

运用检修

HXD1 型机车牵引电机转轴与齿轮轴
断裂原因分析及措施

朱文胜, 安中正, 尚 茂, 田恩奇

(太原铁路安全监督管理办公室驻湖东电力机务段验收室,
山西 大同 037001)

摘 要:针对大秦铁路使用 HXD1 型交流传动电力机车牵引 2 万吨重载列车过程中, 机车走行公里在 40 万~44 万 km 间发生的 12 起牵引电动机转轴与齿轮轴断裂故障现象进行探索分析, 提出了自己的观点和预防措施。

关键词: HXD1 型机车; 小齿轮; 转轴; 疲劳断裂; 裂纹
中图分类号: U269.6 **文献标识码:** B
文章编号: 1000-128X(2011)05-0079-04

湖东电力机务段配属 HXD1 型交流传动电力机车担当着大秦线 2 万吨重载列车的牵引任务, 2010 年 5 月至今, HXD1 型机车先后发生了 12 起牵引电机转轴与小齿轮轴断裂故障, 严重威胁了重载列车的安全。牵引电机是机车机械走行部的最关键部件, 出现如此严重的轴断裂问题后果是十分可怕的, 因此, 必须尽快研究分析加以解决, 防止势头蔓延已刻不容缓。

1 牵引电机故障现象及装备情况

HXD1 型机车牵引电机为交流异步牵引电机, 有 2 种型号, 进口的电机型号为 1TB2624-0TD02, 国产化的电机型号为 JD160, 2 种电机结构与性能完全一致^[1-2]。

1.1 电机转轴与主动齿轮轴断裂故障统计

电机转轴与主动齿轮轴断裂故障具体统计见表 1。

表1 主动齿轮与电机转轴断裂故障统计

故障发生日期	故障机车号	故障部位	运行里程 /km
2010-05-18	HXd10144	A3	398 566
2010-07-11	HXd10165	B4	424 821
2010-07-12	HXd10167	B3	439 764
2010-08-03	HXd10174	A2	443 128
2010-09-29	HXd10167	B1	458 488
2010-11-09	HXd10081	B3	591 583
2010-12-14	HXd10169	B3	482 204
2010-12-24	HXd10165	A2	525 785
2010-12-26	HXd10070	B4	502 151
2011-01-14	HXd10141	B3	543 527
2011-02-17	HXd10141	A4	569 474
2011-03-04	HXd10132	A3	642 036

1.2 故障现象

2010 年 5 月 18 日 HXd10144 机车在整备作业时, 发现 A3 位齿轮箱合口处漏油, 5 月 19 日入库开齿轮箱检查

发现电机小齿轮外窜 15 mm, 解体发现牵引电机转轴及小齿轮轴断裂 (见图 1、图 2)。

2010 年 7 月 11 日 HXd10165 机车在整备作业时, 发现 B4 位齿轮箱合口处有过热及轻微变形现象, 7 月 12 日入库开齿轮箱发现电机小齿轮外窜 14 mm, 大小齿轮磨损严重, 解体发现牵引电机转轴及小齿轮轴断裂。

2010 年 7 月 12 日 HXd10167 机车在整备作业时, 发现 B3 位电机速度传感器信号无效、牵引无流故障, 7 月 17 日入库开齿轮箱发现电机小齿轮外窜 12 mm, 解体发现牵引电机转轴及小齿轮轴断裂。

随后, 自 2010 年 8 月 3 日至 2011 年 3 月 4 日, 又相继发生了 9 起电机转轴及小齿轮轴断裂。

1.3 牵引电机装备情况

湖东电力机务段共配属 220 台 HXD1 型机车, 从西内子原装进口驱动装置 70 台 (其中整体进口 48 台, 南车株洲电力机车有限公司散件组装 22 台), 其余 150 台机车齿轮为国内 2 家公司生产。

