

团 体 标 准

T/CSAE xx—20xx

1500MPa 及以上汽车用铝硅镀层热冲压钢氢致 延迟断裂风险测试方法

The testing method of hydrogen induced delayed
fracture risk of automobile Al-Si coated
press-hardened steel with 1500MPa and above

在提交反馈意见时，请您将知道的该标准所涉及必要专利信息连同支持性文件一并附上。

20xx-xx-xx 发布

20xx-xx-xx 实施

中国汽车工程学会 发布

目次

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 试样要求 3

4.1 试样规格 3

4.2 试样加工要求 3

4.3 试样清洁 4

5 试验设备 4

6 试验过程 4

6.1 确定材料的氢致延迟断裂风险 4

6.2 确定零件的氢致延迟断裂风险 6

7 试验报告 7

附录 A（资料性）2000MPa 级铝硅镀层热冲压钢材料临界氢脆风险指数、氢含量以及露点测试过程实例 9

附录 B（资料性）1500MPa 级铝硅镀层热冲压钢材料临界氢脆风险指数、氢含量以及露点测试过程实例 11

附录 C（资料性）零件氢脆风险指数安全阈值确定原理 13

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。

本文件由汽车轻量化技术创新战略联盟提出。

本文件由中国汽车工程学会标准化工作委员会归口。

本文件起草单位：育材堂（苏州）科技有限公司、东北大学、小米汽车科技有限公司、岚图汽车科技有限公司、北京车和家汽车科技有限公司、浙江极氪智能科技有限公司、长城汽车股份有限公司、东风汽车集团股份有限公司研发总院、中国第一汽车股份有限公司、吉利汽车研究院（宁波）有限公司、广州小鹏汽车科技有限公司、北京汽车研究总院有限公司、赛力斯汽车有限公司、上海汽车集团股份有限公司乘用车分公司、广州汽车集团股份有限公司、东风日产乘用车公司、深蓝汽车科技有限公司、上海蔚来汽车有限公司、奇瑞汽车股份有限公司、鞍钢蒂森克虏伯汽车钢有限公司、马鞍山钢铁股份有限公司、攀钢集团有限公司、鞍山钢铁集团有限公司、唐山钢铁集团有限责任公司、江西豪斯特汽车零部件有限公司、东风（武汉）实业有限公司、江苏燕龙科技股份有限公司、香港大学、北京科技大学

本文件主要起草人：易红亮、周澍、冷秋月、张兴孟、许梦绮、张骁杰、杜文鑫、冉浩、张叮、曹广祥、陈胜、辛蕊、尹小文、徐钧、刁法玺、俞雁、董善举、郭武俊、石春梅、张磊、蒙菁、崔磊、常智渊、胡智评、李建英、梁肖、尤宝卿、赵传涛、黄明欣、杨达朋、汪水泽

1500MPa 及以上汽车用铝硅镀层热冲压钢氢致延迟断裂风险测试方法

1 范围

本文件规定了汽车用铝硅镀层热冲压钢氢致延迟断裂风险测试方法的试样要求、试验设备、试验过程、结果评价和试验报告等。

本文件适用于抗拉强度在1500MPa及以上的汽车用铝硅镀层热冲压钢的氢致延迟断裂风险测试。

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 39039-2020 高强度钢氢致延迟断裂评价方法

JJG 475 电子式万能试验机检定规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件

3.1

氢致延迟断裂 hydrogen induced delayed fracture

材料在应力和氢原子双重作用下发生的延迟断裂行为。

3.2

露点 dew point

恒定气压条件下，空气中的水蒸气达到饱和状态并开始凝结成液态水时的温度，单位：℃。

3.3

氢含量 hydrogen content; C_H

试样中能够在室温下迁移并参与材料损伤过程的氢原子总量，单位：ppm。

3.4

慢应变速率拉伸试验 slow strain rate tensile test

本文件特指拉伸速度不高于 0.01mm/min 的拉伸试验。

3.5

高应变速率拉伸试验 high strain rate tensile test

本文件特指拉伸速度为 10mm/min 的拉伸试验。

3.6

氢致断裂应力 hydrogen-induced fracture stress; σ_H

试样以 0.01mm/min 拉伸速度进行拉伸试验获得的最大力与原始横截面面积的比值, 单位: MPa。

3.7

基准断裂应力 reference fracture stress; σ_0

试样以 10mm/min 拉伸速度进行拉伸试验获得的最大力与原始横截面面积的比值, 单位: MPa。

3.8

氢脆风险指数 hydrogen embrittlement risk index; HERI

试样基准断裂应力和断裂应力的差值与基准断裂应力的比值的百分数, $HERI = \frac{(\sigma_0 - \sigma_H)}{\sigma_0} \times 100\%$,

