ASTM：指定编号 G32-10

使用振动装置研究气蚀的标准试验方法

G32 为颁布本标准的固定编号；在版本标识里，紧跟着固定编号的数字表示最初采纳或者最后一次修订标准的年份。圆括号中的数字表示最后一次重新核定的年份。上标 ε 表示对最后一个版本或者重新核定的版本有排版上的改变。

1 适用范围

1.1 本试验方法将使沉浸在液体里高频振动的样品表面产生气蚀损伤。在液体里样品的振动将导致气泡的产生和破裂，而这种气泡的溃裂将对样品表面产生破坏和冲蚀（材料损失）。

1.2 尽管本试验方法在流动系统或水压机里气泡产生的机制不同（见 5.1），但对材料的破坏机制基本相同。因此，本标准提供了一个小规模的、相对简单且易于控制的试验方法，以用来比较不同材料的抗气蚀性能，详细研究给定材料固有的抗气蚀性能和其过程，或在不同试验条件下研究不同的试验变量对材料产生损伤的影响。

1.3 本试验方法规定了包括样品的直径、振幅和频率在内的标准试验条件，以及试验液体和其容器。如果有合理的文献依据，本标准允许对一些试验条件有过偏差，以适用特殊目的的试验。本标准还提供了一个建立合适仪器的指南、试验和报告的步骤以及所要采取的预防措施。本标准还指定了必须用于验证仪器正常运转和定义标准抗气蚀性的参考材料。

1.4 本试验方法的历史记录见附录 X4，在综合文献后面。

1.5 本试验方法的数值单位为 SI，是本试验方法的标准单位，括号内给出的英制

单位仅供参考。

1.6 *本标准不能顾及到所有的安全问题，如果有安全问题，请参考其使用方法。该标准的使用者负责创建适当的安全和健康规程，并确定在使用之前，适用的规章制度。*对于具体的安全方法措施，见 6.1、10.3 和 10.6.1。

2 引用文件

2.1 ASTM 标准：

引用的 ASTM 标准，请访问 ASTM 网站 www.astm.org，或与 ASTM 客户服务 service@astm.org 联系。ASTM 标准年鉴信息，请参阅 ASTM 网站的标准文件摘要。

A 276 不锈钢试棒及型材标准

B160 镍条和镍棒标准

D211 铝及其铝合金棒材、条材和线材标准

D1193 试剂标准

E177 ASTM 试验方法中精密度和偏差术语的使用规范

E691 多个实验室研究管理规定，从而确保试验方法的精确度

E960 实验室玻璃烧杯标准

G40 磨损与腐蚀相关术语

G73 使用旋转装置研究液体冲蚀的标准试验方法

G117 多个实验室磨损和冲蚀试验数据精密计算和报告指南

G134 用喷液气蚀法测试材料固体冲蚀的标准试验方法

3 术语

3.1 定义：

3.1.1 参见 G40 关于气蚀的术语。为了方便，以下列举了本标准涉及到的重要术语定义。有些略有修订，也有一些术语 G40 没有涉及。

3.1.2 平均冲蚀率，[名词]——不是累积冲蚀率的首选术语。

3.1.3 空泡，[名词]——在液体中形成空穴或由蒸汽或者蒸汽与气体组成的混合气体形成的气泡，随后破裂。

3.1.3.1 解释说明——通常情况下，空泡是由于液体的流动（见流动气蚀）或固体分界的运动（见振动气蚀）引起液体中流体静压局部降低而形成的。众所周知，液体由于沸腾而产生气泡源于液体温度的升高。

3.1.3.2 解释说明——空泡一词本身并不是指它对固体表面的损伤和冲蚀。空泡对固体表面的损伤和冲蚀用空泡损伤和气蚀来表示。气泡或空穴只有在固体表面附近溃裂时，才具有对固体表面的破坏力。

3.1.4 气蚀，[名词]——由于空泡持续溃裂致使固体表面材料不断损失的过程。

3.1.5 累积冲蚀，[名词]——材料的新鲜表面暴露在气蚀或液体冲击的环境中，整个期间内材料从其表面损失的总量。（常用的更详细的术语有*累积质量损失*、*累积体积损失和累积平均冲蚀深度*。也可参见*累积冲蚀-时间曲线*。）

3.1.5.1 解释说明——在未特别注明的情况下，都是指在气蚀整个期间内，空泡或冲蚀的条件是相同的，材料表面也没有进行修补。

3.1.6 累积冲蚀率，[名词]——在穴蚀试验中，给定时间点的累积冲蚀与其相对应的暴漏时间的比值。也就是在累积冲蚀-时间曲线上，从原点到给定点直线的斜率。（也叫*平均冲蚀率*）

3.1.7 累积冲蚀-时间曲线——累积冲蚀与累积暴漏时间确定的点组成的图，通常取决于试验周期间断和样品的质量。这是冲蚀试验的原始记录。其他重要的特性，比如孕育期、最大冲蚀率、最终冲蚀率和冲蚀率-时间曲线，都来源于累积冲蚀-时间曲线。

3.1.8 冲蚀率-时间曲线，[名词]——瞬时冲蚀率和相对应的时间确定的点组成的图，通常由累积冲蚀-时间曲线的数值微分法或图解微分法来获得。（见*冲蚀率-时间图*）

3.1.9 冲蚀率-时间图，[名词]——对由几个可能存在的阶段而组成的冲蚀率-时间曲线形状的定性描述。

3.1.9.1 解释说明——对于气蚀和液体冲蚀，一个典型的冲蚀图谱有以下所有或几个“期”或“阶段”组成：孕育期、加速阶段、最大速率阶段、减速阶段、最终阶段以及突发灾难性破坏阶段。进行定量测试时，建议使用术语“期”，“阶段”更适用于定性描述。

3.1.10 冲蚀起始时间，[名词]——平均冲蚀深度达到 1.0 μm 所需要的暴露时间。

3.1.10.1 解释说明—— 平均冲蚀深度 1.0 μm 是最小准确测量值，要考虑量具的精确度、样品直径和标准参照材料的密度。

3.1.11 流动气蚀，[名词]——流动液体速度改变而引起局部压力降低造成的气蚀，例如在障碍物周围流动或穿过较窄的通道。

3.1.12 孕育期，[名词]——在冲蚀率-时间图中，相对于后期，冲蚀率为零或可忽略不计的最初阶段。

3.1.12.1 解释说明——孕育期通常用于表示在材料大量损失之前，材料表层下的内应力和塑性变形的累积。一般无法精确测量孕育期的长短。请参看相关术语，*冲蚀起始时间*和*名义孕育期*。

3.1.13 最大冲蚀率，[名词]——在试验中，表现出的冲蚀率最大值，紧跟着冲蚀率减小。（见*冲蚀率-时间图*）

3.1.13.1 解释说明——存在最大冲蚀率是许多气蚀和液体冲蚀试验的一个典型特

征。在一些试验中，最大冲蚀率知识瞬时值；而在另一些试验中，最大冲蚀率将稳定的维持一段时间。

3.1.14 平均冲蚀深度(MDE)，[名词]——指定表面区域材料被冲蚀的平均厚度。通过测量材料的质量损失除以密度来得到体积损失，进而再除以指定表面的面积，计算得到平均冲蚀深度。（众所周知平均穿透深度或 MDP，由于采用一些单独凹点深度的平均值，不再作为首选术语。）

3.1.15 名义孕育时间，[名词]——累积冲蚀-时间曲线中，斜率最大的直线的延伸与暴露时间轴的相交点；但是这不是孕育期的真实测量值，它是最大冲蚀率在累积冲蚀时间坐标轴上的值。

3.1.16 标准抗冲蚀性，N_e，[名词]——标准抗冲蚀性是表示所测试材料相对于指定的参照材料抗冲蚀能力的性能指标。以相同的测试条件和相同的分析模式进行试验，通过所测材料的冲蚀体积损失除以参照材料的冲蚀体积损失计算而得。“相同的分析模式”是指必须确定冲蚀率-时间图相对应的两种冲蚀率，比如最大冲蚀率或最终冲蚀率。

3.1.16.1 解释说明——完整的用词是“检测材料相对于参照材料、以数据分析为基础的标准抗冲蚀性是一个数值。”

3.1.17标准孕育阻力，N_o，[名词]——在相同实验条件和相同分析模式下，所测材料的名义孕育时间除以指定材料名义孕育时间的数值。（参见*标准抗冲蚀性*）

3.1.18 累积冲蚀率切线斜率，[名词]——通过原点并与累积冲蚀率-时间曲线弯曲处相切的直线斜率。这个指标存在的条件是累积冲蚀率-时间曲线具有 S 形状。在冲蚀率测试中，累积冲蚀率也表示最大累积冲蚀率。

3.1.19 最终冲蚀率，[名词]——冲蚀率经过最大值下降后达到或者近似达到的稳态值。（参见*最终冲蚀率阶段*和*冲蚀率-时间图*）

3.1.20 振动气蚀，[名词]——沉浸在液体里的固体表面的振动使压力变化起伏，从而引起气蚀。

4 试验方法概述

4.1 该试验方法通常采用 20 kHz 的超声换能器，将其附加在专门设计的“振幅杆”或速度转换器上。将扣状样品穿入振幅杆顶部。

4.2 将样品进入试验液体（通常是蒸馏水）中，且实验过程中必须维持指定温度，以制定振幅振动样品。试验样品的振幅和振动频率都必须精确控制和监测。

4.3 为了获得随时间变化质量的损失过程（这个过程不是线性的），在试验开始之前和周期性的中断试验再开始之前，要精确测量样品的重量。该累积冲蚀率-时间曲线允许适当的中断，来比较不同材料或不同试验液体或其他条件之间的结果。

5 意义及用途

5.1 该试验方法用于评估材料的相对抵抗能力：必须水泵、水轮机、液压测力计、阀门、轴承、柴油机气缸套、船舶螺旋桨、水翼以及阻塞的内部管道等。为了达到相类似目的的另一种试验方法是 G134，它使用的是喷射液流产生空泡，对静止样品产生气蚀。后者更适用于那些不易精确成形的样品。任何气蚀试验的结果都应该慎重使用，见 5.8。

5.2 一些研究人员也采用该试验方法来筛选能够承受突然的液体冲击冲蚀的材料，例如，低压蒸汽涡轮机和可能在暴雨中飞行的飞机、导弹和航天器等。试验方法 G73 说明了另一种检测途径，专门用于此类测试。

5.3 虽然一些弹性或自适应的涂层已成功用于抵抗中等强度的气蚀和液体冲击冲蚀，但是并不推荐使用该试验方法来评估这些涂层。这是因为这种涂层减小了振动产生的气蚀强度。由于气蚀的流体动力学因素与涂层无关，所以这种测试的结果不能代表现场应用的效果。

注释 1——另一种可选择的、使用基本相同装置的方法是静态样品测试方法，适用于自适应涂层。在这种方法中，样品固定于容器的液体中，并且振幅杆的顶端非常接近固定的样品表面。在样品上面的振幅杆（通常在顶端固定一种抗冲蚀性很高的材料）制造出气蚀空泡。许多研究者已经使用了这种方法（见 X4.2.3），但是他们对于样品与振幅杆顶端的距离和其他设置有不同意见。固定样品的方法可用于必须使用这种方法检测的即不能加工成带螺纹的样品也不能加工成盘后黏贴在带有螺纹样品上的脆性材料（见 7.6）。

5.4 该试验方法不能直接用于电化学腐蚀或固体颗粒冲剂作用为主的材料。但是改进后的基本方法和装置已经用于一些特殊目的的检测（见 9.2.5、9.2.6 和 X4.2）。为了确定机械效应和电化效应之间的配合，已经附上了指南 G119。

5.5 对于从事基础研究或专业领域研究的人员，需要变更一些试验参数来达到他们的目的。但是，在所有其他方面遵循该试验方法，将会使不同研究者之间结果的更好理解和相关性。

