

中 华 人 民 共 和 国 民 用 航 空 行 业 标 准

MH/T 6039—2015
代替 MH/T 6039—2006

电镀工艺和飞机用化学品的机械氢脆评估
试验方法

Standard test method for mechanical hydrogen embrittlement evaluation of plating
processes and service environments

2015 - 04 - 08 发布

2015 - 08 - 01 实施

中国民用航空局 发 布

目次

前言

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 总则..... 1

4 仪器装置..... 1

5 材料和试剂..... 2

6 试样..... 3

7 试验规则..... 5

8 试验结果..... 7

9 试验报告..... 8

10 精确度和误差..... 8

附录 A（规范性附录）恒载缺口圆棒拉伸试样的特殊要求..... 9

附录 B（规范性附录）用于自加载夹具的缺口试样的特殊要求..... 11

附录 C（规范性附录）逐步增加载荷（ISL）试验所用试样的具体要求..... 15

附录 D（规范性附录）用恒位移应力棒加载的光滑 O 型试样的特殊要求 17

参考文献 19

前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准代替并废止MH/T 6039—2006《电镀工艺和飞机用化学品的机械氢脆评估试验方法》，与MH/T 6039—2006相比主要技术变化如下：

- 修改了试样加工材料AISI E4340钢的要求（见3.2, 2006年版的3.2）；
- 增加了试样串联加载的要求（见4.3）；
- 修改了试样热处理标准并给出了热处理方法（见6.2.5, 2006年版的6.2.5）；
- 修改了防腐化合物的标准（见6.3, 2006年版的6.3）；
- 增加了1型缺口试样抗拉强度的要求和测试方法（见表3）；
- 修改了敏感性试验方法（见6.5, 2006年版的6.5）；
- 增加了每个批次试样的敏感性的验证方法和加载要求（见6.5.3）；
- 增加了使用防护膜保护镀层的要求（见7.1.4）；
- 增加了缺口试样电镀区域的要求（见7.1.5）；
- 增加了电镀工艺SLT测试方法（见7.1.7）；
- 增加了强腐蚀性飞机用化学品测试时试样的暴露时间要求（见7.2.3.2）；
- 增加了液体飞机用化学品测试时，液体挥发后补充液体的要求（见7.2.4.5）；
- 增加了待测化学品的体积要求（见7.2.4.5）；
- 增加了待测化学品的稀释剂的要求（见7.2.4.5）；
- 修改了试验温度（见7.2.4.6, 2006年版的7.2.4.2）；
- 修改了四个试样有一个试样断裂后的加载方法（见8.1.2、8.2.3, 2006年版的8.1.2、8.2.3）；
- 增加了逐步加载期间的试验要求（见8.2.3）；
- 删除了2006年版的8.2.5～8.2.8；
- 修改了精确度和偏差（见第10章, 2006年版的第10章）；
- 增加了试样缺口部分和其他部分的粗糙度要求（见图A.1、图A.2、图B.1, 2006年版的图A.1、图A.2、图B.1）；
- 修改了附录C的名称（见附录C, 2006年版的附录C）；
- 修改了试样拉伸和弯曲试验的加载方法（见附录C.1.1, 2006年版的附录C.1.1）；
- 修改了试样的制备和缺口位置要求（见附录C.2, 2006年版的附录C.2）；
- 修改了量化试样中氢残留量的测试方法（见附录C.3.1, 2006年版的附录C.3.1）；
- 删除了2006年版的C.3.2；
- 修改了加载程序（见附录C.3.2, 2006年版的附录C.3.3）；
- 删除了2006年版的表C.1；
- 增加了门槛值和恒载荷试验结果的区别（见附录C.4, 2006年版的C.4）；
- 删除了敏感性试验（2006年版的表C.5）；
- 删除了电镀试样的替代方法（2006年版的表C.6）；
- 修改了SLT（恒载荷持久试验）和ISL（递增加载）的等效性（见附录C.5, 2006年版的附录C.7）；
- 修改了试验结果要求（见附录C.6, 2006年版的C.8）；
- 修改了不同强度钢氢残留量的要求（见附录C.7.1, 2006年版的C.9.1）。

本标准由中国民用航空局航空器适航审定司提出。

本标准由中国民用航空局航空器适航审定司批准立项。

本标准由中国民航科学技术研究院归口。

本标准起草单位：中国民用航空局第二研究所。

本标准主要起草人：张亚博、刘晓杰、苏正良、赵芯、于新华、陈元、张帆、夏祖西。

本标准于 2006 年 6 月首次发布。

МН

电镀工艺和飞机用化学品的机械氢脆评估试验方法

1 范围

本标准规定了电镀工艺和飞机用化学品导致机械氢脆的评估试验方法。
本标准适用于电镀工艺和飞机用化学品导致机械氢脆的评估试验。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是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。

AMS 2759/2 抗拉强度大于或等于 220 ksi 的低合金钢零件的热处理

AMS 2759/11 钢零件的应力消除

AMS-QQ-P-416 镀镉(电沉积)

ASTM E4 试验机力鉴定规程

ASTM E8/E8M 金属材料的拉伸试验方法

ASTM E18 金属材料洛氏硬度和洛氏表面硬度的测试方法

ASTM E29 使用有效数字确定试验数据与规范符合性的方法

ASTM E292 材料缺口拉伸试验的断裂时间测试方法

ASTM F1624 用逐步增加载荷的技术来测量钢的氢脆门槛值试验方法

3 总则

3.1 本标准用于评估不同电镀工艺导致高强度钢机械氢脆的可能性，也可用于评估不同化学品环境对表面有电镀层或无电镀层的高强度钢造成机械氢脆的可能性。

3.2 本标准使用符合 AMS-S-5000 空气熔炼、洛氏硬度值处理到 HRC51~HRC53 时抗拉强度为 1 793 MPa~1 931 MPa 的 AISI E4340 钢作为基准。用作试验试样的 AISI E4340 钢，每批热处理均应检测氢脆敏感性。

4 仪器装置

4.1 试验机

试验机应符合 ASTM E4 和 ASTM E292 规定的校准、载荷范围、分辨率、弯曲应变的要求。

4.2 夹具

在拉伸或弯曲试验中，使用各种夹具传递试验机或自加载施加的测试载荷。

4.3 串联加载

允差小于1% NFS (缺口断裂强度) 的同一批次试样可采用串联的方式在一台加载设备上加载。在规定的加载时间内如果一个或多个试样发生断裂, 应将断裂的试件取下, 用连接棒将剩余的试样串联后继续加载。

串联加载时, 一个或多个试样断裂, 导致未加载时间超过规定加载时间的10%时, 应延续加载, 使试样的实际加载时间达到规定的加载时间。

4.4 飞机用化学品的试验装置

在进行飞机用化学品试验时, 在水介质环境试验中应使用一个与试样电绝缘或通过补偿防止电耦合的容器与固定装置, 该容器和固定装置不应污染试验介质。可通过一个饱和甘汞参比电极或等效参比电极如符合 ASTM G5 的 Ag/AgCl 电极来控制试样的腐蚀电位。

5 材料和试剂

5.1 试验用材料包括:

- 符合 AMS-S-5000 要求的 AISI E4340 钢;
- 氧化铝 (150 目或更细) 和 180 目碳化硅砂纸;
- 符合 AMS 2430 要求的喷丸。

5.2 试验用试剂包括:

- 符合 MIL-PRF-16173 中 2 级要求的防腐蚀化合物;
- 符合 AMS-QQ-P-416 的氰化物镀镉溶液, 见表 1;
- 飞机用化学品;
- 铬酐;
- 符合 ASTM D1193 IV 型的试剂水。

表1 电镀液成分和电镀条件 (AISI E4340 钢的批次敏感性试验)

