

# 磁粉检测试片不同缺陷槽的功能探讨

叶永魁, 周 浩, 吴志男, 王亚州, 陈学晋

(福建宁德核电有限公司, 宁德 352000)

**摘 要:** 当前, 在使用单磁化方向磁粉探伤机检测时, 一般利用现行磁粉检测试片的线性缺陷槽和圆形缺陷槽进行检测灵敏度验证。参考相关国家标准、国际标准, 结合磁粉检测工作的实际经验, 通过分析发现: 用现行试片在一个平面检测区域内进行检测灵敏度验证时, 有些偏离磁场磁化方向的角度朝向上的检测灵敏度验证有时是失效的; 实际工作中, 现行试片缺陷槽难以用于1次磁化有效检出缺陷的角度范围测算进而计算出最少磁化次数, 故难以使用现行试片缺陷槽来避免漏检; 多角度缺陷槽磁粉检测试片能解决现行试片存在的灵敏度验证有效性不足与实际检测工作中难以测算最少磁化次数等问题。该结论有望为磁粉检测的检测灵敏度验证提供一些参考。

**关键词:** 磁粉检测; 灵敏度; 试片; 磁场; 磁场强度; 磁化方向

中图分类号: TG115.28

文献标志码: B

文章编号: 1000-6656(2024)10-0088-05

## Exploration of the functions of different defect grooves in magnetic particle testing specimens

YE Yongkui, ZHOU Hao, WU Zhinan, WANG Yazhou, CHEN Xuejin

(Fujian Ningde Nuclear Power Co., Ltd., Ningde 352000, China)

**Abstract:** Currently, when using a single magnetization direction magnetic particle testing machine for testing, sensitivity verification is generally carried out using the linear defect groove and circular defect groove of the current magnetic particle testing specimen. The authors referred to relevant national and international standards, combined with practical experience in magnetic particle testing work, and through analysis, found that: when using current test pieces to verify the detection sensitivity in a planar detection area, some angles deviating from the direction of magnetic field magnetization were facing upwards, and the detection sensitivity verification sometimes failed; In practical work, it was difficult to use the current defect slot of the test piece to calculate the angle range for effective detection of defects in one magnetization and calculate the minimum number of magnetization times, so it was difficult to use the current defect slot of the test piece to avoid missed detections; Multi angle defect groove magnetic particle testing specimens can solve the problems of insufficient sensitivity verification effectiveness and difficulty in calculating the minimum magnetization number in actual testing work for all current specimens.

**Key words:** magnetic particle testing; sensitivity; test block; magnetic field; magnetic field intensity; magnetization direction

磁粉检测试片主要功能之一是检测灵敏度验证; 有些研究试验利用试片中的圆形缺陷槽进行1次磁化有效检出缺陷角度范围的测算, 进而计算最少磁化次数以避免漏检。目前国内外主要通用的磁粉检

测试片中的缺陷槽有线性缺陷槽(文章将一字型缺陷槽、十字型缺陷槽均视为线性缺陷槽)、圆形缺陷槽两类。文章对使用单磁化方向磁粉探伤机时, 国内外主要磁粉检测试片的缺陷槽进行检测灵敏度验证的有效性、测量1次磁化有效检出缺陷的角度范围进而计算最少磁化次数的可行性、实际检测中试片的可用性问题进行分析; 同时针对现行试片存在的检测灵敏度验证有效性不足、实际检测工作中难以进行最少磁化次数测算等问题, 提出一种多角