5.6 由于气蚀和液体冲击冲蚀的冲蚀率-时间曲线是非线性的，所以在进行比较和做结论时，必须考虑曲线的形状。见第 11 节。

5.7 样品表面的处理将极大地影响测试结果。在试验的计划、操作和试验报告环节中必须考虑这一因素。参见 7.4 和 12.2。

5.8 我们并不完全清楚气蚀和液体冲击冲蚀的机制，而且其冲蚀机制因液固界面

的性质、尺度和强度不同而有所不同。因此“抗充实性能”一词表示材料的一种综合性能而非独立的性质，并且仍然没有将其余材料可测量的独立性质相关联起来。因此，在不同的试验方法和不同条件下的测试结果不具有很好的一致性。区分两种材料抗冲蚀性能的微小差别是没有意义的，而且一个测试中的排列顺序在另一个测试中可能会被翻转。

5.9 如果试验程序与仪器、试验样品和试验条件的标准要求有背离，那么应该说明原因，并按照“ASTM 改进的试验方法 G32”来说明结果。见 5.4、5.5 和 12.1。

6 仪器

6.1 该试验方法使用的振动装置会使沉浸在试验液体中一定深度的样品轴向振动。试验设备的振动是由磁致伸缩或压电式换能器产生，使用一个适当的电子振动器或功率放大器进行驱动。振动系统应该有足够大的功率使样品在空气中的振幅和浸入水中的振幅一样大，合适的输出功率为 250W 到 1000W。这种系统是经济可用的，可用于超声焊接、超声乳化等。（**注意**——这种装置会产生很大的噪音，必须使用防噪音耳罩来保护试验者的耳朵。建议使用隔声罩。）

※一些超声处理装置或塑性焊接设备供货商可以提供现成的设备，也可以为这一标准试验方法提供经过特别改进的设备。从协会主席那里得到的被小组委员会有权利列入清单的制造商名单是可以使用的，但这并不意味着列入清单的制造商提供的设备对于这一试验方法是合格的。

6.1.1 图 1 显示了该试验方法所涉及的基本参数。图 2 和图 3 分别显示了典型设备的示意图和实物照片。

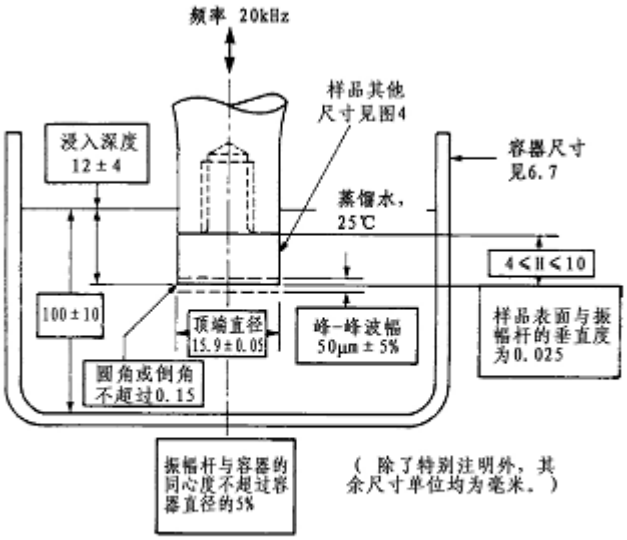


图 1 振动气蚀测试的重要参数

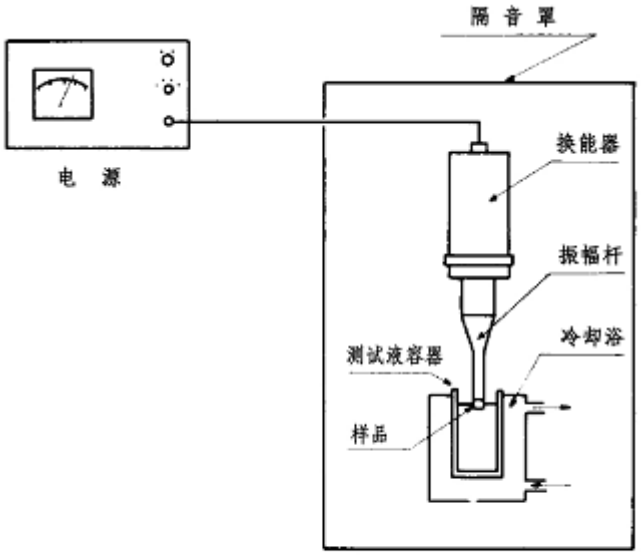


图 2 振动气蚀装置示意图

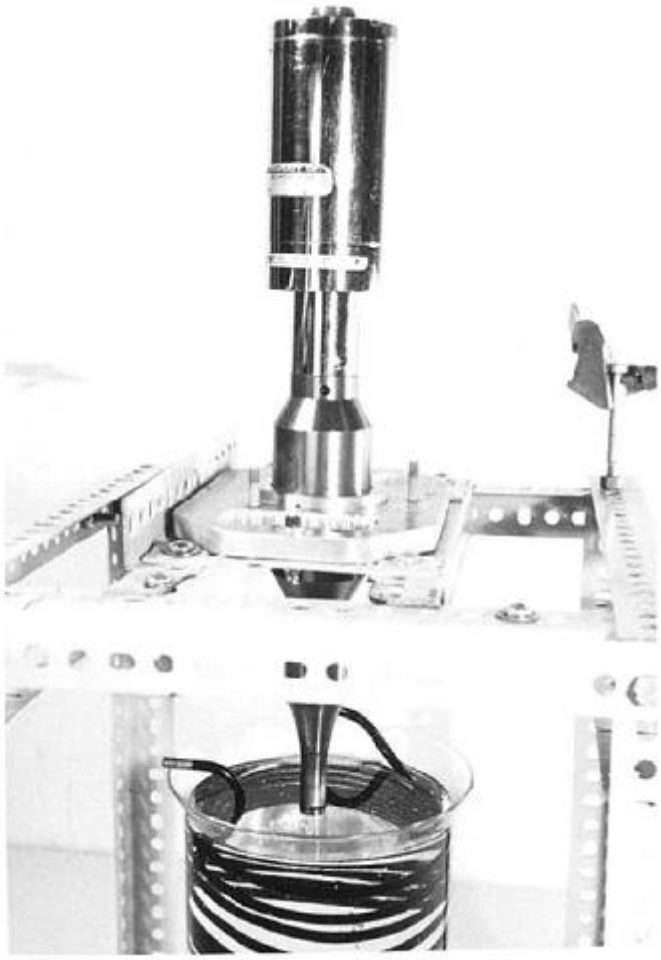
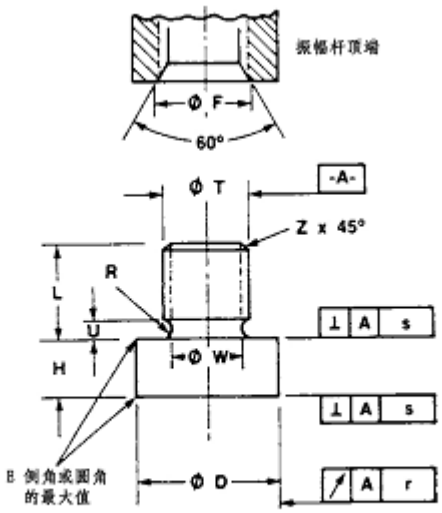


图 3 典型装置照片

6.2 为了获得比变换器更大的样品振幅，需要一个合适形状的圆锥体，通常称为“振幅杆”或“速度转换器”。该试验方法中，采用的振幅杆具有悬链曲面、指数和阶梯型特征。振幅杆顶端的直径必须符合样品的尺寸规定。（见 7.1）

6.3 试验样品（见第 7 节和图 4）是扣状，它的外圆与振幅杆顶端直径相同，且具有较小直径的螺旋槽，可将其旋入振幅杆顶端。振幅杆螺孔深度的最小值与试验样品螺纹长度一样。



	mm	inch
D*	15.9±0.05	0.624±0.002
E*	0.15	0.006
F*	(W+2.2)±0.25	(W+0.09)±0.01
H	见图 7.2	
L	10.0±0.5	0.394±0.02
R	0.8±0.15	0.031±0.006
T	螺纹，见图 X2.2.1	
U	2.0±0.5	0.08±0.02
W	螺纹内径,见表 X2.2	
Z	0.8±0.15	0.031±0.006
r*	0.050	0.002
s*	0.025	0.001

注：星号（*）表示强制执行的，其余为推荐值

图 4 样品尺寸及公差

6.4 换能器与振幅杆的装配支撑不能影响振动，且不能受力。这可以通过加装固定换能器外壳的支撑结构来实现，或者在振动装配波界面上增加一个法兰。这也是为了防止振幅杆由于电缆、冷却系统或换能器外壳致使振幅杆错位。

6.5 *频率控制*:

6.5.1 试验样品振动频率为 20±0.5 kHz。

6.5.2 整个换能器-振幅杆-样品系统必须设计为在该频率下纵向共振。

注释 2——如果测试轻合金和重合金，为了使样品具有同样的尺寸，可能需要两个不同长度的振幅杆。一个振幅杆用于密度大于或等于 5g/cm^3，质量约为 10g（0.022 磅）的

扣状样品。另一个用于密度低于 5g/cm^3，质量约为 5g（0.011 磅）的扣状样品。见 7.2 和表 X2.2。

6.5.3 应提供一种对振动频率进行检测和校验的方法。频率信号有电源或换能器提供并传输到频率计数器。

6.6 *振幅控制*:

6.6.1 应提供检测和控制振幅杆顶端的振幅在 9.1.17 或 9.1.2 规定的公差范围内的方法。

6.6.2 如果超声波系统能自动控制持续的共振和恒定的振幅，可以在空气中进行对样品振幅的校准而且当样品浸入水中时，这种校准仍然适用。这可以由测微显微镜、千分表、电涡流传感器或其他合适的方法来测定（见附录 X1）。

6.6.3 如果仪器不能自动控制振幅，那么为了连续监控，有必要在振动装配件上安装一个应变计或机械振动仪。

6.7 *测试液容器*:

6.7.1 盛测试液容器的尺寸不仅要足够小从而控制温度，而且要足够大从而避免边界反射波和冲蚀碎片的影响。

6.7.2 除非另有规定，容器横截面应为圆形，并且液体深度为 100±10mm。

6.7.3 容器的内径取决于是用将测试液容器浸入冷却槽的外部冷却方式（见 6.8），还是用将冷却管浸入测试液中的冷却方式。无论使用哪一种冷却方式，测试液中的有效圆柱形直径为 100±15mm。

6.7.4 标准小型玻璃烧杯是合适的（例如 I 型和 II 型）。如果使用冷却槽，则使用 600mL 烧杯，如果使用冷却管，则使用 1000mL 或 1500mL 烧杯。

6.8 应提供将样品附近测试液温度维持在规定范围内的方法（见 9.1.1.5）。通常由配有温度调节器的将测试液容器浸入冷却槽的冷却装置或将冷却管浸入测试

液中的冷却装置来实现。温度传感器应该尽可能的靠近样品，但是不能够妨碍气蚀过程，且不能被气蚀损坏。建议位置是距离样品外圆半径 3mm 的位置，温度传感器浸入测试液的深度约为样品表面以下 3mm 的位置。

6.9 加热系统是可选择的装置。加热系统的目的有两个：其一是加热测试液以排除其中的气体，其二是在试验开始之前将测试液温度调整到期望值。这样一个系统由单独的加热管或者具有这种功能的温度控制器或冷却系统组成。至少有一个研究者使用过具有冷却、加热和磁搅拌等多功能温度控制系统。