项目	方法 A		方法 B
	范围	最佳值	
镉 (以 CdO 形式)	22 g/L~41 g/L	33.7 g/L	同方法 A
氰化钠 (NaCN)	89.9 g/L~120 g/L	104 g/L	同方法 A
氰化钠和镉的比例	2.8 : 1~6.0 : 1	3.0 : 1	同方法 A
pH 值	≥12.0	12.0	同方法 A
温度	21 °C~32 °C	24 °C	同方法 A
氢氧化钠 (NaOH)	7.5 g/L~24.0 g/L	18.7 g/L	同方法 A
光亮剂 (如 Colcad 100 [®] 或等同物质)	按照说明书添加		——
电镀阴极电流密度	108 A/m ²		645 A/m ²
电镀时间	30 min		6 min
烘烤温度	190 °C±14 °C		同方法 A
1 型试样烘烤时间	不烘烤		23 h
2a 型试样烘烤时间	8 h		23 h
铬酸盐处理	是		是

6 试样

6.1 形状

6.1.1 本标准规定了七种不同尺寸、形状以及加载条件的试样的试验过程和评定标准。

6.1.2 附录 A 至附录 D 给出了下列两种类型七个不同尺寸试样的图纸：

a) 1 型——带缺口试样：

1) 1a.1 型：标准尺寸的圆棒拉伸试样，见附录 A 中的图 A.1；

2) 1a.2 型：大尺寸圆棒拉伸试样，见附录 A 中的图 A.2；

3) 1b 型：圆棒拉伸试样，见附录 B 中的图 B.1、图 B.2；

4) 1c 型：圆棒弯曲试样，见附录 B 中的图 B.4；

5) 1d 型：C 形环弯曲试样，见附录 B 中的图 B.6；

6) 1e 型：方棒弯曲试样，见附录 C 中的图 C.1；

b) 2 型——光滑试样：

2a 型：O 形环，见附录 D 中的图 D.1、图 D.2。

圆柱形缺口拉伸、弯曲试样和方形弯曲试样应在晶粒纵向方向加载，但 C 形环和 O 形环试样应在垂直于晶粒纵向方向加载。

6.2 制备

6.2.1 每种试样的应力集中因子（Kt）应用有限元分析法（FEA）和图纸上的尺寸加以评估。

注：ASTM 研究报告中给出了 Kt 参考数据，参见表 2。

表2 Kt 参考数据

型号	最小值 ^a	中间值	最大值 ^a
1a.1	3.16	3.30	3.48
1a.2	3.31	3.59	3.76
1b	2.86	3.07	3.33
1c	3.30	3.45	3.62
1d	3.73	4.03	4.42
1e	3.95	4.27	4.60
2a	不适用	不适用	不适用
^a Kt 最小值和最大值根据试样尺寸的最大公差计算。			

6.2.2 如果 60° 缺口无法在缺口根部电镀，则可采用 90° ±1° 的角度。

注：根据有限元分析，缺口从 60° 变成 90° 对 Kt 的影响可以忽略，如果修改需要报告。

6.2.3 试样应采用正火和回火处理，符合 AMS-S-5000 的空气熔炼 AISI E4340 热轧或冷轧钢棒，并按 AMS 2759/2 A 类的要求进行热处理使抗拉强度为 1 793 MPa~1 931 MPa。按 ASTM E18 的试验方法进行硬度测定，试样的硬度值应在 HRC51~HRC53 之间，根据 ASTM E29 四舍五入的取整原则，三次测量的平均值可在 HRC50.6~HRC53.4 的范围内。

6.2.4 粗加工的毛坯尺寸应符合要求。

6.2.5 试样应按照 AMS 2759/2 A 类或 B 类进行如下处理，使处理后抗拉强度达到 1 793 MPa~1 931 MPa：

- 在保护气氛条件下奥氏体化处理，保温温度为 816 ℃～843 ℃，冷却方式为油冷；
- 在 218 ℃～254 ℃双重回火，每次保温 2 h。

- 6.2.6 取四个试样按照 ASTM E8/E8M 进行拉伸测试，验证热处理工艺的符合性。
- 6.2.7 试样的整个缺口部分应符合尺寸要求。不对缺口进行单刃车削、抛光、喷丸、吹砂及任何机械清洁处理。
- 6.2.8 磨削后，试样应按照 AMS 2759/11 在 190 ℃±14 ℃温度下进行 4 h～5 h 去应力烘烤。烘烤时应采用保护措施防止热处理时氧化变色。
- 6.2.9 不应用酸洗或阴极电解方法清洁处理试样。
- 6.2.10 最终热处理后不对试样进行矫直处理。

6.3 储存

应防止试样在去应力退火后发生腐蚀。宜采用的保护方法是在试样上涂一层符合 MIL-PRF-16173 中 2 级要求的防腐蚀材料。

6.4 检查

- 6.4.1 一批试样应为同炉材料，同一取向切取，在同炉进行热处理后同时淬火和回火，并应采用同样的制备过程。
- 6.4.2 当取样的检查结果符合表 3 和 6.5 的要求时，缺口试样便可用于试验。

表3 1 型缺口试样的验收方法和要求

型号	项目	每批取样量	方法和要求
1	抗拉强度	4 个	按照 ASTM E8 测试测试，每个试样的抗拉强度应在平均值的 ±68.95 MPa (10 ksi) 的范围内。
1	硬度	5 %	按 ASTM E18 试验方法，硬度值应达到 HRC51～HRC53，按 ASTM E29 对每一个试样三个读数的平均值取整。
1	尺寸	100 %	应符合图纸所示尺寸，用放大 50 倍～100 倍的投影法检查缺口尺寸。
1	缺口断裂强度 (NFS)	10 个	按 ASTM E8/E8M 测试每个试样的 NFS，数值应在平均值的 ±68.95 MPa (10 ksi) 的范围内。
1C	自加载缺口圆棒弯曲夹具 如图 B.5 所示	10 个	替代方法：每个试样发生断裂时，加载螺栓旋转圈数应在平均值的 ±5% 范围内。
1d	自加载缺口 C 型环弯曲夹具 如图 B.6 所示	10 个	替代方法：每个试样在断裂时直径的变化应在平均值的 ±0.203 mm (0.008 in) 的范围内
注：如果任一抽取试样的硬度不能满足要求，则应对这批试样进行逐个检查。只有满足技术要求的，才能用于试验。			

6.5 敏感性试验

- 6.5.1 按 6.1～6.4 制备和检查试样合格之后，应将每批热处理的 AISI E4340 钢取六个试样暴露于两种不同类型的致氢脆镀镉环境中进行氢脆敏感性试验。其中三个试样按方法 A(见表 1)进行电镀，另外三个试样应按方法 B(见表 1)进行。
- 6.5.2 按附录 C 采用恒载荷 (SLT) 试验方法验证每批次试样的敏感性，按方法 A 电镀的三个试样在 24 h 内应全部断裂；且按方法 B 电镀的三个试样在 200 h 内应全部不断裂。不同试样的加载要求见表 4。

6.5.3 按附录 C 采用逐步增加载荷 (ISL) 试验方法确认每批次试样的敏感性, 按方法 A 电镀的三个试样加载至小于 50% NFS 时, 三个试样均出现裂纹; 且按方法 B 电镀的三个试样, 加载到 90% NFS 试样应全部不断裂。加载方法为: 首先每增加 5% NFS 保持 1 h, 加载 15 次, 然后再按照每增加 5% NFS 保持 2 h, 加载 5 次达到 100% NFS。

表4 恒载荷试验加载要求

试样型号	加载要求
1a、1b、1c、1d、1e 型	75%的缺口抗拉或抗弯强度
2a 型	按 ASTM E8 进行, 加载 92%的极限强度, 可用一根长 64.135 mm (2.525 in) 应力棒插入直径为 58.42 mm (2.300 in) 的 O 型环试样来实现

