

对扭转断裂的球墨铸铁曲轴前端进行理化检验，结果显示曲轴在材质上没有明显缺陷。发现键槽根部存在加工缺陷，修正后，没有解决失效问题。分析认为前端平键键槽处容易产生应力集中。将平键改为圆柱销，键槽改为圆柱形结构。对曲轴键槽分别进行 FEA 受力分析和模拟计算，发现同等情况下圆柱形结构应力分布更合理。键槽结构改善后，台架试验通过。

□ 天润曲轴股份有限公司 于晓东 吕世杰 刘增辉 张华东 倪培相

球墨铸铁曲轴键槽断裂分析及结构改进

某柴油机球墨铸铁曲轴在开发试验过程中，前端小头键槽处出现扭转断裂。该处键槽装有平键、正时齿轮，其外侧轴颈与带轮相连。该类型曲轴的材料选用 QT700—2，加工工艺为：铸造—正火—机加工—圆角滚压—清洗包装。该类型的曲轴在台架试验中多支在前端键槽处断裂。

使用 ARL EasySpark 1160 直读光谱仪检验化学成分，使用 MTS C43 拉伸试验机等检验材料的力学性能，使用 Olympus GX71 金相显微镜观察显微组织，使用 ABAQUS 有限元分析软件模拟计算应力分布。通过以上方法，分析曲轴失效的原因。

检验结果与分析

1. 宏观断口观察

对断口进行宏观形貌观察，断口类似棘轮状，多源断裂，裂纹源分布于小头轴颈圆周，最终在键槽对侧的轴颈位置断开。键槽处为明显的裂纹源区，对该处的裂纹源区进行切样观察。

轴颈表面沿周向扭转磨损迹象明显（图 1），开裂方向与轴向约呈 45° ，裂纹源位于小头轴颈表面与键槽的接触点（图 1b）。

2. 显微组织观察

在断裂的曲轴小头前端键槽开裂处切样，分别对裂纹源、键槽根部、侧面、底部进行组织观察（图 2）。依据 GB/T 9441—2009 评级，裂纹源处的球化率为 2 级，球径大小 5 级。裂纹源处组织腐蚀后，珠光体含量评级为珠 95，符合技术要求。键槽根部局部存在变形石墨，同时键槽根部的圆整度较差，如图 2c 所示。键槽侧面未发现明显缺陷，如图 2d

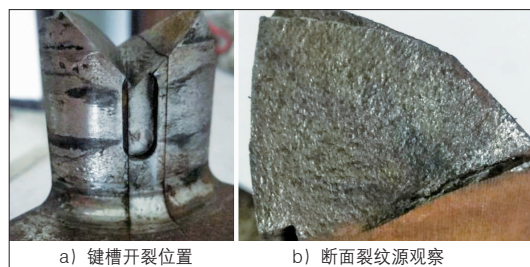


图 1 键槽开裂位置及断面观察

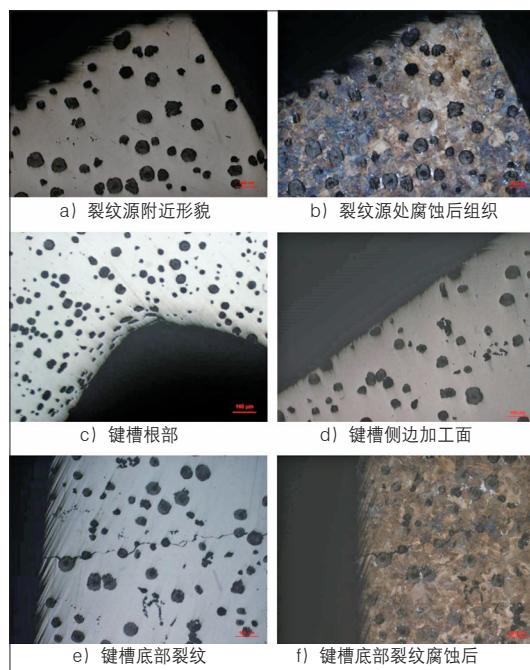


图 2 键槽开裂位置及各断面的组织观察

所示。键槽底部发现有多条微裂纹，基体发现约 1% 左右的碳化物，如图 2e 和图 2f 所示。

3. 力学性能检验

在失效曲轴的曲柄部位取拉伸试样，按照 GB/

T 228.1—2010 规定的方法加工，在曲柄端取硬度试样，检验结果见表 1。

4. 化学成分追溯

对断裂曲轴的同批次铁液成分进行追溯（表 2），均符合 QT700—2 的要求。

分析及改进

1. 原因分析

断裂的球墨铸铁曲轴在键槽裂纹源处的组织没有明显缺陷，曲轴本体性能符合技术要求，同批次铁液的成分相对稳定，符合 QT700—2 的要求。键槽侧面和底部均无加工缺陷，键槽底部出现的微裂纹是在扭转断裂中出现的。键槽根部出现的变形石墨是在键槽加工中，高速旋转的刀具对根部的挤压造成的，而键槽根部并不是裂纹源所在的位置。

