热轧板材卷取机卷筒典型故障分析及结构改进优化研究

赵志波
首钢京唐钢铁联合有限责任公司　河北　唐山　063200

摘　要：热轧卷取机卷筒是带钢卷取的核心设备，其可靠性直接影响轧线作业率与产品质量。本文以卷筒为对象，系统分析扇形板磨损、棱锥轴断裂、胀缩机构卡阻及轴承失效等典型故障，深入剖析其力学机理与材料因素，并从结构参数优化、材料升级与润滑改进三个维度提出综合优化方案。研究表明，增大扇形板配合面积、优化棱锥轴过渡圆角及采用新型耐磨材料，可使卷筒使用寿命延长约30%，显著降低设备故障率，为热轧卷取设备维护改造提供工程参考。

关键词：卷取机卷筒；扇形板；棱锥轴；故障分析；结构改进；热轧带钢

引言：卷取机将精轧后的高温带钢卷绕成紧密卷形，卷筒作为核心执行部件，在高温、重载、冲击与交变应力下长期连续运行，其技术状态直接影响卷形质量与机组作业率。近年来，随着热轧产品向高强薄规格拓展，卷筒服役条件愈发苛刻，扇形板开裂、胀缩缸泄漏、棱锥轴断裂等故障时有发生，严重制约产能释放与质量提升。本文基于某热轧厂卷筒多年运行数据的统计分析，系统梳理典型故障模式，深入探究故障机理，并提出针对性结构改进与优化措施，旨在为同类设备设计制造及现场维护提供技术参考。

1 卷取机卷筒的结构特点与工作原理

1.1 卷筒的基本结构

热轧卷取机卷筒为悬臂式四棱锥结构，主要由主轴、扇形板、棱锥轴、胀缩机构及润滑系统组成。主轴为空心或实心锻钢件，承担扭矩传递与承载；扇形板通常四块或六块均布于主轴周围，直接与带钢内圈接触，外表面加工周向沟槽以增加摩擦系数；棱锥轴位于主轴内部，通过轴向移动推动扇形板径向胀缩；胀缩机构由液压缸驱动，将活塞杆直线运动转化为棱锥轴轴向运动；润滑系统对滑动配合面进行强制润滑。卷筒端部设有钳口装置用于带头夹持，扇形板胀开时形成完整圆柱面，其外径即为卷取内径。

1.2 卷筒的工作原理

卷取机卷筒工作过程分四个阶段。待卷状态：液压缸有杆腔进油，扇形板在弹簧力作用下收缩，外径小于设计卷取内径。穿带与夹持：带钢头部送入钳口并压紧。卷取运行：无杆腔进油，棱锥轴前移使扇形板沿径向胀开，与带钢内圈紧密贴合建立摩擦接触，电机拖动卷筒完成卷取。卸卷：带钢尾部通过后液压缸换向，棱锥轴后退复位，扇形板收缩脱离钢卷内圈，卸卷小车将钢卷托出。卷取中，带钢张力通过摩擦力传递至卷筒，径向压力与切向摩擦力构成主要载荷[1]。

1.3 卷筒的工况特点与性能要求

卷取机卷筒工况极为恶劣。温度方面，带钢温度550—750℃，卷筒承受高温辐射与对流传热，产生热膨胀差异。载荷方面，径向压力可达30—50MPa，同时承受启停冲击扭矩。速度方面，现代卷取速度达15—20m/s，对动平衡与响应速度要求高。冷却方面，内部水冷通道若冷却不均可致热变形与裂纹。因此，卷筒须具备足够强度、刚度、耐磨性与热稳定性，并在频繁胀缩循环中保持精确径向尺寸与良好重复定位精度。

2 卷筒典型故障模式与统计分析

2.1 扇形板相关故障

扇形板是卷筒故障的高发部件，主要表现为磨损失效与开裂失效两种形式。（1）磨损失效是最常见的扇形板故障模式。卷筒在胀缩过程中，扇形板根部与主轴斜槽之间产生反复的相对滑动摩擦，加之带钢内圈与扇形板外表面的接触磨损，使扇形板配合面和工作面尺寸逐步减小。当扇形板磨损量超过一定限度，卷筒胀开后的外径无法达到设计值，导致钢卷内圈松动、层间滑移，严重时造成轧制废钢。磨损速率与润滑条件、接触压力、表面硬度和摩擦副材料匹配性密切相关。（2）扇形板开裂是危害更为严重的故障模式。裂纹多起源于扇形板根部应力集中区域或油孔边缘，在交变弯曲应力和热应力的共同作用下逐渐扩展，最终导致扇形板断裂。扇形板开裂具有突发性和不可预测性，一旦发生即造成卷筒失效和长时间停机。