6.6 合格证

每一批试样的制造和销售应有书面证明, 以表明其符合第 6 章的要求。书面证明应包括下列信息:

- 每批试样的制造商;
- 钢材供应商、炉批号以及化学成分和热处理证书;
- 每批试样热处理工艺证书
- 表 3 和 6.5.3 所要求的试验结果, 包括对应的平均断裂强度, 精确到以兆帕 (MPa) 为单位的小数点后两位 (以千磅每平方英寸 (ksi) 为单位的小数点后两位)。

7 试验规则

7.1 电镀工艺

7.1.1 每个电镀工艺试验应至少使用四个试样。

7.1.2 每个试样只应加工和使用一次, 试样不应退镀后重复使用。

7.1.3 肉眼观察, 除夹持区域外, 整个试样表面都应覆盖镀层。

7.1.4 为防止电镀层影响试样的夹持, 试样夹持区域宜进行局部保护。如进行了保护, 则应报告。

7.1.5 无孔镀层会阻止氢的溢出, 如镀镍或者光亮镀镉。对这类工艺进行评估时, 应将试样的一部分保护, 使其不覆盖镀层, 以便于烘烤过程中氢的逸出。因此, 对于无孔镀层, 宜按以下方式进行电镀:

- 对于缺口试样 (1a、1b、1c、1d 和 1e), 使整个缺口以及缺口两侧 13 mm (0.5 in) 区域内均覆盖镀层;
- 对于 2a 型光滑环试样, 除边沿可以保护外, 试样的内径环面和外径环面均覆盖镀层。

7.1.6 在应力计算时, 应采用试样电镀前的尺寸。

7.1.7 恒载荷 (SLT) 试验中, 对试样的加载应符合表 4 的要求。持久加载时间应不少于 200 h, 可用一个继电器开关系统监测断裂时间。

7.1.8 可用附录 C 中的逐步增加载荷 (ISL) 试验方法替代, 该试验方法见 ASTM F1624。

7.2 飞机用化学品

7.2.1 一般要求

7.2.1.1 表面处理

试样的表面状态，如有电镀镀层或无任何镀层应由买方指定。否则，除非另有规定，试样应按表 1 中的方法 B 进行镀镉和铬酸盐处理。电镀工艺按第 8 章的要求确认是非氢脆性的，未电镀试样表面应符合 6.1 的要求。应在试验报告中注明试样的表面状态。

注：采用电镀试样确认没有致氢脆性的飞机用化学品，若使用未电镀试样测试时可能表现出高氢脆性，反之亦然，因此，建议使用电镀和未电镀的试样同时进行测试。

7.2.1.2 数量

应至少使用四个试样。

7.2.1.3 试样的重复使用

按本标准加工和测试的试样只应使用一次，不应退镀后再重复使用。

7.2.2 飞机用化学品的分类

7.2.2.1 本标准将飞机用化学品分为强腐蚀性和弱腐蚀性两类。

7.2.2.2 弱腐蚀性飞机用化学品一般不会对表面镀镉的或无镀层的空气熔炼 AISI E4340 钢造成任何可感知的腐蚀，例如大部分清洗剂和褪漆剂等。

7.2.2.3 强腐蚀性飞机用化学品会与有镀镉层或无镀镉层的空气熔炼 AISI E4340 钢发生反应，例如硝酸，需要控制试样的接触时间。

7.2.3 飞机用化学品的测试程序

7.2.3.1 对于弱腐蚀性飞机用化学品，试样应按表 5 进行加载，然后暴露在弱腐蚀性飞机用化学品中 150 h，测试完成后，试样和夹具应冲洗干净并用压缩空气吹干。

7.2.3.2 对于强腐蚀性飞机用化学品，试样应按表 5 进行预加载，并按制造商提供的使用时接触试样的最大时间的 1.5 倍来确定试样在环境中的暴露时间，并记录暴露时间。暴露结束后应立即中和（如没有相应标准，则按飞机用化学品制造商推荐的方式进行）试样和夹具的表面，再冲洗干净并用压缩空气吹干，然后将载荷增加到表 4 中所列的水平，保持载荷直到达到 200 h（包含预加载后的暴露时间）。

7.2.3.3 对于飞机用化学品的测试，容器应与试样的缺口部分电绝缘。如果整个加载夹具暴露在飞机用化学品中，应避免加载夹具可能与试样产生的电偶反应。

表5 评估弱腐蚀性飞机用化学品的加载要求

试样型号	加载要求
1a、1b、1c、1e 型	45%缺口断裂强度
1d 型	65%缺口断裂强度
2a 型	按 ASTM E8/E8M 要求的 80%屈服强度，可用长度为 61.34 mm (2.415 in) 的应力棒插入直径为 58.42 mm (2.300 in) 的 O 型环试样中来实现

7.2.4 试验环境

7.2.4.1 试验应在空气中或受控的环境下进行，且使用的试验容器不应与飞机用化学品发生反应。

7.2.4.2 应采用合适的惰性容器或采用补偿法使夹具与试样绝缘，阻止形成电偶对。

7.2.4.3 飞机用化学品为液体化学品时，应测试其原液和规定的最小浓度，来测定暴露在全部使用浓度下的氢脆影响。除非另有说明，稀释剂应采用 ASTM D1193 IV 型水。

7.2.4.4 飞机用化学品为固体化学品时,应测试其最小使用浓度和饱和液,来测定暴露在全部使用浓度下的氢脆影响。除非另有说明,稀释剂应采用 ASTM D1193 IV 型水。

7.2.4.5 试样 1 cm^2 的暴露面积需要待测化学品体积为 25 ml,盛有待测化学品的容器应加盖减少样品挥发。每个工作日至少检查一次液位,除非另有说明,应用待测化学品的稀释剂补充到指定的液位而不是用原液。

7.2.4.6 所有的试验都应在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行,或者在飞机用化学品的实际使用温度下进行,记录试验温度。如果需要升高温度进行试验,试验温度应低于试样材料回火温度和镀层熔化或升华温度至少 28°C 。

8 试验结果

8.1 电镀工艺

8.1.1 当按表 4 规定加载后,200 h 内没有一个电镀试样发生断裂,则应认为该电镀工艺无致氢脆性。

注:自加载型试样(1b, 1c, 1d, 2a)可按 ASTM E1444 进行磁粉探伤或按 ASTM E1417 进行液体渗透探伤,以确认是否因应力水平下降导致产生的裂纹没有扩展。

8.1.2 如果在持久载荷试验期间,四个试样中有一个断裂,则应在完成 200 h 的加载后,继续以每 2 h 增加 5% 缺口抗拉或抗弯强度对其余三个试样逐步加载到 90% 缺口抗拉或抗弯强度。在加载到 90% 缺口抗拉或抗弯强度,保持 2 h 后,如果剩余三个试样中没有一个断裂,则应认为该电镀工艺无致氢脆性。

