



中国汽车工程学会标准

T/CSAE XX—20XX

汽车薄板成形极限图试验方法

Test Method of Forming Limit Diagram of Automotive Sheets

20XX-XX-XX发布

20XX-XX-XX实施

中国汽车工程学会 发布

目 录

前 言	1
1 范围	1
2 规范性引用文件.....	1
3 符号、名称及单位.....	1
4 试验原理及方法.....	1
5 试样	3
6 应变分析图案.....	3
7 模具	4
8 试验条件.....	4
9 试验程序.....	4
10 应变测量与计算.....	5
11 数据处理.....	5
12 试验报告.....	6
图 1 成形极限曲线胀形方法.....	2
图 2 成形极限曲线中不同应变路径下面内极限应变.....	2
图 3 宽度不大于 100mm 的试样.....	3
表 1 符号、名称及单位.....	1
表 2 成形极限图试验推荐的润滑方式.....	4

前 言

本标准借鉴了国内外现有汽车板材成形性能试验方法的特点，通过专题研究，在积累了大量的试验数据和经验的基础上，按照 GB/T1.1—2000《标准化工作导则 第一部分：标准的结构和编写规则》的要求制定。为满足试验需求，与现行国标相比，本标准进行了下列修改：

- 1) 根据成形极限图特征，优化了试样尺寸；
- 2) 按照材料厚度及强度级别，推荐详细的试验润滑方案；
- 3) 提出试样的取样方向要求，并给出快速判定方法；
- 4) 根据应变测试技术的发展及进一步提高试验精度的需求，提出一种新的试验数据获取及处理方法。

本技术标准是中国汽车工程学会钢铁材料技术标准之一。

本技术标准由中国汽车工程学会材料分会提出。

本技术标准由中国汽车工程学会批准。

本技术标准由中国汽车工程学会归口。

本技术标准起草单位：中国汽车工程研究院股份有限公司，马鞍山钢铁股份有限公司，武汉钢铁(集团)公司。

本技术标准主要起草人：张钧萍，马鸣图，金庆生，王德宝，吴青松，张军。

本技术标准于 2015 年首次发布。

汽车薄板成形极限图试验方法

1 范围

本标准规定了汽车薄板在室温条件下的成形极限图（FLD）的实验室测定方法。
本标准适用于厚度 0.3mm~3.0mm 的汽车用薄板。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。

GB/T 15825.2-2008 金属薄板成形性能与试验方法 第 2 部分：通用试验规程

GB/T 15825.8-2008 金属薄板成形性能与试验方法 第 8 部分：成形极限图(FLD)测定指南

GB/T 24171.2-2009 金属材料 薄板和薄带 成形极限曲线的测定 第 2 部分：实验室成形极限曲线的测定

3 符号、名称及单位

本标准所用的符号、名称及单位见表 1。

表 1 符号、名称及单位

符号	名称	单位
FLD	成形极限图	—
FLC	成形极限曲线	—
D_i	凹模内径	mm
d_c	凸模直径	mm
D_h	垫板中间孔直径	mm
r_i	凹模圆角半径	mm
r_p	凸模球头半径	mm
ε_1 、 ε_2	工程主应变、次应变	—
e_1 、 e_2	真实主应变、次应变	—
d_0	应变分析图形初始尺寸	mm
d_l	变形后的应变分析图形较大变形方向尺寸	mm
d_s	变形后的应变分析图形较小变形方向尺寸	mm

4 试验原理及方法

4.1 成形极限图表征板材在变形时在不同的近线性路径下能够达到的极限变形程度。通过对印有一定图案的试样进行胀形获得颈缩失效前极限点的面内应变分布（即主应变和次应变），以不同应变路径下极限点的面内应变绘制而成的曲线即为成形极限曲线。试验测定成形极限曲线时，可采用半球形刚性凸模胀形法或圆柱形刚性凸模胀形法进行胀形实验，两种胀形方式获得的成形极限曲线不能用于比较的目的。在实验室条件下，推荐优先使用半球形刚性凸模胀形法。

