ICS 19.100
CCS J 04

T/CS

团 体 标 准

T/CS 020—2024

无损检测-金属材料涡流阵列检测技术规范

Non destructive testing-technical specification for eddy current array testing of metallic materials

2025－03－06 发布 2025－03－06 实施

中国商品学会 发 布

目　　次

前言 II
1　范围 1
2　规范性引用文件 1
3　术语和定义 1
4　缩略语 1
5　一般要求 2
6　校准和校验 5
7　技术 5
8　检测 6
9　检测结果评定 7
10　验收准则 7
11　文件 8
附录 A（规范性）　演示试样 9

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。

请注意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。

本文件由中国商品学会归口。

本文件起草单位：中兴海陆工程有限公司、上海船舶工艺研究所（中国船舶工业集团公司第十一研究所）、南通中远海运重工装备有限公司、招商局重工（江苏）有限公司、中建八局新型建造工程有限公司、广州惟恒知识产权服务有限公司。

本文件主要起草人：孙圣辉、王希平、韦爱民、丁兵、刘会议、郑中举、姜殿忠、屈冰、欧嫦娥。

无损检测-金属材料涡流阵列检测技术规范

1 范围

本文件规定了金属材料涡流阵列检测技术规范的缩略语、一般要求、校准和校验、技术、检测、检测结果评定、验收准则、文件。

本文件适用于使用涡流阵列（ECA）技术检测金属材料的表面和近表面缺陷及其尺寸定量。其他导电材料的检测可参照执行。

2 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 9445 无损检测 人员资格鉴定与认证

GB/T 12604.6 无损检测 术语 涡流检测

GB/T 20737 无损检测 通用术语和定义

3 术语和定义

GB/T 12604.6、GB/T 20737 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

涡流阵列检测技术 eddy current arry（ECA） testing technology

电子驱动多个按一定方式排布的线圈，能够一次完成大面积扫查，并对检测结果进行 C 扫描显示的涡流检测技术。

3.2

相幅图 phase-amplitude diagram

也称阻抗平面图，描述检测线圈阻抗随检测参数变化函数关系的坐标点轨迹图。

3.3

C 扫描 C-scan

一种对被检工件表面进行二维探测响应的数据显示方式，横坐标和纵坐标代表探头在工件表面的位置，像素色彩或灰度代表在工件表面的探测响应。

3.4

拓扑 topology

按规律排布的线圈的几何结构。

3.5

拓扑技术 topology technology

如何将多个线圈布置在一个探头内部，且如果控制它们实现不同的激励与接收组合，从而建立一个或多个涡流阵列通道。

3.6

平衡 balance

信号检测工作点补偿至预定值的一种信号处理。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件：

ECA：涡轮阵列（Eddy Current Array）

SNR：信噪比（Signal to Noise Ratio）

EC：涡流（Eddy Current）

ECT：涡流检测（Eddy Current Testing）
MT：磁粉检测（Magnetic Particle Testing）
PT：渗透检测（Penetrant Testing）

5 一般要求

5.1 检测人员

5.1.1 按照本文件实施检测的人员，应按照 GB/T 9445 或者合同各方均同意的体系进行资格鉴定与认证。

5.1.2 实施涡流阵列（ECA）检测的人员的最低资格等级应为涡流检测（ECT）II 级，并经过至少 20 h 的 ECA 补充培训。

5.1.3 涡流阵列（ECA）检测方法使用的补充培训至少应包括以下主题：

a) 对特定的涡流阵列（ECA）硬件和软件进行培训；
b) 涡流阵列（ECA）检测的优点和局限性；
c) 涡流阵列（ECA）探头类型、构造和操作；
d) 通道标准化；
e) C 扫描解释；
f) 相位-幅度数据分析解释；
g) 编码扫查。