8.1.3 如果在持久载荷试验期间,有两个或两个以上的试样断裂,则应认为该电镀工艺有致氢脆性。

8.1.4 再次试验前应确定导致试样过早断裂的原因并进行纠正。

只有当断裂试样的冶金检查表明试样加工过程有缺陷或在电镀过程中使试样产生了缺陷时,才应进行再次试验。

试样在非缺口处断裂、预先存在的试样缺陷,如裂纹、磨削烧蚀或非金属夹杂物,可作为试验结果无效和再次试验的根据。

如试样在缺口以外的其他部位断裂,则试验无效,应进行再次试验。

用四个新试样进行再次试验,如果在试验期间任何一个试样发生断裂,则应认为该电镀工艺有致氢脆性。如果这个断裂是由试样的缺陷造成,应重复 8.1.4 的步骤。

8.2 飞机用化学品

8.2.1 对于弱腐蚀性飞机用化学品,如果按表 5 加载的试样暴露在该飞机用化学品中 150 h,试样均无断裂,则应认为该飞机用化学品无致氢脆性。

8.2.2 对于强腐蚀性飞机用化学品,如果 1 型试样在该飞机用化学品中暴露后,加载到 75% 缺口断裂强度,保持 200 h,试样均无断裂;或 2a 型试样加载到 92% 断裂强度,保持 200 h,试样均无断裂(见表 4),则应认为该飞机用化学品无致氢脆性。

8.2.3 如果在持久载荷试验期间,四个试样中有一个断裂,记录断裂时间。其余试样在完成 200 h 或 150 h 的加载后,继续以每 2 h 增加 5% 缺口抗拉或抗弯强度的方式,对其余三个试样逐步增加载荷到 90% 缺口抗拉或抗弯强度。在加载到 90% 缺口抗拉或抗弯强度,保持 2 h 后,如果剩余三个试样中没有一个断裂,则应认为该飞机用化学品无致氢脆性。逐步加载期间,试样不必接触飞机用化学品。

8.2.4 如果在持久载荷试验期间,有两个或两个以上的试样断裂,则应认为该飞机用化学品有致氢脆性。

8.2.5 再次试验参照 8.1.4 进行。

9 试验报告

试验报告应至少包括下列内容：

- a) 材料批次合格和敏感性验证报告；
- b) 试样的类型和数量；
- c) 电镀工艺和飞机用化学品(浓度、温度等)说明；
- d) 相应测试试样的持久载荷或门槛值、非电镀试样缺口抗拉强度或缺口抗弯强度百分率、位移值；
- e) 试验环境下的加载时间；
- f) 评估结果。

10 精确度和误差

10.1 6.5 规定的敏感性测试和第 8 章规定的试验结果判定可作为判断精确度的依据。精确度可能随着实际加载的应力以及试样几何尺寸的变化而改变。

10.2 原材料的性能和加工会给每个批次的试样带来偏差。

附录 A (规范性附录)

恒载缺口圆棒拉伸试样的特殊要求

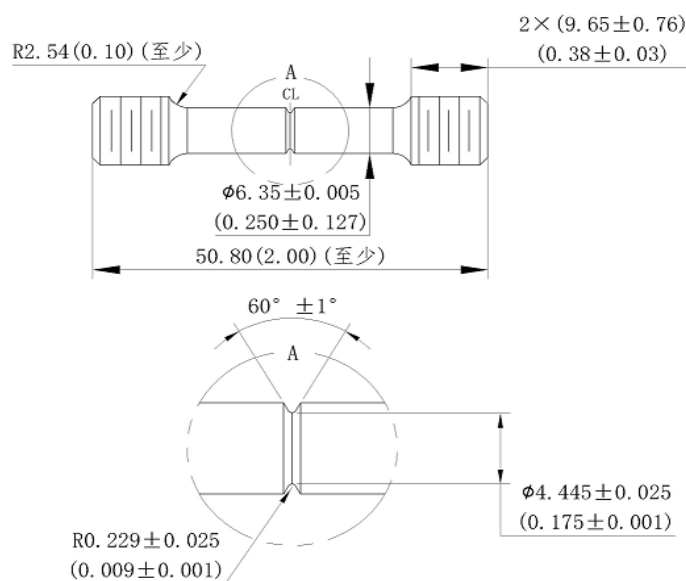
A.1 恒载缺口圆棒拉伸试样

恒载缺口圆棒拉伸试样有两种尺寸,如果没有规定试样的几何尺寸,在控制载荷的情况下,则应选用 1a.1 型标准尺寸缺口圆棒试样。

A.2 1a.1 型标准试样

1a.1 型标准试样为持久载荷试验用标准缺口圆棒试样,其尺寸如图 A.1 所示。应使用量程大于 44.5 kN (10 kips) 的试验机,按表 2 测定试样缺口断裂强度;应使用量程大于 33.4 kN (7.5 kips) 的试验机施加表 4 中规定的 75% 缺口强度的持续载荷。

单位为毫米 (英寸)



试样的制备应符合 6.2 规定。

试样缺口部分的表面粗糙度应小于 $Ra0.8$ (32RMS); 其他部分的表面粗糙度应小于 $Ra1.6$ (63RMS)。

端头结构可自选,但外螺纹底径应大于 6.35 mm (0.25 in)。

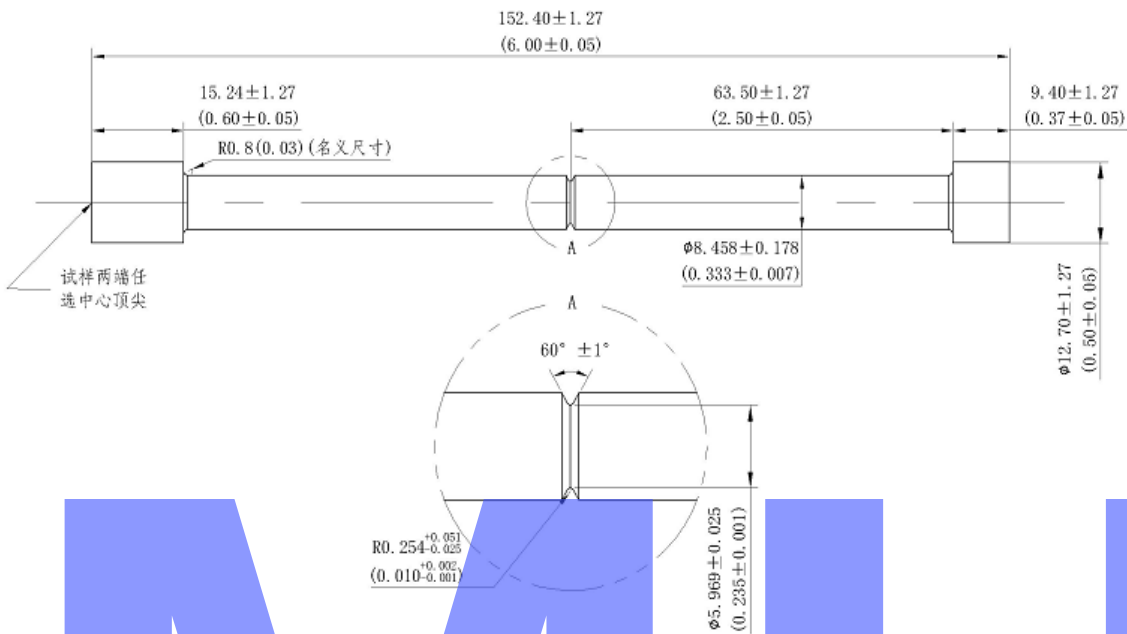
根部半径、变径部分以及缺口根部半径应与试样的中心线同轴,误差在 0.05 mm (0.002 in) 总指示偏差 (TIR) 内。

图 A.1 1a.1 型试样的尺寸

A.3 1a.2 型试样

1a.2 型试样为持久载荷试验用大尺寸缺口圆棒试样,其尺寸如图 A.2 所示。应使用量程大于 71.1 kN (16 kips) 的试验机,按表 2 测定试样缺口断裂强度;应使用量程大于 53.3 kN (12 kips) 的试验机施加表 4 中规定的 75% 缺口强度的持续载荷。

