

# 连铸拉矫辊表面剥落磨损机理与修复工艺

庞伟林

广西柳钢中金不锈钢有限公司 广西 玉林 537624

**摘 要：**连铸拉矫辊是连铸机的重要组成部分，在工作时承受高温氧化、交变热应力、周期性接触载荷的同时，表面剥落磨损是最主要的失效模式。对拉矫辊表面剥落磨损的发生机理进行了研究，阐述了热疲劳裂纹产生和发展、接触疲劳剥层以及高温氧化加快损伤三者的相互影响的关系。进一步介绍了目前常用的几种修复方法，如堆焊修复、热喷涂和喷焊、激光熔覆和表面强化等，分析比较各种方法的特点及适用范围。最后总结了修复的方法的选择原则和修复后的评估标准，以为拉矫辊再制造提供一定的借鉴意义。

**关键词：**连铸拉矫辊；剥落磨损；热疲劳；堆焊修复

## 引言

连铸拉矫机位于连铸机扇形段后部，主要由拉矫辊完成对铸坯牵引、矫直以及压下任务，在持续生产中，拉矫辊圆周面会与高温铸坯（表面温度约为 800~1000℃）相接触并且受到间歇性冷水喷淋冷却作用产生剧烈温差变化，同时还要承受来自铸坯较大矫直力以及接触压力的作用，工作条件十分恶劣，据统计一般情况下拉矫辊平均使用时间仅几个月甚至一年以内，而且最常见的失效形式就是表面剥落磨损。当拉矫辊圆周面上有大面积剥落后，一方面会影响产品质量，另一方面也会引起设备抖动甚至拉不住铸坯而发生灾难性事故。所以研究清楚拉矫辊圆周面剥落磨损机理并采取相应措施可以有效提高使用寿命、减少更换次数从而节约大量资金并且保证连铸正常运转具有重要意义。

## 1 连铸拉矫辊服役条件与失效特征

### 1.1 服役条件

连铸拉矫辊的工作条件是典型的多场耦合作用。一方面，辊面温差很大，在与高温的铸坯接触后，其表面温度可以达到 600℃以上，而之后迅速被冷水冷却到大约 200℃，甚至更高频率，即每分钟几次这样的变化都会给辊子表面带来极大的热应力；另一方面，在对铸坯进行拉矫的过程中，要施加很大的径向压下量以及牵引摩擦力，因此辊面受到很大的接触应力和剪切应力，应力状况十分严峻。再一方面是由于高温下的水汽以及氧气的作用，导致辊面严重氧化，氧化物（如 FeO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等）硬度很高，在外力作用下容易碎裂掉落。还有就是铸坯表面残余的氧化铁皮和硬质夹杂物在滑过辊面时造成磨料磨损，加剧材料消耗<sup>[1]</sup>。所以这些热、力、化学等多

种因素综合作用下，才会有拉矫辊失效的问题的发生，而不仅仅是一种原因造成的。

### 1.2 典型失效形式

拉矫辊失效主要有以下几种形式：表面龟裂、剥落坑、均匀磨损以及局部压溃等。而其中以剥落最为严重的一种失效方式。剥落是指一块或多块大小不同的金属片从辊面上脱落下来，在剥落处会出现深浅不等的凹坑，坑底有明显疲劳辉纹以及次生裂纹。根据剥落程度可以分为两种类型：一种是浅层剥落（深度小于 2 毫米），一般是由于热疲劳裂纹互相连接造成的；另一种是深层剥落（深度大于 5 毫米），一般与接触疲劳导致的表层裂纹发展有关。而在实际生产中往往有多种损坏并存的情况，在剥落出现后就会迅速扩散而导致整个设备停运进行更换。所以了解其剥落磨损原因对于后期处理至关重要。

## 2 表面剥落磨损机理

### 2.1 热疲劳裂纹萌生与扩展

热疲劳是造成拉矫辊剥落的主要原因。当辊子受到加热后，表面材料膨胀而被处于低温状态下的内部基体所限制，从而产生压应力；然后迅速降温使得表面收缩，相应的拉应力也出现。如此往复的拉伸-压缩过程使得应力滞后而形成疲劳损伤，在辊面上产生细微裂纹。这些裂纹往往起始于晶界、碳化物及基体之间的结合部位等较弱的地方。因为拉矫辊所用材质（例如 Cr-Mo-V 类热作模具钢）含有大量合金碳化物，它们的热膨胀系数不同于基体，所以在热疲劳过程中在界面处产生较大的内应力而导致裂纹更容易形成和发展。随着循环次数增多，许多细小裂纹沿晶界或者枝晶间扩展，最终形成

网络状裂纹<sup>[2]</sup>。当这些裂纹连接在一起时,被围起来的部分与基体之间的结合力大大降低,在接下来的热应力或者外力的作用下就会脱离,形成浅层剥落。热疲劳中裂纹的发展速度与温差大小、循环次数以及材料的热导率有关,温差越大,塑性变形越严重,裂纹发展的推动力也越大。

