

应用巴克豪森效应检测起落架镀铬零件的热损伤

潘建华, 刘斌, 刘健, 马强, 杨旭东

(北京飞机维修工程有限公司, 北京 100621)

摘要:应用巴克豪森效应对起落架内筒和枢轴销等零件镀铬层下的本体热损伤检测进行了试验研究。通过对不同表面状态和模拟不同程度热损伤试样的测试数据的分析以及实际零件的测试和验证, 得到不同程度热损伤的磁弹值比值。确定的最优磁化参数和工艺方法能够有效检测起落架镀铬零件热损伤。

关键词:磁粉检测; 巴克豪森效应; 起落架零件; 热损伤

中图分类号:TG115.28 文献标志码:A 文章编号:1000-6656(2013)04-0048-05

Inspection for Thermal Damage in Landing Gear Chrome Parts with Application of Barkhausen Effect

PAN Jian-Hua, LIU Bin, LIU Jian, MA Qiang, YANG Xu-Dong

(Aircraft Maintenance and Engineering Corporation Beijing, Beijing 100621, China)

Abstract: In the paper, the application of Barkhausen effect to inspect thermal damage on the bodies under the chrome layer for the inner cylinder and shaft pin of the landing gear were tested and studied. Through the analysis of sample test data from different surface conditions and the simulation of the different degrees of thermal damage, and together with the testing and verification for the real parts, the magnetoelastic parameter value of the different degrees of thermal damage were obtained. Determined optimal magnetizing parameters and process methods can effectively inspect thermal damage in the landing gear chrome parts.

Keywords: Magnetic particle testing; Barkhausen effect; Landing gear parts; Thermal damages

起落架内、外筒和枢轴销等主要零件采用的是4340M或300M超高强度钢材料, 镀铬层厚度范围0.10~0.38mm, 使用中因各种原因会使镀铬层下的本体产生热损伤缺陷。目前, 起落架零件在修理过程中主要通过目视和退镀后酸蚀方法检查本体热损伤缺陷。由于目视检查仍无法准确判定零件本体是否存在热损伤, 往往容易造成误判或漏检, 最终只能去除镀铬层后通过酸蚀检查进行确认。如果漏检, 将会导致起落架零件失效或断裂等重大飞行安全事故; 如果发生误判, 将会造成不必要的重复修理(退镀和重新镀铬等一系列工序), 导致修理周期延长、

修理费用和成本增加。

热损伤缺陷在退镀的本体表面经酸腐蚀后通常会呈暗黑色或浅白色。暗黑色称为OTM(Overtempered Martensite)热损伤, 暗黑色处是软化点, 表明加工或工作时表面温度已经超过材料的正常回火温度。OTM将导致材料强度和疲劳寿命降低。浅白色称为UTM(Untempered Martensite)热损伤, 浅白色处是硬化点, 表明加工或工作时表面温度已经超过奥氏体转变温度(700℃)。UTM将降低零件的疲劳寿命和韧性, 并且会产生氢脆和应力腐蚀。

笔者就应用巴克豪森效应检测起落架内筒和输轴销零件镀铬层下的本体热损伤进行了试验研究。通过对不同表面状态和模拟不同程度热损伤试样的测试数据的分析以及实际零件的测试和验证, 确定检测起落架零件热损伤的最优磁化参数和工艺方法, 探

