

「断路器」

500 kV断路器50CrVA钢碟簧失效分析

文/西安西电高压开关有限责任公司 王建伟

某500 kV断路器试品上使用的碟簧在试验过程发生断裂，对碟簧断口进行微观检验，并对其成分、金相组织和硬度等进行了检查，分析了碟簧断裂原因，并提出了预防措施。

50CrVA钢具有良好的力学和工艺性能，较高的淬透性、疲劳强度和屈强比，广泛用于液压机构断路器的碟簧。

碟簧的加工流程：下料—机加—去毛刺—去除应力（180~200℃，5~10 h）—成形—热处理（780±10℃，保温时间=1.5倍工件有效厚度×10 s，40℃以下水淬，淬火+氮气保护炉中400℃，2 h以上回火）—强压—喷丸—表面处理，成形加工过程为：冷冲成形—边缘倒圆角—切削内外圆，边缘倒圆角，冷成形—精冲，边缘倒圆角，冷成形。强压处理方法为：用不小于两倍单边碟簧变形量的负荷压缩碟簧，持续时间不少于12 h，或用压缩次数不少于5次的短时压缩。

某500 kV断路器试品上使用的碟簧在试验过程发生断裂，图1a为16片碟簧工作装配图，该断路器试品在600次操作后，一片碟簧发生了断裂，断口如图1b所示。

发生断裂的碟簧材质为50CrVA，尺寸为550 mm×200 mm×17 mm×38.5 mm。

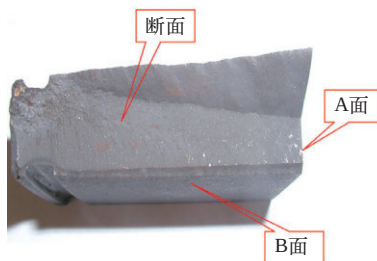
理化检验

1. 成分与硬度测试

将试样A面铣平打磨后，采用ARL 3460直读光谱仪（OES）对其进行化学成分分析，结果如



(a) 碟簧工作装配图



(b) 宏观断口

图1 碟簧工作装配与宏观断口

表1所示。可见，断裂碟簧的成分符合GB/T 1222—2007弹簧钢中的技术要求。

将试样B面打磨后进行洛氏硬度测试，结果如表2所示。可见，试样的5个硬度平均值接近，均符合GB/T 1972—2005碟簧的要求。

2. 断口宏观与微观分析

由图1b可见，试样的宏观断口存在的疲劳裂

表1 碟簧的化学成分（质量分数）

条件	C	Si	Mn	P≤	S	Cr	Ni	Cu	V
试样1	0.5	0.24	0.62	0.010	0.004	0.99	0.035	0.066	0.13
GB/T 1222—2007	0.46~0.54	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.025	≤0.025	0.80~1.10	≤0.35	≤0.25	0.10~0.20

表2 碟簧的洛氏硬度

硬度HRC	测试值							平均值
试样1	45.5	45.2	44.7	44.7	45.4	45.2	45.1	
GBT 1972								
—2005	42~52							

纹源区、扩展区和瞬断区，属于早期疲劳断口，其疲劳裂纹源在碟簧内锥面大径圆周处。

试样镶嵌、磨抛和腐蚀后用Leica DMI3000M金相显微镜进行显微组织观察，可见，其显微组织均为由铁素体基体与大量弥散分布的细粒状渗碳体混合而成的回火托氏体，如图3a~c所示。在试样断口的垂直剖面存在一般疏松，如图4所示。

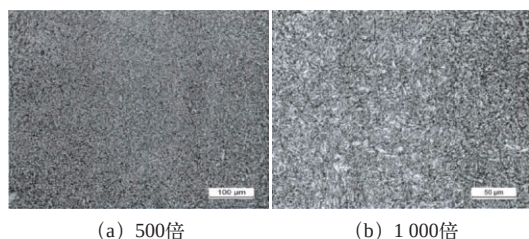
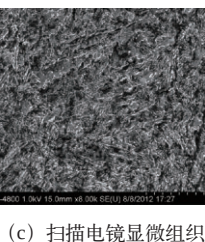


