减速箱高速轴断裂失效分析

陈雪发，林晏民，刘学文

【摘要】对韶钢1号高炉主卷扬机减速箱高速轴裂断进行失效分析。经过分析，造成失效的主要原因是该高速轴所用的材料内部有组织缺陷，在缺陷处形成了应力集中点；此外，材料内部夹杂物较严重，采用的热处理效果不良也是导致断裂失效的可能原因。

我公司炼铁厂1号高炉于2014年某日发生上料主卷扬减速箱高速轴（40Cr）断裂事故，导致高炉无计划休风835min。在金相分析的基础上，应用扫描电镜（SEM）及其附件能谱仪（EDS）联袂对断轴进行定性定量分析后，找出导致该轴脆性断裂的原因，对防止类似事故的发生有积极意义。

一、对减速箱高速轴断裂失效分析

在断轴上截取全断面制成光谱试样进行化学成分和硬度分析，根据图样要求的标准性能判断所用材料的符合性。

对断裂轴全截面进行清洗，在低倍率下观察其宏观形貌，从宏观上找出断裂的撕裂纹走向，从而判断其断裂的最初起源点；对断裂源进行电镜、金相等分析，找出导致其断裂失效的原因；对断裂全截面的硬度与显微组织进行分析，从而对失效原因做出综合分析。

二、材质符合性判断

韶钢炼铁厂1号高炉主卷扬机减速箱高速齿轮轴图样标示材质为40Cr调质处理，从化学成分和硬度检测结果看，材料符合要求。

1. 成分检测

在断轴上截取全断面制成光谱试样，随机取3个点分析，成分实测值与标准成分区间值范围对比完全吻合，见表1。

2. 材料调质硬度

该齿轮轴图样要求材料调质后硬度255～286HBW。在断轴上取样检测，结果为262～276HBW10/3000，符合要求。

表1　化学成分（质量分数）　（%）

元素		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Te
标准	下	0.35	0.20	0.50	≤0.035		0.80	—	—	余量
	上	0.45	0.40	0.80			1.10	—	—	
实测		0.363 0.396 0.378	0.218 0.222 0.223	0.695 0.668 0.671	0.008 0.008 0.010	0.019 0.013 0.014	0.975 0.995 0.988	0.027 0.030 0.029	0.023 0.022 0.024	余量

三、减速箱高速轴断失效分析内容及讨论

1. 基体金相组织和硬度分析

韶钢炼铁厂1号高炉主卷扬机减速箱高速齿轮轴材质为调质40Cr，目标组织为回火索氏体。

（1）试样表面基体组织与夹杂物情况　在试样靠近断面20mm处取全截面试样分析基体组织，选取试样边缘作为检测点，检测结果：金相组织（见图1、图2）为回火索氏体+网状铁素体（5.7%）；夹杂物（见图3）评级为A2.5eD0.5级；硬度为276HBW10/3000。

（2）试样径向1/4处的组织与夹杂物情况　在试样靠近断面20mm处取全截面试样分析基体组织，选取试样径向1/4处作为检测点，检测结果：金相组织（见图4、图5）为回火索氏体+网状铁素体（16.2%）；夹杂物

（见图6）评级为A3.0eD0.5级；硬度结果为262HBW10/3000。

（3）试样心部（径向1/2处）的组织与夹杂物情况　在试样靠近断面20mm处取全截面试样分析基体组织，选取试样心部（径向1/2处）处作为检测点，检测结果：金相组织（见图7、图8）为回火索氏体+网状铁素体（18.7%）；夹杂物（见图9）评级为A2.5eD0.5级；硬度为246HBW10/3000。

