知，离基体内部越远，氧化层中氧化物含量氧的比例越高，而离基体越近，氧化物中金属的比例越高。当Cr的含量高时，会形成Cr的氧化层。Cr的加入使合金的抗氧化性能显著提高。

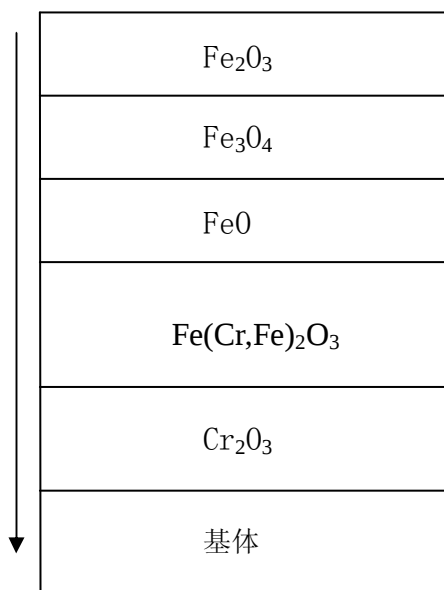


图3.1 耐热钢氧化层示意图

Fig.3.1 Heat-resistant steel oxidation layer diagram

从图3.1还可以看出，耐热钢的抗氧化性主要依靠 Cr_2O_3 氧化层，而 Cr_2O_3 层对基体的保护作用涉及到三个过程^[25~30]：一是氧化层的形成；二是氧化层的生长稳定性和防止氧化进一步进行；三是氧化层与基体的粘附性^[31]。

3.2 耐热合金中各元素对耐热钢组织和性能的影响

镍：镍的化学性质不活泼，不易被氧化，特别是它与硫和氯离子都不易结合，使合金具有较高的组织稳定性。镍在铁基高温合金中通常是与铬共同作来提高基体的耐腐蚀性的。钢中含Cr20%以上时，增加Ni 的含量有利于提高钢的抗氧化能力，能提高钢的韧性，合金中含镍量较低时，镍大部分固溶于奥氏体中，扩大奥氏体相区，提高了合金的再结晶温度，从而使合金的高温抗蠕变能力得以提高。镍是稀贵金属，镍和铬配合使用，可获得良好的效果^[32]。

铬：铬在镍基合金中能提高原子间结合力，减缓扩散，起固溶强化作用。铬的另一个主要作用是提高镍基合金的抗氧化性。含铬量在14~20%的合金在500~700℃空气中表面生成致密的 Cr_2O_3 膜，有良好的保护作用。在800~1000℃合金紧贴基体的仍然是 Cr_2O_3 ，其外层是NiO。 Cr_2O_3 。它具有尖晶石结构，很致密，也有良好的保护作用^[33, 34]。铬含量提高到25%，能提高合金的抗硫化能力。

锰：锰为稳定奥氏体元素，是良好的脱氧剂和脱硫剂。锰能消除或减弱钢因硫所引

起的热脆性,从而改善钢的热加工性能。锰和铁形成固溶体,提高钢中铁素体和奥氏体的硬度和强度;锰同时又是碳化物形成元素,进入渗碳体中取代一部分铁原子。锰在钢中由于降低临界转变温度,起到细化珠光体的作用,也间接地起到提高珠光体钢强度的作用。锰扩大铁碳平衡相图中的 γ 相区,它使钢形成和稳定奥氏体组织的能力仅次于镍,以锰代镍的耐热钢,有广泛的用途。

硅:在 γ -Fe中的最大溶解度大约为2%,含0.35%C时在奥氏体钢中的最大溶解度约9%。在 α -Fe中的最大溶解度大约18.5%。硅在耐热钢中能提高其抗氧化性能。硅也是常用的脱氧剂。硅是有效的抗硫化元素。

氮:耐热钢中加入N主要是为了提高合金的高温强度。N在合金中主要以化合物的形式存在,少量以固溶形式存在。高熔点氮化物由于其八面体结构而使氧化膜很好地钉扎在合金的基体上,提高氧化膜的粘附力,同时氧化膜中的氮化物还能堵塞阴、阳离子扩散的通道,减缓合金的氧化速度,从而提高其抗氧化性。但是大量的氮化物会导致氧化膜变形、开裂和剥落。一般钢中氮控制在 $w(N)=0.20\%\sim 0.30\%$ 范围^[23]。

碳:能提高合金钢强度,但对耐应力腐蚀裂纹性,特别是抗氧化性能不利。因为碳能夺取铬形成碳化物,使固溶体中的铬贫化,从而促进了晶间氧化作用。如当燃料燃烧不充分时,可能在零件表面产生积碳现象,也可能碳化,碳原子与合金中的铬形成碳化铬,而碳化铬附近贫铬区可能发生严重氧化^[35]。高温条件下,钢的蜕变是一个碳原子的持续渗入及随后借助材料内部碳原子和合金元素扩散而适应化学位的过程,从而使高铬含碳奥氏体钢组织稳定的优点难以发挥,耐热性不能持久^[36]。因此,耐热钢除非同时需要较高强度,一般含C量较低。

稀土元素:稀土元素(RE)在钢中作用有两个,一是净化作用,二是合金化作用。加入RE能有效地除去氧、硫、磷、氢、氮等气体,以及与杂质铅、铋、砷、铌、锡等形成熔点较高的化合物,从而有效地降低杂质元素对钢质量的影响。钢中加入RE使晶粒细化,明显改善钢的高温抗氧化性能和高温持久强度;改善钢的铸态组织及热加工性能,并提高其使用寿命。稀土元素 $\omega(RE)\leq 0.1\%$,能提高钢液流动性,改善铸件表面质量,降低热裂倾向^[37]。

在钢中加入Cr、Al、Si等元素,可以提高FeO出现的温度,改善钢的高温化学稳定性^[38],可形成致密的、连续的氧化膜,如 Cr_2O_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3 等,可提高钢的抗氧化能力。加入Cr、Mo、W、Ni等元素,可溶入基体强化固溶体,使再结晶温度提高,从而增强钢在高温下的强度。Cr、Mo、W、V等元素还可形成硬度高、热稳定性好的碳化物,分布在基体一起起到弥散强化作用。Ni为昂贵金属,原材料成本高,为此,通常加入Mn、N、Si

等来代替部分Ni^[39]。

3.3 零件选材的经济可行性

目前链篦机篦床零件设计选材上应用的耐热钢种类有高铬钢、高铬镍钢、高镍钢。其成份与不锈钢相近,但碳含量较高,因而在高温下有较高的强度。高温金属材料的化学成份中含有大量稀缺的贵金属元素,如铬、镍、钴、钼、钨、钛、钎等,而且制造成本高。所以,在选材时,除了保证其使用性能和寿命外,还需兼顾到材料的成本或设备成本,部件的可更换性,安全可靠,市场供应等因素^[40]。