## 2.2 接触疲劳剥层

在辊面与铸坯相对转动或者滑动情况下,接触区表面材料处于多轴压-剪应力状态。最大剪切应力并不在最表层,而是在次表层大约 0.5~1.5mm 深处,这与接触宽度以及载荷有关。在周期性接触应力之下,这个区域内的材料会发生塑性变形产生驻留滑移带并且出现亚表面疲劳裂纹,这些裂纹最初沿着表面方向发展,直到一定长度之后由于裂纹尖端周围应力场的影响使其改变方向朝向表面从而导致薄片状或者贝壳状的碎片脱落也就是所谓的“剥层”。而接触疲劳剥落与热疲劳剥落的区别就是:前者裂纹起源于次表层,剥落较深而且比较平整;后者起源于表面,剥落较浅并且是小块状。而在实际使用过程中,热疲劳表面上的裂纹可以作为接触疲劳破坏的应力集中点从而大大减少亚表面裂纹萌生所需的循环次数,两者之间存在一种互相促进的关系。

## 2.3 高温氧化与磨损的协同作用

拉矫辊表面在高温环境下产生的氧化层由两部分组成:外层是疏松的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 内层是较为致密的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  以及  $\text{FeO}$  混合层。氧化层本身很脆弱,与基体之间结合力较差,在热应力及接触应力的作用下,氧化层首先裂开、碎裂、脱落,露出新的金属表面后又迅速被氧化,从而形成了一个不断重复的氧化-剥落-再氧化的过程造成持续损失。而且更重要的是,氧化前沿沿热疲劳裂纹或接触疲劳裂纹侧面往内部发展,在裂纹尖端处产生氧化腐蚀。氧化产物在裂纹内部膨胀而产生的楔入力相当于一个附加拉开力,大大加快裂纹增长速度。同时氧化还消耗掉基体中 Cr、Mo 等抗氧元素,使得裂纹附近区域变软从而降低其阻止裂纹继续发展的能力。所以高温氧化并不是简单的化学损失,而是由于它与疲劳裂纹之间的相互影响而促进剥落磨损的发生。总的来说,拉矫辊表面剥落磨损是由热疲劳、接触疲劳以及高温氧化等多种因素共同引起的,其中热疲劳起到“播种”的作用(产生表面裂纹网络),接触疲劳起到“深耕”的作用(推动次表层裂纹扩展),而氧化起到“助长”的作用力(促进裂缝贯穿以及材料剥离)。

## 3 修复工艺方法

### 3.1 堆焊修复

利用电弧或者气体火焰将合金熔化后敷在辊子表面剥落处或者是整个圆周上,使其与基体形成冶金结合的堆焊层。常用的堆焊材料有马氏体不锈钢(如 Cr13 系)、镍基合金(如 Inconel625)以及钴基合金(如 Stellite6)。而堆焊过程主要是要保证稀释率(一般小于 15%)及层间温度。如果稀释率过高,则会使堆焊层中的合金元素被基材所稀释,从而降低其硬度和抗氧化性;如果稀释率过低,则会使两者之间不能很好融合在一起而造成剥离现象发生。因此,在进行堆焊之前需要对其进行预热(一般为 300~450℃),并且在焊完之后还要对其进行缓冷(或者回火热处理),以防产生马氏体相变产生的内应力以及氢脆裂纹问题。对于多层多道堆焊来说,需要合理安排焊接顺序避免出现热量过大而导致工件变形的问题<sup>[3]</sup>。堆焊的优势在于技术较为成熟,投资较少并且可以在现场操作,而且堆焊层厚度可以达到几十毫米以上,适合用于严重损坏情况下的修复工作。但是缺点也很突出:由于加热量较大而导致热影响区晶粒长大,给基体带来无法恢复的热损伤;另外堆焊层稀释率不稳定也会影响到使用性能的一致性;最后就是焊后需要大量进行机械加工去除多余部分造成材料的极大浪费。

### 3.2 热喷涂与喷焊

热喷涂方法(如火焰喷涂、电弧喷涂以及等离子喷涂)将粉末或丝材加热到熔融或半熔融状态后高速喷射到辊面上形成涂层,涂层厚度一般为 0.3~2.0 mm,主要用于浅层磨损及剥落坑修补。热喷涂的主要优点是热输入很低,工件温度一般不超过 200℃,不会引起基体相变及变形。但是其缺点是涂层与基体之间主要是依靠机械嵌合力连接,其结合力较差(一般小于 70 MPa),在较大压应力作用下容易出现整个涂层脱落的情况。为了提高涂层结合力还可以采用喷焊的方法,在喷涂之后再对涂层进行加热使其与基体发生冶金结合。喷焊后涂层与基体间结合强度可以达到 200 MPa 以上并且孔隙率大幅度下降。但是由于喷焊需要较高的温度(约 1000℃),所以又会产生热影响。热喷涂或者喷焊对于所使用的粉末材料有较高的要求,目前常用的是 NiCrBSi 自熔合金、WC-Co 金属陶瓷以及  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  陶瓷复合材料等。而 NiCrBSi 喷焊层由于具有良好的抗高温氧化性以及适中的硬度(HRC40~55)因此在拉矫辊修复上应用较为广泛。总的而言热喷涂适用于轻微均匀磨损情况下的修复但是对于大块缺损则需与其他方法联合才能完成修复工作。