2 牵引电机转轴断裂原因分析

2.1 转轴断口分析

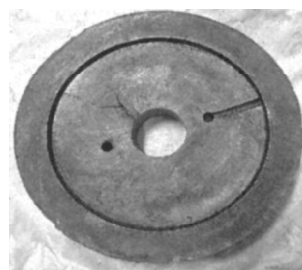
转轴材料为 40CrNi2MoA, 热处理规范为淬火+高温回火, 强度要求为 900~1 100 MPa。小齿轮材料为 17CrNiMo6, 热处理规范为淬火+低温回火, 强度约为 1 350 MPa, 心部硬度约为 HRC44。

2.1.1 断口外观

转轴及小齿轮轴断裂发生在距转轴外端面约 56 mm 深的位置, 处于轴承内圈中部 (轴向看) 的油槽部位。小齿轮断面与转轴断面存在 3~4 mm 的高度差, 也基本沿横向断裂, 但断面为曲面, 中间部位凸出一定的高度 (另一边下凹), 呈现为皿状断口。转轴断口附近靠小齿轮轮齿一侧外圆与轴承接触部位无明显的磨损, 靠电机一侧外圆与轴承接触部位出现了严重磨损。断口两侧外圆磨损程度不一致, 说明磨损是在转轴开裂后才出现的。

2.1.2 宏观断口

图 1 所示转轴及小齿轮轴断裂断口均为疲劳断口 (如无另外说明, 以下对断口特征的描述均是针对小齿轮一侧的断口)。转轴断裂方向为横向, 位置处于与小齿轮油槽交界处, 断口附近无明显宏观塑性变形, 局

图1 HXD10144 机车 A 节
第三电机转轴断裂图2 HXD10144 机车 A 节
第三电机齿轮轴断裂

部可见较明显的台阶,整个断面平整且大部分存在氧化色。

转轴疲劳断裂源区处于内圆与小齿轮外圆油槽交界处,为线源,源区中心与小齿轮径向油孔呈近 30° 的夹角(逆时针方向),源区可见多个小的疲劳台阶,疲劳向外圆径向及两侧周向扩展,疲劳扩展区前期(靠源区附近)平整,看不到明显的疲劳弧线。可见多处小的疲劳台阶扩展一定程度后(疲劳扩展区中前期)可见较模糊的疲劳弧线,其中对应于源区的靠外圆位置可见较模糊的与外圆平行的疲劳弧线。转轴疲劳源区对应位置靠外圆且与外圆平行的疲劳弧线周向扩展的两侧的弧线沿疲劳源区中心基本对称分布,且与圆周方向均呈一定角度的夹角,见图3;转轴疲劳扩展中前期疲劳弧线与外圆呈一定夹角(右侧,箭头为疲劳扩展方向)。疲劳扩展区后期疲劳弧线明显,其方向也为由内向外侧周向扩展。疲劳瞬断区域即最后断裂位置处于转轴外圆,与源区对应180°位置呈约30°的偏角(左侧逆时针方向偏转),最后断裂位置区域很小,只是在很浅的表面存在剪切唇。

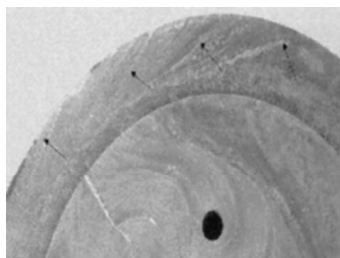


图3 转轴疲劳扩展中前期疲劳弧线

转轴最后断裂处经超声波清洗后,发现转轴整个断面颜色存在一定的层次性:疲劳源区及疲劳扩展区前期颜色呈灰黑色,局部还有黑色的氧化物或积碳产物;疲劳扩展区中后期存在黑褐色的氧化物或积碳产物;疲劳扩展区最后颜色呈浅棕色;最后断裂位置区域呈现为较纯的金属色。