6.10 应配置可以检测试验时间或在达到预定时间后自动关闭试验的时间装置。

7 试验样品

7.1 扣状样品的直径（见 6.3）应为 15.9±0.05mm（0.626±0.002in.）。样品试验表面应平整，并与振幅杆轴的垂直度为 0.025mm（0.001in.）。在样品试验表面上或者周围不允许有环状边缘。扣状样品的圆边应光滑，但是倒角或圆角尺寸不应超过 0.15mm（0.006in.）。

7.2 样品扣状的厚度(在图 1 和图 4 中的尺寸 H)大于 4mm(0.157in.)且小于 10mm（0.394in.）。样品扣状厚度和质量之间的关系见表 X2.2。

7.3 用相同振幅杆测试不同材质样品时，样品质量大致相同的情况下，尺寸值为 7.2 中的限制值，见 6.5.2。

7.4 试验样品的制备要与试验的目的保持一致。在 7.4.1-7.4.3 说明了三点。

7.4.1 除非另有要求，试验样品表面应该进行轻微加工、磨光和抛光，表面粗糙度最大达到 0.8 μm（32 μin.），这是为了使表面损坏或变形最小化。表面不需要极端精加工，要求没有可视麻点或刮痕，这些缺陷会加速气蚀损伤。最后使用细度为 600 的砂布处理达到满意程度。

7.4.2 为了研究在特定环境下材料的抗冲蚀性，样品表面的制备方法应尽可能接近最终应用使用的方法。例如，轧制钢板材料应在轧制状态下测试，堆焊硬化表面应在堆焊和最终加工或（和）抛光条件下测试。

7.4.3 在试验中，应将表面制备对结果的影响降到最小，推荐使用下列步骤：为试验准备机加工后的表面，然后使用细度为 600 的砂布进行进一步抛光，每张砂布至少使用 50 个来回。这种方法加工的表面粗糙度大约为 0.1-0.2 μm（4-8 μin.）rms，塑料/弹性变形边界深度为 20 μm。如果试验要求去除所有材料的变形或性能改变层，可以用点解的方式再去除表面 25 μm 的厚度。

注释 3——由于机加工和磨光引起的表面下的变性也包含在内（**1 和 2**）。
※括号内的黑体字参照该标准最后的参考文献清单。

7.5 样品和振幅杆之间的螺纹连接必须认真设计，而且在装配时旋紧，以防止产生过多的振动应力、疲劳失效、以及防止测试液进入螺纹。在螺纹根部和螺纹槽与扣状样品之间结合点不允许有尖角。结合处倒角或退刀槽。其他推荐建议可以参照图 4 和附录 X2。

7.6 如果测试材料非常轻、或者已损坏、或者非常脆、或者不能轻易加工成均匀样品时，那么螺纹杆可以使用与振幅杆相同的材质（或者其他适合的材料），然后使用铜焊、黏合剂或者其他适合的处理方法来将平整圆片测试材料附着在螺纹杆上。除非样品是用于检测涂层或表面层，这类圆片厚度应该至少 3mm（0.12in.）。在检测涂层或表面层时，试验报告应说明涂层材料、厚度、基底材料和沉积过程或附着过程。对于那些形状均匀的样品，7.3 中的给出的扣状样品的重量推荐值仍然适用。

7.7 样品或振幅杆顶端的圆柱表面应该无加工平面。通过卡钳摩擦力旋紧样品，

防止损伤圆柱面，比如适用于扭矩扳手配合使用的夹头或专门设计的扭矩扳手。（见 10.3 和附录 X2：旋紧要求和指南）

8 校准

8.1 *仪器的校准和资格鉴定*

8.1.1 对相同质量和长度的每一组样品，至少在第一个样品进行系统频率和振幅的校准。同时，使用适当的方法校准温度检测系统。

8.1.2 为了鉴定最初仪器和核实随着时间仪器性能的变化，使用 8.1.3 中推荐的参考材料进行试验，或者，如果试验室没有 Ni 200，那么可以选择 8.1.4 中的候选参考材料。即使仪器在可选择的测试条件下正常运转，也需要在标准试验条件（见 9.1）下进行这样的试验。鉴定的详细指导和标准参见附录 X3。

8.1.3 首选参照材料是退火态的锻造 Nickel 200（UNS N02200），符合标准 B160。这是一种纯度为 99.5%的镍产品，性能见表 1。临时试验室研究的试验曲线见图 5。该研究的统计结果见表 2。各个阶段试验样品表面见图 6。

表 1 实验室间的常用材料

名称：Nickel 200, UNS N02200, ASTM B 160

成分（规定值）：Ni 99(最少)，其它（最大）Cu 0.25， Fe 0.4 ，Mn 0.35，C 0.15，Si 0.35，S 0 01

密度（标称）：8.89

形状：Φ19（0.75 in.）退火态冷拔棒材

性能

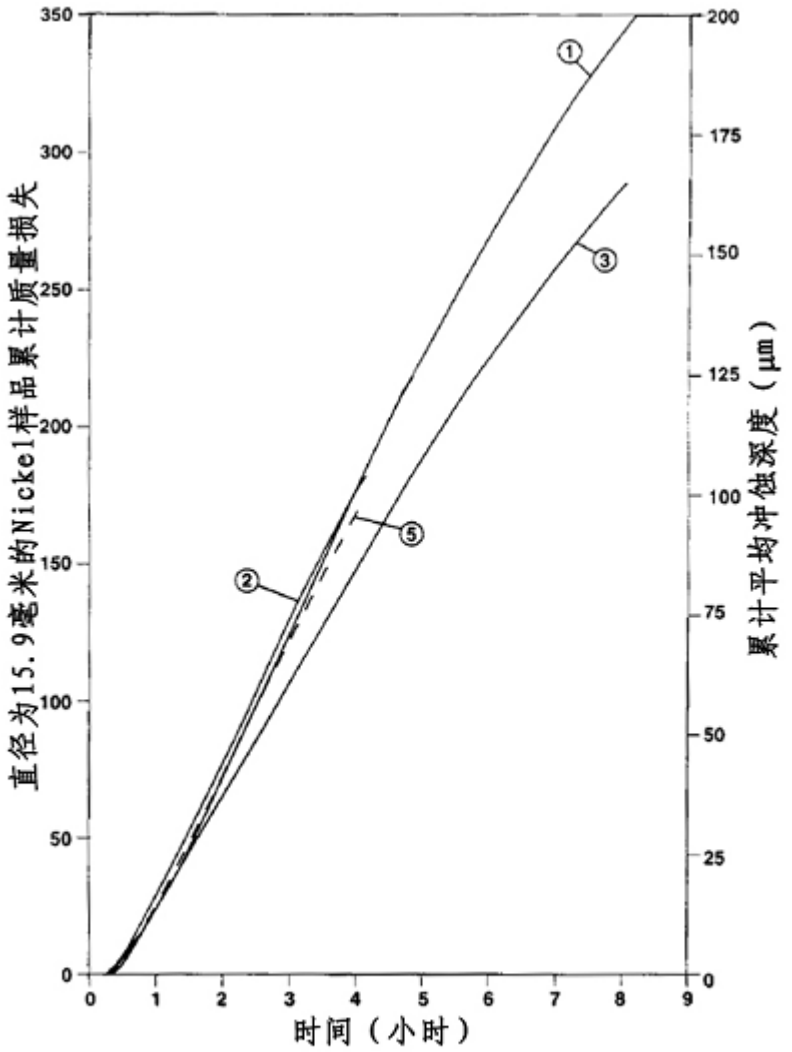
屈服强度：（标称）A	103～207 MPa (15～30ksi)
（实测）B	284 MPa (41.2ksi)
抗拉强度：（标称）	379～517 MPa (55～75ksi)
（实测）	586 MPa (85ksi)
伸长率：（标称）	40～50%
（实测）	58%
断面收缩率：（标称）	N/A
（实测）	76%
硬度：（标称）	45～70HRB, 90～120 HB
（实测）	49 HRB

A “标称”性能数据来自于 Huntington Alloys 数据表。（原表中数据以 ksi 为单位，本表中转换为国际单位制单位数据。）B“实测”性能数据为与冲蚀样品相同样品的测试结果。（原表中数据以 ksi 为单位，本表中转换为国际单位制单位数据。）

表 2：多个试验室使用 Ni 200 研究结果的统计 [A]

测试结果 统计	最大冲蚀率 (μm/h)	名义孕育时间 (min)	t_{50} 平均气蚀深度 (min)	t_{100} 平均气蚀深度 (min)
各实验室的研究结果 [B]				
1 号实验室 平均值:	29.6	29.7	131	234
标准偏差	0.88	6.8	4.7	4.6
变异系数 %	3.0	22.9	3.6	2.0
2 号实验室 平均值:	27.6	19.0	128	236
标准偏差	0.66	2.7	2.9	4.5
变异系数 %	2.4	14.2	2.3	1.9
3 号实验室 平均值:	23.5	18.3	147	275
标准偏差	0.14	2.5	3.1	4.5
变异系数 %	0.6	13.7	2.1	1.6
5 号实验室 平均值:	26.0	19.7	133	248
标准偏差	1.90	3.5	14.9	24.7
变异系数 %	7.3	17.8	11.2	10.0
各实验室的平均值	26.6	21.7	135	248
绝对值的合并变异性				
标准偏差的重复性	1.12	4.24	8.07	13.0
标准偏差的复现性	2.74	6.40	10.6	21.7
95%重复性限 [C]	3.13	11.9	22.6	36.4
95%复现性限 [C]	7.67	17.9	29.8	60.8
名义值的总变异性 [D]				
变异系数的重复性，%	4.2	19.6	6.0	5.2
变异系数的复现性，%	10.3	29.5	7.9	8.7
95%变异系数重复性限，%	12	55	17	14
95%变异系数复现性限，%	29	83	22	25

A 本表是对参考文献 4 的研究报告经过修订而来，对 4 号实验室的数据在合并值中予以去除。B 除了 5 号实验室中分别达到 50 微米和 100 微米平均冲蚀深度的暴露时间是 2 次试验之外，其余所有数据都是三次试验的重复结果。C “95%限”指任意两个数据相对于这一对数据其偏差不超过 95%。D 名义值：变异系数是相应的标准偏差，变异系数的“95%限”是相应数值的限值，表示实验室平均值的平均值。



注：曲线 1-3 是三次试验的平均值，曲线 5 是 2 次试验数据的平均值

图 5 四个实验室的 Nickel 200 累计气蚀-时间曲线（见 13.1.2）

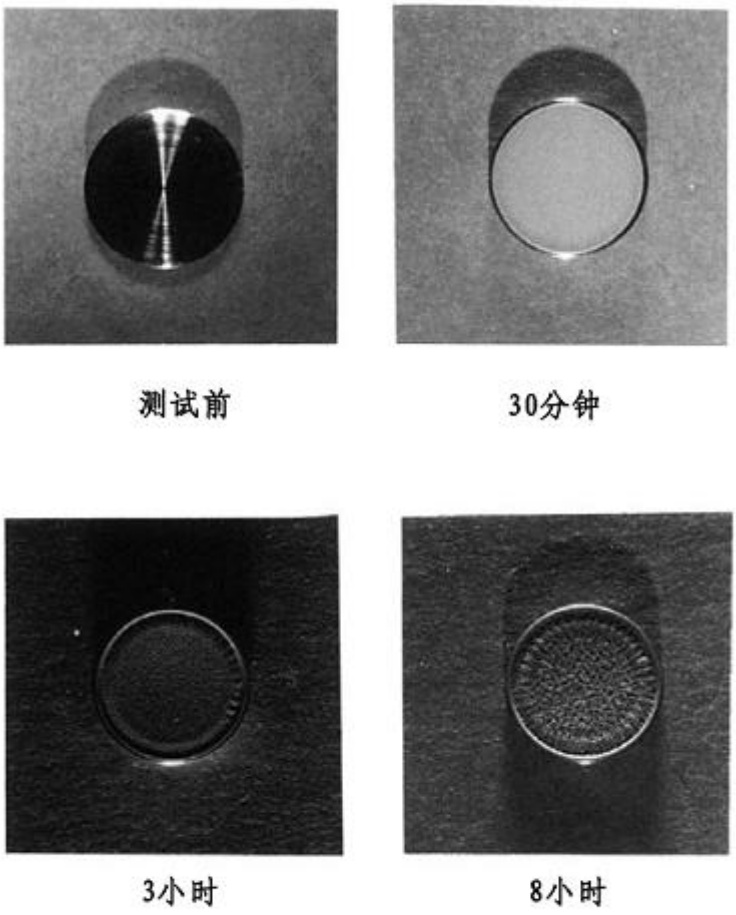


图 6 Nickel200 在不同暴露时间下气蚀的形貌照片

表 3 候补参照材料性能（来自参考文献 4 中的表格）

性能	铝合金 6061-T6	不锈钢 AlSl316
硬度，HRB	60.1	74.8
抗拉强度，MPA(ksi)	328（40.7）	560（81.3）
延伸率，%	21.5	69.0
面积减小，%	44	76.9
密度，g/cm^3	2.71	7.91