5.2 检测设备和器材

5.2.1 涡流阵列（ECA）检测仪器

5.2.1.1 涡流阵列（ECA）仪器应基于通道多路复用或并行通道系统来管理涡流阵列（ECA）探测信号。

5.2.1.2 涡流阵列（ECA）仪器最小使用频率范围应为 1 kHz 至 4 MHz。

5.2.1.3 涡流阵列（ECA）仪器及其相关软件应符合以下要求：

a) 允许通过对每个线圈通道的数据响应进行单独的调整（例如缩放）来标准化涡流阵列（ECA）探测信号响应，以便在阵列通道之间提供统一的响应和灵敏度（即通道标准化）；
b) 将数据显示为二维 C 扫描，允许进行基于图像的分析。在传统的相幅图和带状图视图中也应显示数据；
c) 允许调整编码器设置和显示分辨率（mm/样本）；
d) 允许以评估和存档存储的格式记录涡流阵列（ECA）数据。

5.2.2 探头

5.2.2.1 基本要求

探头应满足以下基本要求：

a) 应提供超出被检区域 3 mm 的覆盖范围，否则需使用多次重叠扫查；
b) 在整个阵列传感器上表现出均匀的灵敏度，可能需要叠加单个传感元件来达到均匀的灵敏度水平（例如典型的多行交错的单个传感元件）。针对检测的目的，对于同一参考试块缺陷的多次扫查，应保持至少达到检测到的最大振幅的 60%的振幅响应。阵列线圈灵敏度变化见图 1；
c) 允许探测所有方向上体积性和线性表面断裂缺陷；
d) 匹配被检区域的几何形状，以最小化被检表面与单个传感元件之间的距离（即“提离”）。

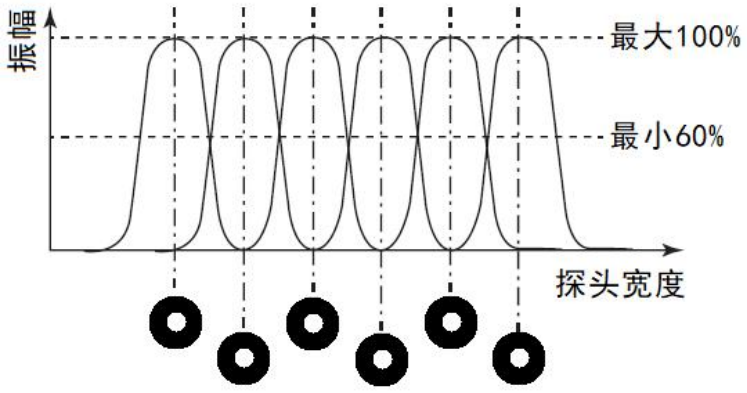


图 1　阵列线圈灵敏度变化

注：对同一缺陷的多次扫查应始终保持至少达到检测到的最大振幅的 60%。

5.2.2.2　探头的拓扑技术

根据探头内部线圈（传感元件）激励与接收的不同组合工作模式，探头的拓扑技术分为阻抗式和激励/接收分离式两种：

a)　阻抗式：阻抗式主要指基于常规涡流技术，一个或一组线圈既做激励又做接收的一种工作模式，其主要优势是在提离较小的情况下，对任何方向缺陷均有较好的灵敏度和检出率。阻抗式又常分为两种经典模式：

——绝对式——单个线圈被激励且独立工作，激励涡流场并感应涡流场本身的变化；

——差动式——两个线圈被同时激励工作，如果两个线圈经过没有缺陷的区域，涡流场无变化，两者的响应值无差异，因为两者都在同样的工件上进行工作。如果一个线圈检测到缺陷而另外一个线圈还在工件完好区域，将产生一个信号差值，利用此特性可以对缺陷进行一定的评估。

b)　激励/接收分离式：激励/接收分离的拓扑技术是涡流阵列探头主要的一种工作模式，通常须由两排线圈协同工作，组成纵向（轴向）通道和横向（周向）通道。纵向（轴向）通道用于检测垂直于线圈阵列排布方向的缺陷，横向（周向）通道主要用于检测平行于线圈阵列排布方向的缺陷。激励/接收分离式也分为两种模式：