图3 显微组织图

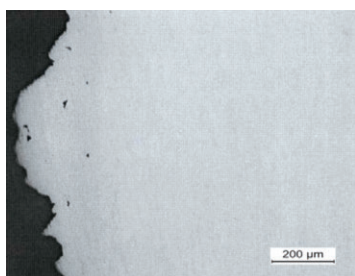
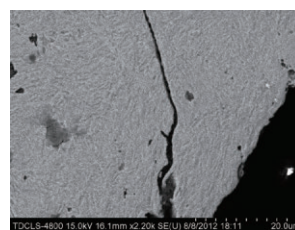


图4 试样断口的垂直截面

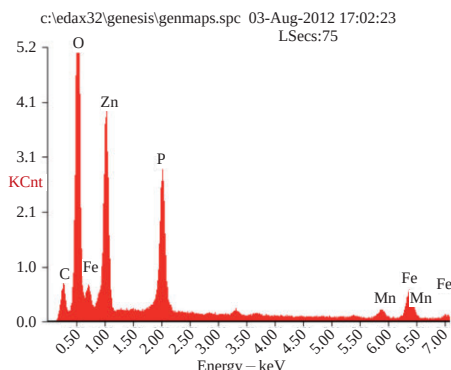
3. 扫描电镜分析

试样超声清洗后，在FEI Quanta 600扫描电镜下观察其形貌。在B面发现微裂纹，如图5a所示，其缝隙中的黑色物质能谱图如图5b所示，化学成分（质量分数）为：38.42%O，15.20%C，22.48%Zn，10.70%P，10.56%Fe，2.65%Mn，可见缝隙中的物质主要是 Fe_2O_3 。

试样的疲劳裂纹源区如图6a所示，此处还



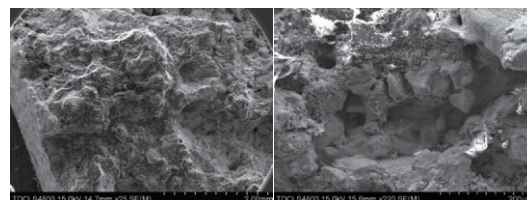
(a) 表面微裂纹



(b) 裂缝物质的能谱图

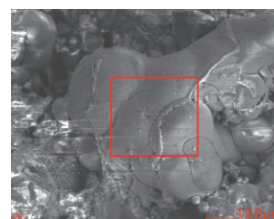
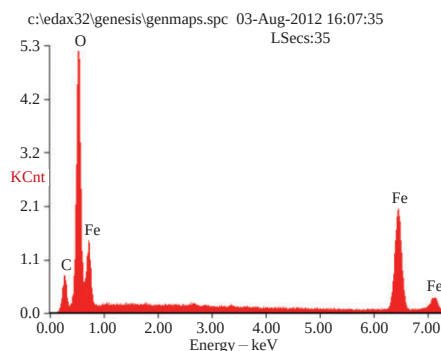
图5 表面微裂纹及其能谱图

是疏松较集中部位，如图6b所示。对疏松部位孔隙基体晶体进行能谱分析如图6c所示，其化



(a) 疲劳裂纹源

(b) 疏松组织



(c) 孔隙中基体晶体氧化物能谱图

图6 裂纹源、疏松及孔隙氧化物能谱图

学成分（质量分数）为：31.63%O，15.19%C，53.17%Fe，可见孔隙中的物质主要是铁的氧化物。

对孔隙中基体晶体表面进行能谱分析，主要化学成分（质量分数）为：29.50%O，15.58%C，10.19%P，24.08%Zn，15.00%Fe，可见孔隙中的物质含有磷化物结晶体，这是在碟簧表面处理过程中渗入孔隙中的，如图7所示。孔隙中的磷化物表明，这些孔隙自试样表面已联通至内部而形成预裂纹，在碟簧内锥面大径圆周处最大交变切应力作用下，预裂纹优先发展成疲劳裂纹源，疲劳裂纹扩展区断口形貌呈韧窝状，如图8所示。在试样靠近内锥面大径圆周处存在表面折叠缺陷，如图9所示。