上世纪50年代,我国高温材料主要依赖进口。基于庞大的国内市场需要,我国首先引进国外的耐热钢和高温合金,进而消化、吸收,根据自有资源以及新工艺、新技术,目前已发展出了我国自成体系的耐热钢、高温合金。一般的高铬耐热钢含有大量的铬(其含量大于20%)及一定量的碳,能基本满足高温抗氧化性能和热强性方面的要求。但由于铬含量高,其室温组织为单相的铁素体及沿晶界分布的碳化物,晶粒粗大,脆性较大;加热至工作温度后往往会发生相变,其抗热疲劳性能及组织和尺寸的稳定性等均不能令人满意,易引起高温构件的过早破坏,降低其使用寿命。加入一定量的镍,得到奥氏体-铁素体双相耐热钢或奥氏体耐热钢,可大大细化晶粒,提高和改善高温性能,抑制裂纹扩展,增强组织和尺寸的稳定性。但镍是一种贵金属,随着添加镍的比例增加,材料成本也会大大增加。研究表明,ZGCr-Mn-N新型耐热钢材料适量的Mn、Si、N等合金元素可以代替部分Ni的作用,材料经高温固溶处理后的组织接近;高温抗磨性和抗氧化性也接近^[41]。因此,在根据设备工况环境选择材料时,为节约成本,尽可能选择国内应用较成熟的以碳、氮、锰来代镍的节镍钢。

3.4 材料的焊接性能

链篦机篦床在高温下运行,在下篦床温度也高达200~300℃,篦床的维护要求方便快捷,且篦板、小轴二端的固定设计就要求采用焊接方法安装,因此,要求零件必须具有较好的焊接性能。

3.4.1 篦床的日常维护要求篦床零件必须具有良好的焊接性能。

链篦机篦床在正常生产时,以1.7~2.2m/min的速度慢速移动,运行中如发生篦板损坏、脱落等隐患,运转至下篦床时需要及时处理,见图3.2。链篦机在正常生产条件下,突然降低机速或高温停机,极易导致布系统压料停产,篦床设备损坏,窑中焙烧气氛恶化,成品球质量下降。一般情况下,为避免因链篦机机速的波动打破生产工艺系统

的平衡或引发设备事故，在处理以上隐患时不停机也不降机速，根据链篦机正常生产时的运行速度及维修距离计算，处理故障时间不宜超过4分钟；因此，要求处理时间必须尽可能短。在下篦床温度最低处温度也有 $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ ，篦板原设计采用螺栓固定，更换耗时较长，且安装螺栓时易将手烫伤；在篦床的日常维护中，后来探索采用焊接方法更换或加固篦板，实践证明，采用焊接固定方法安装篦板可达到用螺栓固定篦板相同效果，既安全，又快捷，图3.2为链篦机运行中工人正在烧焊加固篦板固定件。因此，在选择篦板材质时，必须考虑其是否具有良好的焊接性能。

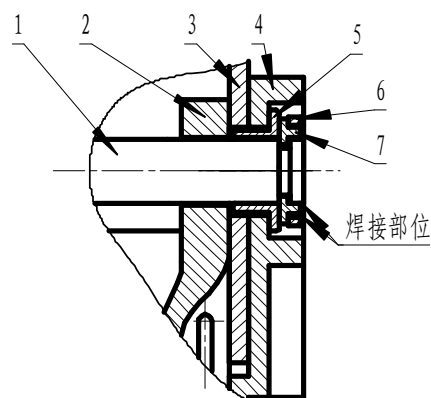


图3.2 链篦机运行中维修篦板

Fig.3.2 Repair grate grate operation

3.4.2小轴二端的固定设计要求其必须具有良好的焊接性能。

小轴轴端的固定结构见图3.3。小轴的二端各设计有一个卡槽，二个半圆卡卡入小轴卡槽内，半圆卡外套有一个卡环，半圆卡与小轴、卡环装配时采用焊接方法固定，其作用是防止小轴上链节、侧板、小轴套松脱。因此，选择小轴材质时，必须考虑其是否具有良好的焊接性能。选用的焊条材质也必须与小轴匹配，焊缝要有较好的高温强度及抗氧化性能。



1--小轴, 2--链节, 3、4--侧板, 5--小轴套, 6--卡环, 7--半圆卡

图3.3 小轴轴端安装结构图

Fig.3.3 Small shaft end mounting structure diagram

3.5 链篦机篦床工况

篦床始终处于高温（800~1000℃）与低温（200~300℃）交变的工况下工作，工作温度曲线见图3.4。工作中，篦床零部件不仅需要承受高温，还要承受氧化性气氛、二氧化硫有害气体侵蚀，同时又要承受巨大的工作载荷。设计选材时，篦床零件材质必须既要具有较好的高温强度，又要具有较好的高温抗氧化、抗磨、抗腐蚀性能。

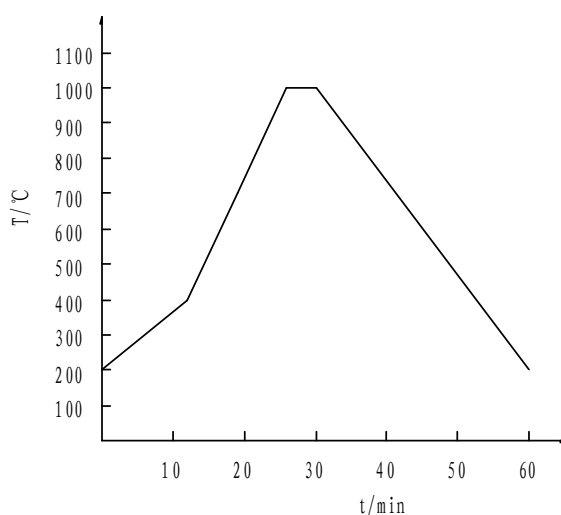


图3.4 篦床工作温度曲线

Fig.3.4 Grate bed temperature curve

4 改进与试验

4.1 小轴改进方案

原小轴材质不能满足工作要求, 根据工况条件, 可选择工作温度大于 600°C 的马氏体耐热钢 2Cr13 制作备件。马氏体不锈钢 2Cr13 最高服役温度如下: 间歇服役为 735°C , 连续服役为 620°C 。篦床始终处于高温与低温的交变工况下工作, 小轴应按间歇服役选择材质。2Cr13 淬火 ($920\sim 980^{\circ}\text{C}$ 油冷) 状态下硬度高, 耐蚀性良好。考虑 2Cr13 虽有高的抗氧化性和耐蚀性, 但组织稳定性差, 可在钢中添加 3% 左右的 Ni, 起到固溶强化和弥散强化作用, 提高小轴高温抗蠕变能力; 加入 4% 左右的锰, 用来提高小轴组织稳定性、高温强度和耐磨性能, 以锰代替部分镍, 降低小轴制造成本。因此, 确定选用新小轴材质为 2Cr13Ni3Mn4。

