

# 带通孔销钉圆柱面上的奇特磁痕

仲维畅

(南京燃气轮机研究所, 南京 210037)

**摘要:**根据磁偶极子链的物理特性及带圆形通孔和矩形通孔销钉的几何特点,推证出纵向磁化时带圆形和矩形通孔销钉圆柱面上的磁痕形状,与试验所得的奇特磁痕完全一致。

**关键词:**圆形通孔;矩形通孔;磁痕;磁偶极子链

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2006)07-0352-03

## Strange Magnetic Particle Pattern over the Cylindrical Surface of a Pin with a Through Hole

ZHONG Wei-chang

(Nanjing Gas Turbine Research Institute, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** On the basis of the physical characteristic of the magnetic dipole chains and the geometrical feature of a pin with a circular through hole and a pin with a rectangular through hole, the shape of magnetic particle pattern over the cylindrical surface of the pin with a circular or a rectangular through hole was deduced, and it all coincided with the strange magnetic particle pattern obtained by the magnetic particle testing experiment.

**Keywords:** Circular through hole; Rectangular through hole; Magnetic particle pattern; Magnetic dipole chains

2001年5月末作者请铁道部戚墅堰机车车辆工艺研究所的黄永巍工程师代为进行一项磁粉探伤试验,以验证作者的一个理论推测,现将该试验介绍如下。

### 1 试验条件和方法

工件为带矩形通孔的销钉两根(图1左图)和带圆形通孔的销钉三根(图1右图)。

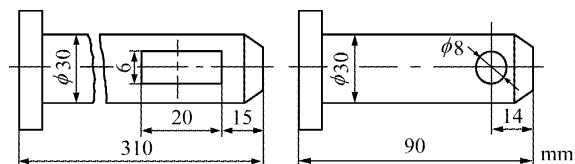


图1 带通孔的销钉

使用的磁化设备为 DCF-2000 型磁粉探伤机,所用磁粉粒度 $\geq 320$ 目,试验方法为湿磁粉连续法,

磁化电流为周向 10D,纵向 20 000 安匝。

### 2 试验结果

通电流周向磁化后,工件上无任何显示。纵向磁化后却出现了奇特磁痕(图2)。

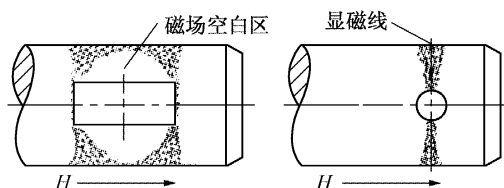


图2 带通孔销钉圆柱面上的奇特磁痕

矩形通孔磁痕如图2左图,可见阴影部位磁场极强,堆积大量磁粉,在孔两边外侧有磁场空白区。

圆形通孔磁痕如图2右图,可见直径相应延伸处有两条扇形区,区内磁粉积聚较强。

### 3 试验结果分析

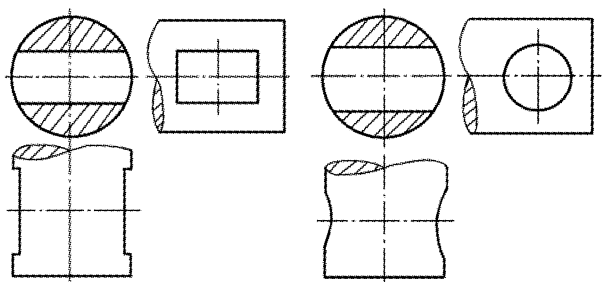
#### 3.1 带通孔销钉横截面的显漏率

带矩形通孔和圆形通孔销钉上的相贯线<sup>[1]</sup>虽不

收稿日期: 2005-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59571064 后续)

作者简介: 仲维畅(1937~),男,高级工程师。从事无损检测工作。



(a) 带矩形通孔销钉

(b) 带圆形通孔销钉

图3 带矩形通孔和带圆形通孔销钉上的相贯线和横截面同(图3顶视图),但通过两孔中心的横截面是完全一样的(图3正视图)。

由文献[2]知,销钉磁化时,磁化场  $H_a$  在其横截面中将激励出  $n$  条磁偶极子链,即

$$n = \frac{\mu_0 \chi_m \pi R^2 H_a}{q_m} \quad (1)$$

式中  $\mu_0$ ——真空磁导率

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$\chi_m$ ——销钉材料的磁化率,为一无量纲纯数

$R$ ——销钉半径, m

$q_m$ ——基元磁荷的磁荷量, Wb

另一方面在带通孔销钉的最小横截面上所能容纳的最大磁偶极子链数  $n_{\max}$  为<sup>[3]</sup>

$$n_{\max} = \frac{\mu_0 \chi_m 2 \left( \frac{1}{2} R^2 \cdot 2\theta - b \sqrt{R^2 - b^2} \right) H_s}{q_m} = \frac{\mu_0 \chi_m \left( 2R^2 \arccos \frac{r}{R} - 2r \sqrt{R^2 - r^2} \right) H_s}{q_m} \quad (2)$$

