

工具钢环形试件表面下人工孔在其表面产生的漏磁场

仲维畅

(南京燃气轮机研究所,南京 210037)

摘要:用磁偶极子链概念分析了工具钢环形试件表面下的人工孔在直流周向磁化时,在其表面上产生漏磁场的原因、条件和规律。证明该漏磁场强度是环径、孔径、孔埋藏深度、周向磁化电流、钢环的饱和磁化电流及其磁化率等的多元函数。

关键词:磁粉检测;漏磁场;环形试件;表面下;人工孔

中图分类号: TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2009)05-0352-04

The Magnetic Leakage Field Yielded by a Subsurface Artificial Hole in the Tool Steel Ring Specimen over its Surface

ZHONG Wei-Chang

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

Abstract: The reason, condition and rule of the magnetic leakage field yielded by a subsurface artificial hole in the tool steel ring specimen over the ring surface at circular magnetization by direct current are analyzed in the present paper through the concept of magnetic dipole chain. It is proved that this magnetic leakage field is a multivariant function of the ring diameters, the hole diameter, the buried depth of the hole, the circumferential magnetizing current, the saturated magnetizing current and the magnetic susceptibility of the steel ring etc.

Keywords: Magnetic particle testing; Magnetic leakage field; Ring specimen; Subsurface; Artificial hole

工具钢环形试件(也称 Betz 环)是磁粉检测系统常用且公认的一种试块(图 1)。自 1941 年首次在美国使用后,现已几乎出现在美国一切磁粉探伤标准和规范之中^[1]。

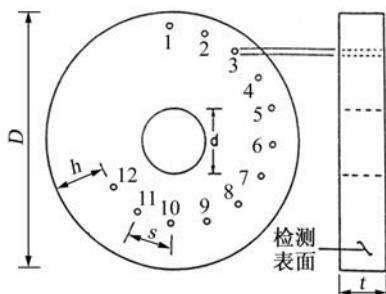


图 1 工具钢环形试件

收稿日期:2007-07-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50371045)

作者简介:仲维畅(1937—),男,高级工程师,主要从事声振动和磁性无损检测及其理论研究。

对于钢环圆柱面下人工孔引起的漏磁场,目前仍沿用半无限大空间内无限长圆柱孔在无限大平面上方产生的漏磁场来近似模拟^[1-2]。其结论因无法圆满阐明试验的结果^[2],故笔者从另一种观点作以下探讨。

1 钢环标准试件的形状、材料和电磁状况

图 1 为美国军标 MIL-I-6868E 规定的工具钢环形试件几何形状,其中环外径 $D=127 \text{ mm}$ (5 in),环内径 $d=31.8 \text{ mm}$ (1.25 in),环厚 $t=22 \text{ mm}$ (7/8 in),小孔间距 $S=19 \text{ mm}$ (0.75 in),人工小孔直径 $2a=1.78 \text{ mm}$ (0.07 in),小孔中心至圆柱面的埋藏深度 $h=1.78k \text{ mm}$ (0.07k in,其中 k 为小孔编号)^[2]。

钢环的材料为 AISI-01 Ketos 工具钢,要求洛氏硬度 RB 在 90~95 之间。

按规定将一定的直流电通过一导体,而该导体

穿过钢环的中心孔,依据不同电平所能检出的孔数来评定磁粉检测方法(或系统)的有效性^[1]。由于导体与钢环中心孔可以是直接接触或绝缘的,故钢环可能被直接通电流磁化,或者被绝缘“芯棒法”磁化。

2 周向磁化时钢环内被激励出的磁偶极子链

2.1 钢环周向磁化的两种极端情况

文献[3-4]简介了磁偶极子链的定义、种类、特性和功能,从而可知:钢环周向磁化时,其中必激励出“闭环”状磁偶极子链。由文献[5]知:磁介质中被激励出的磁偶极子链数 n 为:

$$n = \frac{\mu_0 \chi_m S H_a}{q_m} \quad (1)$$

式中 H_a —磁化场强, A/m;