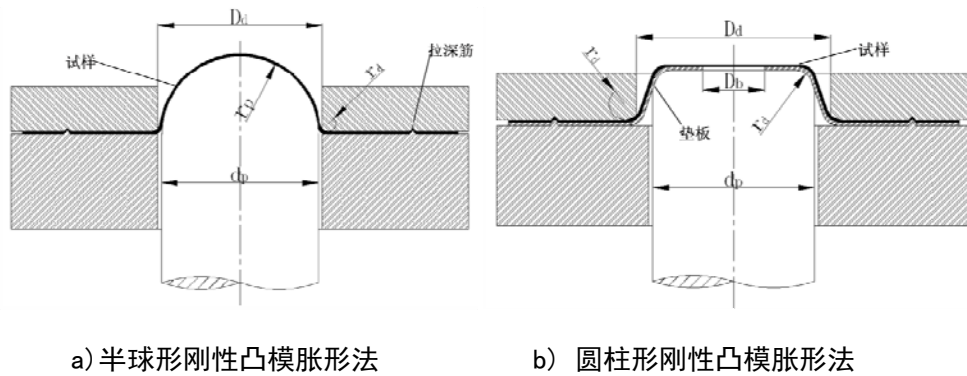


图1 成形极限曲线胀形方法

4.2 半球形刚性凸模胀形试验时，将板面一侧印有图案的试样置于凹模与压边圈之间，用压边圈压牢试样。通过凸模使试样产生胀形并形成凸包，试样上的图案也随之发生变化，当凸包上局部位置产生颈缩或破裂时，停止试验，根据颈缩或破裂部位(或这些部位附近)确定极限点，然后根据试样上印制的图案的变化情况测量并计算极限点的面内应变，该面内应变即为该极限点在胀形时的极限应变，该极限应变又称为面内极限应变。

注：面内极限应变可用工程主应变(ϵ_1 、 ϵ_2)表示，也可用真实主应变(e_1 、 e_2)表示。

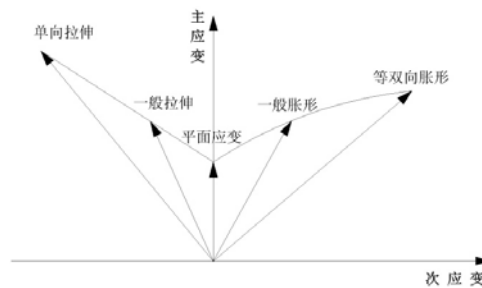


图2 成形极限曲线中不同应变路径下面内极限应变

4.3 完整的成形极限曲线一般由单向拉伸、一般拉伸、平面应变、一般胀形和等双向胀形五个应变路径下的极限点的面内极限应变构成，使用下述方法可以获得不同应变路径下的面内极限应变：

a) 采用不同宽度试样：通常情况下，试样的宽度差越大，获得的极限点的面内极限应变相差越大，选择较多的宽度规格，有利于获得各种应变路径下的极限应变。如果试样宽度合适，还可分别获得近似单向拉伸应力状态或近似平面应变状态的极限应变点；

b) 改变试样与凸模间的润滑或接触条件：通常情况下，不同润滑条件的润滑效果差异越大，测定出的极限应变的数值差异越大。为测试足够的极限应变点，需适当地选择一定数量的润滑条件。如有必要，还可在试样与凸模间加衬合适厚度的橡胶(或橡皮)薄垫，以便通过改变模具与试样间的接触条件来获得等双拉或近似等双拉应变状态的极限应变；

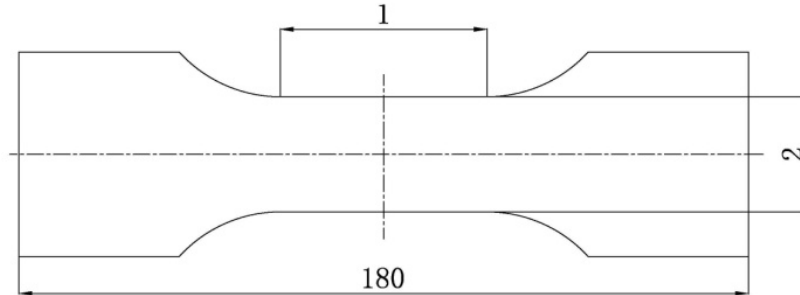
c) 辅以其他试验：为准确测定成形极限图的单向拉伸、平面应变和等双向胀形应变路径下的面内极限应变，可以辅以单向拉伸、液压胀形和圆柱形凸模胀形等其他试验方法。

当润滑条件不好时容易产生双颈缩和破裂位置离拱顶较远的现象。为保证试验结果的准确性以及避免采用拟合法进行极限应变计算时应变分布的多峰现象，通常采用一系列不同宽度的试样进行试验获得成形极限曲线。

5 试样

5.1 试样形状及尺寸

本标准推荐使用长 180mm，宽度为 20mm~180mm 的矩形试样。为获得完整的成形极限曲线，试验采用的试样的宽度应包括 20mm、100mm 和 180mm，且宽度在 20mm~100mm 之间的试样不少于 1 种，在 100mm~180mm 间的试样不少于 2 种。为防止矩形试样的侧边在模具拉深筋处或凹模口处开裂，通常宽度不大于 100mm 的试样采用如图 3 所示的哑铃型试样，试样的过渡圆弧半径一般采用 20mm~30mm，平行段长度一般为 25mm~35mm。试样的尺寸公差为 $\pm 0.2\text{mm}$ 。