——长距，单激励——这种拓扑技术使用了一种较为传统的产生涡流信号的方法：利用一个线圈作为激励源。这种单激励方式是检测较大和（或）近表面缺陷较优的选择，且长距单激励技术相对短距双激励技术对提离高度变化较为不敏感，可以容忍更大的提离变化。见图 2；



图 2　长距，单激励模式

——短距，双激励——这种拓扑技术使用了两个线圈同时作为激励源，形成一个更大的激励源。激励源越大，相对单激励模式缺陷响应更强，灵敏度更高。然而在同样线圈数量基础上，双激励形成的通道数会少于单激励通道数。见图 3。



图 3　短距，双激励模式

5.2.2.3　应根据检测目的选择合适的涡流阵列（ECA）探头以及拓扑技术。

5.2.3 编码器

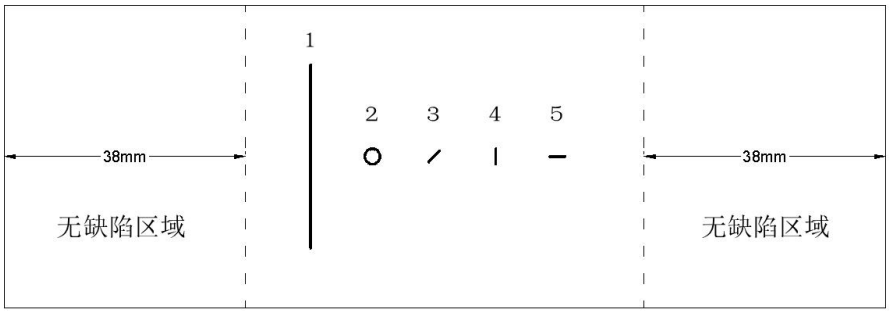
编码器应有足够的分辨率，应能保证扫查方向上的位置测量精度。

5.2.4 参考试块

5.2.4.1 参考试块应采用与待检材料等级相同的材料制造。参考试块提离信号与被检材料提离信号的差值应在±5 ° 范围内，否则应采用更接近被检试件的材料重新加工制作参考试块。

5.2.4.2 参考试块的表面粗糙度应代表待检部件表面的表面粗糙度。

5.2.4.3 参考试块应在纵向扫查方向的开始和结束处有一个 38 mm 的无缺陷区域。铁磁和非铁磁参考试块应至少有一个平底孔和三个表面槽。表面槽应包括斜向（即 45 °）、横向和纵向方向。同一纵向方向的缺陷之间距离至少应为 13 mm。平底孔的最大直径和深度各为 1.5 mm 和 1.0 mm。每条槽的长度、宽度和深度的最大值各为 1.5 mm、0.25 mm 和 1.0 mm。此外，铁磁和非铁磁材料的参考试块应有恒定深度的长横槽，用于通道标准化。长横槽的长度应超过涡流阵列（ECA）探头线圈的覆盖范围，至少为 25 mm，宽度和深度的最大值应为 0.25 mm 和 1.0 mm。见图 4。



标引序号说明：

1 — 长横槽；

2 — 平底孔；

3～5 — 表面槽。

图 4 参考试块

5.2.4.4 当被检区域是曲面，需使用具有匹配轮廓表面的刚性探头时，应使用具有上述参考缺陷的特定几何形状的代表性参考试样。

5.2.4.5 参考试块制造过程中的加工应避免过度冷加工、过热和应力，以防止磁导率变化。

5.3 检测环境

5.3.1 实施检测的场地温度和相对湿度应控制在涡流阵列（ECA）检测设备和被检工件允许的范围内。

5.3.2 检测场地附近不应有影响涡流阵列（ECA）检测设备正常工作的磁场、震动、腐蚀性气体及其他干扰。

5.4 工艺规程

5.4.1 要求

涡流阵列（ECA）检测应按照工艺规程进行，该规程至少应包括表 1 中所列出的要求。对于每一个要求，工艺规程应确定一个值或几个值范围。

表 1 涡流阵列（ECA）检测工艺规程要求

要求	重要变数	非重要变数
仪器（制造商、型号）	X	—
探头（制造商、型号）	X	—
ECA 探头拓扑结构	X	—
检查频率、驱动电压和增益设置	X	—
扫查模式（如手动、机械化或远程控制）	X	—