单位: %。

3.9

氢含量-氢脆风险指数曲线 hydrogen content vs. hydrogen embrittlement risk index; C_H -HERI

本文件特指以试样的氢含量作为横坐标, 以每个氢含量对应的氢脆风险指数为纵坐标, 绘制成的二维曲线。

3.10

临界氢脆风险指数 critical hydrogen embrittlement risk index; $HERI_c$

本文件中特指氢含量 - 氢脆风险指数曲线上斜率未增加, 且其后至少两个数据点随氢浓度增加仍显示氢脆风险指数上升的最高氢脆风险指数值为临界氢脆风险指数, 单位: %。

3.11

临界氢含量 critical hydrogen content; C_{HC}

本文件中特指临界氢脆风险指数对应的氢含量, 单位: ppm。

3.12

临界露点 critical dew point

本文件中特指临界氢含量对应的露点, 单位: $^{\circ}\text{C}$ 。

4 试样要求

4.1 试样规格

慢应变速率拉伸试验缺口试样的推荐结构和尺寸如图1所示。

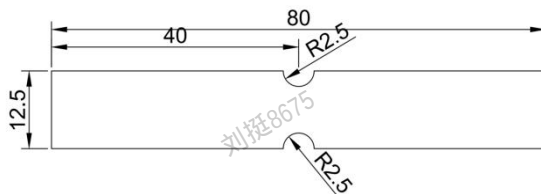


图1 慢应变速率拉伸试验缺口试样规格 (mm)

试样缺口半径推荐为2.5mm, 应力集中因子为1.8。

可通过调整缺口半径的方式调整应力集中因子进而调整局部应力, 应该避免缺口半径过小, 导致加工使试样缺口表面存在问题 (毛刺, 粗糙度和表面缺陷等); 也应该避免缺口半径过大使应力集中因子过小导致试验效率降低。试样的宽度和长度可以进行适当的改变, 但是需要保证试样在缺口中心处断裂。

4.2 试样加工要求

试样加工应符合以下要求:

a) 对于钢板来料, 要求拉伸试样长度方向垂直于板材的轧向。若需评价材料其他方向的氢致延迟断裂风险, 可按要求方向取样。取样方向应在试验报告中标明。

b) 对于零件来料，应尽量在平直区域取样。

c) 采用激光切割等与实际加工相同的方式。不对试样边部进行打磨等其他加工处理。

4.3 试样清洁

试验前需要对试样表面使用无水酒精或者丙酮进行清洗以去除油污和锈迹等表面污染物，但是不应破坏试样表面，包括镀层和基体微观结构的完整性。不应采用可能会使试样引入氢原子的介质清洗试样。

5 试验设备

试验设备应符合以下要求：

a) 对于板料热冲压，可采用管式炉进行加热；露点需采用露点仪进行监控测量。

b) 针对慢应变速率拉伸试验以及高应变速率拉伸试验，可采用拉伸试验机，试验机的精度应满足1级要求，并需要定期参照JJG 475要求进行精度校准。

c) 针对氢含量测量，可采用扩散氢分析仪，其相关技术要求应与厂家产品说明文件相符。

6 试验过程

6.1 确定材料的氢致延迟断裂风险

6.1.1 热冲压过程调控露点充氢

充氢过程应按照以下步骤进行：

a) 首先将管式炉加热至目标奥氏体化温度；

b) 其次调控露点在-40~40℃范围内，将压缩空气与湿气混合后通入管式炉，并利用露点仪实时监测露点，通过调节压缩空气与湿气的比例，直至达到目标露点；

c) 最后将测试材料置于管式炉中进行奥氏体化，并在奥氏体化后将测试材料从加热装置中快速移至冲压模具中进行冲压。

6.1.2 试样加工要求

测试材料经过热冲压后应立即进行试样加工，通过激光切割制备待测缺口试样以及基准缺口试样，尺寸如图1所示，测试材料从热冲压成形模具转移到切割工具以及切割工具的加工时间应控制在5分钟以内。

6.1.3 氢含量测量要求

针对试样的氢含量测量，参照GB/T 39039-2020执行升温脱附方法，推荐每个露点条件下重复试样不少于3件。测量之前应对试样进行酒精冲洗，待其表面自然风干后进行测量，清洗和风干过程要求不超过10min，并且尽量保持相同时间。本文件推荐设置温度为350℃测量氢含量，加热速率不做要求。

