

# 小长径比复杂零件磁粉检测工装设计

王建超

(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 介绍了采用的磁场、磁路、磁阻以及磁场分布理论, 给出了用于小长径比零件磁粉检测专用工装的设计规范, 利用该工装可明显提高发动机机架零件磁粉检测的灵敏度。该项技术已应用于发动机无损检测之中。

**关键词:** 磁粉检测; 退磁场; 磁阻; 长径比

**中图分类号:** V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 02-0074-05

## Tooling design for magnetic particle detection of complex parts with small slenderness ratio

WANG Jian-chao

(Xi'an Aerospace Engine Factory, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Based on the magnetic field, magnetic path, magnetoresistance and magnetic field distribution theory, the design specifications of special tooling for magnetic particle detection of the parts with small slenderness ratio are proposed. The tooling obviously improved the sensitivity of magnetic particle detection for engine frame parts. The detection technology has already been applied to the nondestructive detection of the engines.

**Keywords:** magnetic particle detection; demagnetizing field; magnetoresistance; slenderness ratio

## 0 引言

液体火箭发动机机架用于连接发动机与火箭箭体, 并传递发动机推力。火箭飞行过程中, 机架各零部件将会受到很强的拉应力或压应力作用, 如果机架零件表面存在裂纹、发纹等机械缺陷, 那么在强应力作用下, 这些缺陷将会扩展,

甚至导致零件失效, 造成推力方向偏离预定方向, 轻则导致火箭偏离预定轨道, 重则导致火箭发射失败。

机架由拉杆、支板、主体三类零件焊接而成(见图 1)。主体负责将拉杆和支板连接在一起, 是受力最大的零件, 机械强度要求较高, 同时它对机械缺陷亦极为敏感。该类零件通常采用磁粉检测方法, 检测零件表面是否存在机械缺陷。主体

收稿日期: 2012-08-09; 修回日期: 2012-11-08

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2010JY03)

作者简介: 王建超(1987—), 男, 助理工程师, 研究领域为无损检测

零件的结构形状复杂，在进行纵向线圈磁化时，由于主体零件长径比小，导致磁化不足，检测灵敏度极低，局部区域还存在检测盲区。本文通过

分析该类零件纵向线圈磁化时影响磁化率的各项因素，通过设计专用检测工装，以达到提高磁化率和磁粉检测灵敏度之目的，消除检测盲区。

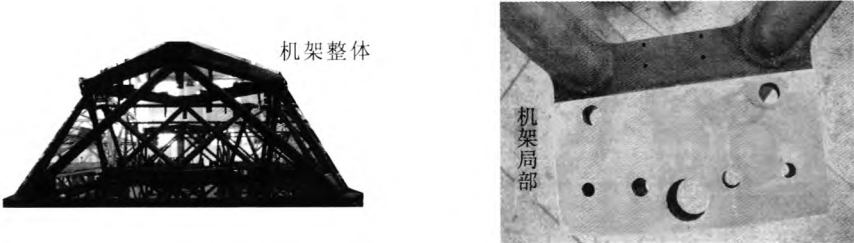


图 1 机架  
Fig. 1 Engine frame

1 磁粉检测理论

1.1 检测原理

磁粉检测适用于铁磁性零件表面和近表面机械缺陷的检测。可检测出裂纹、发纹、折叠、分层等缺陷。其检测原理是，通过对零件进行磁化，在零件内部建立磁场，若零件存在机械缺陷，那么磁力线在零件表面和近表面的缺陷处将会发生畸变，造成部分磁力线逸出零件表面形成漏磁场。漏磁场吸附施加在零件表面的磁粉，形成在合适光照下目视可见的磁痕，从而可显示出零件表面出现不连续的位置、形状和大小，通过观察和分析零件表面出现不连续的位置、形状和大小，即能得出对该零件机械缺陷的判定和评价。磁粉检测原理如图 2 所示。