（4）基体组织与硬度分析　从不同部位基体组织检测结果说明：基体组织中存在铁素体且其含量呈规律性变化，反映了该轴调质处理中淬火工艺执行质量未达工艺要求；基体中夹杂物较严重，进一步降低了该轴的性能。①铁素体含量从轴表层到心部呈规律性变化，从6%上升到19%；而硬度从轴表层到心部也呈规律性变化，从276HBW10/3000下降到246HBW10/3000。②试样横截面组织及其均匀性较差。试样组织为回火索氏体+铁素体，铁素体基本呈网状，这样的组织脆性大，裂纹容易沿晶界扩散。③夹杂物较严重，在轴横截面的1/4处达到了最严重的3级。夹杂物在交变应力作用下，易诱发裂纹产生而导致轴失效。

2. 查找裂纹源

（1）断裂断口宏观分析，找出断裂裂纹源　分析轴断口形貌，从其横截面撕裂方向（见图10）初步判断该轴断口的裂纹源为试样边缘结点处（近表面），该结点为长条椭圆形，裂纹向外扩展，见图11。观察可见，此结点颜色与底部基底颜色不一致，结点颜色较亮白，基底颜色深，带黑红；结点中间有细小裂纹。

（2）电镜形貌分析，找出裂纹源　对图11中疑为裂纹源的结点进行电镜扫描，发现该结点与基体呈镶嵌形态，且与基体间有裂纹（见图12），进一步断定该结点为镶入物，就是裂纹源。对该结点做细致观察，确认凹坑处为裂纹源，微观形貌为河流状花纹（见图13、图14），判断该

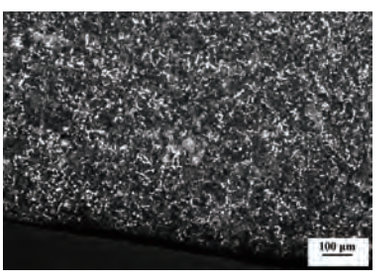


图1　边缘组织（100×）

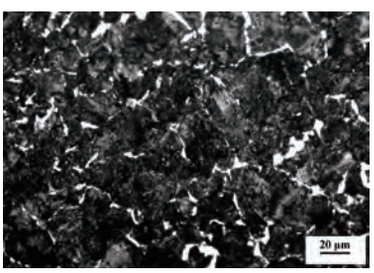


图2　边缘组织（500×）



图3　边缘夹杂物（100×）

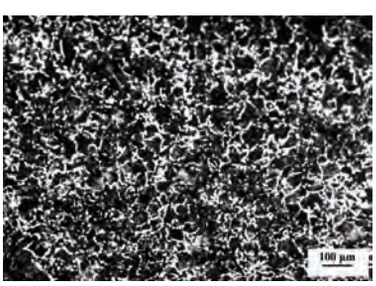


图4　100×

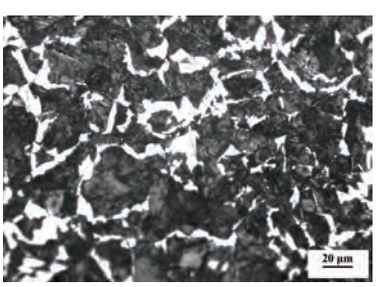


图5　500×



图6　100×

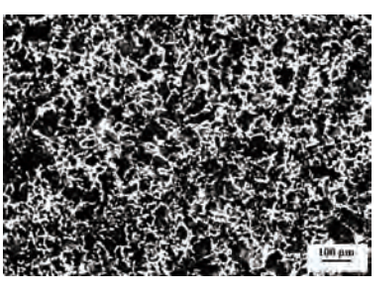


图7　100×

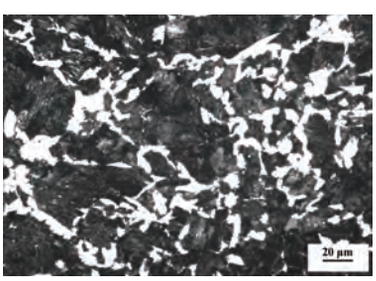


图8　500×



图9　100×

轴为脆性断裂。

3. 确认裂纹源

（1）裂纹源处的组织 试样磨制完成后经腐蚀发现：①结点与其周围（基体）组织颜色不一致。②结点周围（基体）组织为回火索氏体+网状铁素体，与基体组织一致；而结点处的组织为单纯索氏体组织。③基体与结点之间有裂纹，裂纹位于轴表面结点底部，如图15~图18所示。

