|  |  |
| --- | --- |
| ICS  | 77.040.20  |
| CCS  | H 26 |

|  |  |
| --- | --- |
| YS |  |

中华人民共和国有色金属行业标准

YS/T 999—2023

代替 YS/T999-2014

铜及铜合金毛细管涡流检测方法

Eddy current testing method for capillary tubes of copper and copper alloy

送审稿

XXXX - XX - XX发布

XXXX - XX - XX实施

中华人民共和国工业和信息部  发布

1. 前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件代替YS/T 999-2014《铜及铜合金毛细管涡流探伤方法》，与YS/T 999-2014相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

1. 更改了范围，由“本标准规定了铜及铜合金毛细管的穿过式涡流检测方法”更改为“本文件描述了铜及铜合金毛细管的穿过式和旋转式涡流检测方法”（见第1章，2014年版的第1章）。
2. 删除了（铜管）盘矫直涡流探伤方法 的术语和定义，增加了“信噪比”“激励频率”“探头”“线圈填充系数”“相位分析”“调制分析”“标准透入深度”“旋转探头”“穿过式探头”的术语和定义（见第3章,2014年版的3.1）。
3. 增加了探头选择的方法，根据缺陷形状来选择探头（见4.5）。
4. 增加了干扰信号的处理方法（见4.6）。
5. 增加了探头使用类型（见5.4.1）。
6. 删除了零电势的描述（见2014版的5.2.2）。
7. 更改了涡流检测仪器设备综合性能指标,分为手动检测和自动检测；更改了检测能力由原来的0.18mm×0.10mm更改为0.15mmX0.10mm（见表2,2014年版的表2）；增加了各项指标测试方法（见附录A）。
8. 增加了检测灵敏度调节标准旋转式检测人工缺陷（标准人工矩形槽）样管（见6.3）。
9. 更改了检测灵敏度调节标准样管缺陷的个数，由一个缺陷改为三个120°方向的缺陷（见图1、图2、图3，2014年版的图2、图3）。
10. 更改了穿过式检测标准样管人工缺陷尺寸（见表3，2014年版的表3）。
11. 增加了旋转式检测标准样管人工缺陷尺寸（见表4）。
12. 更改了手动基准检测灵敏度调节时标准样管应转动120°方向的方法改为匀速拉动即可（见7.5.1，2014年版的7.3.1）。
13. 增加了检测灵敏度过程校验灵敏度变化具体数值大于2dB，应进行复检（见7.6，2014年版的7.4）。
14. 增加了检测灵敏度过程校验灵敏度变化大于2dB，应进行复检（见7.6）。

本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国有色金属标准化技术委员会(SAC/TC243)归口。

本文件起草单位：仓信无损检测设备苏州有限公司、重庆平湖川村精密铜管有限公司、中铝洛阳铜加工有限公司、苏州九尚久电磁设备有限公司、芜湖精艺铜业有限公司、精艺万希铜业有限公司、浙江海亮股份有限公司。

本文件主要起草人：张瑛、侯永青、李湘海、吕运凯、王世杰、陈永光、丁玉强、杨安山、孙英杰、熊绍凯、张书芳、章祥华、焦志刚。

本文件2014年首次发布为YS/T 999-2014。

铜及铜合金毛细管涡流检测方法

* 1. 范围

本文件描述了铜及铜合金毛细管的穿过式和旋转式涡流检测方法，内容包括原理及方法概述、一般要求、标准人工缺陷样管、检测步骤、检测结果评定及检测报告。

本文件适用于规格为：外径（Φ0.5mm～6.1mm）×内径（Φ0.3mm～4.45mm）的铜及铜合金毛细管涡流检测。

* 1. 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 5248-2016 铜及铜合金无缝管涡流检测方法

GB/T 9445-2015 无损检测人员资格鉴定认证

GB/T 12604.6-2021 无损检测术语

* 1. 术语和定义

GB/T 5248-2016和GB/T 12604.6-2021界定的术语和定义适用于本文件。为便于使用，以下重复列出了GB/T 5248-2016和GB/T 12604.6-2021中的某些术语和定义。

信噪比signal to noise ratio

在涡流探伤仪器输出端缺陷信号的幅度与最大噪声信号的幅度之比。

[来源：GB/T 5248­­-2016, 2.3]