收稿日期: 2024-03-05

作者简介: 叶永魁(1969—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事无损检测工作

通信作者: 叶永魁, yeyongkui@sina.com

度缺陷槽磁粉检测试片并介绍了其功能。

## 1 线性缺陷槽验证检测灵敏度

用现行试片的线性缺陷槽验证检测灵敏度时,一般根据磁化后与磁场磁化方向相垂直的线性缺陷槽是否显示磁痕,来确认检测灵敏度是否满足要求。而试片磁化后缺陷槽是否显示磁痕,很大程度上受缺陷槽与磁化方向之间的夹角的影响。磁场内磁化方向和缺陷槽之间的夹角 $\alpha$ 与线性缺陷检出率之间的关系如图1所示,标准GB/T 26951—2011《焊缝无损检测 磁粉检测》和ISO 17638:2003《焊缝无损检测 磁粉检测》用图1[图中, $\alpha_i$ 为磁化方向和缺陷槽之间所形成的夹角; $\alpha_{\min}$ 为部分磁粉检测标准中 $\alpha$ 的最小值,取 $30^\circ$ ;1表示磁化方向;2表示最佳灵敏度;3表示灵敏度降低;4表示灵敏度不足( $\alpha_{\min}$ 仅是 $\alpha$ 的特例之一, $\alpha_i$ 是 $\alpha$ 的示例)]来说明磁场内线性缺陷检出率与此夹角之间的关系:当磁化方向与线性缺陷所在方向相互垂直即相互之间的夹角为 $90^\circ$ 时,检测灵敏度最高;随着夹角由 $90^\circ$ 逐渐减小,检测灵敏度也逐渐降低。因此,当与磁化方向相垂直的试片缺陷槽磁化后显示磁痕,是否就认为与磁化方向呈不同夹角的同样缺陷也都能检出(或与磁化方向呈不同夹角的缺陷槽检测灵敏度也满足要求)的问题有待证明。

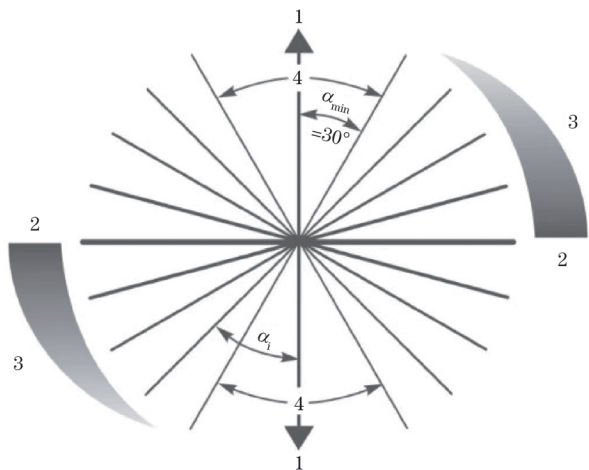


图1 磁化方向和缺陷槽间的夹角 $\alpha$ 与线性缺陷检出率之间的关系

目前磁粉检测标准的一般做法是在磁场强度满足要求的前提下,对磁化次数进行规定。这种规定认为,使与磁化方向相垂直的缺陷槽磁化后显示磁痕(即磁场强度满足要求)时,进行规定次数的磁化,就能确保一个平面检测区域内所有角度朝向上的检测灵敏度都满足要求。标准GB/T 15822.1—2005《无损检测 磁粉检测 第1部分:总则》和ISO 9934-

1:2001《无损检测 磁粉检测 第1部分:总则》提到“在某一表面上进行两次相互垂直的磁化可完成对该表面的完全覆盖”;GB/T 26951—2011标准和ISO 17638:2003标准提到“为确保检测出所有方向上的缺陷,焊缝应在最大偏差角为 $30^\circ$ 的两个近似垂直的方向上进行磁化”;标准GJB 2028A—2007《磁粉检测》和NB/T 47013.4—2015《承压设备无损检测 第4部分:磁粉检测》的规定基本一致,要求应至少对制件在两个相互近似垂直的方向上进行磁化。这些规定的制定都是基于以下观点:在一平面检测区域内进行两次相互垂直的磁化,其所有角度朝向上的检测灵敏度就都能满足要求。这种情况下,每次磁化需至少使试片上偏离磁化方向 $45^\circ$ 角朝向上的线性缺陷槽显示磁痕,即此时 $45^\circ$ 角朝向上的检测灵敏度也需满足要求,磁化方向与线性缺陷槽呈 $45^\circ$ 角关系时线性缺陷槽磁化后的磁痕显示如图2所示,磁化方向与线性缺陷槽呈 $45^\circ$ 角关系时两次相互垂直磁化后线性缺陷槽的磁痕显示(无磁痕)如图3所示(在图2~6中:箭头方向表示磁场磁化方向;试片圆形、线性缺陷槽的实线部分表示磁化后显示磁痕,虚线部分表示磁化后未显示磁痕)。