8.1.4 抗冲蚀性更好的候补参考材料是退火态的 316 型奥氏体不锈钢，硬度为

150-175HV（UNS S31600，标准 A276）。抗冲蚀性较差的候补参考材料是铝合金 6061-T6（UNS A96061，标准 B211）。这两种材料的性能见表 3。为了该试验方法的最初开发，要对这些材料进行比较试验研究；见参考文献（**3 和 4**）。来自四个试验室的曲线和受限统计结果见 X3.2。

8.2 *试验结果的标准化*

8.2.1 在每一个重要项目里包括一种以上的参考材料，在相同条件下进行检测，以便更容易地计算其他材料的“标准抗冲蚀性”。

8.2.2 如果可能包含首选参考材料退火态 Ni 200，见 8.1.3。

8.2.3 可选择地或者附加的，包含一种候选材料（见 8.1.4）。这种选择是以检测材料组的预期抗冲蚀性范围为基础的。

9 试验条件

9.1 *标准试验条件：*

9.1.1 如果在没有额外增加试验参数的情况下选用该试验方法，应该适应下列试验条件进行：

9.1.1.1 测试液为蒸馏水或去离子水，参照由 D1193 规定的III类试剂水规范。

9.1.1.2 容器中测试液的高度为 100±10mm（3.94±0.39in.），及时有冷却管也是这个高度。

9.1.1.3 试验样品表面的浸入深度为 12±4mm（0.47±0.16in.）。

9.1.1.4 样品（振幅杆顶端）与容器的轴线同心度不超过容器直径的±5%。

9.1.1.5 测试液温度保持在 25±2℃（77±3.6° F）。**注意**——如果没有将温度维持在指定温度，会严重影响结果，见 9.2.2。

9.1.1.6 测试液应处于空气环境中，其气压的偏差不应超过标准大气压（101.3kPa；

760mm（29.92in.）Hg.）的 6%。如果外部其他超过这个范围，比如试验室所出海拔高度的原因，必须在报告中注明相对于标准试验条件的各种偏差。

9.1.1.7 在整个试验中，样品表面的波幅位移为 50 μm（0.002in.）±5%。

9.1.2 如果测试材料是易损坏的、脆的或会被快速损坏或不能承受 9.1.1.7 中标准振幅的惯性应力的非金属材料时，振幅位移可选择 25 μm（0.001in.）。参见附录 X2。这个振幅也适用于冲蚀-腐蚀研究。如果使用这个振幅，要结合 G32 将状态描述清楚。

9.2 *可选试验条件：*

9.2.1 由 9.1.1 规定的标准试验条件满足了普通环境下的大多数材料抗气蚀性能的测定。但是，一些材料必须用于不同的温度、不同的压力以及不同的液体介质环境中。对于这种情况，这些涉及到的和制定的条件都明显偏离了 9.1.1 所规定的试验条件（见 12.1）。除非为特殊目的的测试，偏离标准的试验条件尽量不要使用。

9.2.2 测试液温度对材料气蚀率影响的研究表明，冲蚀率峰值出现在测试液凝固点和沸点之间的中间温度区，比如，在标准大气压下水文为 50℃（122° F）时。在标准温度 25℃左右，温度每增加 1℃，冲蚀率增加 1%到 2%。因此，对于检测抗冲蚀性能的材料（比如工具钢和硬质合金），在比 9.1.1.5 规定温度高的环境下，进行水介质的测试有较大的经济意义。这通常可以通过简单的温度控制来实现，因为在没有对测试液温度进行任何冷却的情况下，测试温度会升高，甚至超出最佳值。

9.2.3 为了进行高温、高压或难以操作和危险液体介质的特殊试验，介质容器必须适当改进。通常，容器和振幅杆之间必须使用一个密封件。如果可以使

用波纹管式密封，首选具有密封功能的支撑结构（见 6.4）的设计。

9.2.4 第 10 节规定的程序仍然适用。尽量减少打开或拆卸试验容器，因为暴露于空气中增加额外氧化等因素可能使冲蚀率失真。

9.2.5 如果试验使用的测试液是具有腐蚀性的（例如，海水），为了确定机械和电化学效应之间的相互关系，可以使用指南 G119。例如，参见参考文献（**5**）。

9.2.6 如果试验旨在测试气蚀和腐蚀双重作用，调节设备使之以脉冲或循环的方式工作会比较合适。开 60 秒-停 60 秒，这样的工作循环是这种测试的推荐方式。如果研究冲蚀和腐蚀之间的相互作用，必须改变工作循环周期。

10 操作程序

10.1 在新的一组试验之前，清洁液体容器，并将容器灌满新的测试液。

注释 4——该试验方法之前的版本要求在新一轮试验开始之前，稳定测试液中溶解的气体，将抗冲蚀性能高的样品进行试验 30 分钟。但是，没有可信的证据证明这对结果有多大影响，假设运行第一个 30 分产生的效果相同。但是，当研究试验非常早的阶段时，可用该程序。

10.2 在试验之前，仔细清洗试验样品，并用精度和感量为 1mg 的天平称其重量。

10.3 在确保螺纹和样品与振幅杆接触面上没有碎屑后，将样品旋入振幅杆并用手拧紧，然后用扳手以合适的扭矩拧紧。螺纹拧紧时应有足够的预应力，以确保不会因为振动惯性载荷而使振幅杆和样品之间产生松动。参考附录 X2.

（**注意**——在某些情况下，螺纹部分会发生疲劳失效。样品必须与振幅杆可靠地旋紧，使能量良好的传输和避免两者的分离。在样品和振幅杆之间，常用一层很薄（实际不可见）的液体膜或润滑脂来去报有效载荷和咬焊。但是，由于润滑剂的气蚀，在连接面上存在过多的液体或润滑脂，会损坏表面。参加附录 X2。）

（**注意**——振幅杆发热和不正常的噪音表示出现疲劳失效、样品旋紧程度

不合适或者有尘土污染或者润滑剂过多。）

10.4 将样品进入到测试液中到 9.1.1.3 指定的深度，按照 9.1.1.4 调整好与测试液容器的同心度。

10.5 启动仪器和计时器，尽可能快地将振幅调整到指定值。对于自动控制振幅的仪器，这可由预先校准号的频率计数器来完成（见 6.6 和 8.1.1）。并且确保温度尽可能维持在期望值。随时监控这些条件。

10.6 一个试验周期完成时，停止仪器，取下样品并仔细清洗、烘干并称其重量，以确定其质量损失。参见 10.6.1，清洗和烘干推荐程序。除非清洗样品之前，认为已经没有必要继续进行试验，重复清洗、烘干和称重，指导连续两次质量损失相同（或在允许范围内近似相等）。

10.6.1 在每次称重之前，要非常仔细地情绪和烘干样品。可以使用普通酒精或者其他适合的溶剂进行漂洗。也可以使用超声波清洗器（比如假牙清洗器）。（**注意**——此方法不能使用溶剂）。用吹风机吹出的热风或干空气将其吹干。对于多孔材料（比如铸铁），用真空干燥器干燥。不要用纸或布等可能在样品上留下碎屑的制品去擦拭样品。

10.7 重复 10.3-10.6 步骤，直到满足 10.10 或 10.11 标准。记录累积暴露时间和累积质量损失数据及之间的关系。

10.8 测试液在使用 8-12 小时之后，去除其中的碎屑或者废弃并重新灌入新的测试液。

10.9 如图 7 所示，质量损失与暴露时间的关系。检测间隔要能够合理准确地建立累积质量损失和累积暴露时间之间的关系曲线。所以，试验间隔时间取决于试验材料和材料的抗冲蚀性，不能提前规定。对于铝合金，合理的间隔

为 15 分钟，纯镍为 30 分钟，不锈钢为 1-2 小时，硬质合金为 4-8 小时。试验前期，冲蚀-时间曲线处于“孕育期”或“加速阶段”，所以为了精确气蚀起始时间，要缩短间隔周期。

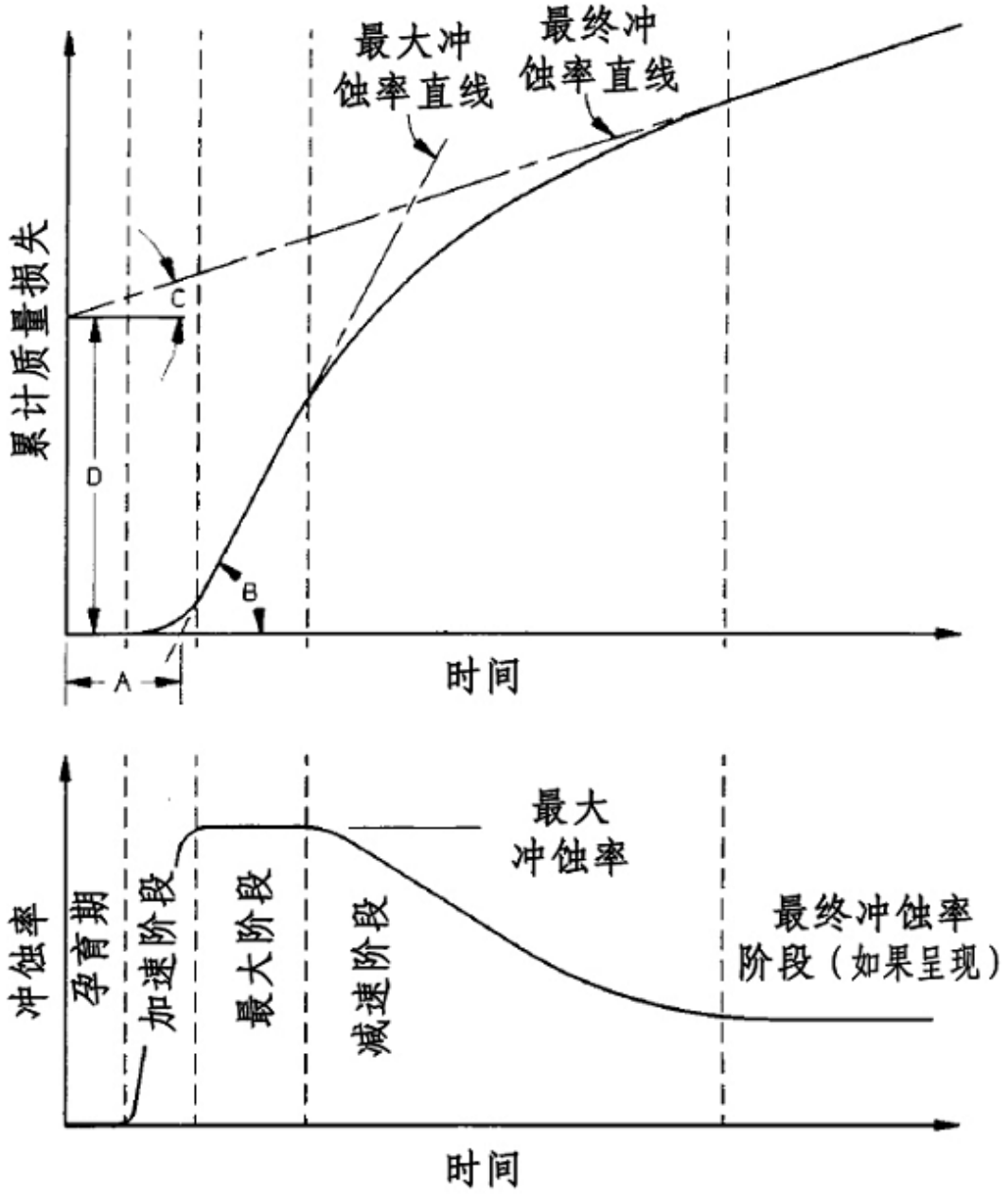
10.10 推荐每个试验至少进行到平均冲蚀率（也可以称为累积冲蚀率）达到最大值并开始降低，也就是知道累积气蚀率切线（见 3.1）出现。

