

ICS 77.040.10

CCS H 22



团体标准

T/CSTM 00790.2—2022

汽车用薄钢板

第2部分：轴向力控制疲劳试验方法

Steel sheet for automobile-Part 2: Axial- force-controlled fatigue testing

2022-11-23 发布

2023-02-23 实施

中关村材料试验技术联盟

发布

前 言

本文件参照 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》，GB/T 20001.4—2015 《标准编写规则 第4部分：试验方法标准》的规定起草。

本部分为T/CSTM 00790《汽车用薄钢板试验方法》的第2部分。

本文件由中国材料与试验团体标准委员会综合标准领域委员会（CSTM/FC99）提出。

本文件由中国材料与试验团体标准委员会综合标准领域委员会（CSTM/FC99）归口。

全 国 标 准 发 布 使 用

引 言

为更好地评价汽车用薄钢板的抗氢致延迟断裂性能、疲劳服役性能，提高板料成形的仿真模拟精度，体系设计上形成汽车薄板的系列化，特制订汽车用薄钢板系列标准。

T/CSTM00790 《汽车用薄钢板试验方法》拟由4部分构成：

——第1部分：抗氢致延迟断裂性能评价拉深成形法。目的在于提供一种采用拉深成形法对厚度不大于3mm的汽车用薄钢板进行抗氢致延迟断裂性能评价的试验方法。

——第2部分：轴向力控制疲劳试验方法。目的在于提供一种厚度小于3mm的汽车用薄钢板轴向力控制疲劳试验方法。

——第3部分：轴向应变控制疲劳试验方法。目的在于提供一种厚度小于3mm的汽车用薄钢板轴向应变控制疲劳试验方法。

——第4部分：双向拉伸试验十字形拉伸试样。目的在于提供两种满足中心区两个主方向应力、应变的均匀性和一致性以及大应变量的十字形拉伸试样形状和尺寸。

本文件的发布机构提请注意，声明符合本文件时，可能涉及到4.1.5.1条（榫卯结构的防屈曲装置）与申请号202010646804.4《一种汽车薄板应变疲劳试验装置及方法》相关的专利的使用。

本文件的发布机构对于该专利的真实性、有效性和范围无任何立场。

该专利持有人已向本文件的发布机构承诺，他愿意同任何申请人在合理且无歧视的条款和条件下，就专利授权许可进行谈判。该专利持有人的声明已在本文件的发布机构备案。相关信息可以通过以下联系方式获得：

专利持有人姓名：鞍钢股份有限公司 地址：中国辽宁省鞍山市铁西区鞍钢厂区

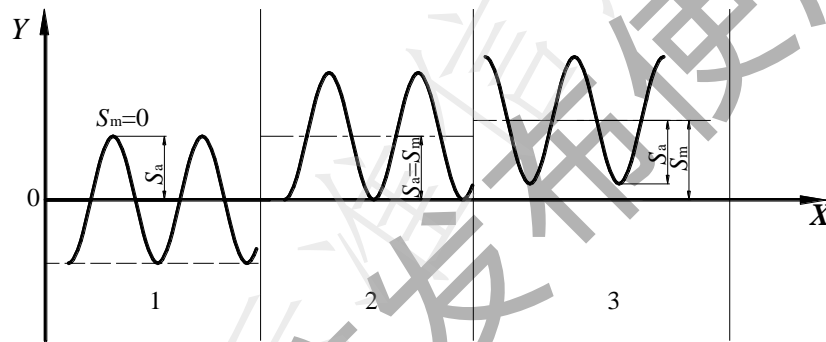
请注意除上述专利外，本文件的某些内容仍可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

汽车用薄钢板 第2部分：轴向力控制疲劳试验方法

1 范围

本文件规定了室温下汽车用薄钢板（没有引入应力集中）轴向力控制疲劳试验的术语和定义、试样、试验条件、试验程序、结果表示和试验报告。

本文件适用于厚度不大于3.0mm（试样最小厚度0.5mm）的汽车用薄钢板（不包括缺口试样）承受图1所示任一类型、恒负荷轴向循环应力幅的疲劳试验。



标引序号说明：

X——时间；

Y——应力；

1—— $R_s = -1$ ；

2—— $R_s = 0$ ；

3—— $0 < R_s < 1$

图1 循环应力的类型

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 3075 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法