表1　涡流阵列（ECA）检测工艺规程要求（续）

要求	重要变数	非重要变数
扫查计划、覆盖范围、重叠部分和扫查方向	X	—
校准用参考试块的标识	X	—
沿扫查轴的最低采样密度（样本/mm）	X	—
表面条件	X	—
数据采集时的最大扫查速度	X	—
人员资格	X	—
数据记录	—	X
数据分析参数	—	X
检查的样品编号	—	X

5.4.2　鉴定

5.4.2.1　当相关规范规定工艺规程要鉴定时，表 1 中重要变数的要求的变化，应通过演示对工艺规程进行重新鉴定。非重要变数的要求的变化，不要求对工艺规程进行重新鉴定。

5.4.2.2　所有工艺规程规定的重要或非重要变数发生变化，均应对工艺规程作出修改或增补。

5.4.3　演示

5.4.3.1　工艺规程应按照有关规范的要求进行演示，并使检验人员和负责的 III 级人员满意。

5.4.3.2　推荐使用附录 A 中所述试样进行演示。

6　校准和校验

6.1　设备校准

每年应对涡流阵列（ECA）仪器进行校准，当设备损坏和/或进行任何重大维修后，也应进行校准。涡流阵列（ECA）仪器应附有显示最新校准日期和校准到期日期的标签。

6.2　系统校验和验证

6.2.1　检测设备的系统校验应使用工艺规程中规定的参考试块进行。该校验应包括完整的涡流检查系统，并应在检测开始前进行。

6.2.2　当出现下列情况之一时，应使用参考试块进行校验验证：

a)　导致信号饱和的材料特性变化；

b)　检测新的部件；

c)　检测设备疑似运行不正常。

6.2.3　连续检测时每 2 h，或一系列检测结束时应进行校验验证。当校验结果异常时，应重新进行上一次校验正常之后的所有检测。

7　技术

7.1　频率、探头驱动和增益选择

7.1.1　可以采用单频或多频技术。频率的选择应使提离信号和参考缺陷之间的相位张角最大化。

7.1.2　应调整探头驱动和增益，直到参考缺陷的响应具有基于数据幅度的信噪比（SNR）大于 3。

7.2　相位调节

7.2.1　相位调节应有利于缺陷响应信号与提离干扰信号的区分和识别，通常将提离信号的相位调节为水平方向（0 ° 方向）。

7.2.2　涡流响应信号会随着检测频率的改变而变化，因此在每次改变检测频率后，应重新调节提离信号的相位，使其处于水平方向。

7.2.3　缺陷响应信号与提离信号之间应有尽可能大的相位差，必要时，可通过调节缺陷响应信号的垂

直、水平比来增大缺陷响应信号与提离信号间的相位差。

7.3 通道标准化

如果为检测选择的拓扑技术具有不同的通道类型（例如纵向和横向灵敏度），则应对每种通道类型进行通道标准化。通过传统的相幅图对各阵列通道的缺陷响应进行复查，确保通道标准化成功完成。通道标准化过程应在带有已知长度、宽度和深度机加工槽的参考试块上进行。如果可以证明与机加工槽有相同的功能，则可以使用其他参考点，如已知的提离效应或金属-空气过渡区。