收稿日期:2012-03-27

作者简介:潘建华(1954—),男,高级工程师,长期从事飞机/发动机无损检测工作。

讨巴克豪森方法替代目视和酸蚀方法检查起落架零件热损伤的可能性。

1 巴克豪森检测原理与方法

1.1 检测原理

铁磁材料具有许多微小的磁畴结构,它们由畴壁分隔开来。材料在外磁场的作用下磁化时,磁畴壁会沿外磁场作用方向发生位移或磁畴转动,材料呈磁化状态。材料经初始磁化阶段后进一步磁化过程中,畴壁位移须克服材料内部存在的不均匀应力、杂质、位错等因素造成的阻力,因而产生不连续的“跳跃”运动。图 1 所示的磁化曲线和磁滞回线最陡区域为阶梯式跳跃性的变化,垂直段为表示跳跃大小,水平段为两次跳跃等待时间。磁畴和畴壁的这种不连续跳跃,称为巴克豪森跳跃。若将一导体线圈置于材料表面,并对材料施加交变磁场时,畴壁的不可逆跳跃将在线圈内感应一系列脉冲信号,放大后通过扩音器可听到沙沙的噪声。该现象首先由德国物理学家巴克豪森(Barkhausen H)于 1919 年在实验中观察到,故称为“巴克豪森效应”或“巴克豪森噪声”,简称 MBN。MBN 信号接收示意图,如图 2 所示^[1]。

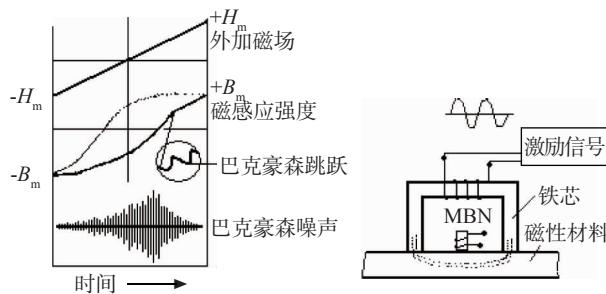


图 1 巴克豪森跳
跃和磁噪声

图 2 MBN 信号接
收示意图

由于畴壁跳跃产生的脉冲信号大小与被测区域的应力场、变形及微观结构的不均匀性等因素有关,因此,巴克豪森效应可应用于评估磁性材料残余应力、硬度、疲劳寿命以及测量磨削烧伤和热处理缺陷等方面^[1-3]。

巴克豪森效应可以检测零件铬层下的本体热损伤是基于使用或加工过程中零件表面产生的残余应力或显微组织发生了变化的特征。

1.2 检测方法

在零件上某一被测区域,使用巴克豪森检测仪器测量 MP 值。MP 值是仪器测得的信号幅度(或磁弹性参数),称为磁弹值(Magnetoelastic Parame-

ter)。首先测出正常情况下的巴克豪森信号幅值平均值作为基准值,称为 MP_{base} 。检测过程中所得到的最大信号幅值称为 MP_{max} 。仪器提供的磁化场是可以调节的,测试需要合适的磁化场,磁场过强,零件表面和激励线圈达到过饱和将导致测量灵敏度降低,磁场弱,不能获得足够的信号。因此,需要通过改变外加磁场强度的大小,即调节电压(或增益)值,以找出该材料或零件的最佳检测灵敏度的磁化参数——最优电压(或增益)值。

可以通过两种方法获得最优化参数:① 在参考试件的模拟缺陷位置上,通过改变电压或增益(每次增加 0.5~1 个单位)后仪器显示的 MP 值,将获得的一系列 MP 值绘制出磁化曲线,最优化值在曲线拐点前稍低处即磁饱和发生前。② 分别在参考试件的正常位置和模拟热损伤的位置上,记录每次改变电压或增益(每次增加 0.5~1 个单位)获得的 MP_{base} 和 MP_{max} ,计算 MP_{max}/MP_{base} 并找出最大比值,最大比值所对应的电压或增益值就是检测该处热损伤的最优磁化参数。

2 测试试样与设备

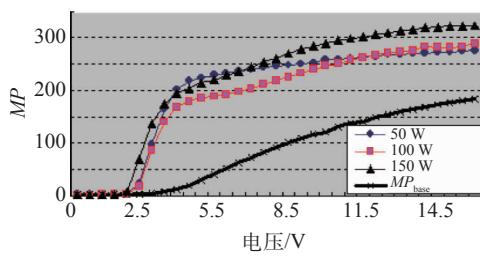
试样选择与起落架零件相同材料,采用激光烧蚀的方法模拟本体不同程度热损伤(呈直线状,激光功率越大烧蚀的损伤越严重)并制成 0, 0.08, 0.26, 0.39 mm 铬层四种表面状态。1 号试样分别采用 50, 100, 150 W 三种激光烧蚀,铬层厚度为 0(无铬层), 0.08, 0.39 mm 三种表面状态,2 号试样采用 100, 150 W 激光烧蚀,铬层厚度 0.26 mm。测试设备为 Rollscan-250 磁弹仪和高能探头。试样和设备如图 3 所示。