GB/T 16825.1 静力单轴试验机的检验 第1部分：拉力和（或）压力试验机测力系统的检验与校准（GB/T 16825.1-2008, ISO 7500-1: 2004, IDT）

GB/T 24176 金属材料 疲劳试验 数据统计方案与分析方法（GB/T 24176-2009, ISO 12107: 2003, IDT）

GB/T 25917.1 单轴疲劳试验系统 第1部分：动态力校准（GB/T 25917.1-2019, ISO 4965-1: 2012, IDT）

GB/T 26076 金属薄板（带） 轴向力控制疲劳试验方法

GB/T 34104 金属材料 试验机加载同轴度的检验

3 术语和定义

GB/T 3075 界定的术语和定义适用于本文件。

4 试样

4.1 试样形状和尺寸

4.1.1 试样的形状和尺寸取决于试验目的及被测材料的形状，其夹持部分应与试样轴线或缩小的试验截面轴线保持同轴或对称。

4.1.2 疲劳试验所用的同一批试样应具有相同的形状、尺寸和表面状态。

4.1.3 应力比 R_s 符合 $0 \leq R_s < 1$ 时，推荐圆弧形试样，试样的形状和尺寸如图2、表1所示。

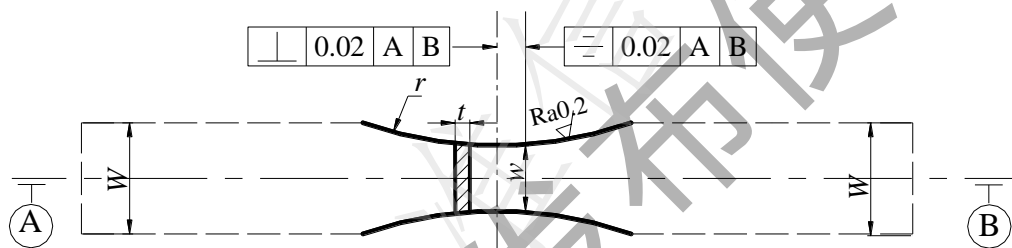


图2 圆弧形试样

表1 圆弧形试样几何尺寸

单位为毫米

t	W/w	r	$t \times w$
0.3~3.0	≥ 1.5	$\geq 6w$	< 30

4.1.4 应力比 $R_s = -1$ 时，推荐等截面试样，如图3所示。

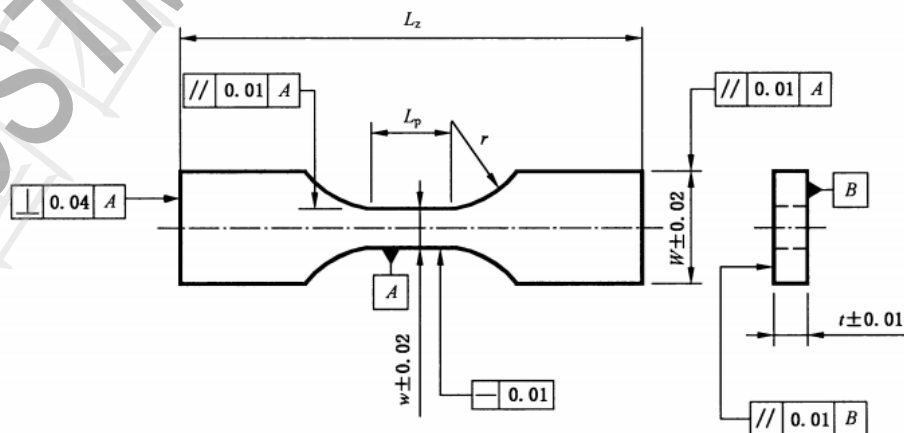


图3 等截面试样

4.1.5 不宜安装防屈曲装置，避免由于防屈曲装置引入的摩擦力影响试验结果的准确性以及试样发热效率偏低的问题。

必要时采用防屈曲装置，其几何尺寸需与试样配套并允许在试样宽度的侧边测量应变，防屈曲装置应使试样失效在测试段。推荐试样尺寸见表2。

试验过程中若时间-位移曲线无波动现象或试样屈曲，可不安装防屈曲装置。一般来说，对于厚度大于1mm的汽车用薄钢板，无需安装防屈曲装置。