S —磁介质垂直于 H_a 的横截面积, m^2 ;

χ_m —磁介质的磁化率, 为一无量纲纯数;

μ_0 —真空磁导率;

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

q_m —基元磁荷的磁荷量, Wb。

在对 Betz 环工作时的电流、磁场分布最初尚难作出精确的理论分析时,可首先考虑两种极端情况:

- ① 芯棒与钢环直接接触,并假设电流均匀地流过芯棒和钢环的横截面。
- ② 芯棒与钢环完全绝缘。

2.1.1 直接通直流电磁化(以下简称直流磁化)

由电磁学^[6-7]知:无限长圆柱形导体中直流电产生的磁场 H (为简化推导,将等式右方分母中略去 4π ^[6])为:

$$H = \frac{2rI}{R^2} \quad (2)$$

式中 I —通过该导体的电流强度, A;

r —场点半径, m;

R —导体半径, m。

且文献[7]载:“若在闭合回路中有一段长度为 L 的直导线,在其附近 $r \ll L$ 的范围内,式(2)近似成立”。故可用式(2)来对 Betz 环作最粗略的近似。

显然,在 $dr \cdot t$ 横截面内激励出的磁偶极子链数 dn 为^[5]:

$$dn = \frac{\mu_0 \chi_m t dr H}{q_m} \quad (3)$$

故钢环内被激励出的磁偶极子链总数 n_1 应为:

$$n_1 = \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{D}{2}} dn = \frac{\mu_0 \chi_m t}{q_m} \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{D}{2}} H dr = \frac{2\mu_0 \chi_m t I}{q_m} \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{D}{2}} r dr = \frac{\mu_0 \chi_m t I}{q_m} \left(\frac{D}{2} \right)^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2$$

$$n_1 = \frac{\mu_0 \chi_m t I}{q_m D^2} (D^2 - d^2) \quad (4)$$

2.1.2 绝缘芯棒磁化

由电磁学^[6-7]知这时钢环内的磁场 H 为:

$$H = \frac{2I}{r} \quad (5)$$

这时在钢环内被激励出的磁偶极子链总数 n_2 为:

$$n_2 = \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{D}{2}} dn = \frac{\mu_0 \chi_m t}{q_m} \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{D}{2}} \frac{2I dr}{r} = \frac{2\mu_0 \chi_m t I}{q_m} \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{D}{2}} \frac{dr}{r}$$

$$n_2 = \frac{2\mu_0 \chi_m t I}{q_m} \left(\ln \frac{D}{2} - \ln \frac{d}{2} \right)$$

$$n_2 = \frac{2\mu_0 \chi_m t I}{q_m} \ln(D/d) \quad (6)$$

2.2 钢环内被激励出的磁偶极子链最大平均数

由于磁偶极子链的横向排斥特性^[5],它们必然均匀地充满磁介质的横截面积,故沿钢环半径方向的磁偶极子链平均数 $\bar{n} = \frac{n}{\frac{D}{2} - \frac{d}{2}} = \frac{2n}{D-d}$ 分别为:

直流磁化

$$\bar{n}_1 = \frac{2\mu_0 \chi_m t I}{q_m D^2 (D-d)} (D^2 - d^2) = \frac{2\mu_0 \chi_m t I (D+d)}{q_m D^2} \quad (7)$$

绝缘芯棒磁化

$$\bar{n}_2 = \frac{4\mu_0 \chi_m t I}{q_m (D-d)} \ln \frac{D}{d} \quad (8)$$

磁介质均有磁饱和现象^[6-7],即磁化电流为磁饱和电流 I_s 时,磁介质的磁化程度便达到了最大值,即使再增大磁化电流,磁介质的磁特性亦不再改变(增加)。故磁饱和时,钢环内的磁偶极子链数亦达到了最大值,即磁偶极子链平均数有最大值 \bar{n}_{\max} ,而不是无限的。