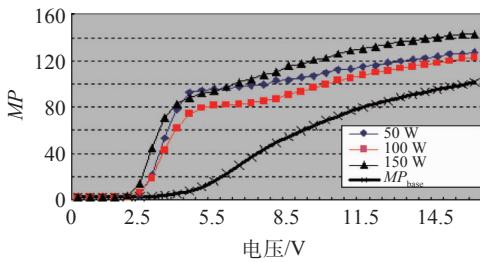
图 3 测试仪器、探头和参考试样

3 测试结果与讨论

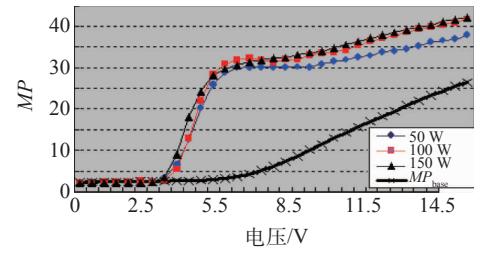
对 1 号,2 号试样采用两种方法进行了测试,结果见图 4~6。图 4 是 1 号试样获得的 MP 数据绘制的曲线;图 5 是 1 号试样数据经计算 $MP_{max}/$



(a) 0 mm(无镀层)



(b) 0.08 mm 铬层

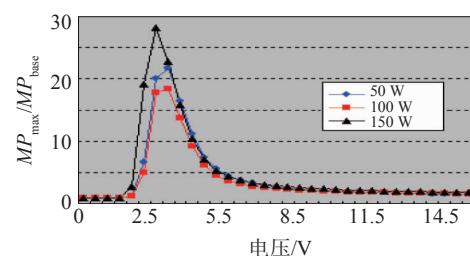


(c) 0.39 mm 铬层

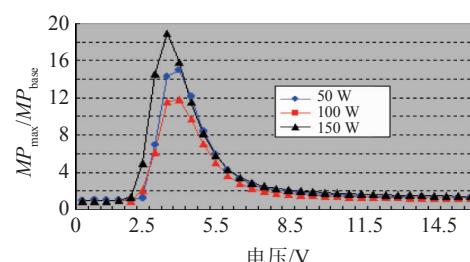
图 4 1号试样测试数据绘制的电压-MP 曲线

MP_{base} 比值后绘制的曲线, 图 6 是 2 号试样的测试数据绘制的曲线。

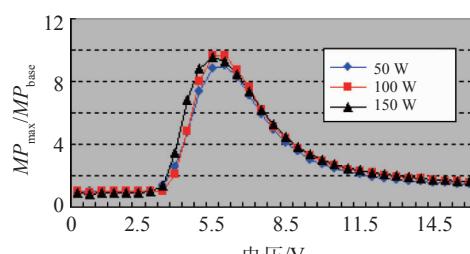
从图 4 可以看出, 三种表面状态下的正常区和热损伤区(随电压值增加) MP 值变化趋势有显著差别。无损伤的正常区形成的磁化曲线没有拐点, MP 值随电压值增加至某一值时开始缓慢增加; 热损伤区的曲线出现明显的拐点, 拐点前随电压增加至某一值时 MP 值出现急剧增加的现象, 形成拐点以后随电压值增加 MP 值增加变缓; 测试数据显示, 同一表面状态下三种程度热损伤的 MP 值出现急剧增加, 与所对应的电压值基本一致; 随铬层厚度增加, 电压值也相应增加, 例如 0(无铬层), 0.08, 0.39 mm 铬层表面对应的电压值分别为 3.5, 4.0 和 6.0 V 左右; 三种表面状态下, 无铬层表面热损伤的 MP 值最高, 接近 180(损伤程度 150 W), 有铬层表面随铬层厚度增加, MP 值明显降低, 如 0.39 mm 铬层的 MP 值在 30 左右。