单位为毫米（英寸）



试样的制备应符合 6.2 规定。

试样缺口部分的表面粗糙度应小于 Ra0.8（32RMS）；其他部分的表面粗糙度应小于 Ra1.6（63RMS）。

端头结构可自选，如选用外螺纹端头，螺纹底径应大于 8.89 mm(0.35 in)。

根部半径、变径部分以及缺口根部半径应与试样的中心线同轴，误差在 0.05 mm(0.002 in)总指示偏差(TIR)内。

图A.2 1a.2试样的尺寸

附录 B

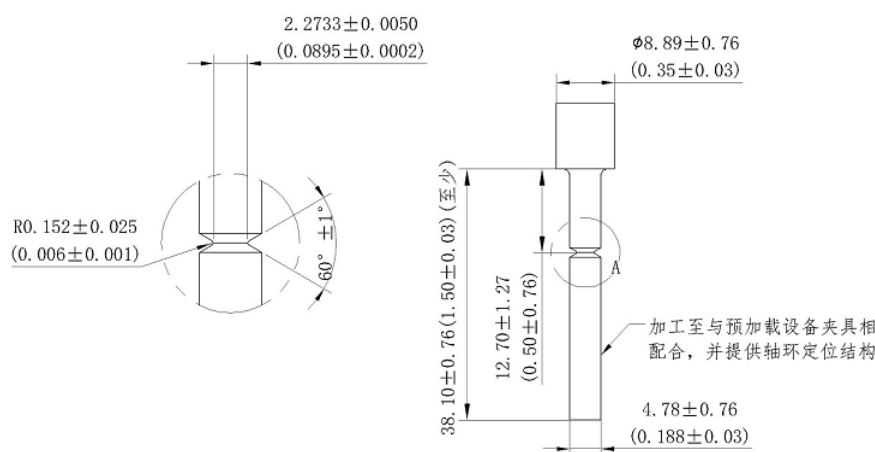
(规范性附录)

用于自加载夹具的缺口试样的特殊要求

B.1 1b 型试样

B.1.1 1b 型试样是恒位移载荷用小尺寸试样，其缺口处直径比 (d/D) 为 2.273 mm/4.775 mm (0.0895 in/0.188 in)，见图 B.1。应用专用的加载设备将试样加载到 75% 缺口强度，按表 3 测试试样缺口强度，试验机量程应大于 11.1 kN (2.5 kips)。

单位为毫米 (英寸)



图中标示出了用定位轴环和应力环装配上的 1b 拉伸试样。

试样缺口部分的表面粗糙度应小于 $Ra0.8$ (32RMS)；其他部分的表面粗糙度应小于 $Ra1.6$ (63RMS)。

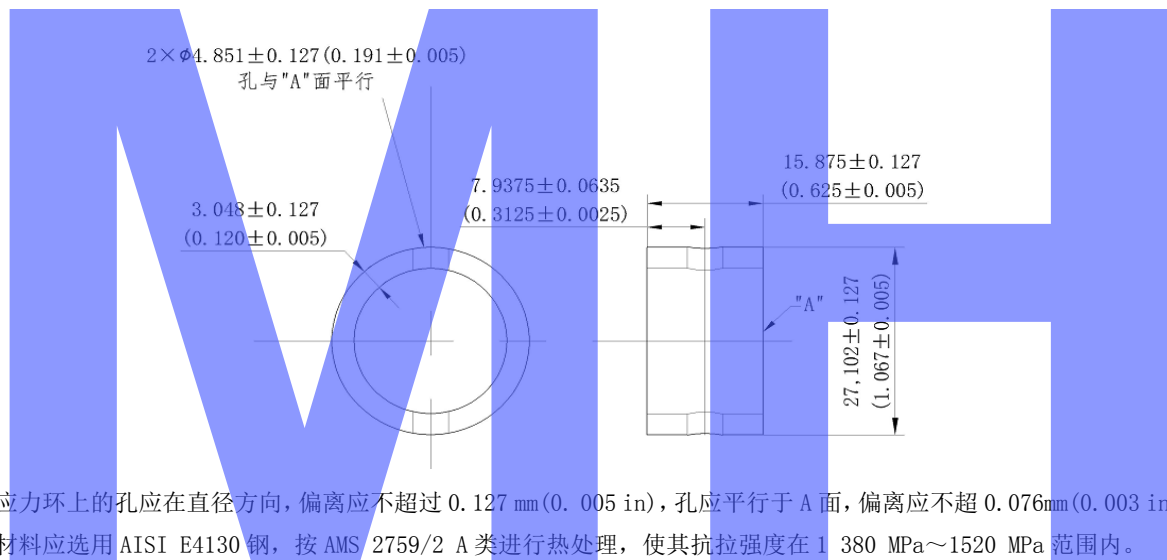
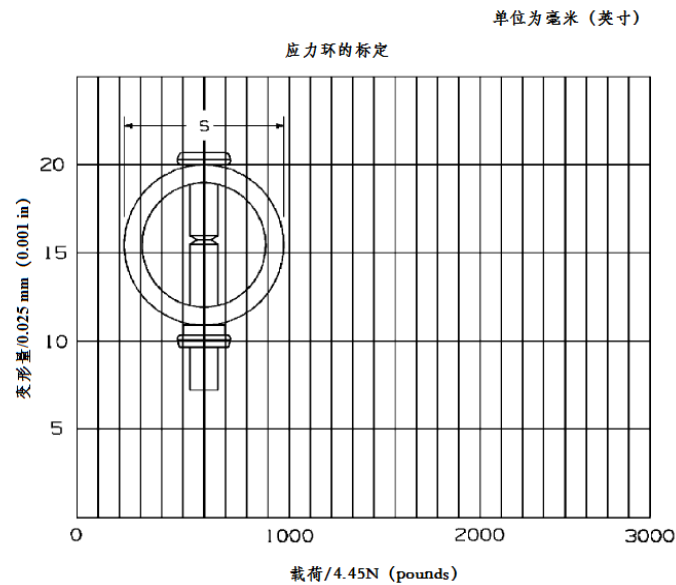
根部半径、变径部分以及缺口根部半径应与试样的中心线同轴，误差在 0.05 mm (0.002 in) 总指示偏差 (TIR) 内。

图 B.1 1b 型试样的尺寸要求

B.1.2 图 B.2 显示了采用弹力加载拉伸缺口圆棒试样方法时使用的预标定环。预标定环的制造商应根据所测定的每个环在受到相当于圆棒试样 75% 缺口强度的载荷作用时的直径变化，对其进行标定。

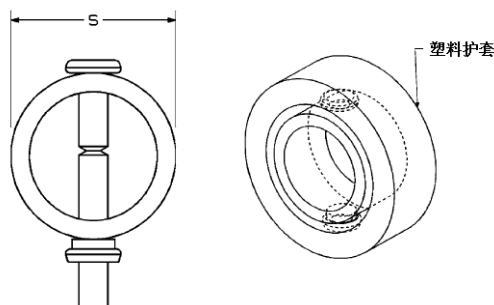
B.1.3 对应力环中试样进行加载的装置应能以试样最大载荷 90% 的应力水平夹持试样。在试样缺口强度 75% 的应力水平下加载和锁住试样的方法见 B.1.4。

B.1.4 将试样插入经过标定的应力环，在试样的端头配一个不锈钢定位轴环，然后将其安放到液压加载设备的夹具上。加载时轴环沿着试样的轴向对环加压，且在加载中不应带入扭矩载荷。从液压加载设备卸下后，应力环的直径变化显示了所施加的实际应力值 (试验载荷)，而且这个数值应大于初次加载时应力环直径变化的 90%。如果在试验结束后试样仍没有断裂，则此时测得的直径与开始试验后测得的直径相比，变化应不超过 0.025 mm (0.001 in)。为防止受载试样过早断裂对操作者的伤害，应按图 B.2 和图 B.3 加载后立即在试样和圆环上安装保护套环。