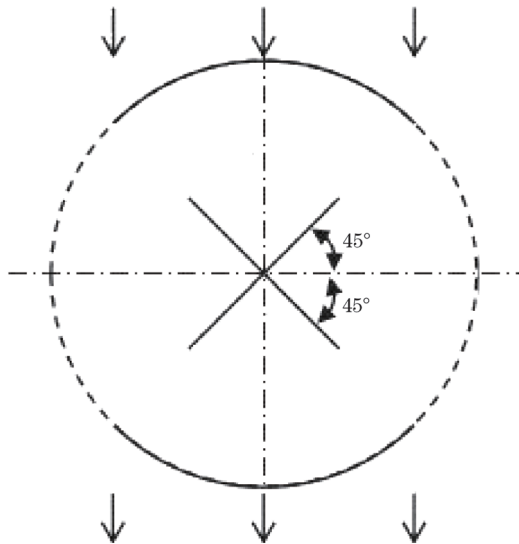


图2 磁化方向与线性缺陷槽呈 $45^\circ$ 角时线性缺陷槽磁化后的磁痕显示

从笔者的试验结果<sup>[1]</sup>可知,当与磁场磁化方向相垂直的试片线性缺陷槽磁化后显示磁痕(即磁场强度满足要求)时,平面检测区域内偏离磁化方向 $45^\circ$ 角的线性缺陷槽(另一试片)不一定显示磁痕,即偏离磁化方向 $45^\circ$ 角朝向上的检测灵敏度不一定满足要求。这说明,与磁化方向垂直的试片线性缺陷槽的检测灵敏度,不能完全代表同一平面检测区域

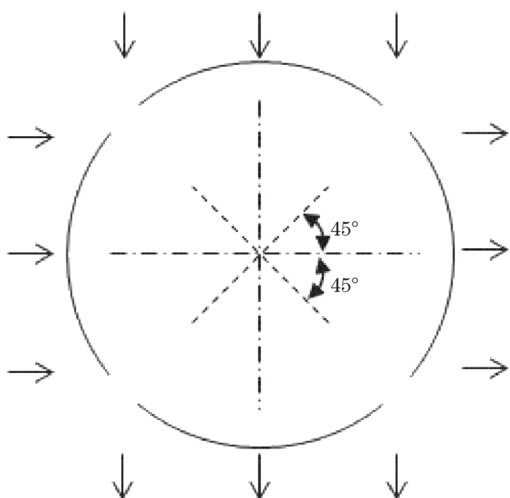


图3 磁化方向与线性缺陷槽呈45°角时两次相互垂直磁化后线性缺陷槽的磁痕显示(无磁痕)

内偏离磁化方向45°角朝向上的检测灵敏度。这种情况下进行2次相互垂直的磁化,即使试片相互垂直的两个线性缺陷槽都显示磁痕,也不能说明偏离磁化方向45°角朝向上的检测灵敏度满足要求,从而可能导致缺陷的漏检。

姚力等<sup>[2]</sup>用“弧形磁痕端点测定法”试验,得出“部分试片磁化后45°角方向的圆形缺陷槽无法显示磁痕”的试验结果及“在大多数实际的磁粉检测工作中,用单磁轭在一个检测方向达到基本的探伤灵敏度的要求(即 $\geq 45^\circ$ )并不是一件容易的事”的结论。笔者用“弧形磁痕端点测定法”试验,得出“部分试验存在漏检区域”<sup>[3]</sup>,也都证明了这种情况的存在。

这说明,根据国内外几个主要磁粉检测标准(GB/T 26951—2011, ISO 17638:2003, GJB 2028A—2007, NB/T 47013.4—2015)的规定,在一个平面检测区域内进行方向相互垂直的磁化时,如用现行磁粉检测试片线性缺陷槽进行检测灵敏度验证,即使与磁化方向相垂直的试片线性缺陷槽磁化后显示磁痕(即磁场强度满足要求,其灵敏度也满足要求),偏离磁化方向的有些角度朝向上的检测灵敏度有时并不满足要求,而可能导致缺陷的漏检。