根据《高温金属材料的性能、强度设计及工和应用》, 2Cr13 属于 HA 合金, 在 760°C 的极限应力 σ_s 为 462MPa , 在高温时安全系数为 $n_s=1.2\sim 2.5$, 本文取 $n_s=1.5$ 。因此, 小轴的高温时许用应力 $[\sigma_s]=\sigma_s/n_s=308\text{MPa}$ 。根据第三强度理论, 小轴高温时的许用剪应力 $[\tau]$: $[\tau]=0.5[\sigma_s]=154\text{MPa}$, 由 2.1.3 可知, 小轴所受剪应力 $\tau=135.67\text{MPa}<[\tau]$ 。2Cr13 能达到小轴高温工作强度要求。2Cr13Ni3Mn4 中增加成份使小轴高温强度提高, 高温工作强高于 2Cr13, 因此, 采用 2Cr13Ni3Mn4 材料制作小轴能满足高温工作强度要求。

4.2 篦板改进方案

4.2.1 材质改进

篦板的使用寿命, 关键因素之一是所选择材料的高温抗氧化性, 而高温抗氧化性又体现在其氧化膜特征上。通过对 ZG35Cr24Ni7SiN 耐热钢的氧化膜进行如下试验研究。将分别带有 900°C 和 1250°C 下的氧化膜的 ZG35Cr24Ni7SiN 耐热钢试样进行冷镶制样, 预磨, 抛光, 用氯化铁盐酸水溶液浸蚀, 在 LE0-1450 扫描电镜下对其氧化膜构成及断面上的元素分布进行观察和分析, 并 D/MAX-RB12KW 旋转阴极衍射仪分析氧化膜中的相构成, X 射线衍射试验参数为: Cu 靶, $\lambda=1.5406\text{\AA}$; 工作电压: 40KV ; 工作电流: 150mA ; $2\theta: 10^{\circ}\sim 110^{\circ}$ 。研究表明, ZG35Cr24Ni7SiN 耐热钢表面能在高温氧化性气氛中形成一层生长缓慢、且粘附致密连续的保护性氧化膜。 $900^{\circ}\text{C}\times 12960\text{h}$ 的氧化膜是由 Fe_2O_3 、

Cr_2O_3 和 SiO_2 构成(见图4.1^[42]), $1250^\circ\text{C} \times 128\text{ h}$ 的氧化膜是由 Cr_2O_3 、 Mn_3O_4 、 CrO_2 和 SiO_2 构成(见图4.2^[42]), 能对ZG35Cr24Ni7SiN耐热钢基材起到很好的保护作用。氧化膜与其基材之间存在着一个富镍层, 并且其面向基材的前沿是沿着晶界分布的。富镍层对氧化膜的缺陷起到填补作用, 氧化膜与基材结合地更为紧密, 进一步提高了材料的抗高温氧化性能^[42]。该材料最高使用温度为 1100°C , 高温强度高, 抗氧化性能好。