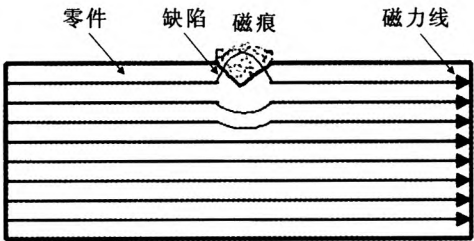


图 2 磁粉检测原理图  
Fig. 2 Principle diagram of magnetic particle detection

1.2 磁化理论

零件磁化时，在相同强度的磁场内其磁化率与以下两个因素有关：一是其内部产生的退磁场

的强度大小，二是整个磁路中磁阻的大小。为了提高零件的磁化率，在零件磁化时需要尽量降低零件产生的退磁场的强度和磁路中的磁阻。

1.2.1 退磁场对零件磁化的影响

零件在线圈中被磁化后，在零件的两端会形成磁极，该磁极将产生一个方向与磁化场方向相反的磁场，该磁场就被称为退磁场。退磁场强度  $H_d$  与被磁化零件的形状和磁化场的强度有关，其关系式为：

$$H_d = -NM \tag{1}$$

式中： $N$  为零件退磁因子； $M$  为磁化场强度；负号表示退磁场方向与磁化场方向相反。

退磁因子与零件的形状和结构有关，形状规则的零件，退磁因子又与零件的长径比  $L/D$  有关。 $L$  为零件沿磁场方向的长度， $D$  为垂直于  $L$  的横截面的直径。长径比越大，退磁因子越小，根据公式 (1)，在相同强度的磁化场中该零件产生的退磁场也越小，零件越容易被磁化。形状复杂的零件，该零件被磁化时，将会产生很多对磁极，这些磁极对零件内部均会产生退磁场，导致零件很难磁化。

1.2.2 磁路中的磁阻对零件磁化的影响

在磁场中，磁感应强度与磁场强度以及磁通量的关系可表示为：

$$B = \mu H \tag{2}$$

$$\Phi = BS \tag{3}$$

式中： $B$  为磁感应强度； $H$  为磁场强度； $S$  为与

磁感应强度方向垂直的横截面积;  $\mu$  为磁导率;  $\Phi$  为通过界面  $S$  的磁通量。

根据磁路定理对于闭合磁路有:

$$\Phi = NI / (l/\mu S) = NI/R = F/R \quad (4)$$

式中:  $F=NI$  为线圈产生的磁动势;  $l$  为磁路长度;  $R=l/\mu S$  为磁路磁阻。

实际磁路由多个不同部分组成, 各部分的横截面积  $S$ , 磁导率  $\mu$ , 长度  $l$  都可能不一样, 对于分段构成的闭合磁路可将磁路定理表示为:

$$\Phi \sum \frac{l_i}{u_i S_i} = NI \quad (5)$$

磁路中的总磁阻:

$$R_m = \sum \frac{l_i}{u_i S_i} \quad (6)$$

在磁动势不变的情况下, 磁阻越大, 磁路中磁感应强度则会越小。由此可见, 磁粉检测时为提高零件磁化率, 除了加大磁化电流外, 还可以采用降低磁路中磁阻的方式来提高检测灵敏度。

### 1.2.3 影响小长径比复杂零件磁粉检测的因素

通过磁化理论分析可知, 影响形状复杂、小长径比零件磁化率的因素有四个: 零件的长径比, 零件磁化后多个磁极形成的退磁场, 磁路中的磁阻, 磁化电流大小。

## 2 发动机机架零件磁粉检测要求

液体火箭发动机机架零件的材料为高强结构钢 30CrMnSiA: 主要包括 30CrMnSiA 管材、30CrMnSiA 锻件及 30CrMnSiA 板材。管材中的主要缺陷有裂纹、发纹; 锻件中的主要缺陷有锻造裂纹、折叠、分层; 板材中的主要缺陷有裂纹、分层。按照 GJB2028A-2007 对这些零件进行磁粉检测, 要求检测出表面和近表面 (深度 1 mm) 各个取向的裂纹、发纹、分层、折叠。检测需覆盖零件的整个外表面, 不允许存在检测盲区。

30CrMnSiA 的管材和板材在进行周向通电磁化和纵向线圈磁化后无检测盲区, 满足检测要求。30CrMnSiA 的部分锻件, 如图 3 所示, 形状复杂、长径比小, 纵向线圈磁化时较困难, 部分区域检测灵敏度不足, 存在检测盲区。