应力环上的孔应在直径方向, 偏离应不超过 0.127 mm (0.005 in), 孔应平行于 A 面, 偏离应不超过 0.076 mm (0.003 in)。材料应选用 AISI E4130 钢, 按 AMS 2759/2 A 类进行热处理, 使其抗拉强度在 1 380 MPa~1520 MPa 范围内。每一应力环在测试液体样品前, 应确保试件不接触样品。

图 B.2 1b 应力环的尺寸要求



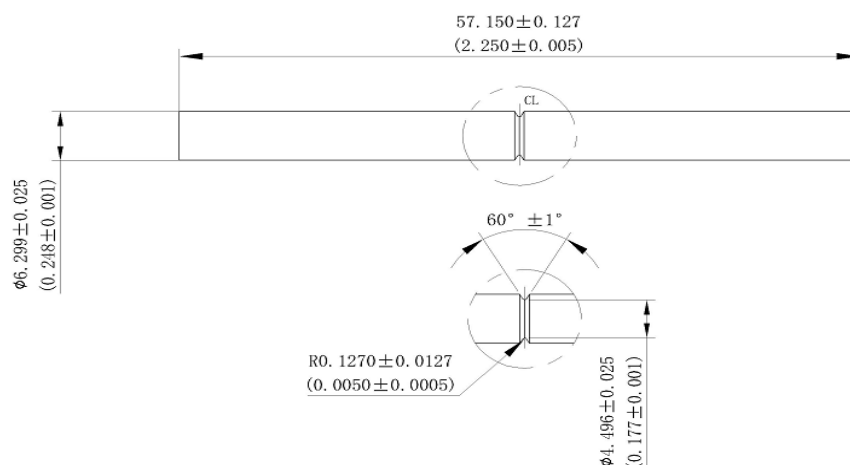
注: 当加载到规定的应力水平后, 将试样和应力环套进用软塑料做的护套内, 护套外径S为44.5 mm (1.75 in), 壁厚为6.4 mm (0.25 in)。

图 B.3 1b 试样和应力环的护套环安装

B.2 1c 型缺口弯曲试样

1c 型缺口弯曲试样尺寸如图 B.4 所示。自加载装置(见图 B.5)能使试样受弯曲载荷。自加载装置通过计数使试样折断的加载螺栓转数进行标定。在加载时除了要数清楚螺栓加载的转数外,还应测量两根加载棒两端的距离以确认试样和加载螺栓的位置正确。应力水平则由标定过程中折断试样的平均转数的百分比来表示。自加载装置应采用尺寸为 15.9 mm (5/8 in)、硬度大于 HRC35 的不锈钢方棒加工。

单位为毫米(英寸)



试样的制备和缺口的角度应符合 6.2 规定。

试样缺口部分的粗糙度应小于 Ra0.8 (32 RMS); 其他部分表面应小于 Ra1.6 (63 RMS)。

根部半径、变径部分以及缺口根部半径应与试样的中心线同轴,误差在 0.508 mm (0.002 in)总指示偏差(TIR)内。

图 B.4 1C 缺口弯曲圆棒试样的尺寸要求

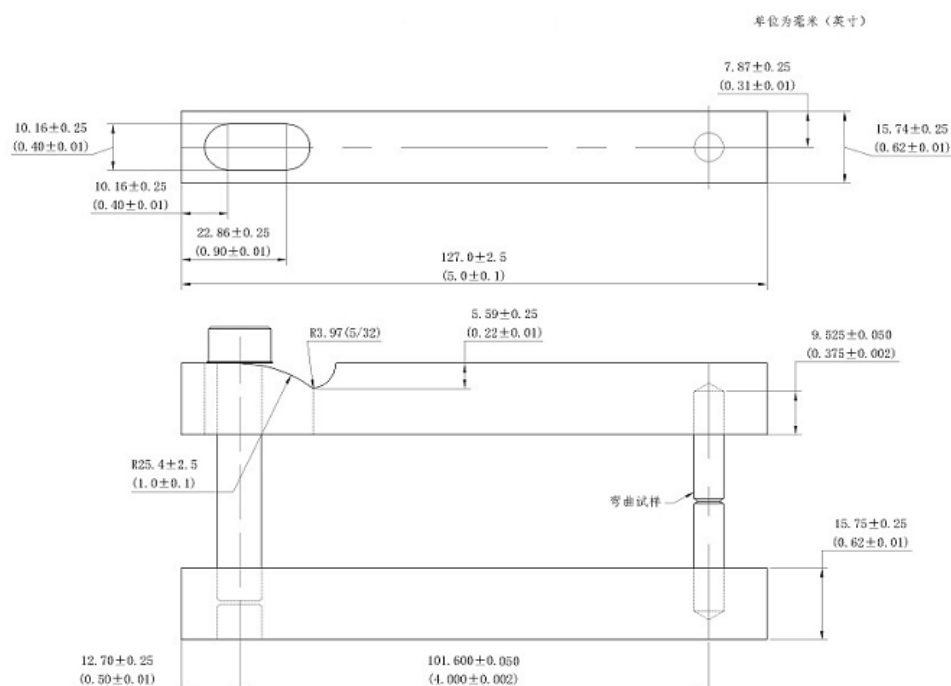
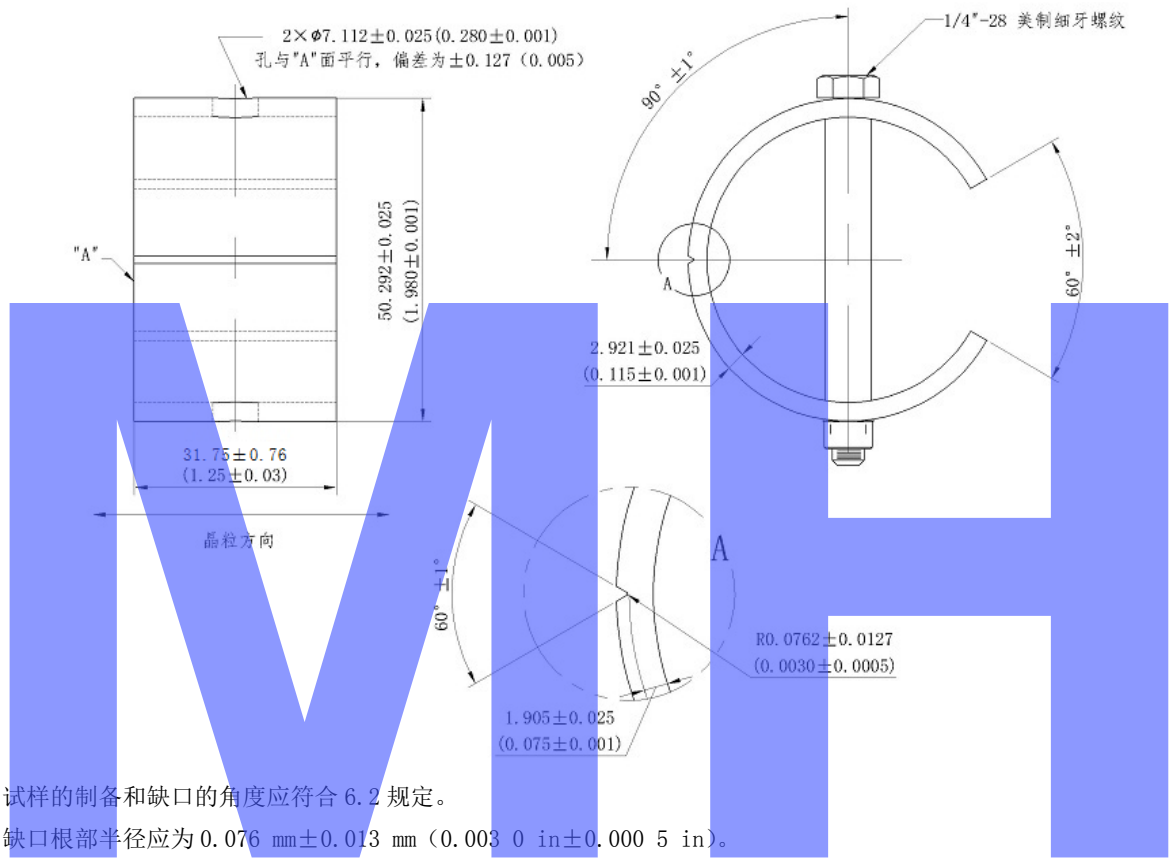