(a) 0 mm(无镀层)



(b) 0.08 mm 铬层



(c) 0.39 mm 铬层

图 5 1号试样测试数据绘制的电压- MP_{max}/MP_{base} 曲线

从图 4 曲线获得的最优电压值(在磁饱和发生前的曲线拐点前稍低处): 无铬层和 0.08 mm 铬层约为 3.5 V 左右; 0.39 mm 铬层约为 5.5 V 左右。如果按无铬层、0.08 mm 铬层、0.39 mm 铬层的排序, 最优电压值对应的 MP 值从 180 降至 25, 呈现明显的由高至低的变化。这表明, 在相同条件下铬层厚度对 MP 值有较大影响, 铬层越厚出现热损伤的 MP 值相对越低, 无铬层或铬层厚度较小的表面不同程度热损伤的 MP 值具有一定的分散性。

从图 5 可以看出, 热损伤区 MP_{max}/MP_{base} 比值存在明显的峰值。相同表面状态下, 150 W 热损伤的比值明显高于 100 W 和 50 W。按表面无铬层、0.08 mm 铬层和 0.39 mm 铬层排序, 变化规律与图 4 相同。随着铬层厚度增加, 不同程度热损伤的比值不但降低, 而且范围也缩小。例如, 无铬层的比值范围在 28~20 之间, 比值最高, 差别明显; 0.39 mm 铬层的比值范围在 10~8 之间, 差异已经不明显。

最大比值(峰值)对应的电压值就是最优磁化参数,1号试样测试数据显示最大比值所对应的电压值在3.5~6.0 V之间。其中,无铬层为3.5 V,0.08 mm铬层和0.39 mm铬层分别为4.0,6.0 V。最大比值由高至低变化,对应的电压值由低至高变化,这种变化趋势符合一般磁化规律。与图4相比,最大比值更能反映出热损伤区与正常区的差别。

图6是0.26 mm铬层厚度在100 W和150 W热损伤下的MP值和 $MP_{\max}/MP_{\text{base}}$ 比值关系曲线,变化趋势与图4和图5中0.39 mm铬层厚度的情况基本相同。图6的MP值和 $MP_{\max}/MP_{\text{base}}$ 比值普遍较低,如150 W热损伤的MP值和 $MP_{\max}/MP_{\text{base}}$ 比值仅分别为26和7.4,但对应的电压值为6.5 V有所增加。可能的原因是,试样在制作过程中,材料(热处理)状态发生了一些变化导致测量的数值降低。这也表明,零件的状态对巴克豪森信号幅值(MP_{base} 和 MP_{\max})有较大影响。

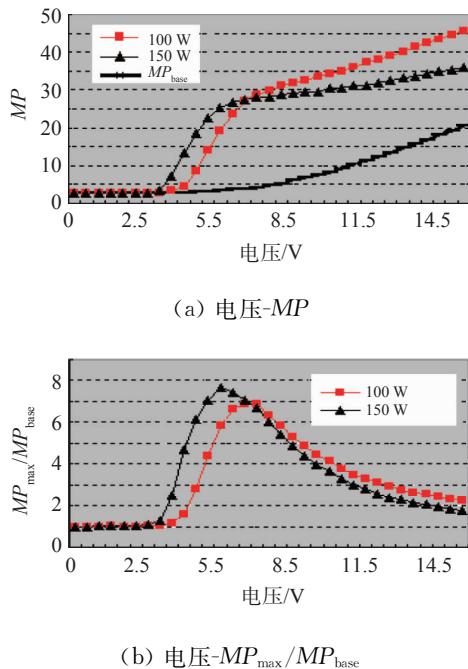


图6 2号试样测试数据绘制的电压-MP和电压- $MP_{\max}/MP_{\text{base}}$ 曲线

综合1号和2号试样获得的测试数据,计算出的 $MP_{\max}/MP_{\text{base}}$ 最大比值以及对应的最优磁化参数(电压值),见表1。

试样测试结果表明:①在不同表面状态下,由激光烧蚀模拟的热损伤显示的MP值和 $MP_{\max}/MP_{\text{base}}$ 比值有显著变化。热损伤程度越严重,MP值和 $MP_{\max}/MP_{\text{base}}$ 比值越高。通过获得的MP曲线和 $MP_{\max}/MP_{\text{base}}$ 比值可以判断热损伤缺陷。②对于

