汽车等速移动节三销架断裂分析

金兄珍，冯贤，牛杰，高天芬，王晓华，吴成卫
万向钱潮股份有限公司　浙江杭州　311215

摘要：汽车等速移动节三销架在台架试验过程中发生断裂。通过对汽车等速移动节三销架失效件的断裂源分析，过程排查问题产生的原因；通过数字化有限元的对比，选择更优的参数，制定出有效解决问题的措施。结果表明：三销架的断裂模式为疲劳断裂；早期失效断裂原因与热处理工装不合理，花键大径、齿根*R*不足有关。建议严格控制热处理工装、花键大径和齿根圆弧。

关键词：汽车等速三销架；疲劳断裂；硬度；花键；有限元分析

1　序言

等速驱动轴是汽车传动系统中的重要组成部分，三球销万向节是汽车传动系统等速驱动轴总成的一个关键部件，常用于汽车等速驱动轴的移动端，连接万向节的主动轴、从动轴以等角速度运转，用来传递发动机曲轴端输出的力矩，以实现汽车行驶。因此，对三球销万向节高性能的要求尤为重要。

2　失效情况

某车型等速驱动轴总成在台架试验中，发生早期失效，检查发现等速移动节三销架裂开，扭转疲劳寿命不足，其材料牌号为16MnCr5H，加工工艺为：下料→加热→锻造成形→机加工→热处理→精加工。本文通过台架试验失效零件进行断口宏观形貌及断裂源观察分析，并结合金相、有限元分析等方法，揭示该类零件的断裂原因，为产品的安全、延寿提供技术支持。断裂三销架台架试验见表1。

表1　断裂三销架台架试验

试验项目	试验要求	实际测试数据	失效部位	备注
静扭强度	≥5600N·m	6635N·m	三销架开裂	见图1
扭转疲劳寿命	≥20万次（±1900N·m）	12万次	三销架开裂	1#件（见图2）
扭转疲劳寿命	≥20万次（±1900N·m）	20万次	无损坏	2#件

3　原因分析与排查

3.1　失效件观察

断裂三销架宏观形貌如图1所示，目视可见三销架鼓形花键部位发生断裂，存在不同程度的挤压变形和磨损痕迹。

将断口置于电镜下进行观察，两处断口形貌如图2所示。由图2可看出，断口1较为平整，断口2起伏较大，从断口扩展方向纹路判断（见图3），裂纹是由内侧花键向外扩展，裂纹源处为沿晶及韧窝形

图1　断裂三销架宏观形貌

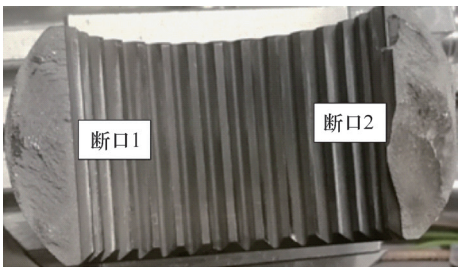


图2　断口形貌

貌（见图4），存在沿晶裂纹，裂纹扩展区为韧窝及解理形貌（见图5）。从断口宏观和微观形貌判断，三销架的断裂模式应为疲劳断裂。

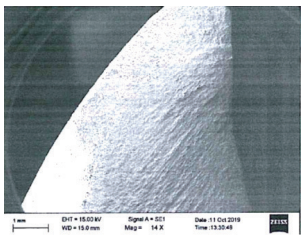


图3　断口处低倍形貌

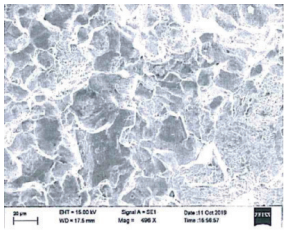


图4　裂纹源处形貌

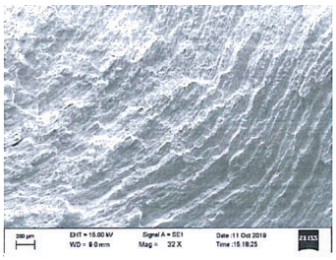
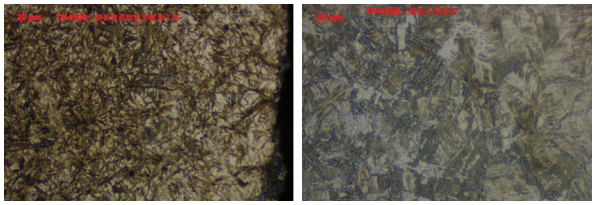