图 B.5 缺口圆棒弯曲试样自加载夹具

B.3 1d 型缺口 C 型环弯曲试样

1d 型缺口 C 型环弯曲试样尺寸如图 B.6 所示。试样从直径为 50.8 mm(2 in) 的 4340 钢棒材上切取，其外径为 50.8 mm(2 in)，壁厚为 2.921 mm(0.115 in)，长度为 31.75 mm(5/4 in)。用加载螺栓对试样加载，形成自加载装置。加载螺栓应位于沿着试样的直径并与缺口相背的方向上，如图 B.6 所示。用图 B.7 中的加载设备测试未暴露试样(见表 2)在断裂时直径的平均值。应力水平与相对于试样断裂时直径变化的百分比有关。



试样的制备和缺口的角度应符合 6.2 规定。

缺口根部半径应为 0.076 mm±0.013 mm (0.003 0 in±0.000 5 in)。

图 B.6 带加载螺栓的 1d 缺口 C 型环试样尺寸要求

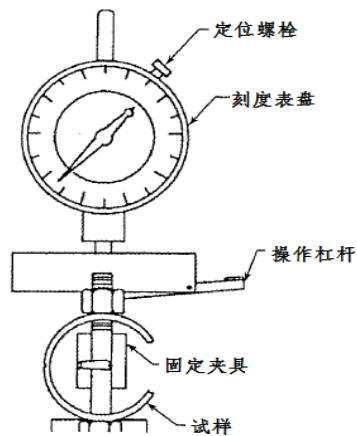


图 B.7 1d 缺口弯曲 C 型试样受应力变形的测量装置

附录 C

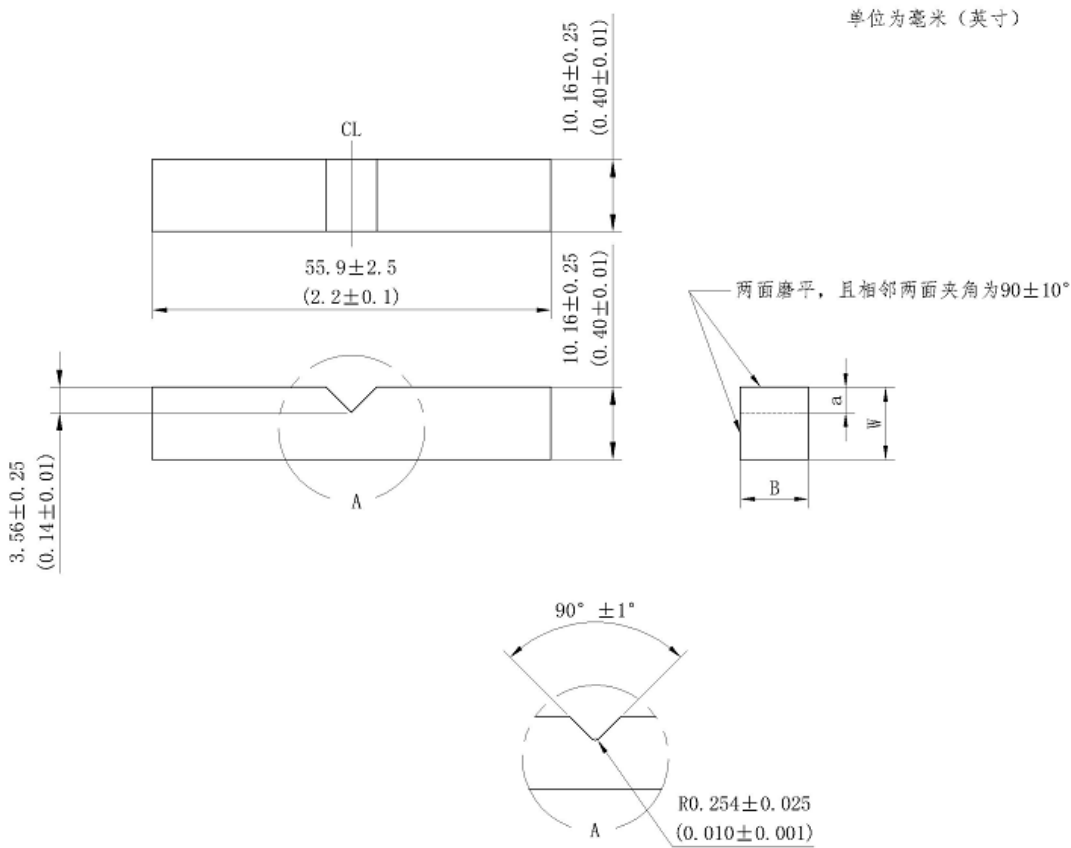
(规范性附录)

逐步增加载荷（ISL）试验所用试样的具体要求

C.1 试样

C.1.1 本标准中所有试样均可按 ASTM F1624 规定的逐步增加载荷（ISL）试验方法进行拉伸或弯曲试验。但是，ASTM F1624 中的 ISL 加载和保持时间只适用于四点弯曲的 1e 型试样（硬度为 HRC52~HRC54 的 4340 钢）；若用其他试样进行 ISL 加载中的方法应考虑材料和热处理的要求。1e 型试样尽管与 1a、1b 及 1c 型试样一样，其裂纹平面为横向，但是 1e 型试样的尺寸却与 1d 型试样——C 形缺口弯曲试样有相同的 a/w 值（缺口深度和试样宽度的比值）。

C.1.2 1e 型试样为缺口方形弯曲试样，其尺寸如图 C.1 所示。试样应在控制位移的情况下用适当的四点弯曲夹具进行试验。



试样的制备应符合 6.2 规定。

缺口应在 ASTM E1823 规定的 LS 方向。

试样缺口部分的表面粗糙度应小于 Ra0.8（32RMS）；其他部分的表面粗糙度应小于 Ra1.6（63RMS）。

在试样尺寸规格公差范围内，应保持缺口部分的净厚度 $W-a=6.60\text{ mm}(0.26\text{ in})$ 。

图 C.1 1e 型缺口方棒弯曲试样的尺寸要求

C.2 制备

试样材料在热处理时会发生脱碳,为消除脱碳层,宜选用粗加工至比试样尺寸稍大的方钢加工试样。应对横截面进行显微组织检查,以确保当有任何取向效应存在时,缺口位于其法线方向与材料的纵向一致、开口方向与材料厚度方向一致的位置。试样应通过磨削的方式消除试样表面的脱碳层,达到最终尺寸。

C.3 加载程序

C.3.1 ISL 试验方法是将持久试验和慢应变速率试验结合对氢脆性进行测试。在控制位移条件下,通过增加载荷并保持载荷时间对亚临界裂纹扩展门槛载荷进行测定,从而量化试样中的氢残留量。

C.3.2 本标准中的加载程序包括:以每小时加载 5%NFS,加载到 75%NFS;然后以每 2 h 加载 5%NFS (15/5/1+5/5/2),直至试样断裂。