6.1.4 高应变速率拉伸试验

对基准缺口试样进行拉伸，以10mm/min的拉伸速度进行拉伸直至断裂获得断裂应力，推荐每个露点条件下重复试样不少于3件，试验步骤如下：

- 拉伸试验前对试样缺口处的宽度和厚度进行测量，输入到拉伸设备中；
- 使用合适的夹具对试验进行加载，将试样加载直至断裂；
- 将发生断裂的试样取下，标记试验条件并且放置在干燥的环境中进行保存。

6.1.5 慢应变速率拉伸试验

对待测缺口试样进行拉伸，以0.01mm/min的拉伸速度进行拉伸直至断裂获得对应的断裂应力，推荐每个露点条件下重复试样不少于3件，试验步骤如下：

- 拉伸试验前对试样缺口处的宽度和厚度进行测量，输入到拉伸设备中；
- 使用合适的夹具对试验进行加载，将试样加载直至断裂；
- 将发生断裂的试样取下，标记试验条件并且放置在干燥的环境中进行保存；

6.1.6 结果记录

详细记录每个露点的试样的氢含量、基准断裂应力以及氢致断裂应力。

6.1.7 试验数据处理过程

- 计算氢脆风险指数

$$HERI = \frac{(\sigma_0 - \sigma_H)}{\sigma_0} \times 100\%$$

式中：

σ_0 —基准断裂应力，MPa；

σ_H —氢致断裂应力，MPa。

- 绘制以氢含量为横坐标，氢脆风险指数为纵坐标的二维关系曲线图。
- 计算每两个相邻点间线段的斜率

$$b = \frac{HERI_2 - HERI_1}{C_2 - C_1}$$

式中：

HERI₁—两个相邻点间低氢浓度对应的氢脆风险指数，%；

HERI₂—两个相邻点间高氢浓度对应的氢脆风险指数，%；

C₁—两个相邻点间低的氢浓度，ppm；

C₂—两个相邻点间高的氢浓度，ppm。

d) 取氢含量-氢脆风险指数曲线上斜率未增加，且其后至少两个数据点随氢浓度增加仍显示氢脆风险指数上升的最高氢脆风险指数值为临界氢脆风险指数。临界氢脆风险指数确定过程参照附录A和B。

e) 临界氢脆风险指数对应的氢含量为临界氢含量，临界氢含量对应的露点为临界露点。临界氢含量和临界露点确定过程参照附录A和B。

6.1.8 结果评价

本文件要求采用氢脆风险指数作为评价同一材料在不同露点或不同氢含量条件下的氢致延迟断裂风险的依据，并采用临界氢含量以及临界露点对比不同材料的氢致延迟断裂风险。

可依据以下准则可开展评价：

a) 氢脆风险指数（HERI）：对于同一材料，当试样的氢脆风险指数低于临界氢脆风险指数值时，判断该试样无氢致延迟断裂风险；当其高于临界值时，则判断该试样存在氢致延迟断裂风险，并且氢脆风险指数值越高，氢致延迟断裂风险越高。

b) 临界氢含量（C_{HC}）：对于不同材料，该值越高则材料的氢致延迟断裂风险越低。

c) 临界露点：对于不同材料，该值越高则材料的氢致延迟断裂风险越低。

6.2 确定零件的氢致延迟断裂风险

6.2.1 试样加工要求

对生产过程中的待评价零件或板料应立即取样并且进行试验。采用激光切割制备待测缺口试样以及基准缺口试样，尺寸如图1所示。若无法立即试验，应将试样放置在液氮中保存或者以完整热冲压零件的形式进行保存，为确保试样中氢含量和分布不发生变化。

6.2.2 高应变速率拉伸试验

对基准缺口试样进行拉伸，以10mm/min的拉伸速度进行拉伸直至断裂获得断裂应力，推荐每个露点条件下重复试样不少于3件，试验步骤如下：

a) 拉伸试验前对试样缺口处的宽度和厚度进行测量，输入到拉伸设备中；

b) 使用合适的夹具对试验进行加载，将试样加载直至断裂；

c) 将发生断裂的试样取下，标记试验条件并且放置在干燥的环境中进行保存。

6.2.3 慢应变速率拉伸试验

对待测缺口试样进行拉伸，以0.01mm/min的拉伸速度进行拉伸直至断裂获得对应的断裂应力，推荐每个露点条件下重复试样不少于3件，试验步骤如下：

- 拉伸试验前对试样缺口处的宽度和厚度进行测量，输入到拉伸设备中；
- 使用合适的夹具对试验进行加载，将试样加载直至断裂；
- 将发生断裂的试样取下，标记试验条件并且放置在干燥的环境中进行保存。

