深研故障模式挖掘飞轮寿命延长点

李金年，梁超
山东盛祥动力有限责任公司　山东潍坊　261041

摘要：飞轮反复啮合脱离过程的磨损以表面疲劳磨损为主，并伴有磨粒磨损、犁沟切削以及黏着磨损，是造成飞轮多种磨损失效机理同时存在的原因。摩擦脱碳最终导致形成龟裂，裂纹形成机理应是脱碳+热效应+磨削裂纹。飞轮抖动、换挡困难、表面沟壑、裂纹等故障均为过度摩擦所致。

关键词：犁沟切削；磨粒磨损；疲劳磨损；表面沟壑；龟裂

1　序言

近几年，根据故障信息统计，飞轮故障在三包故障中呈上升趋势，盛瑞传动股份有限公司本着降低故障率、减少质量损失、提高客户满意度的目的，对售后飞轮故障整体进行了统计分析。抽取其中一个月索赔单据中飞轮故障时间或里程及件数统计（合计130件），见表1。飞轮故障件号及所占比例统计见表2。

表1　一个月索赔单据中飞轮故障时间或里程及件数

序号	故障时间或里程	件数/件	故障原因
1	1.4~170h	2	飞轮砂眼或裂纹
2	1~11km	2	起动机抖或异响，离合器失效
3	326~9457km	14	起动机抖或异响，离合器失效
4	10200~118216km	112	飞轮裂纹或发动机异响或抖动

表2　飞轮故障件号及所占比例

序号	件号	件数/件	所占比例（%）
1	L0211	65	50
2	L0220	36	27.69
3	L0354	5	3.85
4	L030	5	3.85
5	L0051	3	2.31
6	L0337	3	2.31
7	L0026	3	2.31
8	L0416	3	2.31
9	L0456	3	2.31
10	L0041	2	1.54
11	L0636	2	1.54

由表1、表2可以看出，飞轮龟裂发生时整车使用里程一般都在1万km以上。根据退回的三包故障件可以发现，飞轮龟裂发生的部位全部在摩擦面。故障飞轮主要体现在L0211和L0220两款飞轮。

根据三包索赔信息，具体故障描述有以下几种类型：离合器不工作，换挡困难；抖动严重；飞轮裂纹；零公里飞轮边缘破裂。

对退回的三包故障件予以分析，以上描述的集中故障类型在实物上集中表现为飞轮摩擦面裂纹（见图1a）和表面沟壑（见图1b）。

a）飞轮摩擦面裂纹　　b）飞轮摩擦面表面沟壑

图1　故障件

汽车的离合器是装在飞轮上，利用飞轮后端面作为驱动件的摩擦面，用来对外传递动力[1]。飞轮的摩擦面在汽车行进时，是与离合器的离合器片相接触而将动力传至变速器。当驾驶者踩下离合器踏板时，离合器片便离开飞轮，使动力传送中断，进行换档。离开踏板，离合器片与飞轮相触，动力便恢复传送。

根据飞轮的使用原理，可见使用过程中的摩擦是客观存在的，因此裂纹形成为典型的磨损失效。该失效过程是一个较为复杂的过程，其磨损以表面

疲劳磨损为主，并伴有磨粒磨损、犁沟切削以及黏着磨损。

造成飞轮多种磨损失效机理同时存在的原因：一是因为摩擦热使表面氧化，从而改变了表面的性质；二是加工不良；三是工作条件的影响，这一点是最为重要的。

通过对退回三包故障件进行宏观、微观分析，扫描电镜分析以及裂纹形成机理分析，深入剖析三包故障件的问题所在，协助上下游供应商更好地提升产品品质，持续改进，不断完善，以维护公司品牌信誉。

2　宏观分析

分析摩擦面裂纹飞轮的形貌，如图2所示，可以看出，飞轮摩擦面上有沿着转动方向的多道磨痕、台阶、麻点，如图3所示。可判断出，裂纹面必定经受过长时间或高速的摩擦，并且产生了相对位移的滑动摩擦。