C.3.3 ISL 加载的步骤参见 ASTM F1624。

C.4 门槛值

当试样保持在恒位移状态下,载荷下降 5%相当于亚临界裂纹在该位移以及相应的应力下开始扩展。在该位移下,载荷下降 5%以前的载荷,即为该试样的门槛载荷。如果试样在进一步加大位移和载荷时断裂,加载前的载荷应被认为是门槛载荷;以该试样的缺口断裂强度的百分数表示,试验结果记为门槛值。它与恒载荷试验的结果表示方法(通过或不通过)不同。

C.5 恒载荷持久(SLT)试验和逐步增加载荷(ISL)试验的等效性

SLT 和 ISL 两个方法之间没有按照 ASTM E691 的要求建立等效性,但是,已证实未电镀试样用 ISL 方法在空气中加载到 90%NFS 时会断裂。因此,电镀试样在 90%NFS 加载条件下维持 2 h 未断裂,则认为电镀试样是非氢脆性。

C.6 试验结果

按照 (15/5/1+5/5/2) 的加载方法,如果试样在 ISL 试验中门槛值达到或超过 90%NFS,且在 2 h 内未断裂,则可认为电镀工艺是非氢脆性的。

C.7 零部件允许量

C.7.1 由于材料对氢的容忍度随着材料的硬度不同而不同,用于制造实际零件的低强度钢对因电镀引入的氢残留量的容忍度更高,不需要采用与高强钢试样相同的门槛值,因此可以对门槛值的要求进行调整。

C.7.2 为了获得本标准的门槛值和实际生产零件的相关性,可按 ASTM F1624 对实际零件的门槛值或氢容忍度进行测定。

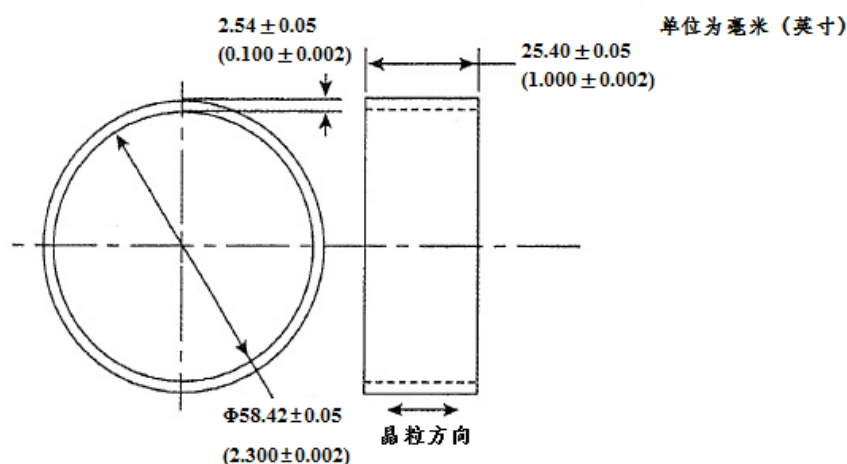
附录 D

(规范性附录)

用恒位移应力棒加载的光滑 O 型试样的特殊要求

D.1 试样

2a 型试样的尺寸见图 D.1。试样的加载方式是用虎钳将 O 型环压扁，在 O 型环中插入一根尺寸大于圆环内径的应力棒。应力棒的加工应按图 D.2 进行。虎钳的钳爪应垫上不易损伤试样的材料，如铝或邵氏硬度为 60 HA 的橡胶。



试样在喷丸前表面粗糙度应等于或优于 Ra1.6 (63RMS)。

在热处理和喷丸前后，试样的椭圆度应在规定的公差范围内。

椭圆度的测量是通过测量三条夹角为 60° 的直径来确定的。

图 D.1 2a 型试样的尺寸要求

D.2 加工

D.2.1 应用正火和去应力退火的管材或棒材加工成 2a 型试样所需尺寸。

D.2.2 在试样进行热处理前，应用碳化硅砂纸手工去毛刺。

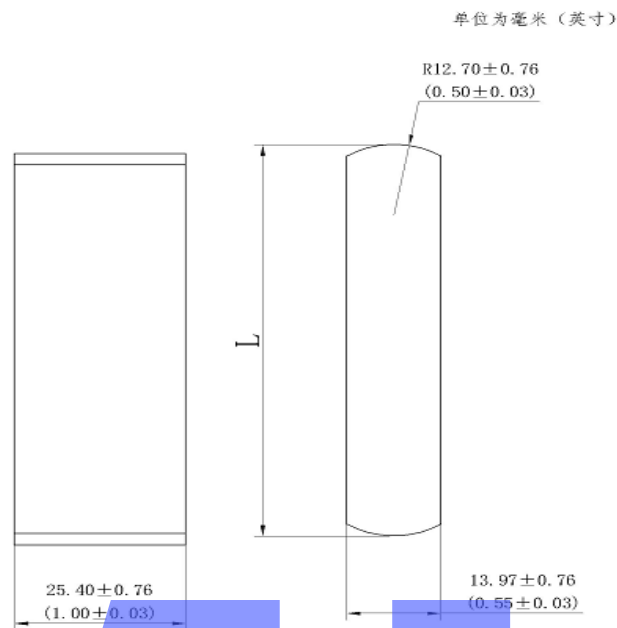
D.2.3 每批试样按照 AMS 2759/2 A 类进行热处理，热处理后应使试样的硬度达到 HRC51~HRC53。热处理后应抽出一个试样做显微组织检查，确定是否有脱碳。

D.2.4 在最后一次热处理及喷丸后，应用 150 目或更细的氧化铝轻喷试样的表面以清洁试样。工艺采用 9.5 mm~13 mm (0.375 in~0.5 in) 的喷嘴，0.21 MPa~0.35 MPa (30 psi~50 psi) 压力，在距离试样约 254 mm (10 in) 处喷，并应不停移动喷嘴。

D.2.5 试样所有外表面均应按 AMS 2430 进行喷丸处理，喷丸的强度应为 0.15 mm~0.25 mm (0.006 in~0.010 in)。

D.2.6 最终热处理后，不对 2a 型试样进行磨削。

D.2.7 每个 2a 型试样应经过检验，且符合表 D.1 的要求，才可用于试验。



应力棒材料应为普通碳钢或低合金钢，应力棒和 O 形环试样都应用拟进行氢脆评估的工艺进行电镀，但对于按表 3 的敏感性试验，在使用前应力棒应按 AMS-QQ-P-416 镀光亮铬。

对 2a 型试样加载到 80%试样屈服强度，“L”应为 61.341 mm±0.076 mm(2.415 in±0.003 in)。

对 2a 型试样加载到 92%试样极限强度，“L”应为 64.135 mm±0.051 mm(2.525 in±0.002 in)。

图 D.2 2a 型应力棒的尺寸要求

表 D.1 2a 型试样的验收标准

性能	要求或试验方法
硬度	按 ASTM E18 测试，HRC51~HRC53
尺寸	符合图 D.1 要求
表面质量	参考 ASTM E709，磁粉探伤，应无大于 0.8 mm(0.031 in) 的提示信号
划痕	不允许

参 考 文 献

- [1] AMS 2430 喷丸
 - [2] AMS-S-5000 铬-镍-钼钢(E4340)棒材和重复锻造坯料
 - [3] ASTM D1193 试剂水规范
 - [4] ASTM E691 开展实验室间研究以确定试验方法精度的实施规程
 - [5] ASTM E709 磁粉检验指南
 - [6] ASTM E1417 液体渗透探伤实施规程
 - [7] ASTM E1444 磁粉探伤的实施规程
 - [8] ASTM E1823 疲劳和裂纹测试的相关术语
 - [9] ASTM G5 动电位阳极化的参考试验方法
 - [10] MIL-PRF-16173 防腐化合物, 溶解稀释, 冷使用
-