激励频率 excitation frequency

激励电流的标称频率。

[来源：GB/T 12604.6-2021,3.1.18]

探头 probe

包含激励元件和接收元件的涡流传感器。

[来源：GB/T 12604.6-2021,3.3.40]

线圈填充系数 coil fill factor

（外穿式线圈）被检件外横截面积与线圈内横截面积之比。

[来源：GB/T12604.6-2021,3.3.9]

相位分析 phase analysis

对涡流检测信号的相位角进行测量和分析的技术。

[来源：GB/T 12604.6-2021,3.6.11]

调制分析 modulation analysis

对调制后的涡流信号进行分析的技术。

[来源：GB/T 12604.6-2021,3.6.10]

标准透入深度 standard depth of penetration

磁场强度或感应涡流密度衰减至被检件表面值的37%时的深度。

1. 以下计算公式适用于采用平面电磁波在半无限大金属导体中激励产生涡流的情况。
2. 标准透入深度的表达式为：

 $δ=\frac{1}{\sqrt{πfσμ}}$ ()

式中：

δ ——标准透入深度，单位为毫米（mm）

*μ* ——磁导率，单位为亨每米(H/m)；

*σ* ——电导率，单位为西门子每米(S/m)；

*f ——*激励频率，单位为赫兹（Hz）。

 [来源：GB/T 12604.6-2021，3.1.37]

旋转探头rotating probe

旋转检测的放置式探头。

[来源：GB/T 12604.6-2021,3.3.47]

穿过式探头feed through probe

仅包含与被检件同轴线圈的探头。

[来源：GB/T 12604.6-2021,3.3.8]

* 1. 原理和方法
		1. 原理

当带有交变磁场的探头在接近被检管材时，在管材表面和近表面产生涡电流及相应的涡流磁场。涡流磁场的作用是削弱和抵消激励磁场。削弱和抵消程度取决于被检管材的物理性能。管材中存在的缺陷会改变这些作用，引起探头的阻抗变化。通过涡流仪器检测阻抗的变化信号，能评价被检管材是否存在缺陷。

* + 1. 方法

管材的涡流检测通常是让被检管材沿其长度方向穿过一个或几个使用同一激励频率的检测线圈绕组来进行。其检测线圈绕组阻抗因管材规格、电导率、磁导率以及管材中缺陷变化而变化。当管材通过探头时，管材这些变量所引起电磁感应信号发生变化，经过仪器对信号进行放大、滤波、解调等处理，将这些变化区分出来，自动进行判别、记录、生成检测报告，检测报告可通过外接打印设施打印；与此同时发送信号到声、光等报警装置，发出缺陷报警；联动标记设施在缺陷位置做上标记。

* + 1. 检测灵敏度

涡流检测的灵敏度是以标准样管上人工缺陷当量大小来衡量的。但人工缺陷的尺寸不应解释为涡流检测可以检测到的缺陷最小尺寸。检测灵敏度与涡流密度有关，而涡流密度在管壁内部随着距管材外表面距离增加而呈指数曲线下降，所以检测灵敏度也随管材壁厚方向由外向内下降。

* + 1. 检测盲区

管材涡流检测中因端部效应而形成管材两端头一定范围不可检测区（即盲区）,对于毛细铜管的直条管或盘管涡流检测均是在连续和自动化进行，盲区大小可以忽略。

* + 1. 探头选择

对于管材上横向缺陷、孔伤及非连续性纵向缺陷，应采用穿过式探头进行检测；对于管材上纵向连续性缺陷采用旋转探头进行检测。

* + 1. 干扰信号

本方法可能得到某些信号与质量无关，如工装夹具痕迹等产生的信号。任何超过报警电平的信号，均应首先视作缺陷信号。为了避免非质量缺陷形成信号导致的误判，可以重新检测或者用其他无损检测方法证实不是缺陷信号。

* 1. 一般要求
		1. 人员

涡流检测人员应经过专业培训、考核，按照GB/T 9445-2015的要求取得相应级别的资质后持证上岗。出具检测报告人员应至少具有Ⅱ级技术资格，仲裁人员应具有Ⅲ级技术资格。

* + 1. 环境
			1. 涡流检测工作区域及附近不应有影响仪器设备正常工作的强电磁场、震动、腐蚀性气氛等干扰因素。
			2. 涡流检测工作区域的温度和湿度应控制在仪器设备允许的范围内。
		2. 被检管材