图2　不均匀摩擦和裂纹

3　化学成分与微观组织分析

对故障件（材料HT250）取样进行化学成分分析，结果见表3，正常的检测点成分异常，但在摩擦故障面处有脱碳现象。

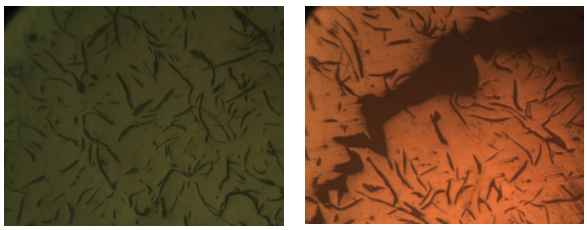
同时，对故障件进行金相组织和硬度检测，所标检测点位置硬度为195~205HBW，而裂纹处金相组织显示，该处石墨较正常飞轮偏粗、短，如图4所示。

a）裂纹与麻点　　b）裂纹与磨痕　　c）裂纹与磨损台阶

图3　飞轮摩擦面

表3　故障件化学成分分析（质量分数）　　（%）

项目	C（摩擦面）	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr
技术要求	3.2~3.5	3.2~3.5	1.5~2.0	0.7~1.0	<0.15	<0.12	0.3~0.8	0.2~0.35
测量结果	2.837、2.703	3.27、3.21	1.558、1.558	0.798、0.790	0.014、0.012	0.054、0.045	0.396、0.402	0.255、0.251
判定	不合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格



a）正常飞轮金相　　b）裂纹处金相

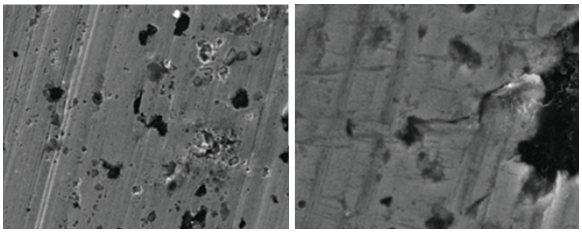
图4　金相检测

4　扫描电镜分析

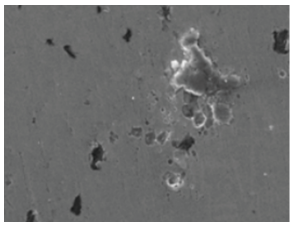
如图5所示，对故障飞轮表面典型磨损形貌的SEM分析可见，在飞轮表面沿其旋转方向除了有平行的细长犁沟状磨痕外，还有一些磨粒和小剥落坑，这些现象为犁沟切削、磨粒磨损及表面疲劳磨损的主要特征。

此外，由于摩擦热很容易导致表面氧化，飞轮和离合器片之间材料转移的黏着磨损不可避免。

飞轮摩擦面既然是受摩擦力，如果飞轮材质不存在问题，即是使用原因造成，超载、超速行驶，使飞轮长时间处于高温状态，摩擦脱碳从而最终导致形成龟裂，裂纹形成机理应该是脱碳[2]+热效应+磨削裂纹。飞轮抖动、换挡困难、表面沟壑及裂纹等故障均为过度摩擦所致。



a）磨粒磨损和犁沟切削　　b）表面疲劳剥落



c）粘着磨损

图5　故障飞轮表面典型磨损形貌

5　导致飞轮裂纹出现的原因分析

裂纹形成机理分析，几种导致飞轮裂纹的现实使用条件：

1）汽车离合器经常性分离不彻底，使用半联动时间持久，在高速的传动摩擦时汽车离合器压盘及飞轮表面极易烧蚀。

2）离合踏板踩下后，在半联动状态的时候，油门给的过大，会使传动系统摩擦过热，造成飞轮和离合器压盘烧蚀。

3）车辆超负荷运载时起步过猛，造成从动盘的扭转减振弹簧脱落，继而造成飞轮的划伤甚至打烂齿圈，或分离轴承座与变速器一轴轴承盖间发卡，导致离合器片与飞轮分离不彻底，飞轮端面受热膨胀，从而拉伤烧蚀飞轮端面。