表2 等截面试样几何尺寸

单位为毫米

试样安装方法	w	ra	L_p	W
安装防屈曲装置	4~10	10~20	6~10	10~20
不安装防屈曲装置	$(1\sim3)t$	$(3\sim10)t$	$(1\sim3)w$	$\geq 1.5w$
$a \geq 2w$ 。				

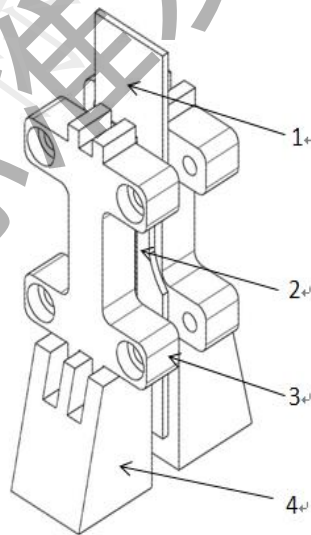
4.1.6 防屈曲装置

4.1.6.1 分类

推荐两种结构的防屈曲装置：

——厚度小于0.6mm且屈服强度小于150MPa的冷轧低碳钢、连续热镀锌钢等，推荐采用榫卯结构的防屈曲装置，见图4；

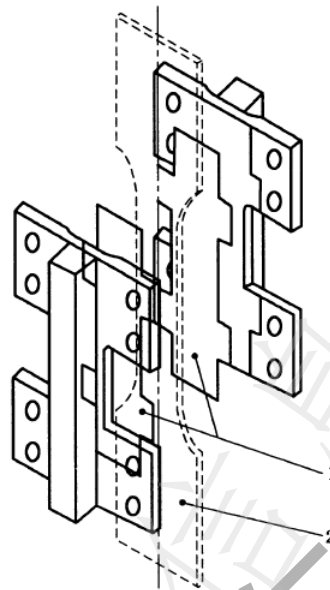
——厚度在0.6~1.0mm之间的冷轧低碳钢、连续热镀锌钢、高强度无间隙原子钢等，推荐采用顶端平齐的防屈曲装置，见图5。



标引序号说明：

- 1——试样
- 2——聚四氟乙烯板
- 3——防屈曲板
- 4——设备夹具

图4 榫卯结构的防屈曲装置



标引序号说明:

1——聚四氟乙烯板

2——试样

图5 顶端平齐的防屈曲装置

4.1.6.2 榫卯结构的防屈曲装置构成

防屈曲装置包括上夹具、左右两个防屈曲板及下夹具，假想露出的试样夹持端就相当于试样的“测试段”，采用榫卯结构的设计思路，将试验机的上、下夹具各切割 n 个直槽，同时设计左、右防屈曲板与之榫卯连接，即夹具底部的多个榫眼与防屈曲板顶部的多个榫头配合连接形成的榫卯结构，这样就使露出的夹持端宽度 W 被平均分割成 $(2n+1)$ 份，相当于减小了夹持端的“测试横截面宽度 w ”，避免了夹持端露出的部分处于平面应变状态，而导致薄板材料在该处屈曲。

为避免试样断裂时触发极限而导致的夹具榫头与防屈曲板榫眼相撞，对应试样的纵向，夹具与防屈曲装置的榫卯连接处间隙为 $1\text{mm}\sim 2\text{mm}$ ，对应试样的横向，夹具与防屈曲装置的榫卯连接处间隙为 $0.5\text{mm}\sim 1\text{mm}$ 。