1—平行段长度；

2—平行段部分宽度；

图 3 宽度不大于 100mm 的试样

5.2 试样取样方向

对汽车薄板进行成形极限图测试或不同薄板间进行成形性能比较时，应沿同一方向进行取样。通常情况下，沿薄板成形性能较差的方向进行取样，可通过下述方式快速判定试样的取样方向：

a) 取少量本标准 5.1 中规定的宽度为 20mm、100mm 和 140mm 的试样进行预试验，从而确定取样方向；

b) 进行垂直方向和轧制方向的单向拉伸试验，通过比较单向拉伸的试验结果（主要包括均匀延伸率及其对应的宽度收缩率）确定成形性能较差的方向。

5.3 试样制备

在保证试样边缘不产生裂纹的前提下，可采用铣削、线切割或其他不产生裂纹、加工硬化和改变试样显微组织的方法。加工过程，应避免试样表面产生划痕或其他表面缺陷。

6 应变分析图案

6.1 为获取胀形试样的极限应变，需在试样的一侧板面上制取应变分析图案，该图案可以是具有一定尺寸和形状特征的网格、散斑或其他可辨识图案。

6.2 若在试样表面制取网格，网格的直径或边长的选取原则为试样厚度的 1~2 倍，当采用直径 100mm 的凸模时，印制的最大网格尺寸一般不超过 2.5mm。网格制取可用照相机、光刻技术、电化学腐蚀或其他方法，制取的网格尺寸偏差不得大于其数值的 2%，网格边缘清晰，试验过程不发生脱落。

6.3 若在试样表面喷涂散斑或其他图案时，喷涂的图案应具有良好的附着性能，试验前后不发生脱落，选择的喷涂图案应保证获得的应变的精度不低于 0.1%。

7 模具

7.1 采用刚性凸模胀形时，在实验室条件下推荐使用直径为（100±2）mm 的半球头刚性凸模，凹模直径推荐使用 108mm，凹模的圆角半径最小取 5mm 或者与 2 倍材料厚度两者之中的较大值。

7.2 在保证符合试验原理并能获得极限应变的条件下，允许使用不同结构的试验模具。具体模具形状及尺寸可参照 GB/T 24141.2 中 4.3.3.2 或 4.3.4.2。

7.3 根据 GB/T 15825.2-2008 中 4.1 的规定制备模具。

8 试验条件

8.1 润滑方式

只有调整润滑方式，使裂纹或颈缩产生在距拱顶 15mm 或 15%的冲头直径范围内的试验才有效。采用合理的润滑方式可以使裂纹产生在非常接近拱顶的位置。这种情况下可以减少对称于拱顶的双颈缩问题(随后两个颈缩区域的一个开始起裂)，从而减少拟合法中截面线上的应变分布的双顶点现象。试验前使用润滑剂对试样不带图案的一侧表面进行润滑。根据试验材料的厚度及力学性能，推荐的润滑方式见表 2。

表 2 成形极限图试验推荐的润滑方式

薄板类型	润滑方式
较薄的钢板或抗拉强度较低的材料	凡士林或油脂+圆形 PVC+凡士林或油脂
较厚的钢板或抗拉强度较高的材料	凡士林或油脂+聚四氟乙烯薄膜+凡士林或油脂+圆形 PVC+凡士林或油脂+聚四氟乙烯薄膜+凡士林或油脂
注 1：聚四氟乙烯薄膜厚度一般为 0.02~0.05mm，圆形 PVC 的直径为 80mm，厚度为 2mm~2.5mm。 注 2：合适的润滑方式在实际试验时可根据试样厚度及材料特性，根据个人经验对润滑方式进行替换，能够获得最大的极限拱高并使裂纹出现在拱顶的润滑方式被认为是最适合的。	

8.2 压边力

试验时不存在通用、恒定的压边力，随着材料或试样宽度的变化应选择不同的压边力。压边力的选择不宜过小，应保证在胀形过程中压牢试验材料，使之不发生变形流动；压边力选择不宜过大，防止试验时在拉深筋附近发生开裂。

8.3 试验速度

为便于及时准确地捕捉试样出现颈缩或者破裂的瞬间，同时避免惯性力破坏试样上的颈缩或破裂状态，不允许试验停机对试样产生较大的惯性运动。通常，凸模运动速度不超过 1mm/s。