4）离合器摩擦片磨损，离合摩擦片磨损减薄，铆钉头超出磨擦片平面，将飞轮工作面刮伤成沟槽，或摩擦片破损，铆钉松脱，引起飞轮平面损伤。

5）离合器不工作或换挡困难应该是离合器本身的问题。在离合器总成中，摩擦片、压盘、弹簧在不停地动作和磨损，当摩擦片不好或压紧度不够时，若飞轮的后端结合面磨损，那飞轮也是受害者。离合器不工作、换挡困难应该更换摩擦片或其他相关件。

为充分表达真实故障率，我们扩大取样基数，增加真实率，对2014—2017年同L2011飞轮毛坯和L0041飞轮毛坯的所有件号供货数量和故障数量进行比较，具体见表4、表5。

由表4、表5可以看出，L0211毛坯所加工的飞轮故障率为0.32%，其中L0211飞轮故障率已经高达9.89%，L0220飞轮故障率高达0.16%，而L0041飞轮毛坯整体故障率仅0.01%。

两者区别：

首先，L0211飞轮车型主要是道路机，而L0041飞轮车型主要是工程机械。

其次，L0041飞轮不与离合器片直接接触，而是在L0041飞轮上增加了一个飞轮连接片。

总而言之，道路机存在超载现象，半离合状态是引起飞轮故障的主要原因，产生的裂纹非铸造或

表4　2014—2017使用L0211飞轮毛坯件号故障率

同L2011坯	2014年	2015年	2016年	2017年	故障数量/件	供货数量/件	故障率（%）
L0211	71	155	423	419	1068	10800	9.89
L0220	29	90	435	400	954	592018	0.16
L0026	0	0	15	10	25	31226	0.08
L0181	0	0	0	0	0	7	0
L0389	0	0	0	0	0	0	0
L0112	0	0	0	0	0	0	0
L0519	0	0	0	0	0	0	0
L0386	0	0	0	0	0	0	0
L0351	0	0	1	0	1	295	0.34
L0438	0	0	0	0	0	0	0
L0343	0	0	0	0	0	0	0
合计					2052	634346	0.32

表5　2014—2017年同L0041毛坯件号故障率

同L0041坯	2014年	2015年	2016年	2017年	故障数量/件	供货数量/件	故障率（%）
L0041	2	0	1	2	5	6509	0.08
LQ041	0	0	0	0	0	13997	0.00
LG041	3	1	7	7	18	162146	0.01
L0721	0	0	0	0	0	68424	0
L0140	0	0	0	0	0	16078	0
L0023	0	0	0	0	0	39	0.00
L0152	1	0	0	0	1	197	0.51
合计					24	267390	0.01

加工的问题，而是客户使用的问题。为减少飞轮故障率，可以优化产品结构，在飞轮与离合器片中间增加一个过渡连接盘，这样可大大提高飞轮件的使用寿命，降低整车维护成本。

6　制造原因分析

齿圈飞轮爆炸图如图6所示，先研究下飞轮齿圈装配工艺，常用的装配工艺有以下2种：

1）螺栓联接——受齿圈精度影响，总成件动平衡精度丢失。

2）热装压装——总成件供应，动平衡[1]精度可控。

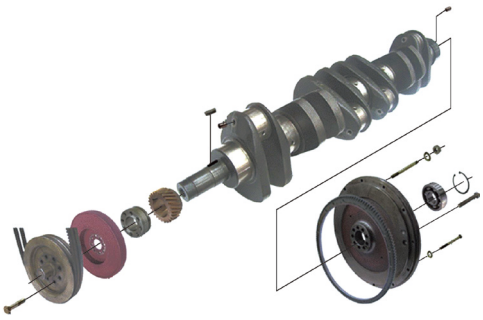


图6　齿圈飞轮爆炸图

通过飞轮的平衡精度检测试验进行数据（见表6）对比：

1）随机抽取20件已经完成动平衡去重检测的飞轮件（见图7）；重新检测飞轮不平衡量数值并做相应记录。

2）随机抽取20件合格的齿圈，分别安装到飞轮件（见图8）上，并重新检测总成件的不平衡量数值，并重新记录。

试验总结：飞轮总成件的不平衡量受齿圈的质量影响，导致总成件的不平衡量精度丢失。

表6　平衡试验检测数据　（g·cm）

序号	零件平衡检测	动平衡复检	部件平衡检测
1	10	12	152
2	8	10	180
3	7	20	40
4	8	15	36
5	6	12	126
6	5	8	40
7	8	10	32
8	10	15	208
9	12	20	180
10	10	20	161
11	8	16	65
12	6	48	70
13	7	22	48
14	8	25	62
15	5	20	70
16	12	25	52
17	10	20	45
18	10	20	100
19	12	25	186
20	8	18	201