直流磁化

$$\bar{n}_{1\max} = \frac{2\mu_0 \chi_m t I_s (D+d)}{q_m D^2} \quad (9)$$

绝缘芯棒磁化

$$\bar{n}_{2\max} = \frac{4\mu_0 \chi_m t I_s}{q_m (D-d)} \ln \frac{D}{d} \quad (10)$$

2.3 钢环内磁偶极子链的断裂和表面磁极的显现

假设钢环周向磁化时,由于人工孔的存在,使原先沿人工孔径分布的磁偶极子链被迫“绕道”而行:一半被“压”入人工孔的下方,另一半被“挤”入了环柱面与人工孔之间。由式(4)和(6)知:必须“挤”过环-孔间的磁偶极子链数 \bar{n} 为:

直流磁化时:

$$\begin{aligned}\tilde{n}_1 &= \frac{\mu_0 \chi_m t I}{q_m D^2} [D^2 - (D - 2h)^2] = \\ \frac{\mu_0 \chi_m t I}{q_m D^2} 2h(2D - 2h) &= \frac{4\mu_0 \chi_m t I h}{q_m D^2} (D - h)\end{aligned}\quad (11)$$

绝缘芯棒磁化时:

$$\tilde{n}_2 = \frac{2\mu_0 \chi_m t I}{q_m} \ln\left(\frac{D}{D - 2h}\right) \quad (12)$$

而据式(9)和(10)知:环-孔间能够容纳的磁偶极子链数 \tilde{n}_{\max} 为:

直流磁化

$$\tilde{n}_{1\max} = (h - a)\tilde{n}_{1\max} = \frac{2\mu_0 \chi_m t I_s (D + d)(h - a)}{q_m D^2} \quad (13)$$

绝缘芯棒磁化

$$\tilde{n}_{2\max} = (h - a)\tilde{n}_{2\max} = \frac{4\mu_0 \chi_m t I_s (h - a)}{q_m (D - d)} \ln \frac{D}{d} \quad (14)$$

据文献[5]定义的显漏率 β 为:

$$\beta = \frac{n}{n_{\max}} \quad (15)$$

由式(11)~(15)知:

直流磁化

$$\beta_1 = \frac{\tilde{n}_1}{\tilde{n}_{1\max}} = \frac{2h(D - h)I}{(D + d)(h - a)I_s} \quad (16)$$

绝缘芯棒磁化

$$\beta_2 = \frac{\tilde{n}_2}{\tilde{n}_{2\max}} = \frac{(D - d)I}{2(h - a)I_s} \cdot \frac{\ln(\frac{D}{D - 2h})}{\ln \frac{D}{d}} \quad (17)$$

由文献[5]和[8]知:只有在 $\beta \geq 1$ 时,被迫挤入环-孔间的磁偶极子链才会因其横向间距减少、磁性位能增高而被迫断裂,并在钢环的圆柱面上沿“显磁线”[9]——通过环中心线、孔中心线的平面与环柱面的交线——而显现出正、负磁极来。

由式(16)和(17),依据钢环尺寸,计算出 $I = I_s$ 时不同 k 值的 β_1 和 β_2 ,如表 1 所列。

显然,当磁化电流等于钢环材料饱和磁化电流

表 1 $I = I_s$ 时不同 k 值小孔所对应的 β_1 和 β_2 值

k	β_1	β_2	k	β_1	β_2
1	3.16	1.10	7	1.55	0.65
2	2.07	0.74	8	1.52	0.65
3	1.84	0.68	9	1.48	0.66
4	1.73	0.66	10	1.45	0.67
5	1.65	0.65	11	1.42	0.68
6	1.60	0.65	12	1.39	0.69