（2）区域化学成分对比分析 结点处的金相组织为回火索氏体，对其进行电镜扫描，能谱结果见图19。

（2）结点内侧处（即基体）金相组织为回火索氏体+铁素体，对其进行电镜扫描，能谱结果见图20。

（3）区域化学成分对比分析 通过能谱分析可见，结点处化学成分与基体不同，基体中主要合金元素为Cr，而结点中的主要合金元素为Mn，其成分对比见表2。结点化学成分中Cr含量明显偏低，Mn含量偏高，Mn元素聚集造成结点的淬透性变高。相同条件下，结点物质较容易转变为马氏体，调质回火转变为回火索氏体，与该轴基体的索氏体+铁素体组织明显存在差异。转变组织的不同造成转变后组织体积的差异，使结点处成为应力集中点，使用过程中该结点受冲击载荷而发展成裂纹，裂纹沿结点扩展到一定程度后发散，最终发生断裂。

四、结语

分析可知，以下原因造成了该高速轴的脆性断裂。

1. 主要原因

加工该高速轴所用的材料（40Cr）内部有组织缺陷，即存在有镶入物质，镶入物质与基体的显微组织不同，前者是回火索氏体，后者是回火索氏体+网状



图10 断面的断口形貌

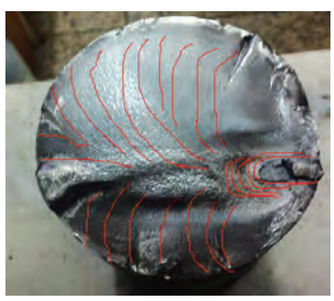


图11 计算机处理后的裂纹源示意

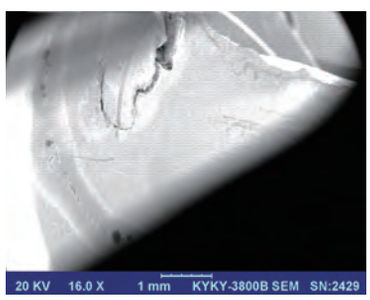


图12 疑似裂纹源

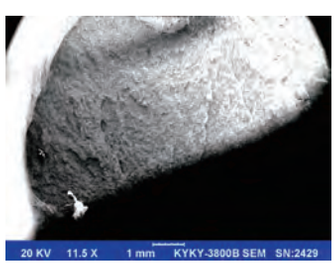


图13 疑似裂纹源

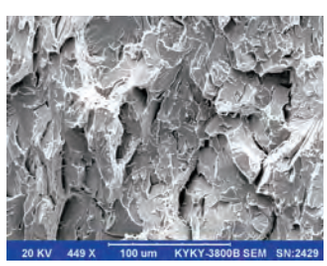


图14 疑似裂纹源

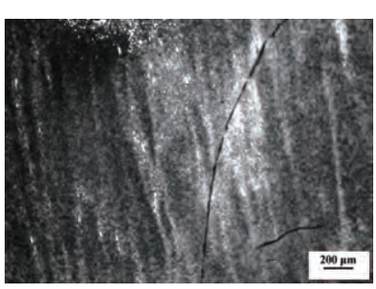


图15 裂纹两边组织（50×）

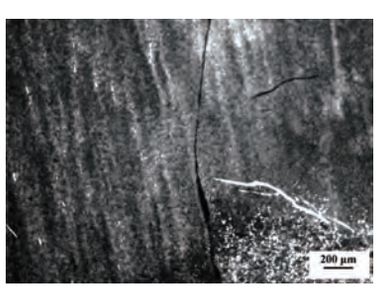


图16 裂纹两边组织（50×）

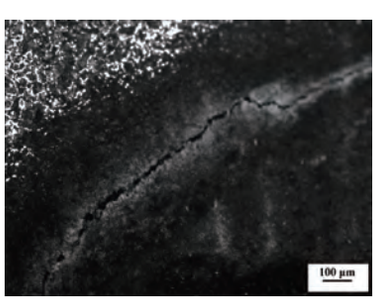


图17 裂纹两边组织（100×）

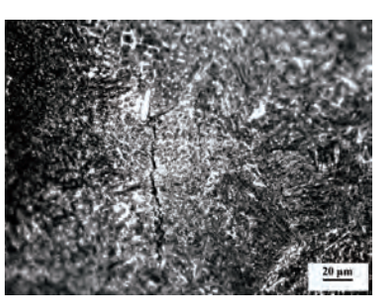


图18 索氏体（500×）

轴类件校直的结构效应

牛万斌，章赛丹，王振荣

