

# 露天煤矿挖掘机齿轮失效形式分析与预防措施

张 铁 毅

(神华北电胜利能源有限公司,内蒙古 锡林浩特 026015)

**摘要:**为避免露天煤矿因挖掘机失修造成大的机电事故,以WK-35和WK-10B挖掘机在运行中遇到的挖掘机故障进行研究,采用失效树分析法对齿轮的轮齿折断、齿面磨损、齿面点蚀和齿轮轴断裂等失效形式进行分析,得出齿轮失效的具体原因。基于以上研究,从挖掘机及相应的配件采购、齿轮润滑、油液监测等方面,提出相应的预防措施,并经过实践验证了以上预防措施可有效降低挖掘机齿轮发生故障的概率。

**关键词:**挖掘机;齿轮;失效树;失效形式;预防措施

**中图分类号:**TD422      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2336(2014)01-0069-03

## Preventive Measures and Failure Modes Analysis on Excavator Gear in Opencast Mine

ZHANG Tie-yi

(Shenhua Beidian Shengli Energy Co., Ltd., Xilinhot 026015, China)

**Abstract:** In order to avoid failures caused by the inadequate maintenance of excavator, the paper researched excavators faults happened in practice based on WK-35 and WK-10B excavators. It also analyzed four failure modes of gear broken teeth, gear tooth wear, gear tooth surface pitting and gear shaft fracture by the analysis method of failure tree, the specific reasons of gear failure was got. It was also indicated the preventive measures from the aspects of excavator and its corresponding parts procurement, gear lubrication, oil monitoring, and others, after the actual application, it showed that these preventive measures for reducing the gear lubrication oil monitoring of excavator gear was effective.

**Key words:** excavator; gear; fault tree; failure modes; preventive measures

## 0 引言

挖掘机动力传动一般是依靠电动机输入,通过减速箱的齿轮传动输出动力。在作业过程中,减速箱内部齿轮传动具有振动强、噪声大以及冲击载荷大等特点。而齿轮失效直接影响挖掘机的工作可靠性和出动率<sup>[1-2]</sup>。笔者运用失效树分析法分析挖掘机齿轮失效的主要原因,结合挖掘机在露天煤矿采场作业中发生的故障,提出相应的管理措施<sup>[3]</sup>,即对胜利露天煤矿的设备、配件、润滑、操作者提出具体要求,以便于胜利露天煤矿改进设备管理、杜绝机电事故、提高设备效率,达到设备效益的最大化。

## 1 齿轮失效形式与原因分析

### 1.1 齿面点蚀与原因分析

齿面点蚀是露天煤矿挖掘机齿轮失效的主要形式。挖掘机齿轮工作时,2个齿面在接触处会产生循环的接触应力,当齿面接触应力超过材料的接触疲劳极限时,齿面上就会产生细小的疲劳裂纹,随着裂纹的逐渐扩展,齿面金属表层将产生片状剥落而形成麻坑,这种现象称为点蚀,当点蚀出现以后,齿面承载面迅速减小,接触应力急剧增大,加剧了齿面的疲劳损坏,最后导致齿面无法正常工作。

2012年3月24日17时40分,胜利露天煤矿1台WK-35挖掘机运行到7 738 h时,在推压过程中推压减速箱有异响,通过拆解减速箱,发现推压二轴

收稿日期:2013-08-11;责任编辑:赵 瑞 DOI:10.13199/j.cnki.est.2014.01.017

作者简介:张铁毅(1962—),男,吉林扶余人,高级工程师,现任神华北电胜利能源有限公司总经理。

引用格式:张铁毅.露天煤矿挖掘机齿轮失效形式分析与预防措施[J].煤炭科学技术,2014,42(1):69-71,111.

ZHANG Tie-yi.Preventive Measures and Failure Modes Analysis on Excavator Gear in Opencast Mine[J].Coal Science and Technology,2014,42(1):69-71,111.

小齿轮在靠近节线处的齿根出现1条带状的齿面剥落,即标准的齿轮齿面点蚀失效状态。齿轮点蚀原因有以下2点。

1) WK-35挖掘机推压减速箱齿轮传动过程中,齿轮接触面上各点的接触应力呈脉动循环变化,当推压二轴上的圆柱直齿与推压三轴上的圆柱直齿啮合时,齿面接触产生很大的接触应力,特别是在推压过程中。由于采掘现场煤层或土层硬度较大,齿面接触面上的接触应力远超过轮齿材料刚度与硬度的疲劳极限<sup>[4]</sup>,导致齿面上产生裂纹,裂纹扩展致使表层金属微粒剥落,形成小麻点,小麻点继续延伸,积累形成齿面点蚀,最终造成齿面金属剥落。

2) 由于齿轮在节线附近啮合时,齿轮啮合面积小,且齿轮轮齿间相对传动中,齿面接触应力超负荷,致使齿轮润滑表面受挤压<sup>[5]</sup>,而不能形成有效的润滑油膜,造成点蚀。