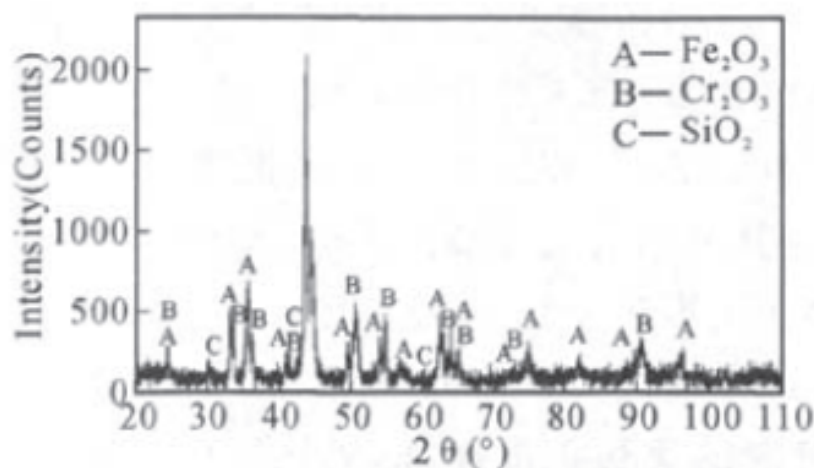


图4.1 $900^\circ\text{C} \times 12960\text{ h}$ 的氧化膜的X射线衍射谱

Fig.4.1 X ray diffraction at 900°C for 12960 h spectra of the oxidized film

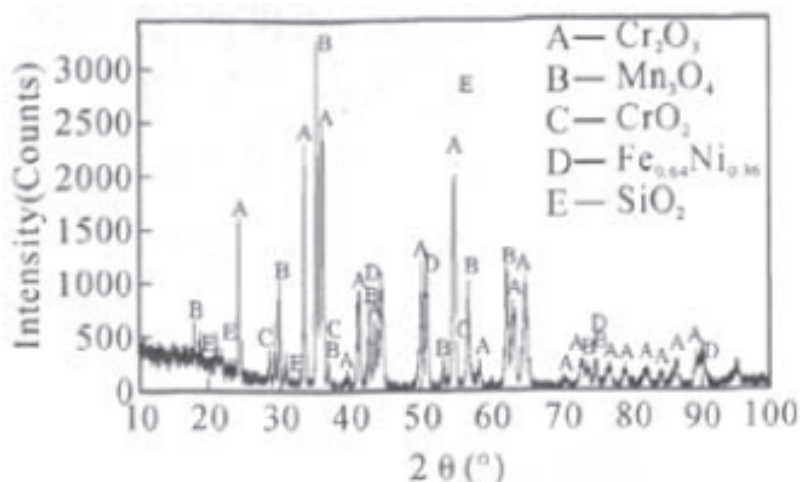


图4.2 $1250^\circ\text{C} \times 128\text{ h}$ 的氧化膜的X射线衍射谱

Fig.4.2 X ray diffraction at 1250°C for 128 h spectra of the oxidized film

ZG35Cr24Ni7SiN奥氏体耐热钢属HD合金, 该合金在 1100°C 以下具有优异的抗氧化和抗硫化性能, 可焊性好^[42]。

原篦板材质为 ZG30Cr26Ni5, 低于设计使用温度要求, 金相显微组织基体为铁素体,

高温下极易产生磨损与脆断失效。因此，将篦板材质改为 ZG35Cr24Ni7SiN 奥氏体耐热钢。

4.2.2 结构改进

改进篦板薄壁部位结构，适当增加磨损部位壁厚，可延长磨损周期。篦板改进前后结构（见图 4.3 与图 4.4），改进后篦条厚度由 8.5mm 增加到 9mm。

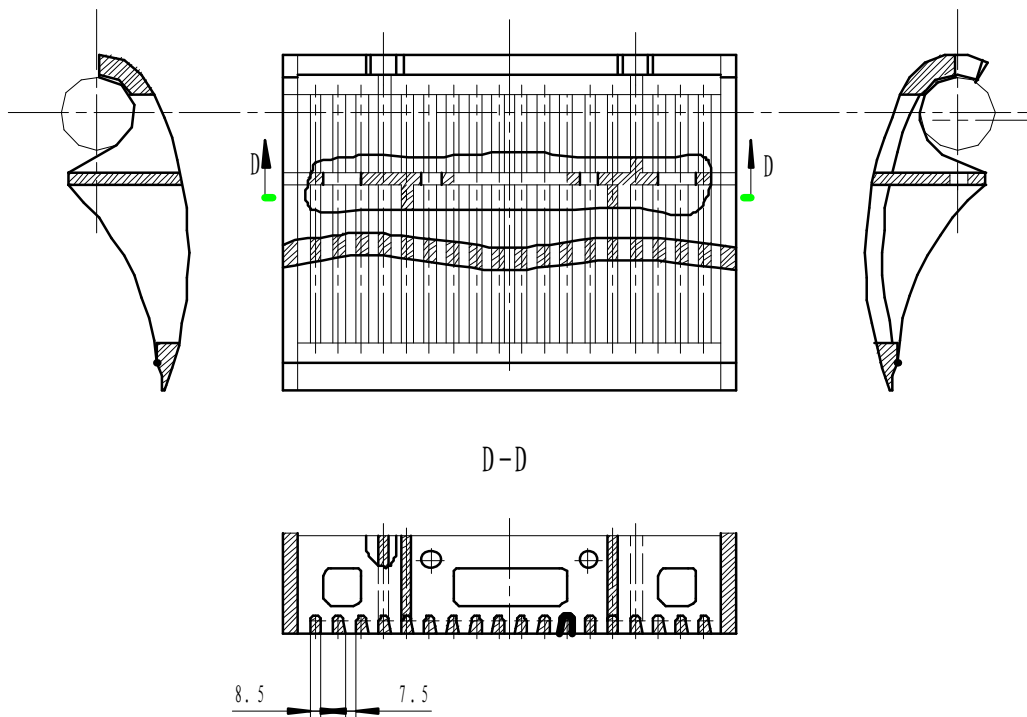


图 4.3 原篦板结构图

Fig.4.3 The original grate structure diagram

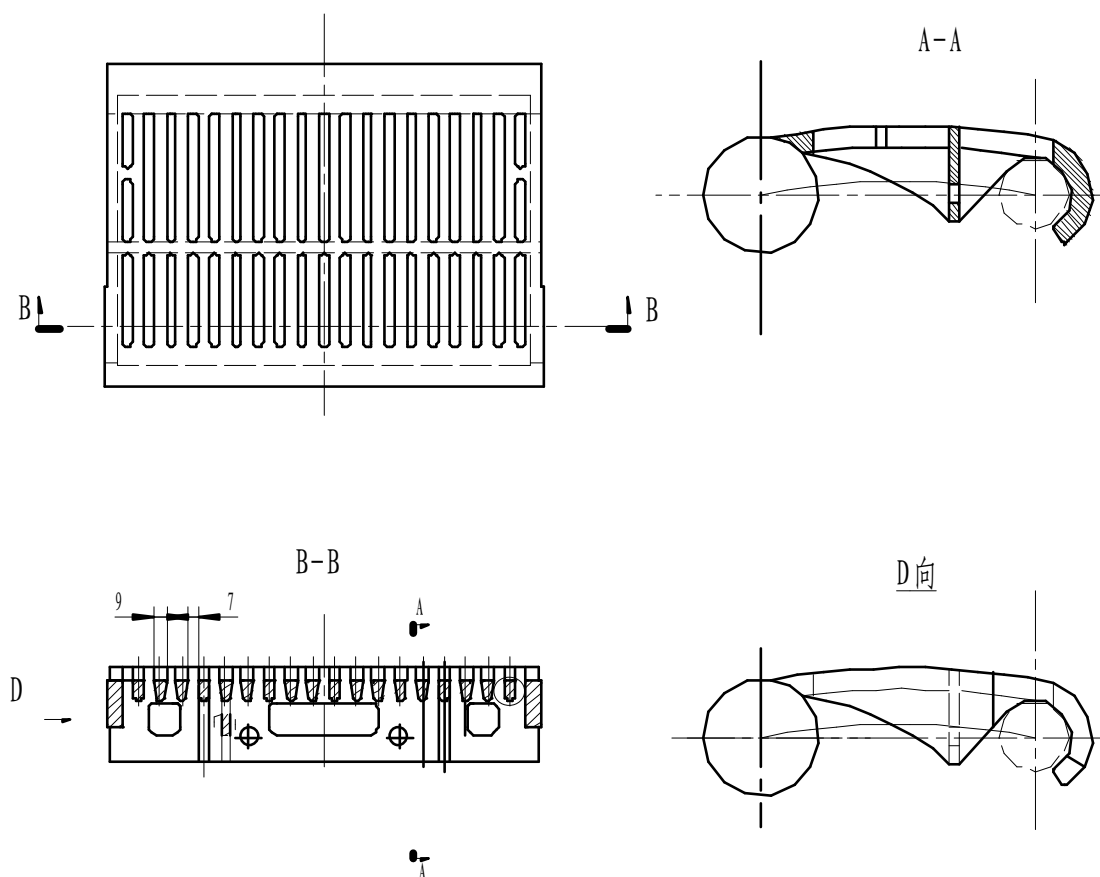


图 4.4 改进后篦板结构图

Fig.4.4 Map grid plate structure improvement

4.3 侧板失效改进措施

要避免侧板提前失效，除了要严格控制好操作工艺温度外，还必须解决篦床二侧空料问题。

篦床二侧布不到料的主要原因有：（1）溜料板二侧粘料；（2）摆头皮带机摆幅不够。解决处理方法：（1）组织人工清除溜料板二侧粘料；（2）采用 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢材料重新制作一件溜料，该不锈钢材质无磁性，可减轻积料。（3）在生产过程中调节摆头皮带机摆动机构螺杆，适当增大摆幅，确保篦床二侧能布到料。