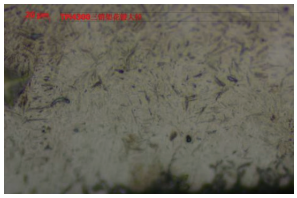
图5　裂纹扩展区解理形貌

3.2　金相与材质检查

（1）金相组织　将断裂件三销架制备成金相试样进行观察（见图6），可见表面组织为马氏体+残留奥氏体和碳化物，心部组织为低碳马氏体，花键部位存在低碳势渗碳层，金相检测数据见表2。参照金相组织评级标准进行评级，满足设计要求，但花键部位存在低碳势渗碳层，不满足设计要求。在三销架疲劳源区未见明显材料缺陷。



a）表面　　b）心部



c）花键

图6　断裂三销架金相组织

（2）硬度检测　对金相试样进行显微硬度测试（见表2）[1]，表面硬度为59.5HRC、59.8HRC，心部硬度为393HV、373HV，表面渗碳淬硬层深度为0.87mm、0.80mm，花键硬度640HV、404HV，扭转疲寿命试验1#件花键硬度明显偏高，扭转疲寿命试验2#件花键硬度符合图样设计要求。两件的硬度差异表明，花键硬度超高的三销架零件在热处理时花键部位渗碳气氛浸入进去了，使得花键表面产生渗碳淬硬层，导致花键表面硬度超高。基于该产品花键硬度超高，会使得三销架零件花键韧性下降，导致产品扭转疲劳寿命下降，结合断裂源部位在花键部位，分析认为这是三销架断裂的主要原因。

表2　试验件金相检测数据

序号	检测项目	技术要求	1#件 实测值	2#件 实测值
1	表面硬度HRC	58～63	59.5	59.8
2	心部硬度HV	300～460	393	373
3	磨区淬硬层深度/mm	0.6	0.87	0.80
4	非磨区淬硬层深度/mm	1.0～1.5	1.18	1.12
5	花键硬度HV	530（max）	640	404

（3）成分分析　采用火花只读原子发射光谱仪对金相试样进行检测，材料主要化学成分符合16MnCr5H钢标准技术要求。16MnCr5H钢是德国材料牌号，与中国16CrMnH钢接近（参照GB/T 5216—2014）[2]，有较好的淬透性和可加工性，对较大截面零件，热处理后能得到较高表面硬度和耐磨性，低温冲击韧度也较高。16MnCr5H齿轮钢经渗碳淬火后使用，主要用于制造齿轮、蜗杆、密封轴套等零部件。

3.3　过程排查

原材料采用带锯式下料，制成一颗颗坯料，自动上料经中频感应加热，过程中加热温度自动控制，钢质模锻锻造成形，后进行机加工至工艺图样要求，零件进行串棒装筐后在多用炉进行渗碳淬火、回火。因样品生产紧急，工装为临时代用，加工过程中设备运转、工艺执行均正常，在数控磨床上完成精磨外圆加工至成品。通过对这些过程逐一排查发现：渗碳淬火、回火的工装为临时代用工装，部分工装不符合工艺要求，导致花键部位产生低碳势的渗碳层。热处理金相检测属于破坏性测

试，执行抽检方式，当时抽检金相检测数据符合工艺要求，未抽到不符合的情况。花键拉刀的大径为极上限，导致三销架拉花键后产品尺寸为极上限（见表3）。

表3　花键与齿根检测结果

序号	检测项目	图样要求/mm	实测数据/mm
1	花键大径	ϕ 32.58（max）	ϕ 32.57/ϕ 32.55
2	齿根R	—	0.14

3.4　对产品进行数字化模拟有限元分析

对三销架建模进行数字化模拟有限元分析，轴颈根部强度应力分布云图如图7所示。因三销架产品结构因素影响，等效应力最大处在轴颈根部R部位，此处应为三销架产品最薄弱部位。

对三销架的花键模型对比分析，如图8所示[3]。从应力分布云图上可看出，三销架内花键应力分布不均匀，在偏离轴头中心3～4颗花键齿处应力最大，三个轴头相对最薄弱齿处强度相当。

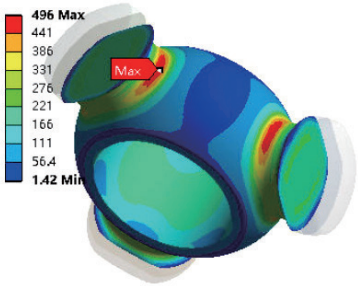
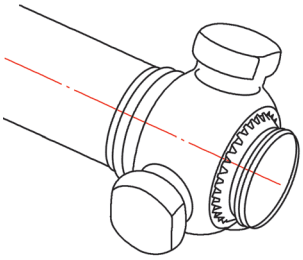
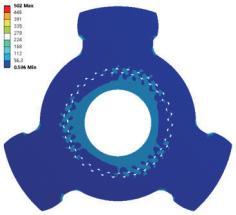