7.4 调色板调整

为了区别于提离效应、几何形状变化和非缺陷相关信号，应调整调色板比例，直到能清楚地辨别参考缺陷。

7.5 滤波

干扰信号影响检测灵敏度时，允许使用滤波器过滤干扰信号，保留缺陷信号。

7.6 应用要求

7.6.1 扫查速度

扫查速度不得超过对参考试块缺陷进行检测的速度。所有缺陷的基于数据幅度的信噪比（SNR）应保持在大于 3。沿扫查轴的最低取样密度应为 2 个/mm。

7.6.2 有涂层表面

7.6.2.1 在检测有涂层材料时，参考试块上的涂层厚度应为涂层规范允许的检测面的最大厚度。可用塑料绝缘片模拟非导电涂层进行工艺鉴定。

7.6.2.2 使用工艺规定的最大扫查速度，应证明该工艺能够穿过最大涂层厚度同样地检测参考试块缺陷。所有缺陷的基于数据幅度的信噪比（SNR）应保持在大于 3。

7.6.3 磁导率变化

若沿扫查轴的磁导率变化使相幅图上的涡流阵列（ECA）数据信号饱和，则检测技术人员应使用参考试块进行系统校准验证，将探头置于受影响的区域重新平衡仪器，并重新扫查该区域。

7.6.4 自动化数据筛选系统

当使用自动涡流数据筛选系统（如报警装置）时，每个系统都应按照书面规程进行鉴定。

7.6.5 编码器校准

7.6.5.1 检测前应对编码器进行校准。

7.6.5.2 校准方式是使编码器移动一定的距离（不小于 500 mm）时，对涡流阵列（ECA）设备所显示的位移长度与实际移动长度进行比较，其误差应不小于 1%，最大不超过 10 mm。

8 检测

8.1 资料审查和现场勘查

在实施检测前，检测人员应了解被检材料的以下信息：

a) 材质；
b) 几何形状、位置及检测范围；
c) 表面状态；
d) 涂层类型和厚度。

8.2 表面条件

应清洗材料表面，以清除松散的铁磁性、导电性和非导电性碎屑。

8.3 平衡

将探头放置与工件上进行扫查前，应先对仪器进行信号平衡操作。当工件磁导率异常时，应按 7.6.3 进行操作。

8.4 扫查

8.4.1 施加于涡流阵列（ECA）探头的压力应足以与被检部件保持接触。使用适形阵列探头时，应对所有线圈施加一致的压力。

8.4.2 应通过重叠扫查对被检区域进行检测。沿扫查轴（即扫查方向）的重叠部分应包括上次扫查末端的至少一个探头宽度。沿步进轴的重叠部分应包括之前的扫查宽度的 6 mm。扫查的重叠区域见图 5。

注：探头长度重叠值 6 mm是基于探头体内的线圈感应的长度。

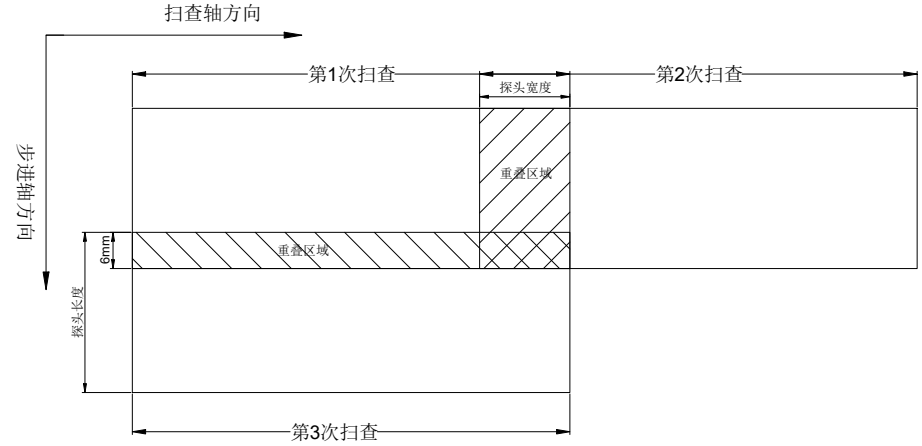


图 5 扫查的重叠区域

8.4.3 当不使用编码器时，缺陷位置可以通过补充的手动单通道涡流检测（ECT）技术来确认。

注：前提是它已经通过性能演示鉴定合格。

9 检测结果评定

9.1 相关显示和非相关显示判别

9.1.1 非相关显示可能是由于探头与表面的接触不一致、由几何特征引起的探头运动或被检表面的材料性质变化而产生的。对于一个显示，其相位响应相当于参考试块上的缺陷响应，且不能辨别为非相关显示的，应作为缺陷进行评定和报告。