为消除键槽根部异型石墨和圆整度的影响，再次针对曲轴小头键槽采用较慢的铣削速度加工，同时在键槽根部加工成 R0.3 的圆角，加工后观察，石墨无变形。产品改型后装机再次试验，曲轴前端小头仍然在键槽与轴颈表面接触点扭断。

2.FEA 分析

再次试验的球铁曲轴在材质和机加工方面均无缺陷，而多次的失效位置相对集中，考虑对键槽的结构进行改进。齿轮和小头轴颈采用过盈配合，平键所受到的剪切力并不大。平键所在轴颈长 25 mm，键槽长 22 mm，几乎占据键槽所在轴颈长度的大部分。在运转过程中，带轮所在轴颈传递来的应力，使得键槽边缘在某个角度会出现应力最大值，容易引起应力集中导致开裂。在保证键槽强度的情况下，将平键改为圆柱销，圆柱销的直径与平键的宽度相等。采用这样的结构，曲轴键槽去除的材料更少，键槽边缘过渡更圆滑，理论上会增加曲轴小头轴颈的强度。为此，我们运用有限元分析的方法对两种结构的键槽进行受力和模拟计算。

图 3 显示的是对带轮轴颈外侧均施加相等的垂直键槽平面的弯曲应力，两种键槽结构附近的应力分布。假定对带轮轴颈的外侧向下施加 10 000 N 的应力，计算结果显示，图 4a 平键键槽边缘受到的最大应力为 75 MPa，图 4b 中装配圆柱销结构的键槽边缘受到的最大力为 60 MPa，

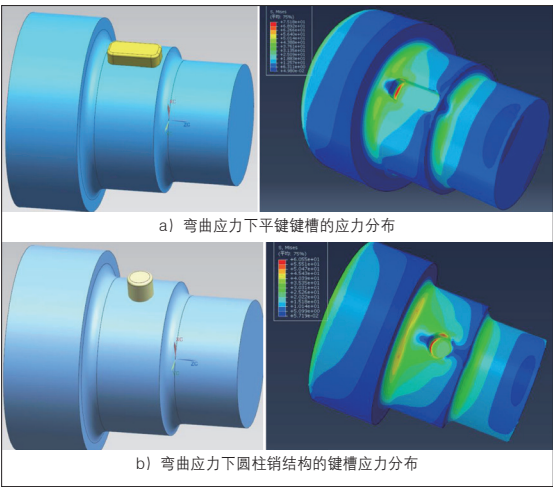


图 3 同等弯曲应力下两种结构的键槽的受力分析

明显降低了键槽周围的应力集中。在实际的发动机高速运转的过程中，使用圆柱销结构的键槽薄弱位置的应力将会大大降低。

结论

在前端失效的球墨铸铁曲轴均开裂于小头齿轮边缘与轴颈接触的位置，多源断裂，裂纹扩展方向均与轴向呈 45°。

断裂曲轴的金相组织、力学性能和同批次铁液的化学成分均符合技术要求。针对开发初期键槽根部的加工缺陷，已将曲轴键槽处的加工参数调整，同时将键槽根部加工成 R0.3 的圆角，消除了异型石墨，改善了键槽根部几何结构。

通过 FEA 分析，将曲轴键槽结构由平键键槽改为圆柱形键槽后，同等弯曲应力作用下，键槽边缘处的应力明显降低。

键槽结构改善后，台架试验获得通过。 AI

表 1 力学性能检测结果

检测项目	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	延伸率 δ (%)	硬度 /HBW
技术要求	≥ 700	≥ 400	≥ 2	241~302
检测值	845	566	4.0	285
	833	535	4.1	283
	794	608	4.3	278

表 2 同批次铁液化学成分追溯

(单位：wt%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Mg
要求	3.08~3.30	2.49~3.13	0.55~0.61	0.02~0.042	0.01~0.022	0.022~0.032	≤ 0.01	≤ 0.010	0.8~1.1	0.022~0.040
检测值	3.12	2.53	0.58	0.021	0.013	0.027	0.003	0.006	0.993	0.029
	3.20	2.56	0.56	0.022	0.011	0.026	0.006	0.004	0.982	0.032
	3.18	2.57	0.57	0.021	0.011	0.026	0.006	0.004	0.97	0.036
	3.16	2.77	0.58	0.021	0.120	0.029	0.006	0.004	0.997	0.032