图7　飞轮检测状态

图8　总成检测状态

7　对比其他材质的飞轮

研究增加Mo元素提高飞轮毛坯铸件的耐磨性[3]

来提高使用寿命，根据工艺成本来选择适合的优化方案。

飞轮材质HT250增加了Mo，合金Mo可以形成致密的合金氧化膜[3]，提高相变温度，同时Mo可以强化铁素体，使基体有较好的高温强度，能承受较大的应力。钼合金可以更好地抗氧化、龟裂、热裂。对此飞轮做了分析，HT250（Mo）飞轮也存在龟裂，但裂纹要轻微，如图9所示。

a）观测点1　b）观测点2　c）观测点3　d）观测点4

图9　HT250（Mo）飞轮磨损效果

表7　售后飞轮故障鉴定方案

序号	故障描述	故障鉴定	责任界定	备注
1	表面沟壑	离合器片磨损，螺栓与飞轮摩擦导致沟壑	用户承担维修费用	
2	轻微磨损	行驶里程≥1万km，摩擦面磨损深度≤1mm，表面无严重裂纹、沟壑	正常磨损，如更换，费用由用户承担	服务站正确引导
3	轻微裂纹	行驶里程≥1万km，摩擦面存在轻微裂纹，裂纹宽度≤0.5mm	正常磨损，如更换，费用由用户承担	
4	严重裂纹、严重磨损	行驶里程＜1万km且磨损深度＞1mm或表面严重裂纹，裂纹宽度＞0.5mm	三包期内，飞轮供应商责任	
5	飞轮振动大、异响	飞轮无明显磨损、损伤	排查轴承、离合器等原因，不能界定为飞轮原因	

总结如下：

1）规范服务站判定标准，给予正确引导，售后飞轮故障鉴定方案见表7。

2）提升飞轮总成件平衡精度，应该由分供方以总成件供应，从而避免飞轮总成件分装导致平衡精度丢失。

3）优化动力输出联接机构，在飞轮与离合器片中间增加一个过渡连接盘。

参考文献：

[1] 全国内燃机标准化技术委员会.往复式内燃机 飞轮技术条件：GB/T 24748—2009[S].北京：中国标准出版社，2009.

[2] 潍柴动力股份有限公司.灰铸铁件通用技术条件：QWCG 050—2009[S].2009.

[3] 全国铸造标准化技术委员会.灰铸铁金相检验：GB/T 7216—2009[S].北京：中国标准出版社，2009.

MW 20210517

（上接第75页）

S，et al. Cold resistance of structural steel subjected to cold radial forging [J]. Metal Science and Heat Treatment，2020，61（9-10）：601-609.

[2] 李维钺.有关《冷镦和冷挤压用钢》标准[J].金属热处理，2002，27（10）：49-51.

[3] 牛延龙，刘清友，贾书君.控冷工艺下组织及M/A岛对管线钢韧性的影响[J].钢铁，2020，55（6）：91-100.

[4] TOMIDA T, IMAI N, MIYATA K, et al. Grain refinement of C-Mn steel to 1 μm by rapid cooling and short interval multi-pass hot rolling in stable austenite region [J].ISIJ International，2008，48（8）：1148-1157.

[5] KOH H J, LEE S K, PARK S H. Effect of hot rolling conditions on the microstructure and mechanical properties of Fe-C-Mn-Si multiphase steels[J].Scripta Mater.，1998，38（5）：763-768.

[6] 胡光立，谢希文.钢的热处理[M].西安：西北工业大学出版社，2012：59.

MW 20210315