

北京地铁8号线主变流器逆变模块 铜排烧损原因分析

孔德东, 宋加庆

(株洲时菱交通设备有限公司, 湖南 株洲 412000)

摘要: 针对北京地铁8号线主变流器逆变模块铜排烧损故障, 通过对各种烧损原因的分析, 对材料和工艺存在的问题进行了改善, 解决了因设计缺陷导致的模块烧损问题。

关键词: 北京地铁8号线; 逆变模块; 烧损; 接触电阻; 压敏纸

中图分类号: U231 文献标识码: B

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2016.03.026

1 问题的提出

主变流器(VVVF)的逆变模块是地铁车辆运行的动力源泉, 而模块上的铜排则是动力输出的管道。一旦铜排烧损, 逆变模块就会功能失效, 整个VVVF将失去动力输出, 导致地铁车辆晚点甚至救援。2014年8月到9月, 北京地铁8号线牵引系统的主变流器接连发生了3起逆变模块铜排烧损故障, 严重影响了车辆的正常运营。所以需要铜排烧损进行原因分析, 并从材料、工艺等方面提出改善措施。

2 故障现象

在逆变模块内部采用铜排连接的方式, 将电容和低感母排连接起来, 形成电流通路从而传递能量(图1)。

将3台故障模块解体后发现, 烧损部位一致, 集中处于铜排、低感母排和电容的叠加紧固处。将各部件拆解后, 确认连接电容P侧和N侧的铜排烧损变色, 连接电容和铜排的低感母排

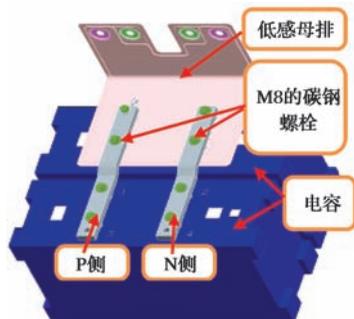


图1 各部件结构示意图

接线柱烧损变色, 电容P侧和N侧的接线柱烧损变色。

3 原因分析

烧损的直接原因是热量过大, 根据焦耳定律 $Q=I^2Rt$ 可知, 在整个回路中, 流经的电流 I 和通电时间 t 都是相同的, 烧损处和其他正常点的区别在于电阻 R 。当某一点的接触电阻大于允许值时, 此处产生的焦耳热将会使接触的部件烧损。模块紧固处发生烧损故障的原因, 应包含以下几点: ①螺栓紧固不良; ②铜排尺寸不符; ③铜排设计选型不当; ④铜排、低感母排和电容接触不良。为了确认本次烧损的原因, 对以上情况进行逐项分析, 使用FTA法分析结果, 如图2。

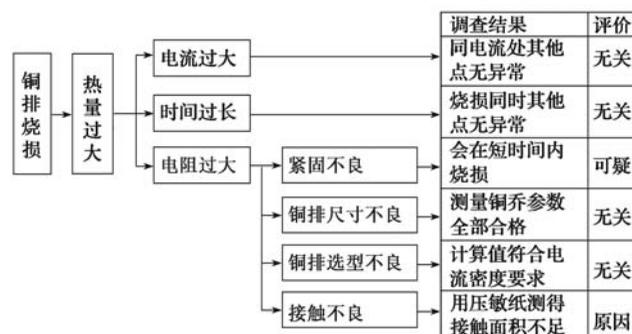


图2 烧损原因的FTA图

3.1 紧固状态分析

紧固不良即组装作业时未将螺栓按照标准扭矩紧固, 导致部件松动或发生了作业遗漏。但根据现场普查的结果看, 超过80%的模块都存在烧损的现象, 发生如此大面积的作业不良几率很小, 且如果螺栓有松动现象, 则在该部位流入大电流时, 温度会急剧上升, 在短时间内就会导致烧损的发生, 这与车辆运行2年多后才发生烧损现象不符。

3.2 铜排尺寸分析

铜排尺寸不符, 即铜排在生产加工过程中的尺寸偏差导致安装后不能可靠接触。对烧损的铜排进行了尺寸测量, 所有测量数据都符合设计偏差要求。对同一模具生产的相同物料进行了重新检查, 未发现铜排尺寸不符合设计要求的情况。

3.3 铜排的设计分析

铜排的设计不当,即在选定铜排截面积时,截面积与承载的电流不匹配,导致铜排在正常运行时,因为截面积过小导致烧损。铜排截面积设计选型计算过程如下:

最大功率输出时铜排承载的有效电流值: 710 A

选定铜排的截面积: $15 \times 35 = 525 \text{ mm}^2$

铜排实际的电流密度为: $710 \div 525 = 1.35 \text{ A/mm}^2$

设计选型时铜排允许的电流密度为 3 A/mm^2 ,而铜排实际电流密度为 1.35 A/mm^2 ,小于设计预定的 3 A/mm^2 ,所以铜排的尺寸设计符合规范,不会导致铜排电流过大引发烧损现象。