9.1.2 如果还需要进一步对相关显示进行澄清，或当确定要去除缺陷时，建议用磁粉检测（MT）或渗透检测（PT）等其他无损检测方法进行验证检测。

9.2 长度定量

应利用编码器来准确地测量缺陷长度。编码器的分辨率值应设置为最多 0.38 mm/样本。

9.3 深度评估

9.3.1 如合同规定有缺陷深度评定要求，可采用加工了不同深度人工缺陷的模拟试块评估缺陷深度。

9.3.2 根据缺陷显示的信号幅值与模拟试块上相关深度人工缺陷的信号幅值的比较，评估缺陷的深度。缺陷显示信号的相位可作为缺陷深度评估的参考信息。

10 验收准则

验收准则及被检件的后续处理应在工艺规程或者合同规定的书面程序中规定。

11 文件

11.1 检测报告

11.1.1 检测报告应包含足够的信息，以便于相同的检测可以重复实施。

11.1.2 检测报告宜包括以下信息：

a) 被检试样的所有者、位置、类型、序列号和标识；
b) 被检材质；
c) 试样编号系统；
d) 被检表面区域尺寸；
e) 执行检测的人员；
f) 检测日期；
g) ECA 设备制造商、型号和序列号；
h) ECA 探头制造商、型号和序列号；
i) 仪器硬件设置（频率、探头驱动、增益和采样率）；
j) 参考试块的编号、材质和图纸；
k) 使用的规程、识别号和版本；
l) 使用的验收准则；
m) 试样灵敏度受限区域或其他灵敏度降低区域的识别；
n) 检测结果及被检区域的相关草图或地图；
o) 用于进一步调查或确认测试结果的补充试验；
p) 延长的电缆，及其制造商、类型和长度；
q) 涡流检测人员的资格等级；
r) 有要求时的涂层厚度表。

11.1.3 检测报告的格式应在采购合同中议定。

11.2 记录保存

检测的各项记录文件应按照相关规范的要求进行保管。

附 录 A
（规范性）
演示试样

A.1 演示试样的材质应符合正文 5.2.4.1 条的要求，长度×宽度×厚度为 200 mm×100 mm×4 mm，如图 A.1 所示划分为 3 个测试区，相邻两个测试区之间正背面各设置长槽分隔，槽深×宽均为 1 mm×1 mm。