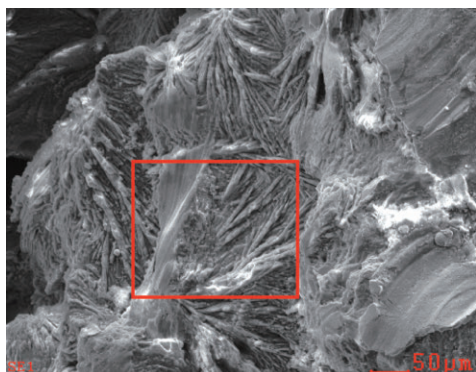
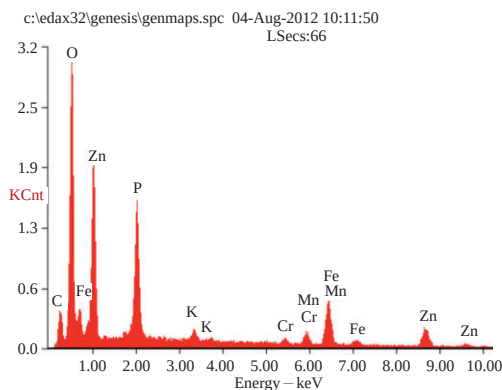


图7 孔隙中基体晶体磷化物能谱图

分析与讨论

疲劳源一般在表面形成，但如果构件内部存在缺陷，如脆性夹杂物、空洞或成分偏析，也可能在“皮下”或内部产生。在断裂碟簧的内锥面大径圆周处发现有折叠和严重的疏松缺陷，疏松形成的空隙由表面联通至内部，形成了预裂纹，该零件不合格。疏松是在钢锭凝固时，晶间部位

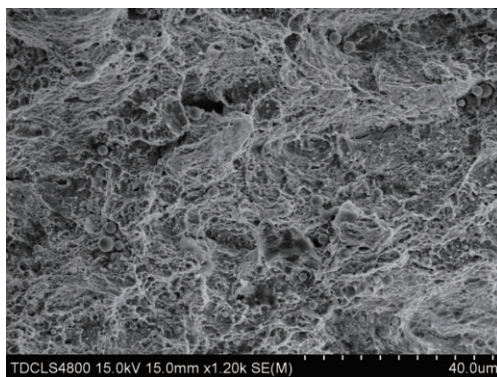


图8 疲劳裂纹扩展区形貌

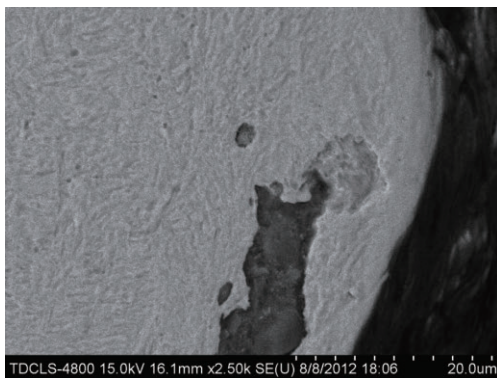


图9 表面折迭

最后凝固并放出气体而产生的小空隙，且空隙在后续加工时未被焊合或在机加时未被切削。折叠是由于坯料的边皮、表面疤痕或尖锐棱角等在热加工时被折附到钢材表面，机加时未被完全切除。

碟簧发生的早期疲劳断裂，主要是由于在碟簧工作时内锥面大径圆周处，承载最大交变切应力造成应力集中，疲劳裂纹源往往在此处产生并不断扩展，最终导致零部件断裂失效。

结论及建议

1) 选用高疲劳强度的材料并优化热处理工艺。严格控制碟簧加工工程，避免成品零件中含有折叠和超标的疏松缺陷。

2) 提高零件的表面质量，尽可能减小零件上的应力集中和零件表面可能发生原始裂纹的尺寸。**EA**

（收稿日期：2014.12.22）

〔编辑：刘群焱〕