被检管材内、外表面应清洁无异物，不能有加工毛刺。

* + 1. 探头
			1. 使用类型

本文件推荐采用穿过式探头检测，也可同时采用旋转探头检测。

* + - 1. 线圈填充系数

填充系数可参照表1。

1. 产品各规格的填充系数参考值

| 管材外径/mm | ＜1.5 | ≥1.5～＜2.5 | ≥2.5～＜4.0 | ≥4.0 |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 填充系数 | ≥0.3 | ≥0.4 | ≥0.5 | ≥0.6 |

* + 1. 涡流检测仪器
			1. 涡流检测仪应采用带通滤波器，在线和盘矫直涡流检测推荐采用速度自适应涡流检测仪。
			2. 涡流检测设备综合性能技术指标应符合表2的规定，各项指标的测试方法按附录A的规定进行。
1. 涡流检测设备的综合性能指标

| 手动测试 | 自动测试 | 盲区 |
| --- | --- | --- |
| 周向灵敏度差 | 信噪比(S/N) | 人工缺陷大小分辨力γ | 长时间稳定性 | 检测能力（确保信噪比） | 人工缺陷误报率K2 | 人工缺陷漏报率K1 | 间距分辨力 | 打标对应率 | 检测能力（确保信噪比） |
| ≤3dB | ≥10dB | ≤0.1mm | 灵敏度波动值≤2dB | 能否检出（b×h）0.15mm×0.10mm的槽伤 | ≤3% | ≤1% | ≤20mm | 色带长度300mm～600mm伤点偏离色带中心50 mm | 能否检出（b×h）0.15mm×0.10mm的槽伤 | 忽略不计 |

* + 1. 传动装置
			1. 盘矫直定尺管涡流检测装置

盘矫直定尺管涡流检测装置主要包括：喂料进管、矫直、前后导向定心、测速系统、定尺切割装置、分选机构和集料架。其要求是：

1. 便于对被检毛细铜管进行准确的同心度调节；
2. 毛细铜管检测过程中应行进平稳、振动量小；
3. 速度测量准确，同步误差小于检测速度的15%；
4. 分选、切割机构运行协调顺畅。
	* + 1. 盘管涡流检测装置

盘管涡流检测装置主要包括：进料、矫直、探头机座、测速系统、标记（如切除缺陷）、缠绕等，其要求是：

1. 便于对被检毛细管的同心度进行准确调节；
2. 毛细铜管行进稳定，振动量小；
3. 报警和有缺陷部分产品切除同步进行；
4. 操作方便。
	1. 标准人工缺陷样管
		1. 样管

毛细铜管涡流检测的灵敏度调节、检测结果的评定和检测仪器设备综合性能测试均以标准人工缺陷样管进行当量比较。

* + 1. 样管选材

标准人工缺陷样管应选用与被检管材的合金牌号、规格、表面状态和热处理状态相同的无自然缺陷的低噪声管材。

* + 1. 样管分类

毛细铜管涡流检测的标准人工缺陷样管分为检测灵敏度调节标准人工缺陷（标准孔伤）样管、检测灵敏度调节标准穿过式检测人工缺陷（标准人工矩形槽）样管、检测灵敏度调节标准旋转式检测人工缺陷（标准人工矩形槽）样管和仪器设备综合性能测试标准人工缺陷样管四种，见图1、图2、图3、和图4。