时,人工孔上方环面上理应出现漏磁场,所以上表证明:直接通直流电磁化模型比绝缘芯棒磁化模型更接近本问题的实际。

2.4 钢环柱面上显现的磁荷线密度 σ_l

当 $\beta \geq 1$ 时,被迫断裂的磁偶极子链数应为 $\Delta \tilde{n} = \tilde{n} - \tilde{n}_{\max}$,由式(11)和(13)知,直流磁化时:

$$\begin{aligned}\Delta n_1 &= \frac{4\mu_0 \chi_m t I h (D - h)}{q_m D^2} - \\ \frac{2\mu_0 \chi_m t I_s (D + d)(h - a)}{q_m D^2} &= \\ \frac{2\mu_0 \chi_m t}{q_m D^2} [2h(D - h)I - & \\ (D + d)(h - a)I_s]\end{aligned}\quad (18)$$

这时,在钢环柱面上显现的磁荷线密度 σ_{11} 应为:

$$\sigma_{11} = \frac{\Delta n_1 q_m}{t} = \frac{2\mu_0 \chi_m}{D^2} [2h(D - h)I - (D + d)(h - a)I_s] \quad (19)$$

由式(12)和(14)知,绝缘芯棒磁化时有:

$$\begin{aligned}\Delta n_2 &= \frac{2\mu_0 \chi_m t I}{q_m} \ln\left(\frac{D}{D - 2h}\right) - \frac{4\mu_0 \chi_m t I_s (h - a)}{q_m (D - d)} \ln \frac{D}{d} = \\ \frac{2\mu_0 \chi_m t}{q_m} [I \ln\left(\frac{D}{D - 2h}\right) - \frac{2I_s (h - a)}{(D - d)} \ln \frac{D}{d}]\end{aligned}\quad (20)$$

同理

$$\sigma_{12} = 2\mu_0 \chi_m \left[I \ln\left(\frac{D}{D - 2h}\right) - \frac{2I_s (h - a)}{(D - d)} \ln \frac{D}{d} \right] \quad (21)$$

2.5 钢环圆柱面外的漏磁场

文献[10]和[11]给出了有限长磁偶极线在空间任意点 $P(x, y, z)$ 所产生的磁场强度 $H(x, y, z)$:

$$H(x, y, z) = \sigma_l \cdot F(l, b, x, y, z) \quad (22)$$

式中 σ_l 为有限长磁偶极线的磁荷线密度, Wb/m; $2l, 2b$ 分别为磁偶极线的长度和间距, m; $F(l, b, x, y, z)$ 为一磁偶极线和场点位置的函数。

在本问题中显然有 $2l = t$ (图 1),故直流磁化时:

$$H_1(x, y, z) = \sigma_{11} \cdot F\left(\frac{t}{2}, b, x, y, z\right) \quad (23)$$

对于绝缘芯棒磁化时:

$$H_2(x, y, z) = \sigma_{12} \cdot F\left(\frac{t}{2}, b, x, y, z\right) \quad (24)$$

由式(19)和(21)知:

$$\begin{aligned}H_1(x, y, z) &= 2\mu_0 \chi_m \Phi_1(D, d, h, a, I, I_s) \cdot \\ F\left(\frac{t}{2}, b, x, y, z\right) &\end{aligned}\quad (25)$$

$$\begin{aligned}H_2(x, y, z) &= 2\mu_0 \chi_m \Phi_2(D, d, h, a, I, I_s) \cdot \\ F\left(\frac{t}{2}, b, x, y, z\right) &\end{aligned}\quad (26)$$

式中 Φ_1 和 Φ_2 分别是两个 D, d, h, a, I, I_s 的函数。

3 结论

(1) 工具钢环形试件因其表面下人工孔而产生的漏磁场强度是环外径 D 与环内径 d 、人工孔埋藏深度 h 、人工孔径 $2a$ 、环厚 t 、磁化电流 I 、材料饱和磁化强度 I_s 、材料磁化率 χ_m 、环柱面上显现出的磁偶极线间宽度 $2b$ 等的多元函数,它与人工孔外边缘的埋藏深度 $(h-a)$ 间没有简单的正比或单调关系。