注释 5——这个推荐的假设是“最大冲蚀率”或“累积气蚀率切线”是材料抗冲蚀性能的重要检测参数，并且两者都可以确定。但是，另一个学派认为最大冲蚀率知识瞬时现象，如果能够确定“最终冲蚀率”，那么检测最终冲蚀率更真实可靠。所以，试验总时间是根据试验目的、研究者的学术流派和实际限制来决定的。比如不锈钢，需要 40 小时才能达到最大冲蚀率，见参考文献 **6**；而硬质合金达到最大冲蚀率则需要 100 小时以上的时间。

10.11 对一些材料进行比较试验时，推荐测试进行直到这些材料达到可以比较的平均冲蚀深度。

11 结果的计算或分析

11.1 对冲蚀试验数据进行分析并做出结论性报告的难点在于其冲蚀率（质量损失）表示随时间的一个常量，而是形成了几个阶段（见图 7）。这使得不可能使用一个单一的数字来充分描述其测试结果，或者用短期试验来预测长期的行为。下面用几小节内容来描述要求的和可选的数据分析步骤。



注：A=名义孕育时间，tan B=最大冲蚀率；tan C=最终冲蚀率，D=最终累计冲蚀率切线截距

图7 冲蚀率-时间图的各特征阶段和表征累计冲蚀率-时间曲线的参数

11.2 气蚀试验最主要的结果就是累积冲蚀率-时间曲线。虽然原始数据是用质量损失和时间的关系来表示的，为了分析和报告，应该将其转化为“平均冲蚀深度”（MDE）和时间曲线，因为当不同密度的材料比较时，体积损失比质量损失更重要。即使在测试表面的外周有一窄的唤醒区域实际上未被损坏，计算平均气蚀深度应以样品测试面的整个面积为基础。对于 7.1 规定的

扣状样品直径，面积应为 1.986 cm^2（0.308 in^2）。

11.3 由于累积冲蚀-时间曲线的形状，比较不同材料在相同暴露时间下的质量损失和平均冲蚀深度（MDE）是没有意义的。（原因是对于一种抗冲蚀性非常强的材料来说，所选择的时间仍然在孕育期或加速阶段，而对于较弱的材料来说，同样的时间，它处于最大冲蚀率或减速阶段。）但是，可以比较达到相同累积平均冲蚀深度（MDE）的累积暴露时间。对于这个试验目的，报告中应该包含下列数值：（1）达到 50 μm 所需要的时间，用 t_{50} 表示；（2）达到 100 μm 所需要的时间，用 t_{100} 表示；（3）如果可能，达到 200 μm 所需要的时间，用 t_{200} 表示。

11.4 为了更完整地描述试验结果，使用下列参数（参见图 7）：

11.4.1 “最大冲蚀率”，就是累积冲蚀-时间曲线上最陡的线性（近似线性）部分的切线斜率，以微米每小时表示。这是文献中最常用的单一数值的测试结果，该试验方法中要求使用这种方法。

11.4.2 “名义孕育期”，就是最大冲蚀率切线在时间轴上的截距。给试验方法中也需要。但是这不是孕育期的检测结果，是一个没有被定义的时间段。参见 11.4.3。

11.4.3 “冲蚀开始时间”（ETT）或平均冲蚀深度（MDE）达到 1.0 μm 所需要的时间。这表示可以开始检测质量损失。在报告中，这是一个可选指标。

11.4.4 “最终冲蚀率”，如果试验需要持续相当长时间，那么该项可选。

11.4.5 如果报告最终冲蚀率，那么最终冲蚀率切线与最大冲蚀率切线交点的平均冲蚀深度（MDE），或者是任一条切线在平均冲蚀深度轴上的截距也必须报告。

11.5 除了上述必须报告的指标之外，其余被精确定义的试验结果指标也是可以选择的。其他常用的有累积冲蚀率切线斜率（通过原点并与累积冲蚀率-时间曲线相切的直线斜率）、切点的平均冲蚀率、瞬时冲蚀率-时间曲线或者平均冲蚀率-时间曲线。最新建议是用威布尔累积分布函数坐标表示，然后从得出的直线来确定这些参数。见参考文献 **7** 和同一作者的其他文献。

11.6 该试验方法充分表明，如果严格遵循标准试验结构、条件和程序，那么不同试验室之间结果的直接比较时有意义的。参加 13.1.4 和表 2。然而，为了方便比较不同类型气蚀试验的结果，推荐在试验项目中包含一种或几种标准参考材料（见 8.2），以标准化形式呈现结果。具体参数包括标准抗冲蚀性和标准孕育阻力（见第 3 节定义）。

12 报告

12.1 报告中必须明确说明所有关于仪器（第 6 节）、样品（第 7 节）和试验条件（9.1）与标准要求不相符的内容，并说明不符的原因。这些包括测试液的要求、温度和压力、以及振幅和频率等。当试验结果是简短形式时，请注明：“ASTM 试验方法 G32 修订”字样，并说明与 9.1 的不符内容。

12.2 样品的制备和样品表面层的变化会对气蚀试验结果产生很大的影响，特别是对孕育期的试验结果（见 7.4.3 和注释 3）。如果试验的目的是研究表面制备工艺对材料性能的最小影响，或者与表面制备工艺相应的应用领域，那么应在报告中说明。

12.3 对于每种被测材料，报告中都应包含以下内容：

12.3.1 标识、规格说明、成份、热处理和机械性能，机械性能包括在样品上检测或从其坯料的样块上检测的硬度。

12.3.2 制备试验样品和试验表面的方法（尤其包括测试面初始粗糙度检测）。

12.3.3 被测样品编号

12.3.4 每种被测样品都应填写以下信息的表格：

12.3.4.1 累积暴露总时间，单位：小时（h）；

12.3.4.2 累积质量总损失，单位：毫克（mg）；

12.3.4.3 累积平均冲蚀总深度，单位：微米（μm），由质量损失、样品面积（见11.2）和样品密度计算而得；

12.3.4.4 最大冲蚀率（见 11.4.1）；

12.3.4.5 名义孕育时间（见 11.4.2）；

12.3.4.6 平均冲蚀深度分别达到 50 μm、100 μm 和 200 μm 所需要的累积暴露时间，分别使用 t_{50}、t_{100} 和 t_{200} 表示（见 11.3）。

12.3.5 对于每种被测材料，应填写一个标准抗冲蚀性和标准孕育阻力的表格，并与试验中的一种参考材料（见 8.2）进行比较。计算同一种材料重复试验数据的平均值。

12.3.6 一份完整的报告还应该包含下列信息：

12.3.6.1 每种样品累积质量损失和相应的累积暴露时间表；

12.3.6.2 每种样品累积平均冲蚀深度与累积暴露时间的曲线图

12.4 报告任何特殊或异常现象或数据。

13 精度和偏差

13.1 *精度*

13.1.1 试验室研究在下列信息方面的局限性使其不能满足惯例 E691 的所有要求；但是，它可以满足指南 G117 规定的临时研究的要求。其数据变异按照 E 691

和 G117 的规定进行计算。统计是以对材料 Nickel 200 的四个试验室的试验研究为基础，并使用该试验方法，只有很小的偏差。所有试验室使用的样品都是取自同一个试棒。材料性能见表 1，并且 ASTM 作为一个研究报告而收录。

13.1.2 试验结果统计总要见表 2，每个试验室的平均冲蚀-时间曲线见图 5。

注释 6——虽然有五个试验室参与，但是 4 号试验室不包含在内，因为在试验过程中发生过热问题，造成试验异常中断，产生的曲线与其他试验室的偏差很大。所有结果可以在研究报告※中找到。

※ASTM 归档了本标准的支持数据，并可通过研究报告 RR:G02-1007 获得。

13.1.3 试验室内的数据变异性

13.1.3.1 对最大冲蚀率合并变异系数（COV）的重复性为 4.2%，但是 1 号、2 号和 3 号试验室内单独结果的变异系数为 3%或更低。

13.1.3.2 对于其他测试结果，1 号至 3 号试验室获得了更低的变异系数：对于平均冲蚀深度达到 100 μm 的暴露时间，绝对值合并变异值为 5.2%，但是 1 号至 3 号试验室每一个所得的值都低于 2%。对于平均冲蚀深度达到 50 μm 的暴露时间，绝对值合并变异值为 6%，但是 1 号至 3 号试验室每一个所得的值都低于 4%。试验室内最大的变异是名义孕育期的变异值，合并变异值约为 20%，而试验室内最低变异值也达到 14%。

13.1.3.3 这些试验结果显示，变异的重复性系数为 5%或更高，对于除了名义孕育期以外的其他参数，应仔细审查样品的制备工艺和试验程序。结果也强调了制备样品一致表面的重要性，因为表面的制备会严重影响整个冲蚀率-时间曲线，特别是试验初始阶段。

13.1.4 *试验室之间的数据变异性*——除了名义孕育期之外，其余所有变量变异重复系数范围是 8-10%；名义孕育期为 30%。

13.2 *偏差*——没有一个声明能给出关于该试验方法的偏差，因为没有一个公认的该试验方法的参考值（见惯例 E177，第 16 节），也没有公认的参考方法。不同方法得出的冲蚀试验结果不能直接进行比较，甚至用不同试验方法或不同试验条件去检测同种材料所得出的结果都是不同的。但是，一个试验室可以通过比较它自己对 Nickel200 的实验结果以及限制试验室研究获得的临时平均结果（见表 2）来确定自己的“临时试验室偏差”。见 8.1。

14 关键词

14.1 空泡；气蚀；液体冲蚀；冲蚀-腐蚀；固体冲蚀；抗冲蚀性；冲蚀试验；振动空泡。

附录

（非强制性规定）

X1 振幅的测量和校准

X1.1 商用超声波设备一般提供能够设计和检测振幅的计数器或功率调节器，计数器和功率调节器已经直接通过测量振幅校准。下面章节简要的介绍了一些认为可行的校准技术以及监控方法。

X1.2 *测微显微镜*——该技术需要一台分辨率为 5 μm（0.0002in.）或更小的显微镜和一个强光源。如果需要，在振幅杆顶端侧面或样品的侧面刻画一条垂直于振幅杆轴线的划痕记号。观察仪器停止和开启时，记号或者垂直于振幅杆轴线的边缘的宽度，两者之差就是峰-峰振幅。

X1.3 *千分表*——该技术需要一个精度为 2.5 μm（0.0001in.）或更小的千分表。

将千分表安装在一个平台或仪器基座上，千分表探针与振幅杆顶端或样品表面接触。读取仪器稳定和开启时的千分表读数。因为千分表不能跟随振幅杆顶端振动，所以指针将位于振幅杆振幅最大位移处。两者之差就是静止-峰振幅。