轴类零件由于材料、结构原因，复杂加工流程，以及热处理过程等影响，在内应力作用下产生不同程度的弯曲变形，早期是采取人工校直、液压机校直，凭经验设定压力、压下量。为了适应高精度、大批量生产需求，自动校直机应运而生，1994年就有国产自动校直机投入市场。目前汽车零部件行业国产、进口自动校直机应用广泛，检测精度、报警灵敏度也不断提高。

1. 报警参数AE值

校直结束后，过去用磁粉无损检测裂纹。为了提高可信度和生产效率，我们选用自动装置应用AE（ACOUSTIC EMISSION）技术，通过检测伴随材质的变形、破损而释放内部应力时发生的AE波，对是否存在裂纹进行判断。

但是，针对具体的轴类件，要设定适宜的报警参数（AE值），该门槛设定过高，可能会导致已经产生裂纹的产品蒙混过关，流向客户，隐患无穷。设置过低，会出现过多的无谓报警，后面要花大量工夫检测、确认。

2. 局部结构的影响

某些产品的复杂性还不限于AE值设置，由于零件内应力形

铁素体，镶入物质与基体之间有清晰界线。该缺陷导致基体形成了应力集中，在上料作业的冲击载荷作用下产生裂纹源并扩展至断裂。

2. 次要原因

（1）该轴热处理工艺执行质量未达到工艺要求，造成材料显微组织存在网状铁素体，且其径向显微组织从材料表层到心部，网状铁素体组织所占比例从6%上升到19%，从而导致其硬度从表层到心部不同，从276HBW10/3000下降到246HBW10/3000；材料物理性能沿径向变化梯度过大，降低了材料承受冲击载荷的能力。

（2）夹杂物较严重，在轴横截面的1/4处达到了最严重的3级。夹杂物在交变应力作用下，易诱发裂纹产生而导致轴失效。

（3）该材料缺陷点正好处于轴的受力面，加大了轴使用过程中发生裂断的几率。

表2 结点与基体区域成分对比（质量分数） （%）

元素	Si	Cr	Mn	Fe
基体	0.67	1.15	—	98.18
结点	0.54	—	0.98	98.48

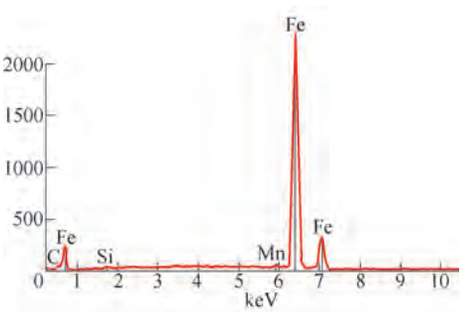


图19 结点处的能谱

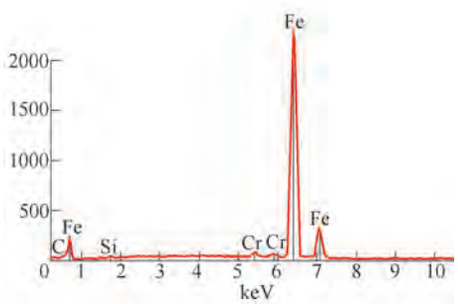


图20 基体的能谱

作者简介：陈雪发、林晏民、刘学文，宝钢集团广东韶关钢铁有限公司。

MW 20141112