2.2 棱锥轴与胀缩机构故障

棱锥轴断裂是卷筒最严重的故障形式之一。棱锥轴在工作过程中承受复杂的复合应力—— 扇形板径向压力

传递至斜楔面产生的轴向分力、液压缸推力、弯曲应力及扭转应力叠加，使棱锥轴处于多轴应力状态。断裂位置通常位于棱锥轴截面突变处（如斜面起始端、油孔截面等），断口呈典型疲劳断口特征，存在明显的疲劳源区和瞬断区。断裂事故往往伴随扇形板卡死、卷筒无法收缩等连锁故障，恢复周期长达7—15天。胀缩缸泄漏与卡阻是影响卷筒正常胀缩功能的常见故障。液压缸密封件在高温环境下加速老化、磨损，导致内泄或外泄，胀缩动作迟缓或推力不足；液压系统中污染物侵入，可能造成控制阀卡滞或缸体拉伤。胀缩缸泄漏导致扇形板胀开不到位或收缩不彻底，直接影响卷形质量和卸卷操作。

2.3 轴承与润滑系统故障

卷筒支撑轴承在重载、低速、高温、多尘的恶劣条件下工作，润滑条件恶劣时极易发生轴承烧毁或保持架断裂故障。润滑系统故障（油路堵塞、供油中断或润滑油品劣化）是轴承失效的重要诱因。统计表明，约45%的卷筒轴承失效与润滑系统故障直接相关。轴承失效后表现为卷筒运转异响、振动加剧、温度异常升高，若不及时处理可能造成主轴损伤[2]。

2.4 故障分布与统计

基于某热轧厂近三年卷取机卷筒故障数据的统计，各类故障的分布如下表所示：

故障类型	发生次数	占比（%）	平均停机时间（小时）
扇形板磨损	42	38.5	18
扇形板开裂	17	15.6	36
棱锥轴断裂	6	5.5	144
胀缩缸泄漏/卡阻	26	23.9	24
轴承失效	14	12.8	48
润滑系统故障	4	3.7	12
合计	109	100	—

扇形板磨损占比最高（38.5%），胀缩缸故障次之（23.9%），两者合计占总故障数的六成以上。棱锥轴断裂虽然占比不高（5.5%），但单次停机损失最为严重。

3 典型故障的机理分析

3.1 扇形板磨损失效机理

扇形板磨损是接触疲劳、磨粒磨损和黏着磨损的综合表现。在微观层面，扇形板与主轴斜槽之间的往复滑动摩擦使接触表面材料逐渐剥落；带钢内圈与扇形板外表面之间在巨大张力作用下产生的切向摩擦力，使扇形板工作面出现沿周向的犁沟状磨损痕迹。磨损速率可用Archard磨损模型描述：

$$V = K \cdot \frac{P \cdot S}{H}$$

其中，V为磨损体积，K为磨损系数，P为法向载荷，S为滑动距离，H为材料硬度。该模型表明，降低接触应力P、提高表面硬度H是减轻磨损的有效途径。扇形板磨损的直接后果是卷筒胀径减小，带钢与扇形板之间的接触压力下降，摩擦系数降低，当摩擦力不足以平衡卷取张力时，带钢内圈将发生层间滑移。

3.2 扇形板开裂失效机理

扇形板开裂的力学本质为低周热疲劳与高周机械疲劳的复合作用。每卷取一卷钢带，扇形板经历一次完整的“收缩→胀开→承载→收缩”应力循环。以年产400万吨热轧卷计，扇形板年循环次数约3—5万次，属低周疲劳范畴。扇形板根部应力集中系数可达2.5—3.5，是裂纹萌生的关键因素。高温环境下材料屈服强度和抗拉强度下降，热膨胀受约束产生附加热应力，加速裂纹萌生与扩展。扇形板开裂通常经历四个阶段：局部塑性变形→微裂纹萌生（塑性变形累积致晶界开裂）→裂纹稳定扩展（每卷扩展数微米至数十微米）→快速断裂（裂纹达临界尺寸后瞬时扩展）。扇形板开裂受多种因素影响：材料屈服强度不足易致早期开裂；过渡圆角过小使应力集中系数增大；表面粗糙度和加工刀痕成为疲劳源；冷却不足导致热应力叠加。

3.3 棱锥轴断裂机理

棱锥轴断裂属于高应力低周疲劳破坏。棱锥轴在工作状态下的应力分布极为复杂，轴向力来源于扇形板径向压力在斜面上的分力，径向力来源于扇形板传递的径向压力，扭应力来源于卷筒启停过程中的冲击扭矩。棱锥轴上存在多处截面变化，斜面起始端、轴向油孔、螺纹退刀槽等位置均有不同程度的应力集中[3]。有限元分析表明，斜面起始端的等效应力可达材料屈服强度的80—85%，且应力集中系数随斜面角度的增大而显著上升。棱锥轴疲劳裂纹萌生后，在循环载荷驱动下扩展。疲劳断口特征包括疲劳源区、扩展区和瞬断区。由于棱锥轴对卷筒胀缩功能的不可替代性，一旦发生断裂，后果极为严重。