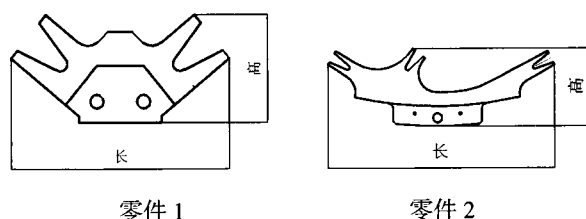


图 3 检测零件的类型

Fig. 3 Types of detected parts

从图 3 可见, 零件外形比较复杂, 纵向线圈磁化时在每一个端头均会产生磁极, 导致零件内部的退磁场加大, 难以磁化。经统计, 零件 1 类型的长度范围从 400 mm 到 500 mm, 高度从 200 mm 到 300 mm, 厚度从 60 mm 到 80 mm; 零件 2 类型的长度范围从 600 mm 到 800 mm, 高度从 300 mm 到 400 mm, 厚度从 60 mm 到 80 mm。按照尺寸将它们简化为规则零件, 计算出的长径比  $L/D$  在 1.8~2.5 之间 ( $D$  为有效直径)。

## 3 检测工装设计

零件磁化困难是由于零件形状复杂导致的。线圈磁化零件时, 会产生多个磁极对, 加之零件长径比小, 磁路磁阻大, 所以零件很难被磁化。为此, 将零件外形进行简化处理, 简化后的零件在线圈中的磁化情况如图 4 所示。

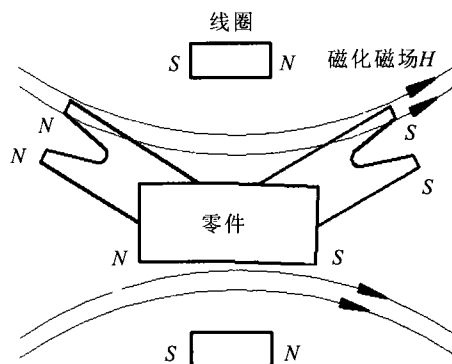


图 4 零件磁化时产生多个磁极

Fig. 4 Magnetic poles generated during part magnetization

通过使用检测工装, 应达到减小磁化磁极对数量、增加长径比和降低磁路磁阻的目的。线圈

磁场是一个以线圈铜板为中心的闭合磁场，如果在零件磁化时，工装和零件装配后能形成一个闭合“圆环”，线圈磁场封闭在该“圆环”中，如图 5 所示，则磁化时不再存在零件长径比小的问题，产生的磁极对数量也可以减少，磁力线经过空气的距离亦可大幅减少，磁路磁阻将大大降低，有利于被检测零件的磁化。根据上述设计思路设计的工装外形结构如图 6 所示。

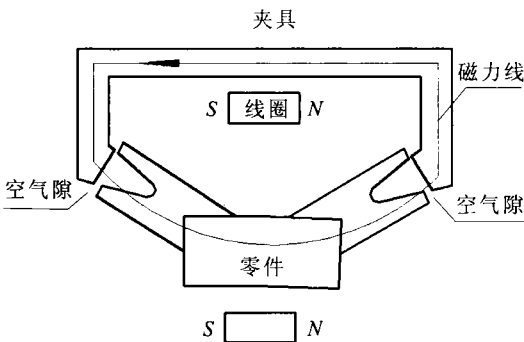


图 5 零件与工装配合  
Fig. 5 Part and tooling assembly

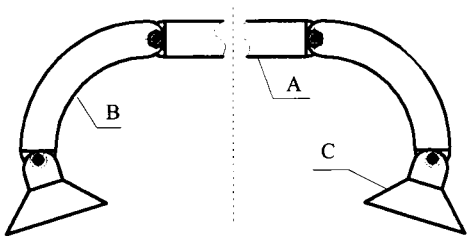


图 6 工装结构图  
Fig. 6 Tooling structure

工装由 A，B，C 三部分组成：A 为连接杆，B 为连接曲杆，C 为触手。三者之间用螺栓连接，B 相对 A 可以转动，C 相对 B 可以转动，转动角度可根据被检测零件的外形尺寸确定。角度确定后，拧紧螺栓将角度固定，即可使用。工装各部分如图 7 所示。