3.4 接触面积分析

各部件间的接触面积决定了接触电阻的大小,设计中的铜排、低感母排和电容接线柱间的接触面积也应满足电流值的要求。按照操作要领,用 $7 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的扭矩进行紧固即可达到预计接触的状态,为此,采用压敏纸对实际情况下不同扭矩的接触状态进行确认。

压敏纸是一种压力测量胶片,可直观地测试出压力分布情况,其原理是在对其施加压力时,胶片上的微囊破裂,深色物质与显色物质相互反应,胶片上出现红色区,而且颜色密度随着压力大小的不同而不同,可以用来检测 2 个面的接触情况。

还原故障品正常的组装过程,在烧损部位的 2 个接触面上放置压敏纸(图 3),对烧损处的螺栓施加 $7 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的扭矩进行紧固,结果发现 2 个接触面的接触率均在 40% 以下。

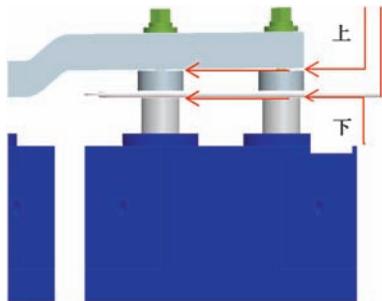


图3 压敏纸放置位置图

将烧损处的螺栓紧固扭矩加大到 $13.7 \text{ N}\cdot\text{m}$,再次使用压敏纸对上述接触面进行测量,结果发现接触面积已经达到 80% 以上。

通过以上的分析得出,在设计截面积完全满足电流密度容量的条件下,铜排、低感母排和电容之间的有效接触面积决定了接触电阻的大小,在通过额定电流的情况下,该部位因接触电阻大而发热严重,此处聚集了大量的焦耳热,最后导致铜排及螺栓的烧损。在产品正常的组装过程中,由此设计缺陷导致的接触面积不足并不能被发现,从而导致不合格产品的流出。

4 整改措施

为了弥补设计缺陷导致的模块烧损问题,通过以

下 3 个方面制定了整改方案。

4.1 增加螺栓的紧固扭矩值

螺栓的扭矩值,是根据电容安装需要,由黄铜材质的短接螺栓决定。按照国外设计标准,强度等级为 4.8 的 M8 螺栓对应的扭矩值为 $7 \pm 0.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。逆变模块在设计时把此值当做了电容接线柱的强度对应值。实际上烧损部位使用的螺栓为碳钢材质,相应的扭矩值应为 $13.7 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

4.2 改变铜排的形状设计

将单块截面积为 $15 \times 35 = 525 \text{ mm}^2$ 的铜排变更为 $2 \times 55 \times 5 = 550 \text{ mm}^2$ 的铜排(5层叠加)。通过提高主电路铜排的柔性来改善通电部位接触面的接触状态,同时,提高铜排的载流量以加大安全裕量。由于搭接的铜排是用于导流的,所以采用层叠铜排后,并不对模块的强度造成影响。

4.3 组作业业时涂抹导电膏

机械部件无论加工面如何光洁,从细微结构来看,都是凹凸不平的,实际有效的接触面只占整个接触面的一小部分,各种金属在空气中还会生成一层氧化层,使有效接触面积更小。为更进一步地改善接触状态,在铜排与低感母排的接触面、低感母排和电容接线柱的接触面分别涂抹导电膏,这样导电膏中的锌、镍、铬等细粒填充在接触面的缝隙中,等同于增大了导电接触面,金属细粒在压缩力或螺栓紧固力作用下,能破碎接触面上金属氧化层,使接触电阻减小,相应地也降低了接触部位导电时的温升。

5 结语

经过验证,整改措施实施后有效地改善了原烧损部位的接触状态,增大了各部位间的接触面积,理论上杜绝了再次烧损的可能。改造后的逆变模块经过近 10 万 km 的运行后,以随机抽验的方式进行了实际的效果验证,确认改造处的铜排状态良好。通过此次烧损事件的整个处理过程可以发现,扭矩值的设定在整个机械设计中,尤其是在多层次的部件贴合中,具有重要的意义。在对机械部件的组装过程中,要结合工艺的特点对关键点位设置必要的安全裕量,在设计的同时,有必要对这些点位进行充分的验证,才能够保证产品的质量。

参考文献:

- [1] 陈亭志. 螺栓选型和装配扭矩的计算方法研究[J]. 机械工程师, 2014(6): 77-79.
- [2] 樊小强, 陈铁旦, 夏延秋. 导电润滑脂的导电性和摩擦性能的研究[C]// 第十一届摩擦学大会论文集. 兰州: 中国机械工程学会, 2013.
- [3] 韩冰. 一种测定空化水喷丸工艺中冲击压力场分布规律的方法[J]. 振动与冲击, 2013, 32(2): 6-8.
- [4] 曲玉峰. 机械设计基础[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006.