图7　轴颈根部强度应力分布云图

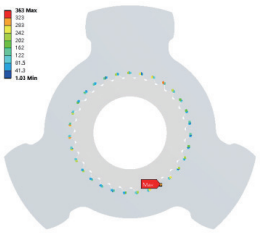
通过多组花键大径尺寸和齿根圆角的理论计算，计算数据见表4、图9。根据计算的数据情况，



a）三销架装配模型



b）三销架应力分布云图



c）花键应力分布云图

图8　三销架的花键模型对比分析

表4　组花键大径尺寸和齿根圆角的理论计算数据

大径 ϕ /mm	齿根圆弧 R /mm	齿根最大应力 /MPa	大径 ϕ /mm	齿根圆弧 R /mm	齿根最大应力 /MPa	大径 ϕ /mm	齿根圆弧 R /mm	齿根最大应力 /MPa	大径 ϕ /mm	齿根圆弧 R /mm	齿根最大应力 /MPa	大径 ϕ /mm	齿根圆弧 R /mm	齿根最大应力 /MPa
32.2	0.10	318	32.3	0.10	345	32.4	0.10	355	32.5	0.10	373	32.58	0.10	385
	0.20	309		0.20	332		0.20	343		0.20	352		0.20	363
	0.26	310		0.26	325		0.26	339		0.26	324		0.26	336
	0.30	317		0.30	320		0.30	323		0.30	316		0.30	328
	0.34	317		0.34	318		0.34	319		0.34	312		0.34	—
	0.38	320		0.38	315		0.38	317		0.38	304		0.38	—

建议花键大径尺寸按ϕ32.2～ϕ32.4mm控制，齿根圆角理论分析*R*0.26～*R*0.36mm较为理想，考虑实际制造精度需要，建议按*R*0.25～*R*0.5mm控制。

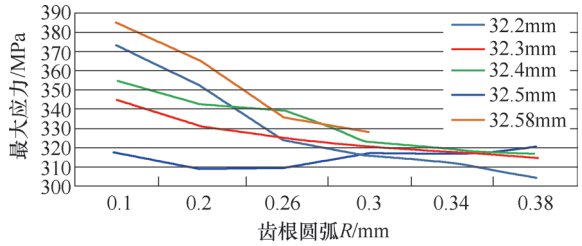


图9　不同状态下齿根最大应力分布

4　分析与讨论

1）宏观和微观观察结果表明，等速移动端三销架疲劳源区位于花键部位，花键断裂部位存在不同程度的挤压变形和磨损痕迹。三销架花键之所以会萌生疲劳裂纹，与其经受加载正负交变扭矩有关。在正负交变扭矩作用下，三销架花键与轴杆花键的配合情况逐渐恶化，二者不断发生相互挤压、磨损，导致花键发生一定程度的变形，加之花键齿根圆弧较小，花键大径极上限的因素影响，促进了花键薄弱处齿根*R*部位疲劳裂纹的萌生。为了防止三销架花键齿根薄弱处情况恶化，一方面，需要三销架严格控制三销架花键处硬度，降低三销架花键部位的脆性，提高三销架花键部位的韧性；另一方面，花键齿根应控制适当的*R*尺寸，以提高花键承载能力。

2）显微硬度测试结果表明，三销架花键硬度为640HV，明显高于设计要求，这会导致三销架花键处承载能力和抗疲劳性能不足。三销架花键硬度偏低可能与两方面原因有关：一方面是三销架热处理工艺不当，导致三销架材料硬度超高；另一方面是三销架在热处理时，存在部分装筐不合理，导致渗碳气氛渗入三销架花键部位，导致花键硬度超高。

上述两个原因究竟哪一种起主要作用，目前通过对同批次产品检查金相符合要求，可排除该方面的因素。另外，该三销架为新品样品加急，热处理工装为临时代用，存在个别工装不合理的情形，导致热处理后部分产品花键硬度超高，使得该批次样品作报废处理。为了防止此问题的发生，决定制作新工装，重新制作样品。

3）火花只读原子发射光谱仪对材料检测结果表明，三销架主合金元素及含量与16MnCr5H钢成分相符。金相分析结果表明，基体表面组织为马氏体+残留奥氏体和碳化物，心部组织为低碳马氏体+铁素体，组织分析可见材料无异常。

4）产品进行数字化模拟有限元分析表明，三销架轴颈等效应力分析为最大处在轴颈根部*R*部位，此处应为三销架产品最薄弱部位；对三销架的花键模型对比分析可见，在偏离轴头中心3～4颗花键齿处应力最大，三个轴头相对最薄弱齿处强度相当。为提升三销架花键强度，建议严格控制花键齿根*R*和大径尺寸。

综合上述分析，建议严格控制三销架热处理工装与质量、花键齿根圆弧和大径，保证三销架强度满足要求，从而避免三销架早期失效，延长其使用寿命，保证汽车的行驶安全。

5　结论与建议

1）汽车等速移动节三销架的断裂模式为疲劳断裂。

2）早期失效断裂原因与热处理工装、花键大径、齿根*R*等不合理、不足有关。

3）严格控制热处理工装、花键大径和齿根圆弧。

参考文献：

[1] 全国钢标准化技术委员会.保证淬透性结构钢：GB/T 5216—2014[S].北京：中国标准出版社，2014.

[2] 全国热处理标准化技术委员会.钢件渗碳淬火回火金相检验：GBT 25744—2010[S].北京：中国标准出版社，2010.

[3] 郑娇娇，郭常宁，雍耀伟，等.三球销式等速万向节受力及仿真分析[J].机械强度，2015，37（1）：114-121.

MW 20211011