## 1.2 齿轮磨损与原因分析

露天煤矿挖掘机的工作对象为不同地质条件的煤岩体,工作环境恶劣、工况条件苛刻、运行时间长和润滑条件差,造成煤矿挖掘机齿轮传动的磨损失效现象极其严重。在2011年5月对WK-35挖掘机(运行时间为21 400 h)进行状态维修时,发现提升滚筒斜齿圆柱大齿圈齿面出现磨损。

齿轮磨损原因分析如下:WK-35挖掘机提升滚筒渐开线斜齿圆柱大齿圈与提升减速箱输出轴2个渐开线斜齿圆柱小齿轮啮合传动时,两渐开线齿廓之间存在相对滑动,形成较大的交变冲击载荷,在挖掘机进行提升作业时,滚筒渐开线斜齿圆柱大齿圈齿面受到的接触应力最大<sup>[6]</sup>。当挖掘机在挖掘硬土岩时,齿面接触应力大幅超过其齿轮表面载荷力,同时由于齿面接触应力超限使得齿轮表面的油膜失效,齿面会产生擦伤现象,擦伤扩展到整个齿面即发生齿面磨损。随着磨损加剧,齿轮间的齿隙增大、润滑效果不良,便会产生较大的噪声,即挖掘机提升作业时产生异响。

## 1.3 齿轮轮齿折断与原因分析

齿轮轮齿折断是一种危险性很大的最终失效形式,它主要分为疲劳断裂与过载断裂。疲劳断裂是指在循环载荷的作用下,齿根处产生应力集中,弯曲应力超过齿轮疲劳极限时,齿根圆角处产生疲劳裂纹。随着工作时间和循环次数的增加,裂纹逐渐扩展、加深,最后导致轮齿疲劳断裂;过载断裂是指轮齿受到一次或者几次严重过载时,发生的断裂。

2011年6月6日,WK-10B挖掘机左侧回转减速箱(图1)发生异响,对回转减速箱进行分解,发现第1个中间轴的轴齿轮下部连续打掉7个齿,第2个中间轴大齿轮表面有擦伤,如图2所示。

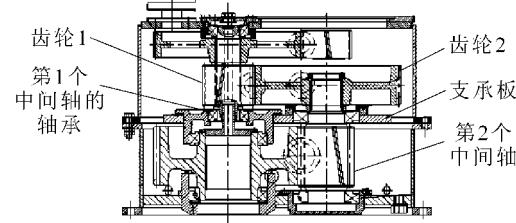


图1 WK-10B挖掘机左侧回转减速箱结构



(a) 第1个中间轴的轴齿轮 (b) 第2个中间轴的轴齿轮

图2 WK-10B左侧回转减速箱失效齿面

齿轮轮齿折断原因分析如下:从图1可知,支承板是第1个中间轴上的轴承和第2个中间轴上的轴承定位基准,支承板通过定位销进行固定,但在拆检时发现支承板有轻微晃动,说明定位销有间隙,造成支承板定位基准存在偏差,造成第1个中间轴上的齿轮1和第2个中间轴上的齿轮2啮合不正常。

因回转减速箱是二级减速渐开线斜齿圆柱齿轮进行啮合传动,相互啮合的齿面是沿斜线接触的,其瞬时接触线为一条斜线,且两齿面开始进入啮合时是点接触,然后接触线逐渐延长,再由长变短退出啮合<sup>[7]</sup>。在传动过程中,轮齿根部所承受的脉冲循环弯曲应力作用最大,同时在齿根过渡圆角处有应力集中现象;并且由于有螺旋角,工作时会产生轴向分力,增加了轴承的负荷。总之,由于支承板在轴向分力作用下向外移动,使得轴承远离中心,出现基准偏差,第1个中间轴上的齿轮1与第2个中间轴上齿轮2啮合出现了间隙,使得下部齿轮面承受的压力大于上部齿轮面。当传动的周期性应力超过下部齿轮材料的疲劳极限时,下部齿轮无法承受传动载荷时,会在根部产生裂纹,进而产生断齿<sup>[8]</sup>。

## 1.4 齿轮轴断裂与原因分析

齿轮轴断裂意味着齿轮彻底失去功用,根据产生断裂的原因,可将断裂分为疲劳断裂、磨损断裂、超负荷断裂、磨削裂纹以及淬裂等<sup>[9]</sup>。2012年10月19日,1台WK-35挖掘机运行到14 217 h时,发现提升减速箱发出有规律的噪声,打开观察孔检查