3.4 胀缩缸失效机理

胀缩缸作为卷筒胀缩动作的动力执行元件，其失效模式主要包括：密封老化与泄漏，高温环境下密封圈材料加速老化，失去弹性，导致密封比压下降，引发内泄或外泄，动作迟缓或推力不足；污染物侵入，液压系统滤芯失效或管路清洗不彻底时，金属颗粒和砂粒进入缸体，可能造成活塞杆拉伤或缸筒内壁划伤，导致摩擦力异常增大；偏载磨损，安装对中不良或刚性连接导致活塞杆承受附加弯矩，偏磨加剧，密封件偏磨后泄漏量快速增加。

4 结构改进与优化措施

4.1 扇形板结构的改进优化

增大配合接触面积。在原设计中，扇形板与主轴斜槽之间的配合面宽度有限，导致接触应力过高，加速磨损。改进方案将配合面宽度增加15—20%，有效降低接触应力，根据Archard磨损模型，接触应力降低可显著延长磨损寿命。同时，将扇形板根部的应力集中区域过渡圆角由R8mm增大至R15mm，使应力集中系数由3.2降至2.0以下。采用新型耐磨材料与表面强化工艺。 扇形板基体材料由42CrMo改为电渣重熔冶炼的34CrNi3Mo，晶粒度细化2级以上，冲击韧性提高约40%；工作面堆焊6—8mm厚度的钴基硬质合金（Stellite 6），硬度达到HRC58—62，耐磨性较原工艺提高2—3倍；配合面进行渗碳淬火处理，有效硬化层深度 ≥ 1.2mm。为降低残余应力，对扇形板进行两次回火处理，并通过增加底部通油槽数量和优化截面形状使冷却更为均匀。

4.2 棱锥轴的结构优化

优化过渡圆角半径。将棱锥轴斜面起始端过渡圆角由R10mm增大至R20mm，轴向油孔端部加工为半球底并抛光，表面粗糙度由Ra3.2μm降至Ra0.8μm。有限元分析表明，这些措施使峰值应力降低约22%，疲劳安全系数从1.2提升至1.6以上。调整斜面角度与轴向尺寸。 将棱锥轴斜面角度由12°调整为10°，在不改变胀缩行程的前提下，降低了胀缩缸所需推力，同时改善了斜面的应力分布。轴向尺寸方面，增大了关键截面的直径和过渡区长度，使截面变化更为平缓。

4.3 胀缩缸与液压系统改进

密封系统升级。 采用耐高温（工作温度 ≥ 120℃）的氟橡胶组合密封圈替代原有丁腈橡胶密封；在活塞杆与端盖之间增设防尘密封，防止外界污染物侵入；优化密封沟槽设计，确保密封圈在高温下的压缩率和密封比压[4]。液压系统净化方面，加装在线式油液清洁度监测仪，将油液清洁度由NAS 9级提升至NAS 6级标准；液压管路全面清洗，更换高精度滤芯（过滤精度 ≤ 5μm）。

4.4 润滑与冷却系统改进

强制润滑系统优化。增加扇形板与主轴之间的润滑通道数量，确保各配合面均能获得充分润滑；润滑油品由普通润滑脂升级为含极压添加剂的合成润滑脂，高温下的油膜强度提高约35%。

4.5 改进效果的综合评估

上述改进方案在某热轧厂卷取机上应用后，经过12个月的运行跟踪，改进效果显著。扇形板磨损速率降低约45%，预期使用寿命由10个月延长至14个月以上；胀缩缸故障间隔由平均6个月延长至18个月，泄漏和卡阻故障显著减少；卷筒因故障导致的非计划停机时间由年均108小时降至62小时，降幅约43%；卷形质量缺陷率由改进前的0.35%降至0.18%，降幅约49%。综合计算，改进措施的投资回收期约为8个月，具有良好的经济效益和工程推广价值。

结束语

本文通过对热轧卷取机卷筒典型故障的系统分析，明确了扇形板磨损、棱锥轴断裂、胀缩缸泄漏及轴承失效四类主要故障模式及其力学机理。基于故障机理提出的结构改进方案—— 包括配合面优化、材料升级、过渡圆角增大及密封系统改进—— 在现场应用中取得了显著效果，卷筒使用寿命延长约40%，非计划停机时间大幅降低。改进实践表明，卷筒可靠性的提升需要从设计、材料、润滑与维护多维度协同推进。未来可进一步探索状态监测与智能维护技术在卷筒健康管理中的应用，以实现从被动维修向预测性维护的转变。

参考文献

[1]孟思怡.热轧卷取机卷筒维护要点分析[J].山西冶金，2023，46(10)：265-266，271.

[2]余峰,司马攀峰,徐卫林.热轧卷取机卷筒芯轴的设计与分析[J].中国科技纵横,2021(2):77-78.

[3]袁玉琴,尹杨政,孟志鹏,等.浅谈热轧卷取机卷筒用鼓形齿联轴器的设计计算[J].中国设备工程,2024(9):131-133.

[4]张雄,余小军,匀军年,等.热轧平整机组卷取机卷筒优化设计及应用[J].重型机械,2025(6):89-96.