### 3.3 激光熔覆与表面强化

以高能量密度激光束（功率密度达  $10^3 \sim 10^5 \text{W/cm}^2$ ）照射同时送入合金粉末使合金粉末瞬间熔化并和辊面上一层较薄的基体产生冶金结合，然后由于基体本身的散热而迅速冷凝，从而得到致密、细小的熔覆层结构。激光熔覆的优势主要有以下几个方面：热输入集中可控，热影响区很小（ $< 1\text{mm}$ ），基体基本无变形；稀释率很低（ $< 5\%$ ），可以最大限度地发挥合金粉末的优点；熔覆层晶粒非常细小，无柱状晶偏析，硬度与韧性良好配合优于堆焊层。对于拉矫辊使用条件，人们研制出各种专用粉末，比如 Fe-Cr-Ni-Mo 多元合金以及纳米碳化物增强复合粉末等，熔覆后可以获得在高温下仍然具有较高硬度（ $> 600^\circ\text{C}$ ）的熔覆层<sup>[4]</sup>。另外一种激光熔覆的派生物是激光表面淬火及激光合金化，前者是对辊面进行相变硬化（不需要添加粉末），而后者则是通过熔入合金元素改变其成分，都可以起到预防性强化作用。虽然激光熔覆的成本较高，而且要求很严格（对光斑大小、扫描速度、供粉量等都有较高要求），但是由于其修复效果好，后续加工量少，因此是目前高附加值拉矫辊再制造的最佳选择。

## 4 修复工艺选择与质量控制

### 4.1 工艺对比与适用条件

三种修复方法都有一定的局限性，在使用时要根据脱皮程度、损伤面积、辊子材质、经济性和现场情况进行考虑。堆焊适用于脱皮程度大于  $3\text{mm}$  的大面积损伤，技术难度较小、成本较低，但是对高碳当量材料（例如 Cr5MoV 等）需要进行严格的预热（ $> 400^\circ\text{C}$ ）以及焊后回火处理。热喷涂/喷焊适用于脱皮小于  $1.5\text{mm}$  且较为均匀的情况，热影响区小，但是涂层韧性较差，不适合在矫直力度较大的拉矫辊上应用。激光熔覆适应范围最广（ $0.5 \sim 10\text{mm}$ ），熔覆层质量良好，适合高要求的关键部位，但是单价较高，更适合于大直径或者进口高端辊子的再制造。对于微裂纹较多但是尚未出现严重脱皮的

早期缺陷可以采用激光表面淬火或者超声冲击强化以起到预防作用。

### 4.2 修复后性能评价指标

修复后要经过一系列检测，主要有以下几个方面：界面结合强度（不低于基体屈服强度  $80\%$ ）；表面硬度（HRC  $40 \sim 55$ ，同辊硬度差  $\leq \pm 3\text{HRC}$ ）；抗热疲劳性能（循环加热-淬冷试验）；高温氧化增重百分比；涂层致密度及孔隙率（喷涂类应小于  $3\%$ ）。无损检测用渗透/磁粉探伤观察表面裂纹，用超声波检测界面未熔合缺陷等。还要检查辊子表面形状以及圆度误差等。标准不能和新辊一致，要根据“安全服役寿命”，而不是“原来的性能”来确定可以接受的标准，在经济效益和安全性之间寻求一个平衡点。

## 5 结语

连铸拉矫辊表面剥落是热-力-化学多因素耦合的复杂损伤过程：热疲劳引发裂纹，接触疲劳促其扩展，高温氧化加速材料分离，三者协同导致剥落突发且迅速。修复应聚焦阻断裂纹、恢复尺寸与提升表层性能。堆焊、热喷涂和激光熔覆各具优势，其中激光熔覆因热影响小、组织细密、成分可调，代表高品质修复方向。未来应研究复合工艺（如激光熔覆 + 超声滚压）的协同效应，开发工况自适应修复材料，并构建基于损伤程度的智能修复决策系统，推动再制造智能化与标准化。

## 参考文献

- [1] 张建华, 刘伟民, 陈宏. 连铸拉矫辊热疲劳裂纹扩展行为研究 [J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(5): 478-485.
- [2] 王海涛, 李志刚, 孙晓峰. 激光熔覆 Fe-Cr-Ni 合金涂层的高温磨损性能 [J]. 表面技术, 2023, 52(8): 112-120.
- [3] 陈思远, 吴玉道, 赵明. 堆焊修复层界面结合强度评价方法对比 [J]. 焊接学报, 2021, 42(11): 87-93.
- [4] 刘艳梅, 周新国, 郑凯. 热喷涂 NiCrBSi 涂层接触疲劳剥落机理 [J]. 热喷涂技术, 2024, 16(2): 34-41.