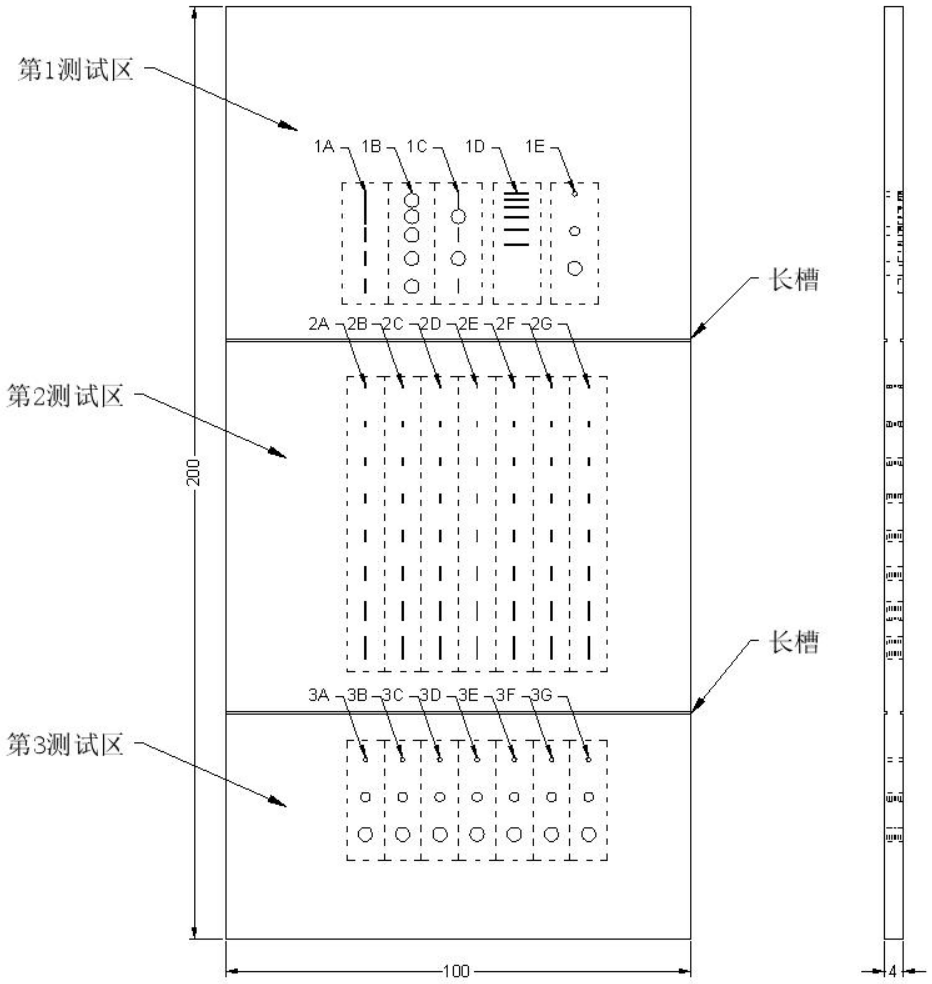


图 A.1 演示试样型式

A.2 第 1 测试区设有 5 组人工缺陷：

a) 1A 组为 5 条纵向线槽，槽长×深×宽均为 3 mm×1 mm×0.1 mm，槽端间距分别为 0.5 mm、1 mm、2 mm、3 mm；
b) 1B 组为 5 个平底孔，孔径×深度均为 3 mm×1 mm，孔边缘间距分别为 0.5 mm、1 mm、2 mm、3 mm；
c) 1C 组为 3 条线槽和 2 个平底孔混合，槽长×深×宽均为 3 mm×1 mm×0.1 mm，孔径×深度均为 3 mm×1 mm，槽端至孔边缘间距分别为 0.5 mm、1 mm、2 mm、3 mm；
d) 1D 组为 6 条横向线槽，槽长×深×宽均为 5 mm×1 mm×0.1 mm，间距分别为 1 mm、1.5 mm、2 mm、2.5 mm、3 mm；
e) 1E 组为 3 个通孔，孔径分别为 1 mm、2 mm、3 mm，孔中心间距 8 mm。

A.3 第 2 测试区设有 7 组线槽，每组线槽均有 8 条，线槽中心间距均为 8 mm，槽长分别为 0.5 mm、

1 mm、1.5 mm、2 mm、2.5 mm、3 mm、3.5 mm、4 mm，槽宽均为 0.1 mm，2A～2G 组槽深依次为：0.5 mm、1 mm、1.5 mm、2 mm、2.5 mm、3 mm、3.5 mm。

A.4 第 3 测试区设有 7 组平底孔，每组平底孔均有 3 个，平底孔中心间距均为 8 mm，孔径分别为 1 mm、2 mm、3 mm，3A～3G 组孔深度依次为：0.5 mm、1 mm、1.5 mm、2 mm、2.5 mm、3 mm、3.5 mm。