表1 测试数据($MP_{\text{base}}, MP_{\max}/MP_{\text{base}}$)与最优化磁化电压

铬表面 层厚度 /mm	最优化 磁化电 压/V	MP_{base}	MP_{\max}			$MP_{\max}/MP_{\text{base}}$		
			50 W	100 W	150 W	50 W	100 W	150 W
0	3.5	7.6	165.0	140.7	173.8	21.6	18.5	22.8
0.08	4.0	5.2	78.2	61.9	82.6	15.0	11.8	15.8
0.26	6.5	3.5	—	24	26	—	6.4	7.4
0.39	6.0	3.0	25.9	28.4	28.1	9.0	9.6	9.5

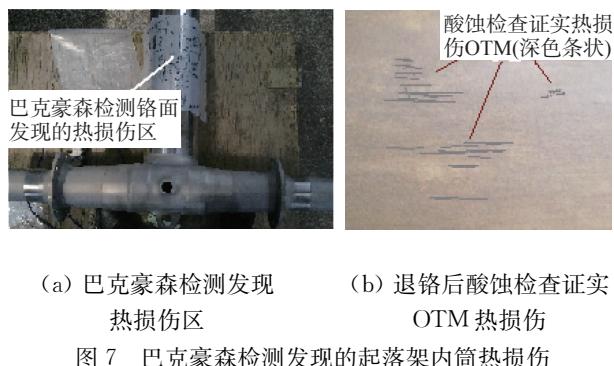
0,0.08,0.26,0.39 mm铬层四种表面状态,测定的最优磁化电压值范围在3.5~6.5 V之间。③铬层厚度对于MP值和 $MP_{\max}/MP_{\text{base}}$ 比值有明显影响。随铬层厚度增加,MP值和 $MP_{\max}/MP_{\text{base}}$ 比值明显降低,同时不同程度热损伤的差别减小。另外,需要说明的是:由于材料/零件表面残余应力或显微组织对巴克豪森信号幅值影响较大,检测前确定正常情况下的基准值(MP_{base})是非常重要的。

4 实际零件检测

按测试结果确定的最优磁化参数分别对737-300,737NG,A320起落架内筒共32件和15件枢轴销零件铬层表面进行了检测,并在退铬后采用酸蚀检查方法对检测结果进行了验证。检测前,首先按最优化电压值(3.5~6.5 V)测试并确定以正常表面的平均值(MP_{base})作为基准,然后检测整个铬层表面。记录和标记MP值明显增加的位置并计算 $MP_{\max}/MP_{\text{base}}$ 比值,随后去除表面铬层,进行酸蚀检查验证。

4.1 起落架内筒

起落架内筒正常镀铬表面的 MP_{base} 值通常在6~10左右,个别在20以内。经酸蚀检查确认热损伤区MP值的范围比较大,最小MP值在12~18之间,最大MP值达到220,2≤ $MP_{\max}/MP_{\text{base}}≤30$ 。检测发现,热损伤区的MP值普遍比正常区平均值高出6倍以上,热损伤严重的区域 $MP_{\max}/MP_{\text{base}}$ 比值往往大于20。热损伤区MP值在60~180之间,最大 $MP_{\max}/MP_{\text{base}}$ 比值比正常区平均值高出20倍以上,说明热损伤程度较为严重。图7(a)是巴克豪森检测显示的热损伤区,图7(b)是热损伤区经退铬后酸蚀检查本体对应表面所显示的不同损伤程度,显示有多个呈深色条状的OTM热损伤,MP值相对较高的多是严重的UTM热损伤,酸蚀检查结果与巴克豪森检测结果一致。