式中  $H_s$ ——使销钉材料达到磁饱和和所需的磁化场强, A/m

$r$ ——圆形通孔的半径,或矩形通孔的半高, m

$\theta$  和  $b$  见图4。由文献[2]知,  $n$  是必须通过最小横截面积的磁偶极子链数,  $n_{\max}$  是最小横截面所能

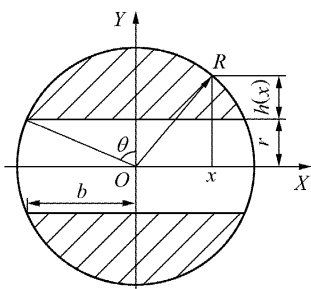


图4 销钉通孔的最小横截面积

允许通过的磁偶极子链数,故此时的显漏率  $\beta$  为

$$\beta = \frac{n}{n_{\max}} = \frac{\pi}{2 \left[ \arccos \frac{r}{R} - \frac{r}{R} \sqrt{1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2} \right]} \cdot \frac{H_a}{H_s} \quad (3)$$

$$\beta = \beta \left( \frac{r}{R}, \frac{H_a}{H_s} \right) \quad (4)$$

即带通孔销钉的显漏率仅是通孔与销钉半径尺寸比和磁化场强与材料饱和磁化场强比的函数。

显然,当  $\beta \leq 1$  时,所有的磁偶极子链都能顺利通过通孔处的最小横截面积,所以销钉柱面上不会有磁痕显示;而当  $\beta > 1$  时,必有一部分磁偶极子链无法通过通孔处的最小横截面积,文献[4]已证明它们将被迫断裂,并在销钉的圆柱面上显示出正、负磁荷(极)。

而由式(3)得

$$\beta |_{H_a=H_s} = \frac{\pi}{2 \left[ \arccos \frac{r}{R} - \frac{r}{R} \sqrt{1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2} \right]} \quad (5)$$

$$\text{且 } \lim_{r \rightarrow R} \beta |_{H_a=H_s} = \frac{\pi}{2(0 - 1 \times 0)} = \frac{\pi}{0} \rightarrow \infty$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \beta |_{H_a=H_s} = \frac{\pi}{2 \left( \frac{\pi}{2} - 1 \times 0 \right)} = 1$$

$$\text{所以 } \beta |_{H_a=H_s} \geq 1 \quad (6)$$

即带通孔销钉饱和磁化时,其中的磁偶极子链必有一部分被迫断裂,而在圆柱面上显现出正、负磁极,从而出现异常磁痕显示。

### 3.2 带圆形通孔销钉圆柱面上的磁痕

由于磁偶极子链是因挤不过最小横截面才被迫断裂,所以显现出的正、负磁极(荷)必定是沿着最小横截面与表面的交线(可称为显磁线)分布的。因为磁偶极子链有均匀分布于磁介质横截面积内的特性<sup>[2]</sup>,故可假设因磁偶极子链断裂而在表面上某一点显现出的磁荷量  $Q_m$  由两部分  $Q_{m1}$  和  $Q_{m2}$  组成,即

$$Q_m = Q_{m1} + Q_{m2} \quad (7)$$

其中  $Q_{m1}$  为一常量,仅取决于显漏率  $\beta$ 。

$$Q_{m2} = Kh(x) = K(\sqrt{R^2 - x^2} - r) \quad (8)$$

式中  $K$ ——比例常数

$h(x)$ ——最小横截面上的高度变化量(图4)