X1.4 *非接触性探针*——可以使用各种非接触性探针和振动探针。探针的适用性是根据是否能够达到振动表面最近位置而决定的。

X1.5 *应变计*——从理论上来说，如果知道精确的振幅杆形状，并使用应变计在任何一个位置检测到振动应变，那么就可以计算相应的振幅杆的振幅。同时，也可以使用上述几种方法进行校准。该技术适用于进入液体的振幅杆在试验过程中对振幅进行持续监控。

X1.6 *机械振动仪*——在一些合适的位置（不是特定节点的位置）安装可以感应轴向运动的机械振动仪（比如在换能器顶端），可以通过理论计算或其他方法来对其进行校准。

X2 对样品螺纹尺寸和预紧扭矩的推荐值

X2.1 需要考虑的基本因素

X2.1.1 一方面，在装配时，螺纹的预应力必须超过样品在振动波峰位置的惯性应力，以便在每个振动周期内，样品轴肩和振幅杆顶端之间始终保持正接触应力。这是由于两个基本原因：第一，为了降低施加于螺纹上的交变力，使产生的力均匀分布于振幅杆顶端；第二，为了防止测试液进入螺纹中，如果测试液渗漏到螺纹中，会使螺纹损伤和发热。

X2.1.2 另一方面，螺纹的预应力不能太大，以防止预应力和减小但仍存在的交变

应力的合力损坏螺纹和扣状样品的连接处。值得注意的是，某些螺纹连接的预应力可以有效的消除所有来自螺纹构建的交变应力，但是在此采取此方法是不合适的。原因是振幅杆顶端的面积和刚度不比螺纹杆的大多少，实际上振幅杆和螺纹杆会以它们的面积和弹性模量按比例的承受狡辩载荷。

X2.1.3 最后一个要求，通常没有多大困难，就是振幅杆的环形横截面，也就是振幅杆顶端有螺纹孔的横截面，必须能够承受来自于整个样品和这个界面以下的振幅杆部分产生的总交变力。

表 X2.1 样品螺纹参数

注：尺寸单位为 mm 或 mm^2。（圆括号中的尺寸单位为 in.或 $in.^2$。）

		备选		推荐 A 系列		B 系列	
		7/16 UNF-20	3/8 UNF-24	M10-1.0	M10-1.5	5/16 UNF-24	M8-1.0
公称直径	D	11.11 （0.4375）	9.5 （0.375）	10.00 （0.3937）	10.00 （0.3937）	7.94 （0.3125）	8.00 （0.3150）
螺距	*p*	1.270 （0.0500）	1.059 （0.0417）	1.000 （0.0394）	1.250 （0.0492）	1.059 （0.0417）	1.000 （0.0394）
外螺纹牙高	*h*	0.779 （0.03067）	0.649 （0.02556）	0.613 （0.02415）	0.767 （0.03019）	0.694 （0.02556）	0.613 （0.02415）
中径	D_P	10.29 （0.4050）	8.84 （0.3479）	9.35 （0.3681）	9.19 （0.3617）	7.25 （0.2584）	7.35 （0.2894）
小径	D_R	9.56 （0.3762）	8.23 （0.3239）	8.77 （0.3454）	8.47 （0.3333）	6.64 （0.2614）	6.77 （0.2667）
小径截面积	A_R	71.68 （0.1111）	53.16 （0.0824）	60.45 （0.0937）	56.26 （0.0872）	34.65 （0.0537）	36.06 （0.0559）
拉应力面积 [A]	A_S	76.58 （0.1187）	56.65 （0.0878）	N/A	N/A	37.42 （0.0580）	N/A
振幅杆肩宽	b	2.38 （0.0938）	3.18 （0.125）	2.95 （0.116）	2.95 （0.116）	3.96 （0.156）	3.94 （0.155）
振幅杆应力面积	A_H	100.6 （0.156）	126.5 （0.196）	119.4 （0.185）	119.4 （0.185）	148.4 （0.230）	147.7 （0.229）
A_H/A_R	-	1.40	2.38	1.97	2.12	4.38	4.10

[A] 如果 A_S 不可用，用 A_R 代替 A_S

[B] $b=(0.625-D)/2$ in. ; $A_H=(\pi/4)(0.625^2-D^2)in.^2$。

X2.2 **螺纹的选择**

X2.2.1 如果该试验方法没有书面规定样品螺纹杆的参数，推荐使用一下螺纹和螺纹杆尺寸：

X2.2.2 首选 X2.1 表中 A 系列 3/8 UNF-24、M10-1.0、或 M10-1.25 中的任何一个。次选 B 系列中的 5/16 UNF-24 或者 M8-1.0。一些研究者已经使用了 7/16 UNF-20。英制标准螺纹为 2 级，或者如果需要，可以为 3 级。对于公制螺纹选用中等松紧程度的配合（6g 和 6H），或者如果需要，可以选用紧配合（4h 和 5H）。外螺纹根部必须有圆角；在英国标准里，建议圆角为螺距的 0.1443 倍。这些螺纹的性能见表 X2.1。

X2.2.3 螺纹杆长度应该为 10±0.5mm（0.394±0.02in.）。

X2.2.4 在样品螺纹杆和样品的连接处必须有半径至少为 0.65 mm（0.025 in.）的圆角，并且有长度为 2mm（0.08in.）的退刀槽，如图 4 所示。如图 4 所示，振幅杆应有相应的内倒角。倒角不能比要求值过大，不能使振幅杆顶端和样品肩部的接触面积过多的减小。

X2.3 **拧紧力矩和预载荷之间的关系**

X2.3.1 对于推荐的螺纹，可以使用下列公式来确定要求的力矩，T，从而得到期望的预应力，F_s。F_s 的选择指导参见 X2.4。

X2.3.2 对于 A 系列螺纹：

$$T/F_s = [0.472\mu + 0.0076]\ (\text{lb} - \text{in./lb}) \qquad (X2.1)$$
$$= [0.012\mu + 0.00019]\ (\text{N} - \text{m/N})$$

X2.3.3 对于 B 系列螺纹：

$$T/F_s = [0.415\mu + 0.0062]\ (\text{lb} - \text{in./lb}) \qquad (X2.2)$$
$$= [0.0105\mu + 1.57 \times 10^{-4}]\ (\text{N} - \text{m/N})$$

X2.3.4 在上述公式中，μ是摩擦系数，其值假定为在干态配合时为 0.2，在有润滑剂存在的条件下装配时为 0.1。

X2.4 **预紧指南**

X2.4.1 根据经验，在许多试验中，预紧应力是样品螺纹屈服强度的一半。但是，为了更近一步评定预紧应力限值和识别潜在问题，可以通过下列计算步骤来实现。

X2.4.2 按照下面公式，计算振幅峰值时扣状样品的惯性力 F_b。确定样品质量，M，单位 g。（见表 X2.2）。对于在 20kHz 下的标准振幅峰值为 50μm：

$$F_b, N = 400\ M \qquad (X2.3)$$

or:

$$F_b, \text{lbf} = 90\ M$$

当振幅为 25μm 时，其惯性力值是上面惯性力的一半。最小预紧应力至少是惯性力的 1.5 倍。使用下面的公式确定最大安全预紧应力。

表 X2.2 样品扣状质量和长度的关系

材料比重	铝 2.7	钛 4.5	钢 7.9	镍、铜、硬质合金 8.8
样品扣状长度 mm(in.)	相应的质量，g (重量，lb)			
4.0(0.157)	2.14 (0.00472)	3.57 (0.00787)	6.27 (0.0138)	6.99 (0.0154)
6.0(0.236)	3.22 (0.00709)	5.36 (0.0118)	9.41 (0.0207)	10.48 (0.0231)
8.0(0.315)	4.29 ()0.00945	7.15 (0.0157)	12.55 (0.0276)	13.98 (0.0308)
10.0(0.394)	5.36 (0.0118)	8.94 (0.0197)	15.69 (0.0346)	17.47 (0.0385)
样品扣状质量，g(重量,lb)	相应长度，mm（in.）			
4(0.0088)	7.46 (0.294)	4.47 (0.176)	2.55 (0.100)	2.29 (0.090)
5(0.0110)	9.33 (0.367)	5.59 (0.220)	3.19 (0.125)	2.86 (0.113)
8(0.0176)	14.93 (0.588)	8.95 (0.352)	5.10 (0.201)	4.58 (0.180)
10(0.0220)	18.66 (0.735)	11.19 (0.440)	6.37 (0.251)	5.72 (0.225)
样品惯性加速度				
频率为 20kHz,波幅为 50μm 时，$3.95\times10^5 m/s^2$(约 40300 倍重力加速度)				
频率为 20kHz,波幅为 25μm 时，$1.97\times10^5 m/s^2$(约 20100 倍重力加速度)				

X2.4.3 计算样品螺纹上振动引起的交变力 F_a，其应用于预紧应力超过 F_b 时：

$$F_a = \frac{F_b}{1+(A_H/A_R)(E_H/E_S)} \qquad (X2.4)$$

其中：

A_H = 振幅杆螺纹外面的应力面积

A_R = 样品螺纹杆应力面积

E_H = 振幅杆材料弹性模量

E_S = 样品材料弹性模量

（A_H/A_R）推荐值由表 X2.1 给出。

X2.4.4 用下面公式计算保守的预紧力上限值 F_S：

$$F_{s_{max}} = S_y A_s - 8\,F_a \qquad (X2.5)$$

其中：

Sy = 样品材料的屈服强度

As = 螺纹张应力面积，根据表 X2.1 得出

X2.4.5 如果由公式 X2.5 得出的 F_{Smax} 超过由公式 X2.3 得出的 F_b 的 2 倍时，选择一个 F_s 的中间值，最好至少 $2F_b$ 和 X2.3 计算的扭矩值。

X2.4.6 如果由公式 X2.5 得出的 F_{Smax} 小于 $2F_b$，使用下面公式进行更详细的计算，此公式根据参考文献 **8** 中的公式 33 而改写：

$$F_{s_{max}} = S_u A_s / N_s - K_f F_a (S_u / S_e) \qquad (X2.6)$$

N_S = 安全系数，最好至少为 1.5

S_u = 样品材料的极限强度

S_e = 样品材料完全交变载荷下的无缺口疲劳强度极限

K_f = 疲劳缺口系数

= q（Kt-1）+1

K_t = 应力集中系数，对螺纹大约为 6.7

q = 缺口敏感系数，取决于切口的半径。根部圆角半径为 0.15mm（0.006in.）的螺纹，对于退火态或正火态的钢，约为 0.5，对于硬化钢其值大于 0.5，对于铝合金其值小于 0.5。

X2.4.7 如果有公式 X2.6 得出的 F_{Smax} 超过 S_yA_s，则使用下面的公式：

$$F_{s_{\max}} = S_y A_s \qquad (X2.7)$$

X2.4.8 如果由公式 X2.6 或者公式 X2.7 得出的 F_{Smax} 都比较低，但超过 $1.5F_b$ 时，可能会发生疲劳损坏。可以选用最小厚度 4mm 的样品来补救，或者选用振幅为 25 微米的试验条件，也可以使用一个样品试试看能否正常运行。在任何情况下，预负荷力 F_s 不能小于 $1.5F_b$。

X3 仪器资格鉴定指导

X3.1 简介

X3.1.1 在 8.1 中列出了可以用于鉴定仪器的三种参考材料。8.1 和第 13 节也提到了精确统计（表 2）和首选材料 Nickel 200 临时试验室间研究（ILS）的试验曲线。然而对于候补的两种参考材料，316 不锈钢和 6061-T6 铝合金，没有相应的统计。该附录呈现了这些材料的一些数据，并且说明了仪器是否符合该试验方法要求的鉴定指导。