单位为毫米



说明：

d₁ ——标准人工缺陷孔径；

d ——管材外径；

t ——管材壁厚；

1. 灵敏度调节标准人工缺陷（标准孔伤）样管示意图

单位为毫米



说明：

b ——人工标准矩形槽宽；

h ——人工标准矩形槽深；

d ——管材外径；

t ——管材壁厚；

1. 灵敏度调节标准人工缺陷（穿过式标准人工矩形槽）样管示意图

 单位为毫米



说明：

b ——人工标准矩形槽宽；

h ——人工标准矩形槽深；

l ——人工标准矩形槽长；

d ——管材外径；

t ——管材壁厚；

1. 灵敏度调节标准人工缺陷（旋转式标准人工矩形槽）样管示意图

单位为毫米



说明：

b ——人工标准矩形槽宽；

h ——人工标准矩形槽深；

d ——管材外径；

t ——管材壁厚；

毛细铜管涡流检测仪器设备综合性能测试标准人工缺陷样管

* + 1. 穿过式检测标准人工缺陷样管为标准人工矩形槽（槽壁管外壁表面垂直）和垂直于管壁的圆形通孔，毛细铜管检测灵敏度和毛细铜管涡流检测仪器设备综合性能测试标准人工缺陷尺寸见表3。 旋转式检测标准人工缺陷样管为标准人工矩形槽，标准人工缺陷尺寸见表4。标准样管不应有加工毛刺和管壁的加工变形。尺寸偏差应不大于±0.02mm。
1. 穿过式检测标准人工缺陷样管尺寸表

单位为毫米

| 外径（d） | 壁厚（t） | 普通级 | 高精级 |
| --- | --- | --- | --- |
| 槽宽（b） | 槽深（h） | 槽宽（b） | 槽深（h） |
| ＜3.0 | ＜0.60 | 0.20 | 0.10 | 0.15 | 0.10 |
| ≥0.60 | 0.20 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| ≥3.0 | ＜0.40 | 标准样管缺陷孔径（d1）：Φ0.30 | 0.15 | 0.15 |
| ≥0.40 | 标准样管缺陷孔径（d1）：Φ0.40 | 0.15 | 0.20 |
| 1. 家用冰箱、空调用毛细管，推荐采用普通级。航空、航天、医疗用等高要求毛细管，推荐采用高精级。
 |

1. 旋转式检测标准人工缺陷样管尺寸表

单位为毫米

| 外径（d） | 壁厚（t） | 槽宽（b） | 槽深（h） | 槽长（l） |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| ＜3.0 | ＜0.60 | 0.05 | 0.03 | 10.00 |
| ≥0.60 | 0.05 | 0.04 | 10.00 |
| ≥3.0 | ＜0.40 | 0.05 | 0.04 | 10.00 |
| ≥0.40 | 0.05 | 0.05 | 10.00 |

* 1. 检测步骤
		1. 涡流检测仪器和设备预热及检查

仪器和设备均应开机预热30分钟，检查输入、输出、警示灯及喷墨打标正常后，方可投入使用。

* + 1. 标准人工缺陷样管选择

按第6.2条要求选择。

* + 1. 探头的选择

根据毛细铜管的规格按第5.4条要求选择，并配置相应的导套。

* + 1. 传动装置的调整

调节导向装置和探头机座使探头与被检毛细铜管同心，毛细铜管行进顺畅，确认配置的测速和实际速度一致，标记处于缺陷位置。

* + 1. 涡流检测仪器参数调节
			1. 检测频率调节

检测频率选择要满足第3.7的条件。

* + - 1. 相位调节

确认干扰信号相位，抑制干扰信号，提高信噪比。

* + - 1. 滤波设置与检测速度关系

滤波设置与检测速度自动匹配（或调试匹配）。

* + - 1. 报警电平设置

报警电平设置约为屏高50%，应符合：

1. 三个120°方向标准人工缺陷信号的平均幅值达到设置报警电平线，其误差不大于2dB；
2. 任何噪声幅值高度小于报警电平的20%。
	* + 1. 基准检测灵敏度调节
				1. 手动基准检测灵敏度调节

当采用手动调节检测灵敏度时，应匀速拉动（图1、图2和图3）标准样管，使三个120°方向标准人工缺陷的信号幅值均达到报警电平高度，则确认其为基准检测灵敏度。

* + - * 1. 机械传动基准检测灵敏度调节

进行综合性能测试的灵敏度调节用综合性能测试样管（图4），应注意稳定行进调节增益，使三个120°方向标准人工缺陷的信号幅值均达到报警电平高度，则确认其为基准检测灵敏度。