直槽数量依夹持端宽度 W 而定，一般建议被直槽均分后的每段夹持端宽度不大于 5mm 。

可采用扭力扳手紧固防屈曲装置，施加相同的锁紧扭矩，使防屈曲装置受力均匀，避免因某个螺丝松动而影响试验结果。

聚四氟乙烯板宽度要稍小于防屈曲板中间立段宽度，可采用双面胶粘贴聚四氟乙烯板。

按试样厚度及强度不同，可设计不同尺寸的防屈曲板中间立柱宽度。

4.1.6.3 防屈曲装置的安装

应在每个试验开始前通过记录试样在安装防屈曲装置前后在拉伸弹性范围内的应力—应变曲线，比较弹性模量增量，弹性模量的测量值与预期值的偏离宜不超过 $\pm 5\%$ ，确定附加摩擦力的大小。依据试样厚度、强度不同选择不同的锁紧扭矩，一般建议在 $0.5\text{Nm}\sim 1.4\text{Nm}$ 之间，在试验过程中保证防屈曲装置不滑落的前提下可适当减小锁紧扭矩以减小摩擦力对试验结果的影响。采用约 0.5mm 厚的聚四氟乙烯板或氮化硼粉末干燥润滑剂能在一定程度上解决这个问题。不推荐使用烃基润滑剂因为它有可能对试验结果产生影响。

对于厚度较薄且强度很低的汽车用薄钢板，可将聚四氟乙烯板延长至夹具榫眼处，避免夹持段范围疲劳失效提前发生的风险。

4.1.6.4 试样夹持部分的横截面积与试样最大应力截面面积之比

试样夹持部分的横截面积与试样最大应力截面面积之比依夹持方法而定，但不应小于 1.5。

4.2 试样加工

4.2.1 试样所采用的加工工艺应尽可能使试样表面产生的残余应力和加工硬化减至最小，在加工过程中应防止过热或其他因素的影响而改变材料的疲劳性能，力求试样表面质量均匀一致。

4.2.2 试样抛光完成后应涂一层防腐蚀油，测试前应将其去除，避免影响测试结果。

4.2.3 试样工作部分与圆弧过渡部分的连接应光滑，不得有凹陷。

4.2.4 纵向铣削或线切割后，再用纵向磨抛的方法进行试验段部分表面的最后精加工。

4.2.5 试样测试段表面粗糙度应满足 $Ra \leq 0.2 \mu m$ 。

4.3 尺寸检查

应在精加工完成后对试样的尺寸进行检查，采用的检查方法不应改变试样的表面条件。

4.4 存放和运输

4.4.1 试样制备好后，应保存以防止任何损伤(接触刮伤或氧化等)。建议采用单独的盒子或带封头的管保存试样。在某些情况下，应将试样存放在真空瓶或者放有硅胶的干燥器中。

4.4.2 应尽量减少对试样的运输。

4.4.3 对试样进行标记时应特别注意。推荐在试样的两端标记试样，这样两段断后的试样都可以被识别出来。

5 试验条件

5.1 试验环境

试验通常在室温 ($10^{\circ}C \sim 35^{\circ}C$) 下进行，相对湿度 $\leq 80\%$ 。

试验时保证最小限度的大气污染(如灰尘、化学蒸汽等)、没有能够影响试验机控制和数据采集的外部电信号干扰以及最小限度的外部机械振动。

5.2 试验机夹具

试验机的上、下夹具应牢固地夹紧试样端部。夹具的中心线应尽量与试验机的施力轴线重合，确保力均匀分布在试样横截面上。

5.3 试验机施加的负荷值

试验机施加的负荷值应符合以下要求：

试验机静态力的力值准确度应符合 GB/T 16825.1 的要求；

——在连续试验 10h 内，动态力值波动度应符合 GB/T 25917.1 的要求；

——为确保试验中施加负荷的一般程序对每个试样保持一致，负荷的动态误差范围应 $< \pm 1\%$ ；

5.4 试验机检查

根据 GB/T 34104 的要求，在每次系列试验之前以及任何时候加载链发生变更时，都应检查试验机的对中情况，试验机的同轴度应不大于 5%。

5.5 试样监测仪器

5.5.1 记录系统

现代疲劳试验设备普遍采用计算机控制和数字化的数据采集系统。现代数字系统中提供的基本软件平台提供精确的测试控制和报告生成。它们通常可以在测试数据的数字或模拟域中提供实时数字显示，以及图形和表格测试结果的生成和存储。