为避免漏检,可提高磁场强度或增加磁化次数。如提高磁场强度但仍仅进行2次磁化,需使用能验证偏离磁场方向45°角朝向上的检测灵敏度满足要求的试片。但现行试片无45°角朝向的线性缺陷槽,实际工作中难以验证偏离磁场方向45°角朝向上的检测灵敏度是否满足要求。如增加磁化次数,需测算最少磁化次数 $N$ 以避免漏检,这要求试片需有朝向不同角度方向的线性缺陷槽。这样的试片经1次

磁化后,一些角度朝向上的缺陷槽显示磁痕。测量所有显示磁痕线性缺陷槽所形成的最大夹角(即1次磁化有效检出缺陷的角度范围 $\delta$ )即可计算出最少磁化次数 $N$ ,对试片进行1次磁化后的磁痕显示如图4所示。鉴于所有现行试片的线性缺陷槽仅有一字型和十字型槽,无法满足1次磁化有效检出缺陷的角度范围 $\delta$ 测量的要求,因此无法用于最少磁化次数 $N$ 的计算。

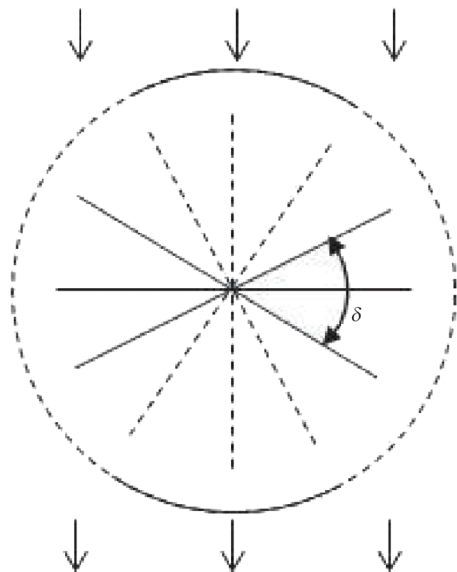


图4 对试片进行1次磁化后的磁痕显示(实线部分)

最少磁化次数 $N$ 的计算公式为

$$N = 1 + (360^\circ / 2 \cdot \delta \text{ 的取整值}) \quad (1)$$

式中:加上1是为了确保几次磁化区域有一定的重叠,避免出现漏检区域;“ $360^\circ / 2 \cdot \delta$ 的取整值”是指“ $360^\circ / 2 \cdot \delta$ ”为非整数时,除去小数直接取整。

综上所述,现行试片的线性缺陷槽是否适合作为灵敏度试片的缺陷槽需要商榷。

## 2 圆形缺陷槽验证检测灵敏度

利用试片圆形缺陷槽进行检测灵敏度验证,其原理与线性缺陷槽的基本相同,是利用与磁场磁化方向基本垂直的部分圆形缺陷槽磁化后是否显示磁痕来验证的。由第1节的分析可知,根据国内外几个主要磁粉检测标准(GB/T 26951—2011, ISO 17638:2003, GJB 2028A—2007, NB/T 47013.4—2015)规定进行2次相互垂直的磁化时,用现行磁粉检测试片圆形缺陷槽在一个平面检测区域进行检测灵敏度验证,即使利用试片验证了磁场强度满足要求,偏离磁场磁化方向的有些角度朝向上的检测灵敏度有时并不满足要求。也就是说,采用2次相互