* + - 1. 检测灵敏度调节

在基准检测灵敏度基础上提高2dB作为检测灵敏度并确认，进行逐盘（根）检测。

* + 1. 检测灵敏度过程校验

每班次或更换规格后均应按第7.5.6条的要求进行检测灵敏度校验，当检测灵敏度变化大于2dB，应对上次至本次校验之前的管材进行复检。

* 1. 检测结果的评定
		1. 缺陷信号正常

被检毛细铜管的缺陷信号幅值不大于报警电平（不报警），评定此管合格。

* + 1. 缺陷信号异常

如果缺陷信号有异常，应进行复检或用其他无损检测方法确认，方可评定。

* + 1. 噪声信号干扰

对于噪声显示超过20%屏高，应分析噪声形成原因或采用其他无损检测方法进行检测。

* 1. 检测报告

检测报告应包括如下内容：

1. 铜及铜合金毛细管生产企业名称或委托单位名称；
2. 检测日期和报告填发日期；
3. 铜及铜合金毛细管的牌号、规格、状态、批号等；
4. 涡流检测仪名称及型号、探头规格及编号；
5. 检测数量及验收合格数量；
6. 执行的涡流检测标准的编号；
7. 执行的标准人工缺陷及编号；
8. 检验人员和审核人员签名、检测部门盖章；
9. 其他。
10.
11. （规范性）
铜及铜合金毛细管涡流检测设备的综合性能测试方法
	1. 范围

本附录规定了铜及铜合金毛细管涡流检测设备的综合性能（手动和自动）测试条件、方法和测试项目，以及应达到的最低性能指标。

* 1. 测试条件
		1. 涡流检测仪器应符合5.5的规定。
		2. 测试时分手动测试和自动测试两种测试方法。
	2. 标准人工缺陷样管

标准人工缺陷样管的制作应符合第6章的规定。

* 1. 测试项目和方法
		1. 手动测试
			1. 周向灵敏度差（Z）

调节检测的灵敏度（增益值），使（图1、图2、图3）标准人工缺陷样管中间的3个人工缺陷刚好报警，并且连续行走5次都报警，记下此时的增益值为Z₁。继续调节检测的灵敏度（增益值），使标准人工缺陷样管中间的3个人工缺陷刚好不报警，并且连续行走5次都不报警，记下此时的增益值为Z₂。

 $Z=Z\_{1}−Z\_{2}$ (A.1)

式中：

Z ——周向灵敏度差，单位为分贝（dB）；

Z₁——标准人工缺陷样管中间的3个人工缺陷刚好报警的增益值，单位为分贝（dB）；

Z₂——标准人工缺陷样管中间的3个人工缺陷刚好不报警的增益值，单位为分贝（dB）。

* + - 1. 信噪比（S/N）

调节检测的灵敏度（增益值），使（图1、图2、图3）标准人工缺陷样管中间的3个人工缺陷刚好报警，并且连续行走5次都报警，记下此时的增益值为Z₁。继续调节检测的灵敏度（增益值），使噪声刚好报警，并且连续行走5次都报警，记下此时的增益值为Z₃。

 ${S}/{N=Z\_{1}−Z\_{3}}$ (A.2)

式中：

S/N ——信噪比;

Z₁——标准人工缺陷样管中间的3个人工缺陷刚好报警的增益值，单位为分贝（dB）；

Z₃——噪声刚好报警的增益值，单位为分贝（dB）。

* + - 1. 人工缺陷大小分辨率

在相同的灵敏度（增益值） 条件下，刚好报警的人工缺陷孔径d₁与刚好不报警的人工缺陷孔径d₂之间的差值即人工缺陷大小分辨率，见图5。连续测试5次。

 $γ=d\_{1}−d\_{2}$ (A.3)

式中：

γ——人工缺陷大小分辨率

d₁——刚好报警的人工缺陷孔径；

d₂——刚好不报警的人工缺陷孔径；

单位为毫米



说明：

d₁ ——刚好报警的人工缺陷孔径；

d₂= d₁-0.1

d ——管材外径；

t ——管材壁厚。

* 1. 人工缺陷大小分辨率（标准孔伤）样管示意图
		+ 1. 长时间稳定性

在检测设备连续运行2小时后，重新按照A.4.1.1和A.4.1.2测试周向灵敏度差和信噪比，其波动值不大于2dB,否则应按照A.4.1.1和A.4.1.2重新测试。

* + - 1. 检测能力

在确保信噪比条件下（S/N≥10dB），检测该仪器能否检出0.15mm×0.10mm槽伤。

* + 1. 自动测试
			1. 人工缺陷误报率、人工缺陷漏报率、间距分辨率、打标对应率、0.15mm×0.10mm槽伤检测能力，一次性由长管通过在线装置获得，认真核对仪器报警计数和控制箱报警计数。
			2. 测试后，检查色带长度及伤点偏离色带中心长度。