工装的各零件材料与机架零件材料相同，均为 30CrMnSiA，热处理状态为正火状态，在该状态下其磁导率最大。

图 3 中的零件 1 与工装的装配关系如图 8 所示。图 3 中的零件 2 与工装需进行两次装夹，进行两次纵向磁化，才可完成磁粉检测。

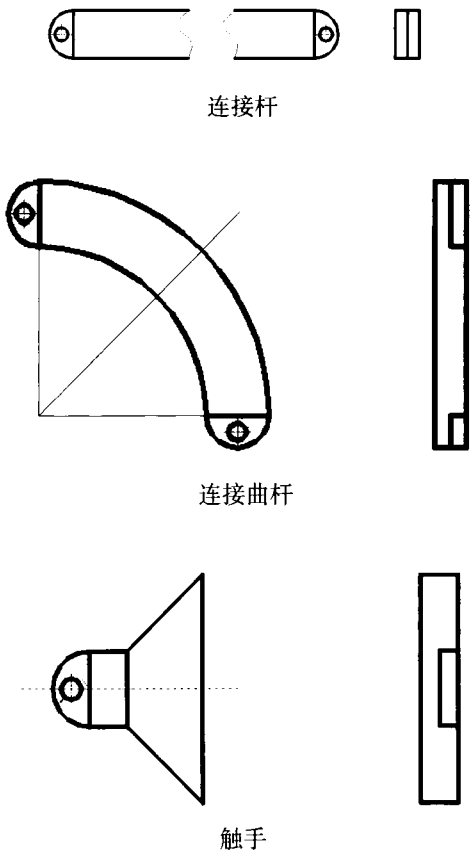


图 7 检测工装  
Fig. 7 Detection of tooling

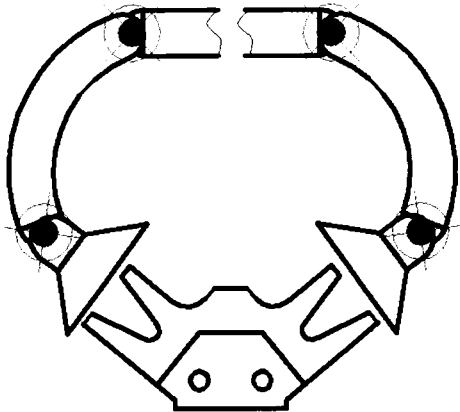


图 8 零件与工装配合图  
Fig. 8 Part and tooling assembly

4 小长径比复杂零件磁粉检测流程

小长径比复杂零件磁粉检测流程如下：

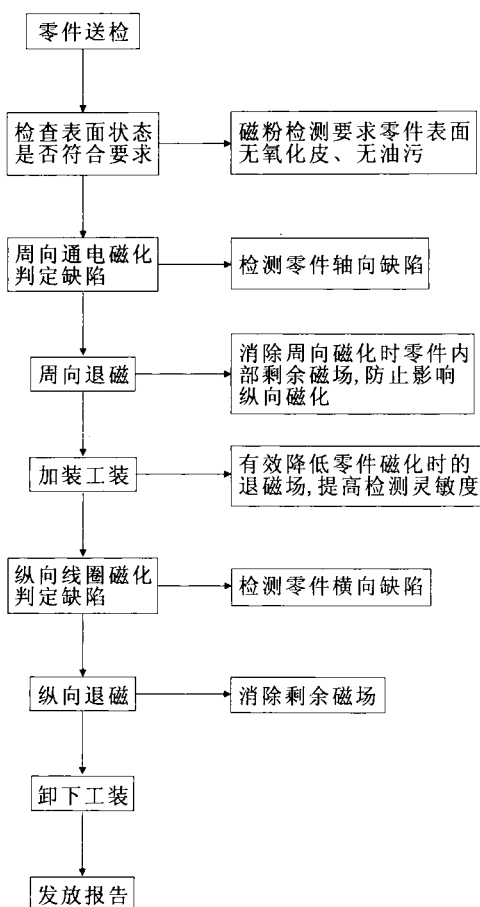


图9 小长径比复杂零件磁粉检测流程

Fig. 9 Flow chart for magnetic particle detection of complex parts with small slenderness ratio

## 5 检测结果验证

为了验证上述理论分析和工装检测结果的正确性,进行了实验对比。实验结果见表1。

实验设备: CJW-9000

灵敏度试片: A2-30/100

磁悬液: 无味煤油+黑色磁粉

沉淀浓度: 1.0~2.5 ml/100 ml。

实验结果显示: 零件直接放在线圈中磁化时, 需要将线圈电流值调到线圈的极限电流 4 000 A, 试片才有磁痕显示, 而且不能显示试片上的圆弧刻槽, 检测灵敏度不高。在 3 000 A 以上大电流下磁化工件, 设备会发出很大噪音, 影响检测人员的注意力。工件在该交流磁场的作用