垂直磁化工艺时,利用试片圆形缺陷槽进行检测灵敏度验证,在有些角度朝向上的验证有时是失效的,而可能导致缺陷的漏检。

刘毓秀等<sup>[4]</sup>认为:试片圆形缺陷槽磁化后,显示磁痕的圆弧端点的切线方向是“该磁化电流下可发现的缺陷方向”(“端点切线法”中切线与可发现缺陷方向的关系如图5所示,下文简称为“端点切线法”)。但实际磁粉检测工作中,没有将圆形缺陷槽的“端点切线法”用于验证偏离磁场磁化方向一定角度朝向上的检测灵敏度是否满足要求。这是由于实际工作中难以确定磁化后圆形缺陷槽的圆心,也就难以确定出磁化后显示磁痕的圆弧缺陷槽端点处的切线。实际工作中不能将圆形缺陷槽的“端点切线法”用于检测灵敏度的验证,也就不能用于2次相互垂直磁化工艺中偏离磁化方向45°角朝向上检测灵敏度的验证。

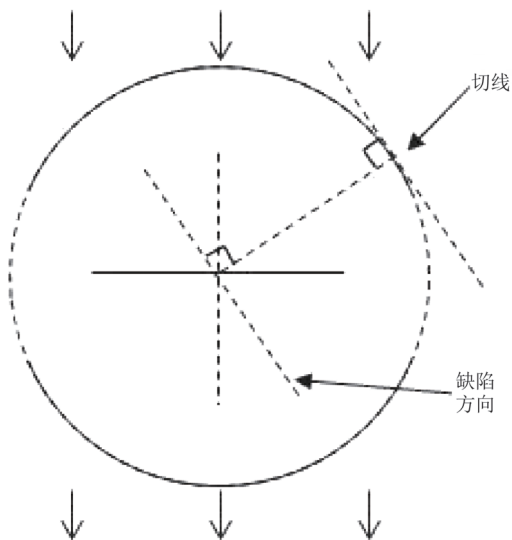


图5 “端点切线法”中切线与可发现缺陷方向的关系示意

在实验室环境下,试片磁化后圆形缺陷槽的部分圆弧显示磁痕,利用专门设计的方法,可确定出圆形缺陷槽的圆心,测量出显示磁痕圆弧( $\widehat{AB}$ )所对应的圆心角( $2\theta$ ,等于1次磁化有效检出缺陷的角度范围 $\delta$ ,见图6),进而计算出最少磁化次数 $N$ 。实际检测工作中,难以确定出磁化后试片圆形缺陷槽的圆心,也难以测量出显示磁痕圆弧所对应的圆心角,因此难以通过这个圆心角来计算最少磁化次数 $N$ 。实际检测工作中,可以通过测量显示磁痕圆弧所对应的弦长( $AB$ )来计算圆心角,然后通过式(2)计算最少磁化次数 $N$ ,即

$$N = 1 + (360^\circ / 4 \cdot \theta \text{ 的取整值}) \quad (2)$$

式中:加上1是为了确保几次磁化区域有一定的

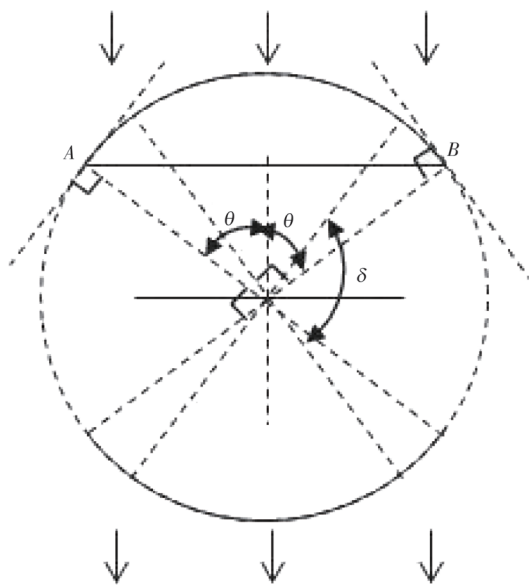


图6 磁化后显示磁痕圆弧所对应的圆心角( $2\theta$ )以及1次磁化有效检出缺陷的角度范围 $\delta$ 示意

重叠,避免漏检;“ $360^\circ / 4 \cdot \theta$ 的取整值”是指“ $360^\circ / 4 \cdot \theta$ ”为非整数时,除去小数直接取整。