(2) 工具钢环形试件与导体直接接触作直流磁化时,其显漏率为:

$$\beta_1 = \frac{2h(D-h)I}{(D+d)(h-a)I_s}$$

若作绝缘芯棒磁化时,其显漏率为:

$$\beta_2 = \frac{(D-d)I \ln \frac{D}{D-2h}}{2(h-a)I_s \ln \frac{D}{d}}$$

只有在 β_1 和 $\beta_2 \geq 1$ 时,表面下埋藏的人工孔才会在钢环表面上产生出吸附磁粉的漏磁场。

(3) 由钢环尺寸的具体数值计算证明:直接通直流电磁化模型比绝缘芯棒磁化模型更接近本问题的实际情况。

(4) 由于本文已证明环上漏磁场与钢环材料的磁化率 χ_m 成正比,故自然而然地解决了《美国无损检测手册》中的一个难题,即“在给定电流密度下,显现出五个孔的钢环,经过退火后重作灵敏度试验,却出现了九个孔”^[1]。

(5) 由于文献[1-2]给出的试验数据过少,且互相矛盾,故尚难用以对本理论作定量验证,因而今后还须从试验和理论两个方面对本问题作更深入的研究。

致谢:衷心感谢在日本国立横滨大学攻读研究生学位的张耀邦先生为作者提供了文献[2]等资料。

(上接第 351 页)

要的特征信息进行重建,这样一方面可以缩短重建时间,另一方面,其分解完全来自信号本身,所得到的特征信息真实可靠。再则,如果重建图像时具有先验知识,那么该方法在提取特征时会更加准确。

参考文献:

- [1] 王黎明. 基于数字平板探测器的工业 DR/CT 技术研究[D]. 太原:中北大学,2005.

参考文献:

- [1] 美国无损检测学会编. 美国无损检测手册·磁粉卷 [M]. 《美国无损检测手册》译审委员会译. 上海:世界图书出版公司,1994.
- [2] Swartzendruber L J. Magnetic leakage and force fields for artificial defects in magnetic particle test rings[C]. Proceedings of the XII th Symposium on NDE. San Antonio, Texas, USA:[s. n.], 1979.
- [3] 仲维畅. 磁偶极子链和磁粉探伤[C]. 第八届全国无损检测新技术学术交流会议论文集. 中国, 大连:[出版者不详], 2002:37-39.
- [4] Zhong Wei-Chang. Magnetic dipole chain and magnetic particle inspection[C]. Proceedings of 2003 International Symposium on NDT. Suzhou, China:[s. n.], 2003:2.
- [5] 仲维畅:磁偶极子链的横向排斥——磁粉探伤原理之二十三[C]. 西南地区第八届无损检测学术年会/全国电磁轭技术指标及标准化问题研讨会论文集. 四川, 成都:[出版者不详], 2002:248-254.
- [6] 高等工业学校物理学编写组:物理学(初稿),第二册 [M]. 北京:高等教育出版社,1956.
- [7] 赵凯华,陈熙谋. 电磁学[M]. 北京:高等教育出版社,1978.
- [8] 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[C]. 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(摘要)集. 中国, 苏州:[出版者不详], 2003:117.
- [9] 仲维畅. 带通孔销钉圆柱面上的奇特磁痕——磁粉探伤原理之二十五[C]. 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(摘要)集. 中国, 苏州:[出版者不详], 2003:118.
- [10] 仲维畅. 有限长磁偶极线和磁粉探伤[J]. 无损检测, 1991, 13(4):96-100.
- [11] Zhong Wei-Chang. Linear magnetic dipole of finite length and magnetic particle testing[J]. Materials Evaluation, 2001, 59(8):961-966.
- [2] 谭善文. 多分辨希尔伯特-黄(Hilbert-huang)变换方法的研究[D]. 重庆:重庆大学,2001.
- [3] 赫尔曼 G T. 由投影重建图像[M]. 北京:科学出版社,1985.
- [4] Huang N E, Shen Z, Long S R. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[J]. Proc Roy Soc London A, 1998, 454(1):903-995.
- [5] 刘杰,李政,康克军. 小波多分辨率 CT 成像及处理算法[J]. 光电工程, 2002, 29(2):48-51.