小齿轮疲劳源区,处于径向油孔外圆位置,实际上是从油孔与外圆油槽2个交界转角处起始,为2个点源,源区均平坦;小齿轮疲劳源区特征疲劳沿径向及两侧周向扩展,疲劳扩展区前期可见较明显的疲劳弧线;中后期其疲劳弧线很明显,局部可见小的疲劳台阶,由于周向油槽应力集中的影响,使得在小齿轮外圆疲劳扩展速度快,在内部疲劳扩展速度慢,从而在断面上局部显示为反向的疲劳弧线。

另外疲劳扩展中疲劳弧线显示为区域分布,各区域断面颜色存在层次差异,其弧线也相互不连贯,说明各疲劳扩展区域之间存在较明显的时间间隔,即各个区域的疲劳之间存在一定时间的间歇期,在机车的下一个运行阶段,后一个疲劳区域是在前一个疲劳区域的基础上重新开始的;疲劳扩展到内孔及油孔时,

疲劳弧线出现了一定程度的变化甚至有些紊乱,这是由于应力集中导致应力分布变化的结果;疲劳沿圆周2个方向扩展到一定程度后出现汇聚,在交界处形成了一道较大的疲劳台阶;小齿轮疲劳扩展的最后位置基本上看不到瞬断区,最后断裂位置与源区对应180°位置呈约45°的偏角(左侧,逆时针方向偏转)。经超声波清洗后,小齿轮整个断面颜色同样存在一定的层次性:疲劳源区及疲劳扩展区前期颜色呈灰黑色,局部还有黑色的氧化物或积碳产物;疲劳扩展区中后期靠外圆呈现为红棕色,局部呈黑褐色的氧化色或存在积碳产物;疲劳扩展区中后期靠内圆呈浅棕色;最后断裂位置呈现为浅棕色。

2.1.3 微观断口

转轴疲劳断口的疲劳源区为线源,可见明显的疲劳台阶,源区未见明显的加工及冶金缺陷,见图4。转轴疲劳源区(局部)微观特征:有明显的疲劳台阶及大量锈坑疲劳扩展区,可见疲劳弧线及细密的疲劳条带;整个断面局部均可见表面氧化物开裂而形成的泥纹花样及大小不一的锈坑;小齿轮疲劳断口存在2个疲劳源区,源区平坦且均为点源,处于油孔两侧,其中靠右侧的源区中心处于外圆油槽底部,距油孔近2 mm。靠左侧的源区基本处于油槽与油孔转角处;油槽底部可见周向加工纹路,油槽与油孔转角夹角约呈90°,疲劳扩展区可见疲劳弧线及细密的疲劳条带。整个断面局部均可见表面氧化物开裂而形成的泥纹花样及大小不一的锈坑。

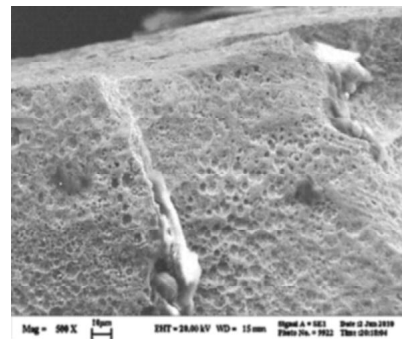


图4 转轴疲劳源区(局部)微观特征

2.2 理化检测

2.2.1 化学成分分析

电机转轴材质要求为40CrNi2MoA,用SPECTOR-LAB直读光谱仪进行成分分析,结果见表2,符合相关要求。

2.2.2 硬度检查

转轴基体:HB313~321(相当于HRC34~35);强度要求为900~1 100 MPa,换算得到硬度要求为HB269~360,或HRC28~39,符合要求。小齿轮基体:HRC39~41,符合要求。

2.2.3 金相检查

转轴及小齿轮轴的金相检查情况见表4,各检查项目均正常。

表2 转轴材料成分

分析元素	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	S	P	Cu	Fe
分析结果	0.40	0.64	1.76	0.18	0.68	0.18	< 0.01	< 0.02	< 0.20	余
40CrNi2MoA 要求	0.36~0.43	0.60~1.00	1.60~2.00	0.15~0.30	0.60~0.90	0.15~0.35	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.20	余