但这种方法计算比较繁琐,难以在实际工作中运用。

综上所述,现行试片的圆形缺陷槽是否适合作为灵敏度试片的缺陷槽需要商榷。

### 3 多角度线性缺陷槽验证检测灵敏度

某多角度缺陷槽磁粉检测试片<sup>[5-6]</sup>的结构如图4所示,在试片上加工不同角度朝向的线性缺陷槽,可以直接用于验证不同角度朝向的线性缺陷是否可以检出,即确认偏离磁场磁化方向的不同角度朝向上的检测灵敏度是否满足要求。这解决了目前所有现行试片在实际工作中的检测灵敏度验证有效性问题。同时,多角度缺陷槽磁粉检测试片能根据磁化后试片所有显示磁痕的线性缺陷槽,直接测算出1次磁化有效检出缺陷的角度范围 $\delta$ (见图4),并由式(1)计算出最少磁化次数 $N$ 以避免漏检。

现行磁粉检测标准一般规定:“至少对部件进行两个相互垂直方向的磁化”,但对什么情况下进行2次以上磁化和进行2次以上磁化时磁化次数如何确定,没有做出规定或提供可行的方案。现行的试片以及现行的磁粉检测标准都难以解决这两个问题,而多角度缺陷槽磁粉检测试片能很简单、方便地解决这些问题,可应用于角焊缝、曲面等非平面工件的磁粉检测中。

多角度缺陷槽磁粉检测试片的缺陷槽设计更符合实际,用于检测灵敏度验证更有代表性、更准确,

不会产生像现行试片的缺陷槽设计不够合理而导致检测灵敏度验证失效的问题;同时利用该试片,能很简便地进行1次磁化有效检出缺陷的角度范围的测算并计算出最少磁化次数以避免漏检。因此,多角度缺陷槽磁粉检测试片比所有现行试片更适合作为磁粉检测灵敏度试片。

#### 4 结论

(1)现行磁粉检测试片线性缺陷槽,配合单磁化方向磁粉探伤机进行检测灵敏度验证时,偏离磁场磁化方向的有些角度朝向上的检测灵敏度验证有时是失效的,可能导致漏检;同时现行磁粉检测试片线性缺陷槽,难以用于1次磁化有效检出缺陷的角度范围测算进而计算最少磁化次数,其是否适合作为灵敏度试片的缺陷槽需要商榷。

(2)现行磁粉检测试片圆形缺陷槽,配合单磁化方向磁粉探伤机进行检测灵敏度验证时,偏离磁场磁化方向的有些角度朝向上的检测灵敏度验证有时是失效的,可能导致漏检;同时现行磁粉检测试片圆形缺陷槽,实际工作中难以用于1次磁化有效检出缺陷的角度范围测算进而计算最少磁化次数,其是否适合

作为灵敏度试片的缺陷槽需要商榷。

(3)所提多角度缺陷槽磁粉检测试片能在一个平面检测区域内对各个角度方向检测灵敏度进行有效验证;同时其能很简便地进行1次磁化有效检出缺陷的角度范围测算进而计算最少磁化次数以避免漏检,适合作为灵敏度试片。

#### 参考文献:

- [1] 叶永魁,侯海彬,刘海涛,等.磁场方向与试片磁痕显示关系的试验[C]//中国机械工程学会无损检测分会第十二届年会论文集.上海:中国机械工程学会无损检测分会,2023.
- [2] 姚力,马学荣.关于磁粉探伤极限检测角的实验与分析[J].无损探伤,1996,20(3):39-40.
- [3] 叶永魁,侯海彬,杨璋,等.磁轭检测中磁化次数与漏检率关系的试验[C]//2023远东无损检测新技术论坛论文集.天津:远东无损检测新技术论坛,2023.
- [4] 刘毓秀.关于磁化场方向的试验[J].无损检测,1995,17(7):196-197.
- [5] 叶永魁,李旺,侯海彬,等.磁粉检测试片:CN215493316U[P].2022.
- [6] 叶永魁,李旺,侯海彬,等.C型磁粉检测试片:CN215641010U[P].2022.