6.2.4 结果记录

详细记录试样的基准断裂应力以及氢致断裂应力。

6.2.5 试验数据处理过程

$$\text{计算氢脆风险指数HERI} = \frac{(\sigma_0 - \sigma_H)}{\sigma_0} \times 100\%$$

式中：

σ_0 为基准断裂应力，MPa；

σ_H 为氢致断裂应力，MPa。

6.2.6 结果评价

本文件要求采用氢脆风险指数作为评价零件的氢致延迟断裂风险的依据。

可依据以下准则可开展评价：

氢脆风险指数（HERI）：当零件试样的氢脆风险指数低于零件所采用的材料的临界氢脆风险指数值时，判断该零件无氢致延迟断裂风险；当其高于临界氢脆风险指数值时，则判断该零件存在氢致延迟断裂风险，并且氢脆风险指数值越高，氢致延迟断裂风险越高。

6.2.7 零件氢脆风险指数安全阈值

本文件要求安全性要求更高的关键结构件的氢脆风险指数不高于5%；要求常规热冲压零部件氢脆风险指数不高于10%，原因参考附录C。

7 试验报告

7.1材料氢致延迟断裂风险评价试验报告应至少包含下列信息：

- 试样材料信息（钢的牌号，镀层种类和厚度）；
- 热冲压工艺；
- 测氢方法和条件（测氢温度和加热速率）；

- d) 露点和氢含量;
- e) 氢致断裂应力, 基准断裂应力和氢脆风险指数;
- f) 临界氢脆风险指数, 临界氢含量和临界氢浓度

7.2 零件氢致延迟断裂风险评价试验报告应至少包含下列信息:

- a) 零件信息 (钢的牌号, 镀层种类, 厚度以及零件型号);
- b) 材料临界氢脆风险指数;
- c) 氢致断裂应力, 基准断裂应力和氢脆风险指数。

附录 A

(资料性)

2000MPa 级铝硅镀层热冲压钢材料临界氢脆风险指数、氢含量以及露点测试过程实例

按照以下步骤进行试验：

- 测量各个露点条件试样的氢含量 C_H ；
- 对各个露点条件试样进行高应变速率试验，获得基准断裂应力 σ_0 ；
- 对各个露点条件试样进行慢应变速率试验，获得氢致断裂应力 σ_H ；
- 对各个露点条件试样的氢脆风险指数 HERI 值的计算（如表 A.1）；

表 A.1 针对 2000MPa 级铝硅镀层热冲压钢材料的测试结果

露点/°C	氢含量/ppm	断裂应力 /MPa	基准断裂应力 /MPa	氢脆风险指数/%
-40	0.08±0.01	2001±40	1981±40	-1.0
-10	0.13±0.01	1950±37	1952±18	0.1
0	0.32±0.01	1949±32	1970±28	1.0
5	0.36±0.03	1903±48	1997±30	4.7
10	0.53±0.03	1809±77	1972±6	8.3
25	0.77±0.10	1019±60	1979±10	49.0

- 绘制以氢含量为横坐标，氢脆风险指数为纵坐标的二维关系曲线图（如图 A.1）；

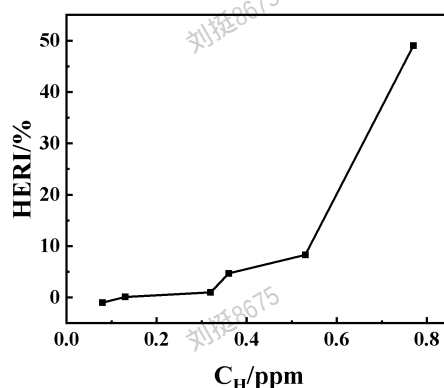


图 A.1 氢含量-氢脆风险指数的二维关系曲线示例

- 计算每两个相邻点间线段的斜率；

0.08~0.13ppm 两点之间的斜率为 22.0；0.13~0.32ppm 两点之间的斜率为 4.7；0.32~0.36ppm 两点之间的斜率为 92.5。

- 取氢含量-氢脆风险指数曲线上斜率未增加，且其后至少两个数据点随氢浓度增加仍显示氢脆风险指数上升的最高氢脆风险指数值为临界氢脆风险指数；

氢脆风险指数在 1% 以前曲线斜率未发生增加，并且氢含量高于 0.36ppm 对应的氢脆风险指数保持

上升的趋势，因此将 1%指定为 2000MPa 级铝硅镀层热冲压钢材料的临界氢脆风险指数。

h) 临界氢脆风险指数对应的氢含量为临界氢含量，临界氢含量对应的露点为临界露点；

氢脆风险指数 1%对应的氢浓度和露点，分别为 0.32ppm 和 0℃，分别为 2000MPa 级铝硅镀层热冲压钢材料的临界氢含量以及临界露点。

附录 B

(资料性)