4.4 链篦机设备改进

4.4.1 增设篦板强制复位装置

为保证篦板卸料翻转后能正常回位，避免篦板被铲料板铲坏，防止小轴因局部高温产生胀弯，在链篦机机尾设计一篦板自动复位装置，使未复位的篦板自动回位，减少工

人看护工作劳动强度。

篦板自动复位装置主要由滚轮1、支架2、底座3、钢丝软绳4构成（见图4.5）。在链篦机机尾下回程篦板自然复位处安装本装置，本装置设计10个滚轮，一个滚轮对应一排篦板，每二个滚轮装配成组，安装在一个滚轮支架上，5个支架固定在一个底座上，每组滚轮用一根钢丝软绳吊挂于机尾的梁上。每组滚轮贴靠在需回位的篦床上，滚轮支架以一定的倾角安装（约 60° ，可视现场情况做适当调整），可随篦床做起伏运动，连续运行的篦床上，未自然复位的篦板经过滚轮时，滚轮的重力与链篦机的驱动力对未复位的篦板产生压迫，强制篦板复位。挤压力的大小由滚轮重量决定，该力设计不宜过大，以免拉伤损坏篦床。

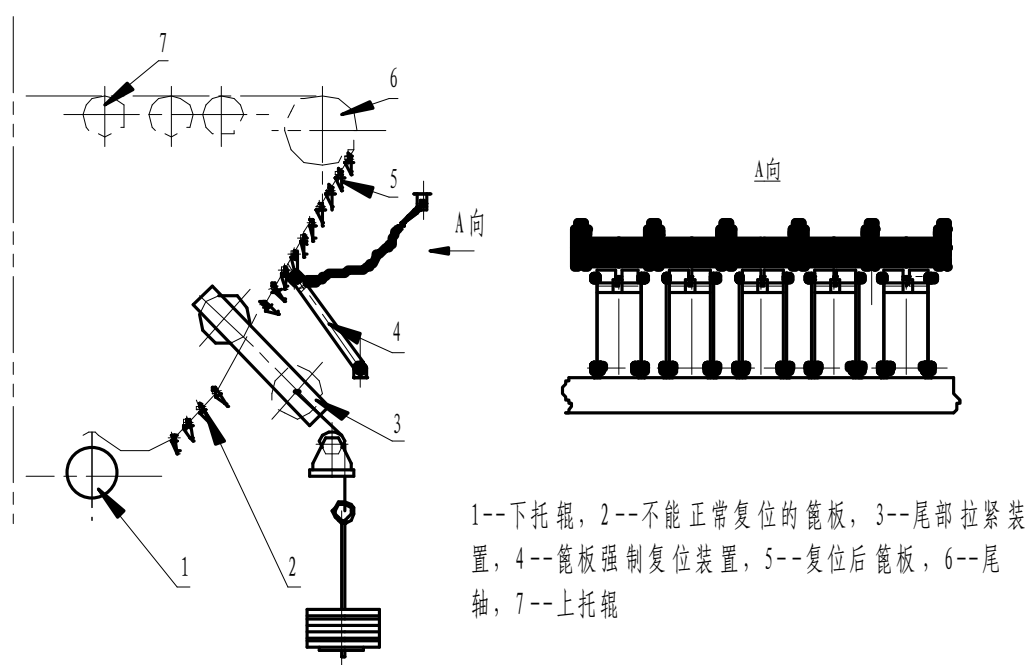


图 4.5 篦板强制复位装置

Fig.4.5 Grate plate forced reset device

4.4.2 改进链篦机主轴链轮固定结构

原主轴轴向固定主要依靠轴肩和紧定螺钉固定，生产过程中，小轴受热膨胀伸长，因高温蠕变变形，小轴伸长时在链节轴孔内不能自由移动，小轴热膨胀伸长量比主轴大，主轴链轮易被小轴推动往伸长方向滑动，冷缩后造成链节与主轴链轮啮合不良引发设备事故。