下会产生剧烈振动, 磁场强度较弱的漏磁场形成的磁痕由于振动会减淡或消失, 造成漏检。

表1 零件磁化对比实验结果

Tab. 1 Magnetization contrast testing results of parts

线圈 电流值/A	直接磁化试 片磁痕指示	夹上夹具磁化 试片磁痕指示
500		
1 000		
1 500		
2 000		
3 000		
4 000		

将零件夹在检测工装中进行磁化, 磁化效果大大改善, 在 1 000 A 时, 试片上有磁痕显示; 电流达到 2 000 A 时, 试片上的刻槽可完全显示, 检测灵敏度已达到要求。采用该方法后, 对该类零件进行检测时, 设备无噪音, 工件无剧烈振动, 极大地改善了检测人员的工作环境。

## 6 结论

根据磁场理论, 设计出用于小长径比复杂零件磁粉检测工装, 采用该工装提高了小长径比复杂零件检测灵敏度, 消除检测盲区, 检测合格的零件焊接成机架后通过了发动机热试车考核。

### 参考文献:

- [1] 叶代平. 磁粉检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] 美国无损检测学会. 磁粉检测手册[M]. 上海: 世界图书出版公司, 1994.

(下转第 82 页)

小,具有较高的精确度、可靠度,说明采用的测试方法可行、精确、可靠,可作为其它液体物质在带压条件下饱和蒸汽压测试的参考方法。

2) 运用该测试方法可得出,在一定温度、气体压力条件下,MON-1 的饱和蒸汽压值随温度和气垫压力升高而升高。

3) 采用该方法测试 MON-1 的饱和蒸汽压,可能产生误差的原因是:氦气在水中有一定程度的溶解,可能会对测试结果造成一定影响,但氦气压 15 ℃, 20 ℃和 25 ℃在水中的溶解度分别只有 0.88, 0.86 和 0.85 ( $\times 10^{-4}$  ml/ml),对测定结果影响很小,可忽略不计。

#### 参考文献:

- [1] 李亚裕. 液体推进剂[M]. 北京: 宇航出版社, 2011.
- [2] 才满瑞, 王向阳, 刘兴武, 等. 国外航天运载器的发展状况、发展趋势及采用的关键技术[J]. 导弹与航天运载技术, 1998 (3): 16-18.
- [3] 庞建国, 刘小平, 邵永平, 等. 推进剂加注后末修贮箱压力变化机理[J]. 火箭推进, 2005, 31(5): 15-17.
- [4] 陈阳, 张振鹏, 瞿骞, 等. 液体火箭发动机试验台贮箱增压系统数值仿真[J]. 航空动力学报, 2007, 22(1): 96-101.
- [5] 李进华, 孙兆懿. 四氧化二氮胶体的饱和蒸汽压测试及分析[J]. 火炸药学报, 2007, 30(1): 74-77.
- [6] PONNER S S. The chemistry of propellants[M]. London: Pergamen Prees, 1960.
- [7] SMITH I D. The determination of the helium saturation level of monomethyl hydrazine and MON-3 nitrogen tetroxide, NASA-TM-101262 [R]. USA: NASA-TM, 1979.
- [8] 潘玉竹, 余永刚, 张琦. AF-315 液体单元推进剂高压燃速的实验研究[J]. 弹道学报, 2012, (2): 79-82.
- [9] 李健, 周文禄. 推力室气动加热及结构传热耦合分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2012, (3): 18-22.
- [10] 李青, 王天舒, 马兴瑞. 充液航天器液体晃动和液固耦合动力学的应用[J]. 力学进展, 2012, (4): 472-481.
- [11] TIM Edwards. Liquid fuels and propellants for aerospace propulsion:1903~2003. Journal of Propulsion and Power, 2003, 19(6): 28-32.
- [12] AMES D L, TURNER D W. The static method studies on the vapor pressure of dinitrogen tetroxide and dinitrogen pentoxide[J]. Physical and Chemical Sciences, 1976, 348 (1653): 89-94.

(编辑: 王建喜)

(上接第 78 页)

- [3] 石井勇五郎. 无损检测学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [4] 仲维畅. 方钢纵向磁化时各棱上的磁荷线密度[J]. 无损检测. 2002, 24(8): 332-335.
- [5] 宛德福, 罗世华. 磁性物理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1987.
- [6] 林俊明, 林春景, 林发炳, 等. 基于磁记忆效应的一种无损检测新技术[J]. 无损检测, 2000, 22(7): 297-299.
- [7] 王丹, 董世运, 徐滨士, 等. 应力集中部位的金属磁记忆检测研究[J]. 失效分析与预防, 2007, 2(2): 12-16.
- [8] 黄小忠. 短切磁性碳纤维泡沫复合材料吸波性能研究 [J]. 2010, 41(5): 15-18+26.

(编辑: 王建喜)