9 试验程序

9.1 通常在 10℃~35℃温度环境下进行试验，若有要求，亦可将温度环境设置为 23℃±5℃。

9.2 按本标准第 5 章的规定准备试样，并按第 6 章的规定在试样上制取应变分析图案。

9.3 检查和清洁试验设备。

9.4 进行预试验，以便选取合理的压边力，对于取样方向不确定的试样材料，亦可先通过少量的预试验确定取样方向。

9.5 进行正式试验：试验前对试样不带应变分析图案的一侧表面进行润滑并面向凸模一侧放置，在工作行程内，保证凹模与凸模的中心线重合，偏差不大于 0.15mm，试样中心与凹模中心线偏差不大于 0.5mm，通过试验定位装置对试样定位，试验过程中保证压边圈将试样材料压牢，直至试样发生局部颈缩或破裂。

9.6 对同一尺寸规格和润滑方式的试样进行 3 次或以上的有效重复试验。

9.7 出现下述任一情况，则视为试验无效：

- 试样的颈缩或破裂发生在凹模孔口附近；
- 使用不同宽度试样时，试样侧边发生撕裂；
- 试样在拉深筋附近破裂；

9.8 分析应变分析图案，并计算面内极限应变。

10 应变测量与计算

10.1 半球形刚性凸模胀形试验时，可采用在线式或离线式测量应变。在线式测量指将相机直接安装在成形试验机上，通过记录并分析从试验开始到试样破裂时试样上的变形图案，获得试样在整个变形过程的面内应变分布；离线式测量是指通过对比成形前后试样上图案，获得试样变形后的面内应变分布。

10.2 试样面内极限应变可根据下式（1）~（4）计算或者根据相应的图形变化对比直接获取：

$$\varepsilon_1=(d_1-d_0)/d_0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\varepsilon_2=(d_2-d_0)/d_0 \dots\dots\dots (2)$$

$$e_1=\ln(d_1/d_0)=\ln(1+\varepsilon_1) \dots\dots\dots (3)$$

$$e_2=\ln(d_2/d_0)=\ln(1+\varepsilon_2) \dots\dots\dots (4)$$

11 数据处理

11.1 面内极限应变

成形极限曲线由不同应变路径下的极限点的面内极限应变构成，极限点指发生颈缩前瞬间临界位置所对应的点，该点所对应的面内应变即为面内极限应变。获取极限点及面内极限应变的方式有两种：拟合法和回溯法。

11.2 拟合法

拟合法参照 GB/T 24171.2-2009 第 5 部分的数据处理方法进行。该方法适用于离线式或在线式测量的数据处理。面内极限应变的获取步骤包括：根据裂纹或颈缩位置确定 3 条截面线，分析截面线上的应变分布，去掉颈缩或裂纹区域的应变点，以截面线上剩下的应变点组成拟合区间，利用拟合区域内的应变进行反抛物线拟合，获得裂纹或颈缩位置的极限点的面内极限应变。

11.3 回溯法

回溯法适用于在线式测量。在线式测量根据观察和分析整个变形过程中应变的分布情况确定颈缩或裂纹起始的临界位置，并根据一定方式确定临界位置发生颈缩的临界时刻，临界位置在临界时刻的面内应变即为面内极限应变。

采用在线式测量时，按如下步骤获得面内极限应变：

a) 通过在线式测量确定发生颈缩的临界点，并在该点周围确定一个与薄板厚度相同大小的临界区域；

b) 分别取临界区域和相邻区域的点，分析其成形过程中主应变随时间的变化曲线，以临界区域内的点的应变显著增加且相邻区域的点的应变不变或降低的时刻作为临界时刻（也可辅以临界点的厚向应变及厚向应变速率随时间的变化曲线进行判断）；

c) 以临界时刻临界点对应的主应变和次应变作为该试样的面内极限应变。

为获得精确的极限点及面内极限应变，在线式测量采用的图形采集系统的采集频率不小于 10Hz。

11.4 成形极限曲线

用本方法 5.2 规定的不少于 6 个宽度尺寸的试样进行试验以获得完整的成形极限曲线，每种宽度尺寸试样的数量须保证至少 3 个有效样本。获得不同应变路径下的面内极限应变后，计算不同宽度尺寸试样的 3 个有效样本的面内极限应变的平均值，以次应变为横轴、主应变为纵轴作图，此即试样的成形极限图。可直接将上述平均值点连接起来或用其他拟合方式构成成形极限曲线。

12 试验报告

试验报告应包括以下信息：

- a) 试验方法；
 - b) 模具形状及尺寸；
 - c) 试验材料的牌号、规格和状态；
 - d) 环境温度；
 - e) 试样形状、尺寸、数量及取样方向；
 - f) 试验设备；
 - g) 润滑方式；
 - h) 应变分析图案及测量方式；
 - j) 面内极限应变及平均值；
 - k) 成形极限图；
 - l) 试验日期。
-