由于主轴更换工程难度极大，需耗资近百万，耗时半个月以上，因此设计时必须确保主轴的安全与较长的使用寿命。原设计主要最外侧二个链轮固定存在缺陷，因此只要

将外侧二个链轮固定结构适当改进即可。改进方案如下：

两侧链轮的紧定螺钉调换位置装在另一侧；链轮外侧上机床车去 40mm，二外侧各增加一个 M350×3 的锁紧螺母。改进前后的主轴结构见图 4.6 与图 4.7。

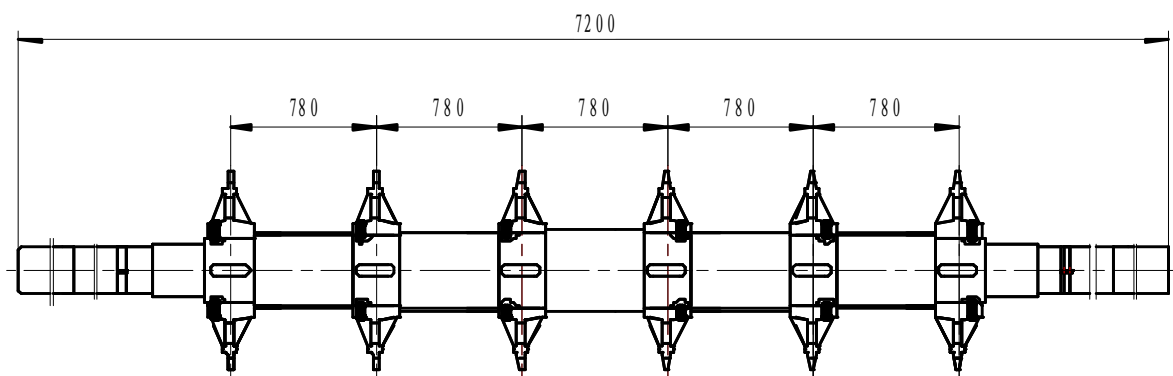


图 4.6 改进前的主轴结构

Fig.4.6 Spindle structure before improvement

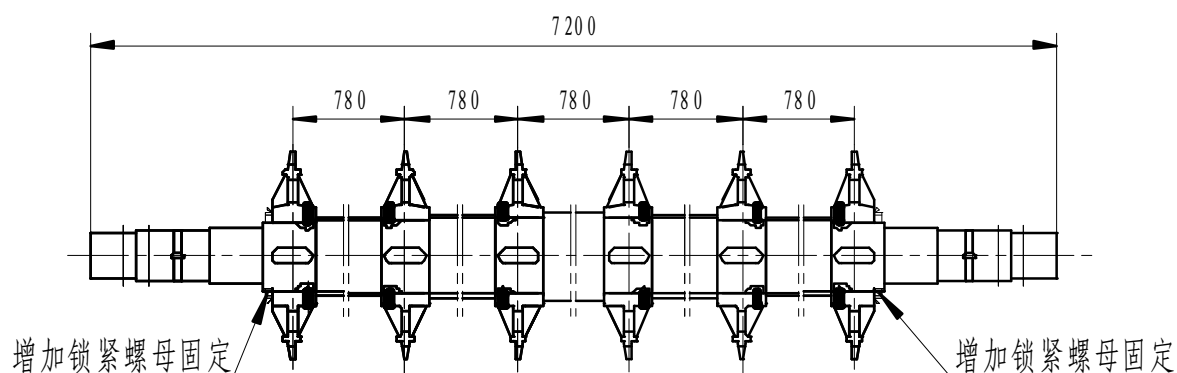


图 4.7 改进后的主轴结构

Fig.4.7 The improved structure of the spindle

4.5 零件改进后新做备件质量控制

4.5.1 新做小轴备件质量检测

(1) 化学成分分析

小轴材质改进方案确定以后，备件制作单位根据要求，按对成份做了适当调配 2Cr13 Ni3Mn4 材质试制了新的小轴备件。从新小轴上提取样品进行了检测化验，化验结果如表 4.1。结果表明，小轴材质成份除达到 2Cr13 耐热钢标准要求外，还增加了约 4%的锰，2~3%的 Ni 及少量 Mo，有利于提高小轴的高温抗氧化性、耐磨性、高温强度及抗蠕变能力，

减弱热脆性，适宜工况环境，符合小轴材质改进要求。

表 4.1 新小轴化学成分分析结果 (wt%)

Table 4.1 The analysis results of new small chemical components (wt%)

成份	C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	P	S
2Cr13 标准	0.15~ 0.25	12.0~14.0	-	≤1.0	≤1.0	-	≤0.035	≤0.030
实测结果	0.27	13.64	2.9	0.26	4.78	0.209	0.027	0.013

(2) 拉伸试验

从新制的小轴样品中切取试件，按照 GB/T228-2010 拉伸试验标准加工成拉伸试件，进行拉伸试验。试验结果(见表 4.2)。通过试验结果可知，因在 2Cr13 基础上增加了一定量的 Ni 和 Mn，试件屈服强度与抗拉强度比 2Cr13 标准还要高，说明强度更好；断后伸长率与断面收缩率比 2Cr13 标准要低，说明该材料的抗变形能力更强，符合小轴材质改进预期。对比改进前的小轴（20CrMo 钢）试验结果，新制的小轴拉伸力学性能强度、抗变形能力好于改进前。

表 4.2 新制小轴拉伸试验结果

Table 4.2 The test results of small axial tension system

试验项目	实测值 (新制小轴)	2Cr13 钢标准值	实测值 (原小轴)
下屈服强度 ReL(MPa)	524	≥440	404
抗拉强度 Rm(MPa)	886	≥635	671
断后伸长率 A(%)	4.5	≥20	8.5
断面收缩率 Z(%)	4	≥60	9

4.5.2 新做篦板备件质量检测

在改进篦板材质后，先后安排了江苏、新钢公司下属综合服务公司二家单位试制了新的备件，分别从二家单位生产的篦板上提取样品进行检测化验。其中 1#样品为从江苏一家单位生产的篦板上提取的，2#样品为从新钢公司综合公司生产的篦板上提取的，化验结果见表 4.3。结果表明，二家单位生产的篦板均符合 ZG35Cr24Ni7SiN 钢标准要求，可以投入生产使用。

表 4.3 新篦板化学成分分析结果 (wt%)

Table 4.3 The analysis results of new grate chemical composition (wt%)

Table 15 The analysis results of new grade chemical composition (wt%)										
成份		C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	P	S	N
实测结果	1 [#]	0.38	22.3	7.2	1.33	2.72	0.069	0.029	0.013	-
	2 [#]	0.28	23.5	7.48	1.64	1.64	0.105	0.034	0.006	-
ZG35Cr24Ni7Si		0.30~	23.0~	7.0~	1.3~	0.8~	-	≤0.04	≤0.03	0.2~
N 钢标准		0.40	25.5	8.5	2.0	1.5				0.28

4.6 实验过程及效果

4.6.1 小轴及篦板改进效果

小轴材质的改进于 2009 年完成、篦板改进于 2010 年完成,分批次将原失效严重的小轴与篦板全部更换完毕。通过生产实践检验,并对四年来的小轴与篦板等消耗情况进行了统计与分析(见表 4.4),小轴运行稳定,未发生大面积失效情况,每年更换下来的小轴数量不足在用数量的 1/10,平均使用寿命大于 3 年,篦板年消耗数量也大幅下降,平均使用寿命大于 18 个月,将 2011 年与 2009 年更换下来小轴与篦板对比,年小轴消耗减少 169 根,篦板消耗减少 1845 块,按小轴 1139 元/根,篦板 323 元/块计算可知,每年可降低小轴与篦板备件费用 78 万元。为支持公司备件加工企业发展,我厂尝试了对消耗较多的篦板进行公司内部单位试制,2012 年 2 月 13 日将试制篦板安装到生产线上试用,截止目前已使用 15 个月,运行状况良好。

表 4.4 近四年篦板等消耗统计表

Table 4.4 Statistics of nearly three years of grate plate consumption

名称	在用数量	更换数量			
		2009 年	2010 年	2011 年	2012 年
小轴	440 根	207 根	28 根	38 根	32 根
篦板	4400 块	3215 块	2173 块	1370 块	1139 块
侧板	880 块	418 块	136 块	414 块	123 块
链节	2640 个	1298 个	276 个	375 个	523 个

4.6.2 篦板强制复位装置使用效果

链篦机机尾增设的篦板强制复位装置已于 2010 年初完成（见图 4.8），投入使用后，可清楚地观察到篦板复位情况，无需手工敲打未复位的篦板，大大减轻了工人劳动强度。复位装置可做起伏运动，可避免篦板被碎球卡死对篦床造成严重的顶啃。