1500MPa 级铝硅镀层热冲压钢材料临界氢脆风险指数、氢含量以及露点测试过程实例

按照以下步骤进行试验：

- 测量各个露点条件试样的氢含量 C_H ；
- 对各个露点条件试样进行高应变速率试验，获得基准断裂应力 σ_0 ；
- 对各个露点条件试样进行慢应变速率试验，获得氢致断裂应力 σ_H ；
- 对各个露点条件试样的氢脆风险指数 HERI 值的计算（如表 B.1）；

表 B.1 针对 1500MPa 级铝硅镀层热冲压钢材料的测试结果

露点/°C	氢含量/ppm	断裂应力 /MPa	基准断裂应力 /MPa	氢脆风险指数/%
-40	0.06±0.01	1703±17	1693±20	-0.5
0	0.23±0.02	1698±29	1723±8	1.5
10	0.48±0.02	1682±7	1686±21	0.2
25	0.74±0.07	1710±9	1710±11	0.0
40	0.92±0.02	1661±15	1708±15	2.8

- 绘制以氢含量为横坐标，氢脆风险指数为纵坐标的二维关系曲线图（如图 B.1）；

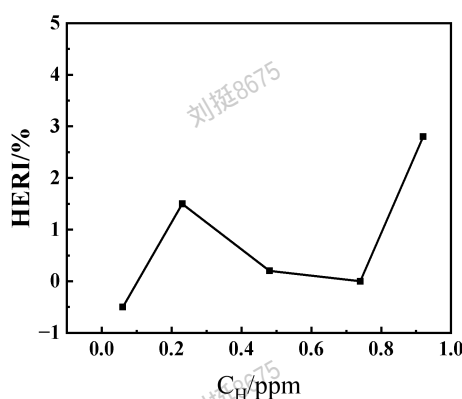


图 B.1 氢含量-氢脆风险指数的二维关系曲线示例

- 计算每两个相邻点间线段的斜率；

0.06~0.23ppm 两点之间的斜率为 11.8；0.23~0.48ppm 两点之间的斜率为-5.2；0.48~0.74ppm 两点之间的斜率为-0.77；0.74~0.92ppm 两点之间的斜率为 15.5。

- 取氢含量-氢脆风险指数曲线上斜率未增加，且其后至少两个数据点随氢浓度增加仍显示氢脆风险指数上升的最高氢脆风险指数值为临界氢脆风险指数；

氢脆风险指数在 0.74~0.92 ppm 区间曲线斜率略有增加。由于热冲压过程的露点调控范围限定在这一区间内，所获得的最高氢含量为 0.92 ppm，无法确定更高氢含量对应的氢脆风险指数是否保持上升

的趋势，因此将 2.8%指定为 1500MPa 级铝硅镀层热冲压钢材料的临界氢脆风险指数。

h) 临界氢脆风险指数对应的氢含量为临界氢含量，临界氢含量对应的露点为临界露点；

氢脆风险指数 2.8%对应的氢含量和露点，分别为 0.92ppm 和 40℃，分别为 1500MPa 级铝硅镀层热冲压钢材料的临界氢含量以及临界露点。

附录 C

(资料性)

零件氢脆风险指数安全阈值确定原理

由于热冲压零件在结构设计中严禁出现显著的应力集中区域，因此，允许的最小孔径边缘的圆角半径通常不小于 2.5 mm，其余结构部位也需避免小于等于 3.0 mm 的圆角或孔洞设计，以将应力集中因子控制在较低水平。与此不同，在本方法中进行测试采用 2.5 mm 的缺口半径，代表实际零件中可能出现的最大应力集中条件，对应的应力集中因子处于上限状态。同时，测试过程中所施加的外部应力水平远高于实际热冲压零件中可能存在的最大残余应力水平或者在后续加工中可能被施加的最大应力，尤其无氢致延迟断裂风险的 HERI 临界值以下的试样的断裂应力已接近材料在无氢影响下的极限强度。因此，考虑到试样在最不利应力状态下仍能维持良好的抗氢脆性能，实际热冲压零件在实际工艺下的氢脆风险将更低。基于这一工程冗余原理，可在不降低安全性的前提下，根据实际测试结果（参照附录 A 和 B），将 5% 作为优选标准，适用于对安全性要求更高的关键结构件，可最大限度地降低氢致延迟断裂风险；10% 则作为一般评估标准，适用于常规热冲压零部件，在保证材料性能安全裕度的同时兼顾制造效率与成本控制。