X3.2 候补参考材料数据

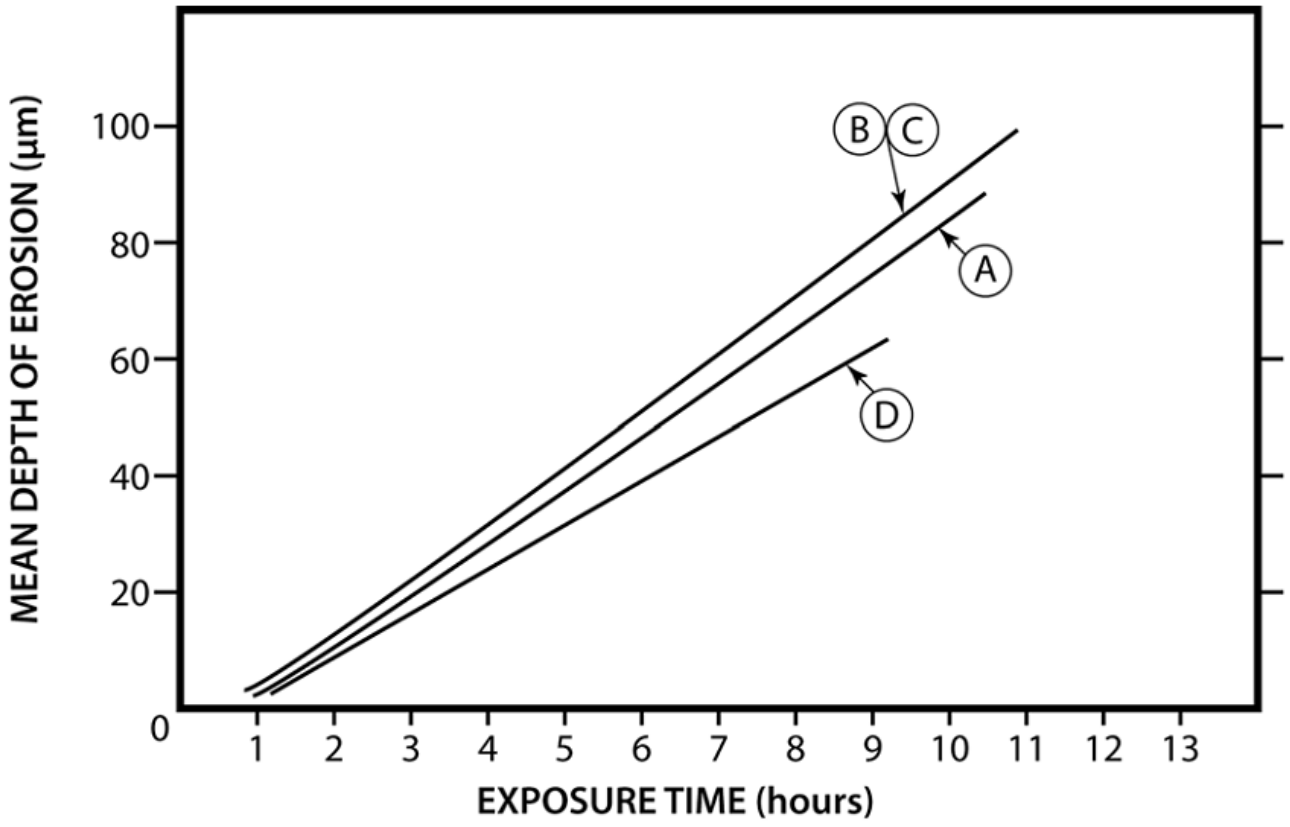
X3.2.1 在该试验方法最初起草之前，进行一系列试验项目都包含不锈钢 316 和铝合金 6061-T6，当然也包括 Nickel 200，可以参见参考文献 **3** 和 **4**。该研究中，有 11 家试验室参与，但是由于没有标准，所以仪器和操作参数差别很大。

X3.2.2 下面呈现了受限统计和来自 4 家试验室平均结果曲线，这 4 家试验室操作符合或者接近该试验方法要求。这 4 家试验室使用试验室 A 到 D 表示。试验运行条件是频率 20kHz、振幅 51 μm、温度 24℃、样品尺寸方位

12.7-15.9mm。由于这些条件，只有平均冲蚀深度可以进行比较，不能比较质量损失。而且，3 家试验室使用的是 316 不锈钢平底样品，1 家使用的是 316 不锈钢有边缘的样品；但是这些有边缘样品的试验结果与平底样品的结果一致。参考文献 **3** 和 **4** 没有呈现每个试验曲线，只呈现了一些试验室的平均曲线。根据现在理解，这个试验项目不是一个严格的 ILS，下面的数据要慎重使用，而且仅是近似值。

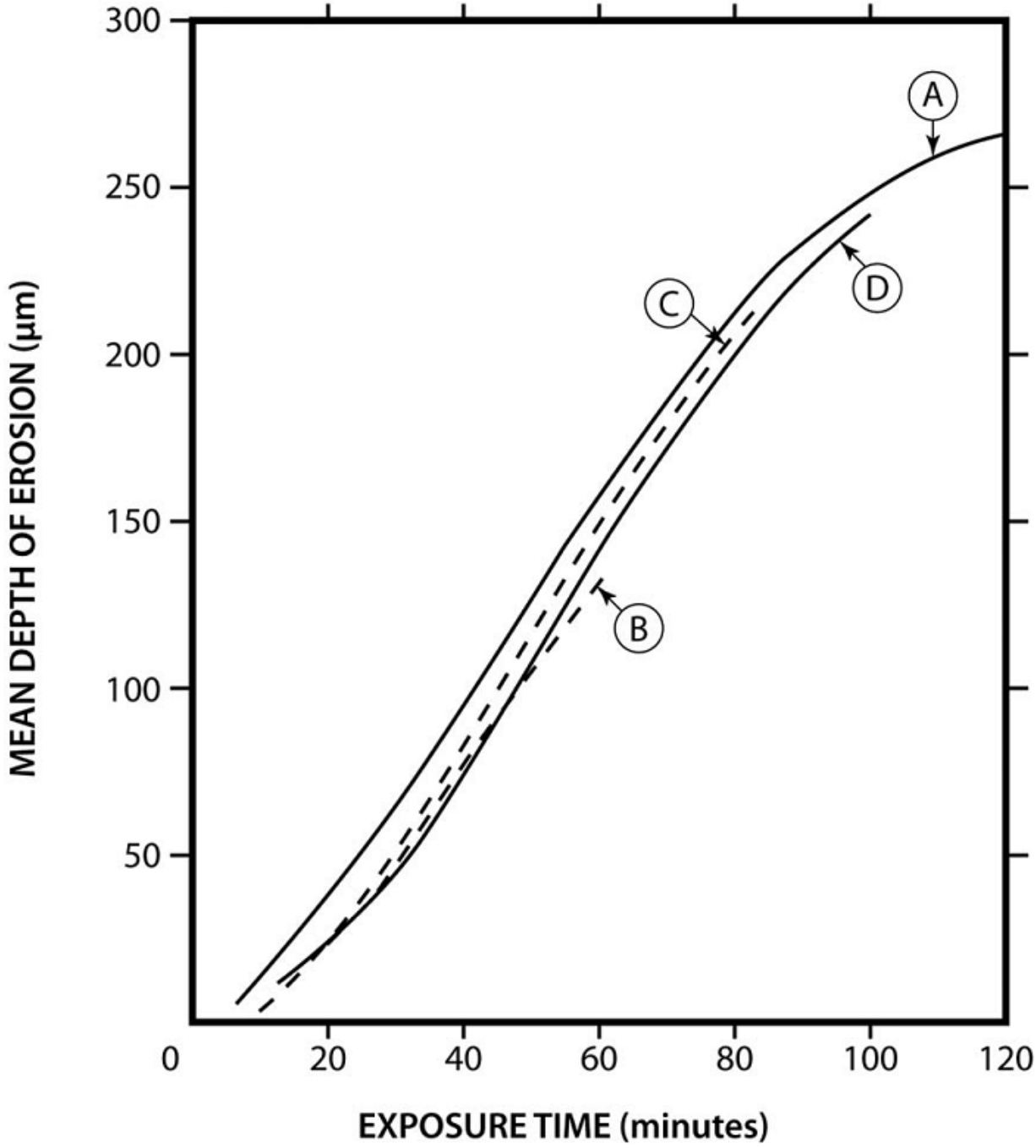
X3.2.3 图 X3.1 表示的是每个试验室对不锈钢 316 的 MDE 平均曲线，来自参考文献 **3** 的图 2 或者参考文献 **4** 的图 10。

图 X3.1 来自参考文献 4 的数据，不锈钢 316 累积冲蚀-时间曲线



X3.2.4 图 X3.2 表示的是每个试验室对铝合金 6061-T6 的 MDE 平均曲线，是根据参考文献 **4** 的图 9（重量和体积损失）重新计算得来的。参考文献 **3** 的图 4 和相应的参考文献 **4** 的图 12 的原因是各自的曲线不能够得到公认。

图 X3.2 来自参考文献 **4** 的数据，铝合金 6061-T6 的累积冲蚀-时间曲线



X3.2.5 表 X3.1 和 X3.2 分别呈现了图 X3.1 和图 X3.2 的检测数据，它们的平均偏差和标准偏差。纵栏里的数值与第 13 节中表 2 的数值是一致的，但是不能正式推测这些数值的可重复性和再现性。

（1）最大冲蚀率（MER），单位 µ m/h。（必须指出这些数值与参考文献 **3** 和 **4** 表中数值的不同）

（2）名义孕育时间（t_0），单位 min。

（3）平均冲蚀深度达到 50 μm 所需要的时间（t_{50}），单位 min。

（4）平均冲蚀深度达到 100 μm 所需要的时间（t_{100}），单位 min。

X3.3 确定仪器资格的指导

X3.3.1 简要地，这些指导是以比较 MER、t_{50}，如果可能的话，t_{100}，的平均结果为基础的，它们来自于所选参考材料的一些样品和分别来自表 2、表 X3.1 和表 X3.2 的材料结果的统计范围。

X3.3.2 第一次试验至少试验所选参考材料的两个以上的样品，根据该试验方法的标准试验条件，确定上述所列参数的平均值。同时核实样品所用坯料的想能在表 1 或表 3 规定的范围内。如果没有在范围内，应该在鉴定报告中说明。

X3.3.3 如果这些数值在上述列表相应平均值中有两个以内的偏差，那么该仪器就是合格的。这些限值见表 X3.3。（这三种材料都经过同样的处理，Ni200 的标准偏差是以表 2 中的试验室平均值为基础的。表 2 中没有正式再现性和偏差。）

X3.3.4 如果三个参数都在限值范围内，那么该仪器合格。

X3.3.5 如果不合格，那么进行下列一项或几项工作：

（1）仔细检测仪器，按照规定的操作条件和试验程序进行操作，进行必要的调整；

（2）如果只检测两个样品，那么再检测第三个样品，重新计算结果。

X3.3.6 如果这些步骤结果都不能满足要求，那么应该在报告或论文中说明不符内容。

表 X3.1 不锈钢 316 试验结果

试验室	样品编号	MER μ m/h	t_0 min	t_{50} min	t_{100} min
A	2	9.3	57	380	700
B	3	9.9	41	344	648
C	3	9.9	41	344	648
D	1	7.6	41	437	n/a
平均值		9.2	45	376	665
标准偏差，s		1.1	8	44	30
变异系数		0.12	0.18	0.12	0.05

表 X3.2 铝合金 6061-T6 试验结果

试验室	样品编号	MER μ m/h	t_0 min	t_{50} min	t_{100} min
A	2	188	10	24	42
B	3	166	13	30	48
C	3	204	16	30	45
D	1	209	19	31	47
平均值		192	14.5	29	45.5
标准偏差，s		19	3.9	3.2	2.8
变异系数		0.10	0.27	0.11	0.06