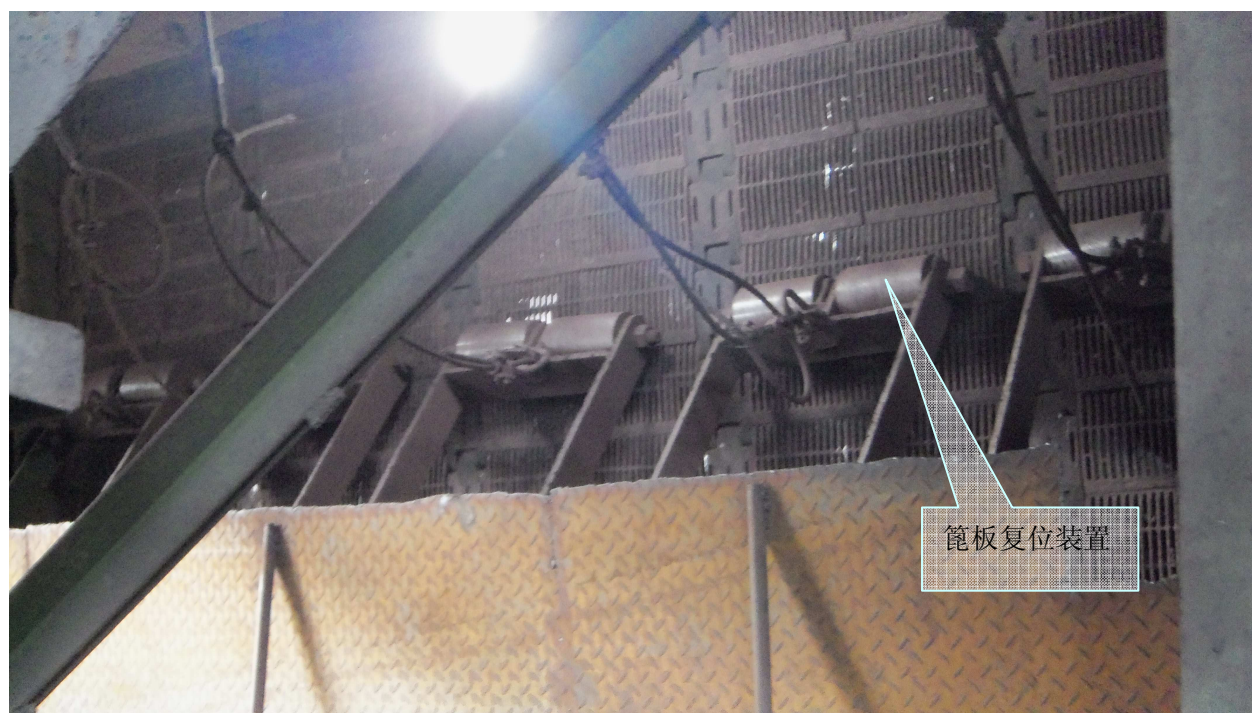


图 4.8 篦板强制复位装置安装实物图

Fig.4.8 Grate plate forced reset device is arranged the physical map

4.6.3 链篦机主轴改进实施效果

链篦机主轴改进于 2011 年底完成备件制作（见图 4.9），2012 年 6 月检修时更换，经热负荷试车，生产运行正常。高温运转一个月后，降温停机进入链篦机内部检查，链轮无松动现象，链轮与篦床链节啮合良好。至今未发生过链节因此挤坏开裂失效情况。



图 4.9 改进后的链篦机主轴实物图

Fig.4.9 Main chain grate machine improved physical map

4.6.4 生产工艺控制改进措施

链篦机主轴二侧链轮与链节侧间隙为 2mm 左右，而设计高温留量 5~7mm，冷态时，由于篦床零件装配误差或变形影响，转机时易发生局部啮合间隙小引发事故，因此，冷态不宜转机。有时因检修需要，也只能降速，以较低的速度运转。生产升温阶段，随着链篦机机头温度的升高，小轴与主轴温差越大，小轴受热膨胀伸长量比主轴越多，当机头温度高于 300℃时，能确保篦床链节与主轴啮合最佳。根据以往操作实践经验，生产操作时，机头烟罩温度低于 300℃必须停机，检修后升温，机头烟罩温度高于 300℃时方可转机；链篦机检修低温运转操作，转速必须低于 0.6m/s。

5 结束语

篦床作为球团生产主要设备链篦机上的核心部件，长期处于高温与低温的交变工况下工作，且工作中要经受氧、硫、水蒸气等侵蚀，承受粉尘的冲刷与磨损，有时又受生产工艺操作失当等人为因素的影响，发生故障损坏失效在所难免。如不能准确分析查找出原因，所造成的备件消耗与减产损失必然巨大。新钢球团厂根据自身实际情况，不断总结的实践经验，对损耗大、故障多的篦床主要零部件失效原因进行了深入分析，对设备存在的问题不断探索与改进，制定了科学合理的链篦机生产操作工艺制度，大幅降低了篦床事故故障，提高了链篦机利用系数，每年可减少篦床零部件备件消耗 100 多万元，取得了良好的经济效益。

6 结论

通过对新钢公司球团厂链篦机篦床主要零部件失效原因分析与改进试验，得出如下主要结论：

(1) 小轴在工作中要承受 600℃ 以上的高温与 135.67MPa 以上的剪应力。20CrMo 在链篦机篦床工作环境下易发生蠕变变形与断裂失效现象。2Cr13 中加入 3%左右的 Ni 与 4%左右的 Mn，可提高小轴的高温组织稳定性，满足制作小轴零件材质要求。

(2) 原篦板结构设计单薄，选用的 ZG30Cr26Ni5 材料高温下抗磨性、抗氧化性差，易发生快速磨损、篦条断裂失效。ZG35Cr24Ni7SiN 最高使用温度为 1100℃，高温强度高，抗氧化性能好，适合用作篦板、侧板零件材质。

(3) 侧板、链节零件材质设计满足链篦工况需求。侧板的氧化烧损失效主要由于篦床布料不均及操作不当造成；链节的断裂失效主要由于主轴链轮设计结构的可靠性差，链轮在高温下发生松动移位所致。采用 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢材料制作溜料板、调节摆头皮带机摆动机构螺杆等措施，可确保篦床二侧能布到料，减缓侧板烧损失效的发生。在主轴二侧各加装一锁紧螺母，能有效防止链轮高温下松动外移。

(4) 在机尾增设篦板自动强制复位装置，不需人工看守，能自动检测到未复位的篦板并强制其回位，能避免篦床空料，对篦床的运行能起到良好的保护作用。

致 谢

在本课题研究过程中，新钢公司检测中心协助进行材质检测与试验，新钢公司第二动力厂机修车间协助设备的维护、更换与安装，江苏宏大特种钢有限公司与新钢公司综合服务公司配合备件的制作，作者在此表示深深的谢意！

本论文是在我的导师张聪惠教授的悉心指导下完成的。张老师认真求实、一丝不苟的治学精神；平易近人、雍容大度的学者风范；知识渊博、思维敏锐和忘我的工作精神使我铭记在心，并终身受益。在论文撰写阶段，还得到了何晓梅老师的精心指导和帮助。在本论文结束之际，谨向恩师致以最诚挚的敬意和最衷心的感谢！