前、后提升Ⅰ轴齿轮,发现前提升Ⅰ轴齿轮轴齿面剥落,造成齿轮轴与中间轴大齿轮啮合时齿隙增大发出异响,该齿轮的设计使用时间为13 000 h,属于正常磨损。随后同时更换前、后提升Ⅰ轴、轴承、隔套、端盖等所有总成配件,按照厂家技术标准对中电动机轴与提升Ⅰ轴,依据规定转矩,准确紧固各部螺栓,调整轴承轴向间隙。经过试运行,轴承无过热,减速箱未出现异响,齿轮润滑良好,联轴器间隙正常,各部螺栓无松动。在运行250 h后,检查减速箱齿轮齿面光滑,啮合符合技术标准。

2012年12月3日,该台挖掘机在运行到14 969 h时,给定提升滚筒不转动。检查发现后提升Ⅰ轴齿轮轴断裂,拆解减速箱后发现在提升电动机一侧轴台阶15 cm处断裂,对轴的断面进行分析,如图3区域1所示,颜色明显发亮,属于金属正常断裂的金属光泽,是因剪切力大而断裂,是此次故障的最后断裂区;而图中区域2属于原始断裂区,已形成锈蚀痕迹,可以断定是在安装前已存在的裂缝区域。区域3为二次断裂区,已无断裂光泽,但还没有形成锈蚀。此轴仅使用752 h,与设计使用时间13 000 h相差甚远。通过轴断口进行分析,该断口属于层状断口。因齿轮轴锻造时存在层状断口裂纹,导致齿轮轴从中心区域开始在交变应力作用下逐步外扩展到图中区域3,最后图中区域1因齿轮轴的强度严重降低,无法满足交变应力的要求,迅速断裂。

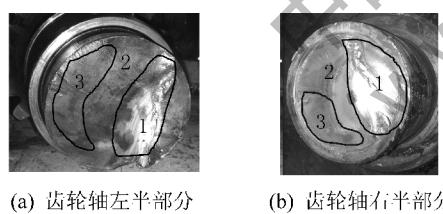


图3 WK-35 提升减速箱后提升Ⅰ轴齿轮轴断裂面

## 2 齿轮失效预防措施

综上所述,齿面接触应力大幅超过其齿轮表面载荷力造成的齿轮表面油膜失效、轴承定位基准偏差、配件质量不合格等是挖掘机齿轮失效的根本原因<sup>[10]</sup>。为防止挖掘机齿轮失效,应采取以下措施。

1)购置设备时,齿轮箱制造商关于齿轮机械性能与工艺,应满足实际生产工况要求。如建议采用纯净度合格的合金渗碳钢,降低非金属夹杂物的含量,改进渗碳淬火工艺,提高齿面硬度,改善渗碳组织以减少齿面非马氏体等缺陷。

2)按计划定时对齿轮箱做检查与保养,包括齿

轮表面、轴承、箱体、紧固件、循环泵、油封等。例如使用内窥镜,可在不打开齿轮箱的情况下对内部进行显微检查。

3)对挖掘机减速箱的运行状态进行监测,如温度、压力、噪声、振动等。

4)在新设备发生机械故障时,应正确分析其失效的真实原因,避免在故障原因调查不明的情况下,只对故障配件做简单的修复与更换,从而造成同样故障的再次发生。

5)购买配件时,应选择原设备生产厂家或合格配件厂家生产的配件。

6)利用本单位资源对润滑油及配件进行入库检测,或委托其他厂家进行抽样检测,确保入库产品合格。

7)为避免因设备操作者操作不当造成设备部件的损坏<sup>[11]</sup>,提高设备操作者的操作技能水平尤为重要。设备操作者要及时掌握采掘现场的地质情况,避免因地质突变引起挖掘机推压机构的损坏。

8)开展油液监测,在不拆解减速箱的情况下,每500 h对挖掘机减速箱进行一次油液分析,通过元素分析与铁屑分析及时了解减速机磨损状况。

观察光谱分析报告中的铁、铜、铝、硅等元素,当含量超出表1最低预警值时,及时对减速机油进行更换,降低污染物及磨粒造成的不良影响。当以上金属含量超出最高预警值时,要加强第2与第3项防范措施的实施力度,及时进行温度、噪声监测,并做窥镜检查,对磨损至极限的轴承、齿轮及时更换,避免故障扩大化。

表1 WK-10B/WK-35 挖掘机减速箱齿轮轴油光谱

各金属元素含量预警值对照

$10^{-6}$

检测 部位	最低含量预警值				最高含量预警值			
	Fe	Cu	Al	Si	Fe	Cu	Al	Si
推压	400	200	20	40	800	500	50	60
回转	200	200	5	15	300	500	7	30
提升	200	200	20	40	500	500	60	60
行走	200	10	10	30	400	15	15	60

注:油品使用时间2 000 h。

观察齿轮油黏度变化情况,上升或下降超过15%时必须更换减速机油,黏度变化直接反映润滑油品质<sup>[12]</sup>,保持合理的黏度范围是保证齿轮优质润滑的基础。

(下转第111页)