$$\text{因为 } 0 \leq x \leq \sqrt{R^2 - r^2}$$

$$\text{所以 } 0 \leq Q_{m2} \leq K(R - r)$$

由此可画出沿显磁线(图2右图)分布的磁荷量如图5所示,它由一常量(直线a)和一变量(曲线b)组成。显然,某点上显现的磁荷量  $Q_m$  越多,在该处被

吸附的磁粉颗粒也就越多<sup>[5~7]</sup>,所以带圆形通孔销钉圆柱面上将出现图2右图所示形状的奇特磁痕,与试验结果完全一致。

### 3.3 带矩形通孔销钉圆柱面上的磁痕

与带圆形通孔销钉一样,在完整圆柱体内均匀分布的磁偶极子链将从通孔处挤过减小的横截面积( $\beta \leq 1$ 时),若 $\beta > 1$ ,则必有一部分磁偶极子链在横截面突然改变处的显磁线(图6)上断裂,而在圆柱面上显现出正、负磁极(荷)来。沿显磁线出现的磁荷 $Q_m$ 分布也和带圆形通孔销钉完全相同,但磁偶极子两极点间的场强远高于两极点外的场强<sup>[5,6]</sup>,故两条显磁线之间吸附的磁粉颗粒要比显磁线外多,因而磁痕在显磁线内外不对称。由于矩形通孔尺寸与销钉半径的多样性,圆柱面上的奇特磁痕可能有多种不同的形态,如图6所示,其中一种与试验结果(图2左图)完全一致,其它的则大同小异,有待今后的试验验证。但无论是哪一种都存在着磁场空白区。

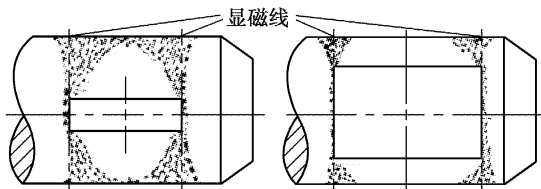


图6 带矩形通孔销钉圆柱面上的磁痕

## 4 结论

(1) 销钉上的通孔减少了销钉的横截面积,迫使原先均匀分布的磁偶极子链挤过剩余的横截面积。如其显漏率 $\beta \leq 1$ ,则所有的磁偶极子链都能顺

利通过减小了的横截面积;但 $\beta > 1$ 时必有部分磁偶极子链断裂,而在圆柱面上显现出正、负磁极(荷)。

(2) 磁偶极子链必沿显磁线(圆形通孔为最小横截面和圆柱面的交线,矩形通孔为横截面积的突变面与圆柱面的交线)断裂,显现出的磁荷量为—常量与—变量之和。

(3) 带圆形通孔销钉圆柱面上的磁痕沿通孔直径(销钉最小横截面)呈扇形向两边延伸。

(4) 带矩形通孔销钉圆柱面上的磁痕沿通孔四角向两边延伸,可以形成互相连接的两个浓密磁痕区和四个不吸附任何磁粉颗粒的空白区,也可能形成四个互不相连的浓密磁痕区和两个空白区。

(5) 带通孔销钉圆柱面上的奇特形状磁痕实际上是磁偶极子链原理推论的必然结果。

向黄永巍工程师致以深切的谢意。

### 参考文献:

- [1] 欧义同,吴维翰.画法几何及工程制图[M].长沙:国防科技大学出版社,1994.
- [2] 仲维畅.磁偶极子链的横向排斥——磁粉探伤原理之二十三[A].第八届全国无损检测大会暨国际无损检测技术研讨会论文集[C/CD].中国苏州:2003.
- [3] 原北京矿业学院高等数学教研组.数学手册[M].北京:燃料化学工业出版社,1973.
- [4] 仲维畅.磁偶极子链的断裂和表面磁极的显现——磁粉探伤原理之二十四[A].第八届全国无损检测大会暨国际无损检测技术研讨会论文集[C/CD].中国苏州:2003.
- [5] 仲维畅.磁偶极子与磁粉探伤[J].无损检测,1990,12(3):66—70.
- [6] Zhong Wei-Chang. Magnetic particle inspection——A new theory [J]. British Journal of Non-destructive Testing,1993,35(2):68—74.
- [7] 仲维畅.工件表面点状缺陷磁痕的形状和大小[J].无损检测,2000,22(1):25—27.

(上接第343页)

是利用该方面的课题与试验进行研究而已,在比较两种方法时并没有利用到涡流检测本身的特性,因此,这两种相位信息的获取方法对其它种类检测也是可以适用,可根据实际情况慎重选用。

### 参考文献:

- [1] 任冠众,宁永兰.相位测量技术[J].电测与仪表,1999,

(9):41—45.

- [2] 张毅刚,付平,等.采用数字相关法测量相位差[J].计量学报,2000,21(3):216—221.
- [3] 岳瑞华,许化龙.基于数据采集板的相位测量新方法[J].计量技术,2001,(11):8—10.
- [4] 任吉林.电磁检测[M].北京:国防工业出版社,1999.