表3 小齿轮材料成分

分析元素	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	S	P	Cu	V	V	Fe
分析结果	0.17	1.80	1.62	0.30	0.53	0.22	<0.01	<0.011	0.12	< 0.01	0.03	余
供应商数据	0.15	1.71	1.59	0.29	0.52	0.26	0.003	0.011	0.15	0.01	0.04	余

表4 转轴及小齿轮轴金相检查项目

项目	电机转轴	小齿轮轴
非金属, 脆性夹杂物	1 级	0.5 级
夹杂物, 塑性夹杂物	1.5 级	0.5 级
晶粒度	9~10 级	10 级
心部显微组织	回火索氏体 + 少量贝氏体, 不同直径处组织稍有差异	板条马氏体 + 少量贝氏体, 不同直径处组织稍有差异
断口附近表面腐蚀	/	断口附近未发现漏渗现象

2.2.4 应力分析

HXd1 型机车转向架的传动装置采用抱轴驱动, 主要由电机、抱轴箱、传动齿轮箱等组成, 传动轴承采用滚动抱轴承; 由于小齿轮的结构强度限制, 其与电机轴的配合采用了内锥式的悬臂式结构, 锥度为 1:20, 压入量 4.4~4.6 mm。小齿轮锥轴与电机转轴的锥孔为过盈配合, 其支撑点为电机轴两端的轴承, 在传动结构中为悬臂式结构。工作时由电机轴带动小齿轮轴转动, 小齿轮轴将电机轴的转动通过从动齿轮转化为机车的移动, 小齿轮轴承受扭转及弯曲载荷。

经分析表明, 在小齿轮轴的环形油槽附近存在应力集中。该应力集中的程度应该与油槽的实际过渡圆弧半径大小、表面粗糙度、表面是否有明显刀痕以及在实际运用中存在的冲击载荷等有关^[3]。小齿轮、电机轴最大过盈情况下最大应力为 360 MPa, 位于小齿轮轴油槽位置, 电机轴过盈应力为 351 MPa。小齿轮轴在启动工况下最大应力为 513 MPa, 位于小齿轮轴油槽位置; 电机轴在启动工况下最大应力为 489 MPa。小齿轮轴在短路工况下最大应力为 630.7 MPa, 位于小齿轮轴油槽位置; 电机轴在短路工况下最大应力为 506.7 MPa。

2.3 结果分析

2.3.1 转轴及小齿轮轴的断裂性质

从断面这些特征来看, 转轴及小齿轮轴的断裂性质均为旋转弯曲疲劳。从断面平整度、颜色层次分布、放射线的收敛位置及疲劳弧线发散的起始位置来看, 转轴的疲劳源区位于内圆位置, 为线源; 小齿轮的疲劳源区位于外圆的油孔部位, 为点源。从疲劳源区对应 180° 位置与最后断裂部位的逆时针偏转现象来看, 说明转轴及小齿轮轴疲劳时的旋转方向为顺时针, 即疲劳基本上是由机车沿一个方向行驶造成的。

转轴及小齿轮轴的断面基本上均为疲劳区, 疲劳均从一处起源, 疲劳扩展区疲劳条带细密(局部条带间距约 0.1~0.2 μm), 均为低应力的高周疲劳断裂; 转轴疲劳源为线源, 且源区可见多条小的台阶, 说明其起始应力较大, 即转轴疲劳起始应该还受到了应力集中