表 X3.3 资格鉴定的合格极限

参考材料	参数	试验室结果平均值（x）	标准偏差，s	上限值 x+2s	下限值 x-
Nickel 200	MER	26.7	2.6	31.9	21.5
	t_{50}	135	8.1	152	118
	t_{100}	248	19	286	210
316 不锈钢	MER	9.1	1.0	11.1	7.1
	t_{50}	378	34	445	310
	t_{100}	667	26	719	615
6061-T6 铝合金	MER	213	15	243	183
	t_{50}	30	3	36	24
	t_{100}	46	3	52	40

X4 基本原理

X4.1 背景和历史

X4.1.1 自从 Gaines 在振动活塞表面发现了有气蚀发生，这一现象是筛选材料的基本研究内容。在 1955 年，美国机械工程师学术委员会对气蚀现象推荐了一个最先进的标准试验程序，而后一致沿用。随后出现了更多更先进的设备和技术。于 1966 年美国材料试验协会委员会 G02 小组发起了联合循环试验，完成于 1969 年。试验要求和推荐内容包括了直接来自于联合循环试验结果的该试验方法的最初版本，参与者使用了当时现有的仪器，尽管样品直径、振幅和频率不同于最终的规范。英国一个独立学术团体在此之前就提出了相似的试验规范。

X4.1.2 选择振动方法作为标准试验方法的原因是因为它使用广泛、相对简单和能

够更经济的配置仪器以及对重要参数更容易控制。其他的气蚀试验方法包括当流体刘静文氏管或障碍物时会产生空泡的“空泡管道”，沉浸在液体里带有孔或凸起的旋转盘可以制造出空泡的“造空泡盘”的方法也可以产生空泡，最近更多的使用喷射流方法制造出空泡。参考文献 **11-15** 包括空泡现象、其实损伤和气蚀试验。

X4.2 振动仪器的应用

X4.2.1 在一些其它目的试验中也是用振动仪器，例如材料损伤开发研究（参考文献 14）、试验参数的影响（参考文献 6、16 和 17）、“气泡云”和空穴的动力学研究（参考文献 18）、泥浆中的气蚀（参考文献 19 和 20）、以及气蚀-腐蚀研究（参考文献 5、21 和 22）。

X4.2.2 许多试验还选用了除水之外更多的测试液（例如甘油、石油产品、钠等），以及不同的水温（参考文献 16、17、23、24、25、26）。

X4.2.3 有几位研究者报道了使用非常接近振幅杆的静止样品的试验结果（参考文献 19、27、28、29、30），但是由于无法统一样品表面和振幅杆端面的最佳距离致使标准化受阻。

X4.3 *关于该试验方法的修订*——第一个版本的试验方法颁布之后，直到 1987 年“气蚀试验研究会议”召开，只对一些细节和编排类型做了一些修订。这次会议确立了建立全面的试验方法的任务并根据对原来的试验方法的使用经验进行了修订。1992 年的版本几何对所有的部分都进行了充分修订并重新编排章节；除了增加一个可选的 2.5 μm（0.0001in.）的小振动波幅之外，还将测试温度从 22℃提高到 25℃，在一个正常的测试中，这一温度的改变将不影响其测试结果。对仪器主要的改动内容为增加了测试液容器

的直径和样品浸入测试液的深度。其余的版本的修订方向是尽量降低样品固定方式、设备的配置和测试程序的可变性，增加了使用此测试方法的指南以及更进一步对结果的表述标准化。另外，参照材料也从 Nickel 270 改为 Nickel 200，原因是 Nickel 270 不再是通用的镍合金。在 1990-1991 年对 Nickel 200 的标准材料在多个试验室进行了修正，其结果是基于修订了的精度和偏差。在 2004 年，另一个学术团体建议更进一步修订并提交委员会审定。在此基础上的 2006 年修订的版本中，因为精确统计的需要而删除了一个试验室的结果，因为此结果被认为由于仪器故障而出现了数据异常。还修订了测试液容器的详细规范说明，更严格的规定了操作和测试程序步骤，增加了更多的指南以及一些报道了的参数。最新一次修订是在 2010 年，放松了一些要求，附录中增加了补充参照材料的试验数据（参考文献 3 和 4）和仪器资格鉴定程序。

REFERENCES

(1) Samuels, L. E., "Metallographic Polishing by Mechanical Methods," *American Society for Metals*, 3rd edition, Metals Park, OH, 1982.

(2) Field, M., Kahles, J. F., and Koster, W. P., "Surface Finish and Surface Integrity," *ASM Handbook*, 9th edition, Vol 16, (Machining), American Society for Metals, 1989.

(3) Hammitt, F. G., et al., "Round-Robin Test with Vibratory Cavitation and Liquid Impact Facilities of 6061-T 6511 Aluminum Alloy, 316 Stainless Steel and Commercially Pure Nickel," *Materials Research and Standards*, ASTM, Vol 10, No. 10, October 1970, pp. 16–36.

(4) Chao, C., Hammitt, F. G., et al, "ASTM Round-Robin Test with Vibratory Cavitation and Liquid Impact Facilities of 6061-T6 Aluminum Alloy, 316 Stainless Steel, Commercially Pure Nickel," The University of Michigan Report MMPP-344-3-T / 01357-4-T, Nov. 1968, 84 pp. Obtainable from NTIS (National Technical Information Service) as Item PB 183 581.

(5) Kwok, C. T., Cheng, F. T., and Man, H. C., "Laser-fabricated Fe-Ni-Co-Cr-B austenitic alloy on steels," "Part I. Microstructure and caviation erosion behaviour," "Part II. Corrosion behaviour and corrosion-erosion synergism," *Surface and Coatings Technology*, Vol 145, 2001, pp. 194–214.

(6) Hobbs, J. M., "Experience with a 20-kc Cavitation Erosion Test," *Erosion by Cavitation or Impingement, ASTM STP 408*, ASTM, 1967, pp. 159–185.

(7) Meged, Y., "Modeling of Vibratory Cavitation Erosion Test Results by a Weibull Distribution," *J. of Testing and Evaluation* , Vol 34, No. 4, 2003, pp. 277–288.

(8) Peterson, R. E., *Stress Concentration Factors*, John Wiley and Sons, New York, NY, 1974.

(9) Gaines, N., "A Magnetostriction Oscillator Producing Intense Audible Sound and Some Effects Obtained," *Physics*, Vol 3, No. 5, 1935, pp. 209–229.

(10) Robinson, L. E., Holmes, B. A., and Leith, W. C., "Progress Report on Standardization of the Vibratory Cavitation Test," *Transactions, ASME*, Vol 80, 1958, pp. 103–107.

(11) *ASME Symposium on Cavitation Research Facilities and Techniques*, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, 1964.

(12) Knapp, R. T., Daily, J. W., and Hammitt, F. G., *Cavitation*, McGraw-Hill, 1970.

(13) Preece, C. M., "Cavitation Erosion," *Treatise on Materials Science and Technology, Volume 16—Erosion*, Academic Press, 1979, pp. 249–308.

(14) Preece, C. M., and Hansson, I., "A Metallurgical Approach to Cavitation Erosion," *Advances in the Mechanics and Physics of Surfaces*, Harwood Academic Publishers, 1981, *1*, pp. 199–254.

(15) Karimi, A., and Martin, J. L., "Cavitation Erosion of Materials," *International Metals Reviews*, Vol 31, No. 1, 1986, pp. 1–26.

(16) Wiegand, H., and Schulmeister, R., "Investigations with Vibratory Apparatus on the Effect of Frequency, Amplitude, Pressure and Temperature on Cavitation Erosion [in German]," *MTZ Motortechnische Zeitschrift*, Vol 29, No. 2, 1968, pp. 41–50.

(17) Matsumura, M.," Influence of Test Parameters in Vibratory Cavitation Erosion Tests," *Erosion: Prevention and Useful Applications, ASTM STP 664*, ASTM, 1979, pp. 434–458.

(18) Hansson, I., and Morch, K. A., "Guide Vanes in the Vibratory Cavitation System to Improve Cavitation Erosion Testing," *Proceedings of the 6th International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact*, Cambridge University, UK, 1983, pp. 9-1 to 9-9.

(19) Ji Zhiye, "A Study of Cavitation Damage in Slurry Flow," *Proceedings of the 7th International Conference on Liquid and Solid Impact*, Cambridge University, UK, 1987, pp. 35-1 to 35-7.

(20) Matsumura, M., et al., "Vibratory Sand-Erosion Testing," *Proceedings of the 5th International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact*, Cambridge University, UK, 1979, pp. 53-1 to 53-6.

(21) Oka, Y., and Matsumura, M., "Cavitation Erosion-Corrosion," *Proceedings of the 6th International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact*, Cambridge University, UK, 1983, pp. 11-1 to 11-10.

(22) Hercamp, R. D., and Hudgens, R. D., "Cavitation Corrosion Bench Test for Engine Coolants," Paper No. 881269, Society of Automobile Engineers.

(23) Devine, R. E., and Plesset, M. S., "Temperature Effects in Cavitation Damage," Report No. 85-27, Div. of Engr. and Applied Science, Calif. Inst. of Tech., Pasadena, CA, April 1964.

(24) Garcia, R., Hammitt, F. G., and Nystrom, R. E., "Comprehensive Cavitation Damage Data for Water and Various Liquid Metals Including Correlations with Material and Fluid Properties," *Erosion by Cavitation or Impingement, ASTM STP 408,* ASTM, 1967, pp. 239–279.

(25) Hammitt, F. G., and Rogers, D. O., "Effects of Pressure and Temperature Variation in Vibratory Cavitation Damage Test," *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol 12 , No. 6, 1970, pp. 432–439.

(26) Young, S. G., and Johnston, J. R., "Effect of Temperature and Pressure on Cavitation Damage in Sodium," *Characterization and Determination of Erosion Resistance, ASTM STP 474*, ASTM, 1971, pp. 67–102.

(27) Endo, K., Okada, T., and Nakashima, M., "A Study of Erosion Between Two Parallel Surfaces Oscillating at Close Proximity in Liquids," ASME Transactions, Vol 89, Series F, *Journal of Lubrication Technology*, 1967, pp. 229–236.

(28) Hobbs, J. M., and Rachman, D., "Environmentally Controlled Cavitation Test (Improvement in a Cavitating Film Erosion Test)," *Characterization and Determination of Erosion Resistance, ASTM STP 474*, ASTM, 1970, pp. 29–47.

(29) Hansson, I., and Morch, K. A., "Some Aspects on the Initial Stage of Ultrasonically Induced Cavitation Erosion," *Proc. Ultrasonic International*, Graz, Austria, IPC Science and Technology Press, UK, 1979, pp. 221–226.

(30) Matsumura, M., Okumoto, S., and Saga, Y., "Mechanism of Damage in the Vibratory Test with Stationary Specimen," *Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol 25, No. 204, 1982, pp. 898–905.

美国材料试验协会尊重本标准所有条目中提到的任何有效的专利权利。本标准的用户必须明确这一点，侵犯这些专利权利造成的后果有用户自己完全承担。

本标准每 5 年由技术委员会负责修订一次，或重新批准，或撤销。如果邀请您对标准做评论或增加新的标准应与美国材料试验协会国际部联系，您的建议将在有你参加的会议上会仔细讨论。如果您认为您的建议没有受到公正的对待，请记住如下地址并请致函美国材料试验协会标准文员会你的意见。

本标准版权归美国材料试验协会国际部所有。单独再版请通过以下方式与美国材料试验协会取得联系。地址： ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 United States。电话 610-832-9585，传真 610-832-9555，电子邮箱 service@astm.org，网站 www.astm.org。