在论文的试验和理论研究过程中，我还受到了本单位导师新钢公司机动能源处彭兵高工的有力帮助和精心指导，使论文得以顺利完成，谨此表示衷心的感谢。

最后，衷心感谢在百忙之中评审本论文和参加本论文答辩的各位专家和教授！

参考文献

- [1] 张一敏. 球团理论与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997: 2—95.
- [2] 廖建国. 链算机-回转窑球团生产工艺[J]. 世界金属导报, 2010 (010): 2.
- [3] 李蒙, 任伟, 陈三凤. 国内外球团矿生产现状和展望[J]. 中国冶金, 2004, (12): 217—219.
- [4] 我国球团矿生产发展的现状和建议[EB/OL]. 企业库 2010-01-21.
- [5] 叶匡吾. 我国球团生产的现状与展望[J]. 烧结球团, 2003 (1): 3.
- [6] 魏永英. 链算机算板用新型Fe—Cr基耐热钢的抗氧化性能研究[J]. 河北冶金, 2008 (4): 29.
- [7] 张一敏. 球团矿生产技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005, 69—110.
- [8] 肖琪. 团矿理论与实践[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1991: 201-202.
- [9] 叶学农. 链篦机-回转窑氧化球团生产工艺渐析[J].
- [10] 孔令坛. 中国球团矿的发展[A]. 2004年全国球团技术研讨会论文集, 2004, 8: 1—3.
- [11] 孔令坛. 中国球团矿的发展[J]. 球团技术, 2005 (1): 2.
- [12] 孙立晏. 全国球团技术协调组工作汇报[J]. 球团技术, 2006 (4): 3.
- [13] 中钢协会 中国金属学会. 2006年~2020年中国钢铁工业科学与技术发展指南. 冶金工业出版社, 2006年.
- [14] 王悦祥主编. 烧结矿与球团矿[EB/OL]. 超星读书网 矿业工程 2006—07: 168—169.
- [15] 高宇宏, 张英明, 唐玖. 链篦机的结构简介[M]. 机械工程与自动化, 2008 (2): 109.
- [16] 李守林, 刘杰, 韩向东, 高瑞清, 刘俊友. ZG35 Cr27Ni7 Si耐热钢链节断裂失效分析[J]. 河北冶金, 2007 (4): 12.
- [17] 张彦博, 杨国芝. 链篦机的主要故障原因分析与处理方法[EB/OL]. 道客巴巴网 2007-11-23.
- [18] 戴枝荣. 工程材料[M]. 高等教育出版社, 1992: 119.
- [19] 丛 勉主编. 铸造手册. 铸钢分册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991: 150—151, 171—180.

- [20] 邓想, 公永建. 抗磨耐热钢的耐磨性研究[J]. 河南机电高等专科学校学报, 2006, 14 (6) : 8—9.
- [21] 谢锡善. 我国高温材料的应用与发展[J]. 机械工程材料, 2004 (1) : 1.
- [22] 孙峰. 新型耐热钢的研制和应用[J]. 水利电力机械, 2004, (2) : 41.
- [23] 蔡春波, 古可成, 丁晖. 锅炉喷嘴用耐热钢的研究[J]. 沈阳工业大学学报, 2004, (5) : 499.
- [24] Whittle D P, Stringer J. Improvements in high temperature oxidation resistance by additions of reactive elements or oxide dispersions[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 1980, 295: 309—329.
- [25] 永井宏. 希土類元素の利用耐热合金への微量添加[J]. 铁と钢, 1984, 70(11): 1523—1529.
- [26] 李碚. 稀土金属在耐热钢和耐热合金中的应用[J]. 稀土, 1985, 6(5): 45—52.
- [27] 沈保罗. 稀土在改善钢的抗氧化、硫化、高温腐蚀以及抗渗碳性能的应用[J]. 四川冶金, 1995, 17(2): 4549.
- [28] 李美栓, 张亚明. 活性元素对合金高温氧化的作用机制[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2001, 13(6): 333—337.
- [29] Pint B A. Progress in Understanding the Reactive Element Effect since the Whittle and Stringer Literature Review[A]. Proceedings of the John Stringer Symposium on High Temperature Corrosion[C]. Indianapolis, 2001. 1. 10.
- [30] 李碚, 王嘉敏, 胥继华. 稀土元素对耐热金属材料高温腐蚀行为的改善作用[A]. 稀土在钢铁中的应用[c]. 北京: 冶金工业出版社, 1987.
- [31] 杜晓建, 王龙妹, 刘晓, 陈雷. 稀土在耐热钢高温氧化中的作用机制[J]. 〈稀土〉2010, 31 (6) : 73-74.
- [32] 刘国志. 合金元素对耐热钢组织和性能的影响[J]. 材料开发与应用. 1997, 12 (1) : 17—21.
- [33] 吴承建, 陈国良, 强文江等编著. 金属材料学 (第2版) [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009 (8) : 159.
- [34] 王海涛, 冯新德, 王守仁, 王执福. 镍、铬、铝对铁基高温合金组织和性能的影响[J]. 山东机械, 2001 (6) : 7.
- [35] 谭惠钟, 陈继志, 王嘉敏. 常用铸造耐热钢的碳化研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39 (22) : 185.

- [36] 罗新民, 陈康敏. 高镍铬含氮奥氏体耐热钢在高温渗碳环境中的蜕变[J]. 热处理, 2007, 22 (5) : 25.
- [37] 蒋汉祥, 孙善长, 杨德鑫. 含氮稀土耐热钢H1的研制 [J]. 重庆大学学报, 2002, 40 (3) : 94—95.
- [38] 胡宾伟. 耐热钢的设计思想[J]. 装备制造技, 2006, (4) : 50—51.
- [39] 古可成, 蔡春波, 孙东杰, 邹纳维. 以Mn、N代Ni奥氏体耐热钢的高温氧化[J] . 沈阳工业大学学报, 2006, 28 (1) : 21.
- [40] 徐自立编著. 高温金属材料的性能、强度设计及工和应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006, (1) : 1—150.
- [41] 鲍崇高, 张西平, 张建军, 杜智武. 高温工况下一种耐热耐磨新材料的组织、性能研究[J]. 铸造技术, 2001 (4) : 55—56.
- [42] 李志伟, 杨洪业, 徐凤莲, 刘杰, 景旭冉. ZG35Cr24Ni7SiN耐热钢不同温度下的氧化膜特征分析[J]. 铸造技术, 2009, 30 (3) : 348—350.

附录 I：硕士研究生学习阶段发表论文

- 1、易林根. 环冷机漏球原因分析与解决方法, 矿业工程, 2012 年第 2 期, 刊号: ISSN 1671-8550 CN21-1478/TD
- 2、黄伙根, 易林根. 耐热风机故障原因分析与处理, 江西冶金, 2011 年第 2 期, 刊号: ISSN 1006-2777, CN 36-1105/TF