的影响; 小齿轮的疲劳源区位于油槽与油孔的转角处, 为点源, 这与油孔部位的较严重的应力集中有关。

2.3.2 对转轴疲劳起始位置的分析

转轴及小齿轮轴的断裂性质均为旋转弯曲疲劳, 说明疲劳主要受弯曲载荷的作用。轴类件所受弯曲载荷为外圆大、中心小, 且是外圆一侧受拉应力, 而对应的一侧则受压应力, 中心所受应力为零, 所以说, 一般情况下轴类件弯曲疲劳起始应该在外圆部位。转轴的外圆半径约 80 mm, 内圆半径约 60 mm, 按简单的线性处理, 转轴内圆处所受最大名义弯曲拉应力应该相当于外圆所受最大名义弯曲拉应力的 75% 左右, 转轴疲劳源区处于内圆与小齿轮外圆油槽交界处, 沿径向及周向扩展, 说明转轴的疲劳除了受名义应力的作用外, 在疲劳的起始过程中还受到了应力集中的影响。

实际上, 转轴与小齿轮为过盈配合, 转轴配合处受压应力并产生弹性变形, 而油槽部位的转轴内圆面则为自由状态, 这样使得转轴在小齿轮油槽的交界处产生附加的拉应力, 或者说造成该处应力集中, 对转轴的疲劳过程产生影响。

另一方面, 从转轴外圆来看, 其断裂位置处于轴承内套圈轴向的中部, 而轴承内套圈与转轴也为过盈配合, 即转轴与轴承配合处的外圆受了额外的附加压应力, 在转轴旋转弯曲疲劳过程中, 该附加压应力将对名义的弯曲拉应力有一定的抵消作用。

综上所述, 由于应力集中的影响, 虽然转轴外圆所受名义弯曲应力较大, 但疲劳仍从内圆部位起始。

2.3.3 对转轴及小齿轮轴疲劳断裂顺序的分析

从断口特征来看, 转轴疲劳源区可见多个小的疲劳台阶, 而小齿轮轴源区很平坦, 说明小齿轮轴疲劳起始的应力较转轴小, 在小齿轮轴疲劳开裂并扩展后, 转轴及小齿轮轴的所受应力增大, 继而导致转轴开裂; 转轴疲劳扩展区后期断面起伏较大, 弧线较宽, 而小齿轮轴疲劳扩展后期断面起伏较小, 弧线较细, 这说明小齿轮轴最后断裂时应力较转轴最后断裂时的应力小, 即小齿轮轴完全断裂以后, 转轴才断裂; 从断面颜色来看, 转轴最后断裂部位基本上为光亮的金属色, 而小齿轮轴最后断裂部位呈浅棕色。由此断定转轴及小齿轮轴的断裂顺序如下: 疲劳首先在小齿轮轴的油孔处起始并向圆周两侧扩展, 在其疲劳起始一段时间后, 转轴在其内圆应力集中处也出现疲劳起始并向圆周两侧扩展; 小齿轮轴疲劳扩展直至断裂后, 转轴也最后断裂。

2.4 小齿轮轴和电机转轴断裂结论

故障小齿轮轴的油孔处可见明显的刀痕, 在断口

分析中发现小齿轮轴疲劳源区位置存在裂纹,裂纹深度在0.1~1.5 mm之间;与此对应的电机转轴也发现了裂纹,裂纹深度在0.05~0.1 mm之间。从已发生的小齿轮轴和电机转轴断裂的检测分析看,小齿轮轴(电机转轴)发生裂纹时应该在机车运行早期;裂纹扩展比较慢,大约机车运行40万km左右小齿轮轴(电机转轴)才最终断裂。

由此推断,小齿轮轴和电机转轴在油槽附近断裂的原因如下:

①由于小齿轮轴的表面环形油槽和径向油孔交界处加工粗糙,至使该部位在小齿轮轴与电机转轴为过盈配合时存在较大的应力集中,形成早期裂纹源。

②由于小齿轮轴的表面环形油槽和径向油孔交界处形成了早期裂纹,导致电机转轴的相对应位置的局部应力发生改变,形成电机转轴的早期裂纹源。

③小齿轮轴的表面环形油槽和径向油孔交界处加工粗糙,应为加工油孔的钻头已磨钝,没有及时修复或更换所至。

④由于大秦线运用条件恶劣,特别是2万吨列车的开行,中部机车运行条件的不确定性和过大冲击载荷,加速了该部位裂纹的产生与扩展。

3 措施

根据以上的分析和故障统计,可以认为小齿轮环形油槽和径向油孔有加工缺陷问题(集中在装有某公司生产的齿轮的大号机车)。机车运行40万km左右故障出现,最初裂纹发生在运用的早期阶段。参照裂纹形成的原理及机务段现场对车轮车轴其他部件裂纹的处理方法^[3-5]制订如下的措施:

①加速更换某公司生产的小齿轮,并对入库机

车进行检查。

②打开齿轮箱上方的观察孔,从观察孔上目视小齿轮轴是否窜出。正常的情况下,小齿轮的外端面距从动齿轮的相应端面大约2 mm。

③新制小齿轮:严格控制小齿轮注油孔及油槽的机加工质量,对油槽、油孔部位进行打磨,避免棱角。

④对HXD1牵引电机齿轮、电机轴加工及组装工艺和质量控制进行彻底全面的检查整改。

⑤对小齿轮、电机轴内锥孔进行渗透探伤,及时发现早期裂纹。

⑥小齿轮安装时,严格控制小齿轮装入量。

4 结语

本文对HXD1型交流传动电力机车的牵引电机转轴与小齿轮轴断裂的故障现象进行了研究分析,分析出断裂原因,提出了自己的观点和预防措施,相信在以后的安全运输生产中会起到积极作用。由于重载技术是一个新课题,各种环境比较复杂,需要在今后的实践中不断摸索和逐步完善。

参考文献:

- [1] 张曙光. HXD1型电力机车[M]. 北京:中国铁道出版社, 2009.
- [2] 张曙光. HXD2型电力机车[M]. 北京:中国铁道出版社, 2009.
- [3] 林吉忠. 金属的缺陷、载荷与疲劳[M]. 北京:中国铁道出版社, 1993.
- [4] 刘 宪. 机车整体辗钢车轮裂损及探伤方法[J]. 机车电传动, 2009(1): 66-69.
- [5] 刘 宪. SS4改进型机车整体车轮车轴疲劳裂纹超声波探伤分析[J]. 机车电传动, 2008(4): 64-66.

(上接第61页)

机测量与控制, 2002(12): 782-783, 791.

[3] 王 鹏, 徐 峰, 王宏宇. 利用FPGA实现移频键控信号的调制[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2002, 42(S1): 68-71.

[4] Ding Y J X Z. A High-accuracy Parameter Estimation Algorithm for Jointless[A]//Computing, Communication, Control, and Management, 2008. CCCM '08. ISECS International Colloquium on. 2008: 750-753.

[5] 孙 杰, 潘继飞. 高精度时间间隔测量方法综述[J]. 计算机测量与控制. 2007, 15(2): 145-148.

[6] 张 延, 黄佩诚. 高精度时间间隔测量技术与方法[J]. 天文学进展. 2006, 24(1): 1-15.

[7] 王宏宇, 徐 峰, 王 鹏. 基于FPGA和单片机技术的FSK信号监测[J]. 仪表技术与传感器, 2001(10): 12-15.

[8] 陈 俊, 周正中. 高速、高精度频率采样中的量化误差分析[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(1): 60-62.

《机车电传动》

欢迎 垂询 订阅 赐稿 刊登广告

跟踪世界科技动态 致力中国轨道交通

- ◆ 轨道牵引动力的主导刊物
- ◆ 荟萃电力与内燃牵引技术成果
- ◆ 涵盖干线铁路与城市轨道交通两大领域

联系地址: 湖南省株洲市时代路株洲电力机车研究所《机车电传动》编辑部 邮政编码: 412001 联系电话: 0731-28498221 28498141 传真: 0731-28498141 E-mail: edl@teg.cn