4.2 枢轴销

检测枢轴销有热损伤显示的区域经酸蚀检查都得到了确认,准确性较高。正常镀铬表面的 MP_{base} 值通常在 4~10 左右。热损伤区 MP 值最小在 10~16 之间,最大达到 273, $2 \leq MP_{max}/MP_{base} \leq 25$ 。其与内筒零件基本相同,显示存在热损伤的 MP 值普遍比正常区平均值高出 6 倍以上,热损伤严重的区域大于 20 倍。 MP 显示比正常值高出 2 倍以上的区域经退铬后酸蚀检查,均确认存在热损伤。所不同的是,枢轴销的热损伤形态多呈深色的片状和点状,损伤程度多为 OTM,如图 8 所示。这表明,枢轴销表面热损伤的深度远比内筒的要深。



图 8 巴克豪森检测发现的枢轴销热损伤

经巴克豪森检测显示有热损伤的区域,通过退铬后酸蚀检查大多被确认是 OTM 或 UTM 热损伤。实际零件检测结果表明:①当表面 MP_{max}/MP_{base} 比值 > 2 时,应怀疑存在热损伤。比值在 10 以上时,通常热损伤面积较大、也较严重。②从激光烧蚀模拟热损伤测试结果与实际零件热损伤对比

~~~~~

(上接第 20 页)

(4) 周向 X 射线探伤环缝较定向透照法底片黑度均匀,黑度和清晰度满足标准要求。

(5) 经过理论分析认为该储罐环缝周向 X 射线探伤工艺也可以同时完成对纵缝的射线探伤。

来看,50 W 和 100 W 烧蚀相当于 OTM 热损伤,150 W 烧蚀相当于 UTM 热损伤。但试样测试结果显示,模拟热损伤程度较低(50 W)的  $MP_{max}/MP_{base}$  比值至少在 6 倍以上,说明 50 W 热损伤程度不是应检测出的最低程度的热损伤,实际低于 50 W 也存在热损伤的情况。③ 经酸蚀检查确认,巴克豪森方法能够有效地检出起落架镀铬零件本体热损伤,准确率达到 90% 以上。

但是,检测中也发现某些区域的  $MP_{max}/MP_{base}$  比值在 2 左右时,存在酸蚀检查没有发现热损伤的现象。有时从无热损伤的正常表面获得的巴克豪森信号值比较分散,不利于基准值  $MP_{base}$  的确定。另外,对于尺寸较小的单个点状(如 1.5 mm 左右)热损伤,有时不能获得响应信号。这些仍需要做进一步的试验研究。

#### 5 结论

(1) 巴克豪森方法能够比较有效地检测出起落架零件热损伤缺陷。

(2) 经过对测试数据的分析确定,检测起落架零件热损伤的最优化磁化电压值范围在 3.5~6.5 V 左右。

(3) 当  $MP_{max}/MP_{base}$  比值大于 2 时,应怀疑存在热损伤。当显示的  $MP$  值较高或  $MP_{max}/MP_{base}$  比值大于 10 时,表明是较严重的热损伤。

(4) 当  $MP_{max}/MP_{base}$  比值在 2 左右时,对热损伤的判断存在不确定性。

#### 参考文献:

- [1] 李家伟,陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京:机械工业出版社,2002(1):497~508.
  - [2] 庄又青. 利用巴克豪森效应综合评价材料表面质量[J]. 无损检测,1994,16(2):14~16.
  - [3] 王泓,乙晓伟,刘雪峰,等. 基于疲劳性能的热损伤巴氏磁参数表征[J]. 中国机械工程,2008,19(5):609~612.
- ~~~~~

#### 参考文献:

- [1] JB/T 4730—2005 承压设备无损检测[S].
- [2] 郑世才. 射线检测[M]. 北京:中国机械工业出版社,2004.
- [3] 钱惠,范虎山. X 射线周向曝光技术的应用[J]. 无损检测,2002,24(10):449.