在这种典型的数字系统中，应力（力）-时间数据点的采样频率应足以确保施加在试样上的峰值应力（力）的真实性。

由于仍有许多模拟系统在使用，以下应视为模拟数据记录的最低要求：

- 应力（力）-时间记录仪；
- 峰间探测器。

5.5.2 循环计数器

循环计数器是记录循环次数所必需的装置。

6 试验程序

6.1 试样的安装

对于先前对中好的试验系统，可采用两种安装方式：

a) 先采用位移控制，将试样夹在上、下夹头的一端，然后移动作动器，到合适位置后转为力控制，并将力设置为零，夹好试样的另一端开始试验。

b) 采用位移控制，要预先设定好试样载荷保护，要求载荷保护的力值不超过屈服强度的5%。

推荐选用硬质合金表面、金刚石端点表面夹具楔块。

6.1.1 应力比 R_s 符合 $0 \leq R_s < 1$ 的试验

安装试样时应仔细操作，首先，须完成对中检查，使试样与试验机上、下夹具间保持同轴，要保证力均匀地分布在试样的整个断面上，并尽量减少试样承受规定轴向应力以外的其他应力。

6.1.2 应力比 $R_s = -1$ 的试验

使用防屈曲装置时，防屈曲板与试验机夹具之间的距离应尽可能小，建议不超过2mm，以提高试样刚度，避免造成试样在夹持端屈曲。

不使用防屈曲装置时，建议将试样夹持端全部放入夹具，减小试样有效试样长度，提高试样刚度，避免试样屈曲。

6.2 试验控制参数选择

6.2.1 试验频率选择

力循环的频率取决于所使用的试验机类型，在许多情况下取决于试样的刚度。频率的选择取决于材料、试样和试验机组合。如果频率取决于试样和试验机组合的动态特性，就有必要在试验前测量试样的刚度。

试验频率一般在5Hz~40Hz范围内，建议采用的试验频率为10Hz~20Hz。同一批试样在同一应力水平下的实验应在相同的频率下进行。

在高频率时，试样会产生较大热量，从而影响疲劳寿命和疲劳强度的试验结果。如果试样发热，建议降低试验频率。如果试样温度超过35℃，应在报告中注明。

注1：如果环境影响显著，试验结果可能依赖于频率。

注2：使用防屈曲装置时，试验频率不要超过10Hz，以免试样发热。

6.2.2 施加负荷选择

试验机测力系统应按照GB/T 16825.1进行静态校准，其准确度应为1级或优于1级。应确保动态力测量误差不超过所需测力范围的±1%。按GB/T 25917.1或JJG 556进行检查。

建议试样夹持力尽可能小，以降低试样于钳口内断裂的概率。

6.3 终止试验

试样在规定应力下，通常一直连续试验至试样失效或规定循环次数。试样失效应发生在试样工作段或最大应力截面处，否则试验结果无效。

试验过程如有中断，需在试验报告中注明中断时的循环次数和间歇时间。

7 结果表示

7.1 一般要求

由于疲劳试验数据分散度较大，为了获得比较可靠的试验结果，除合理设计疲劳试验方案外，疲劳试验数据应采用数理统计方法进行处理。

7.2 条件疲劳强度的测定

用升降法测定材料的条件疲劳强度。一般取3级~5级应力水平。应力台阶的选取接近标准偏差，在试验过程中变换不同的应力水平，如果无法得到标准偏差，以估算平均疲劳强度的3%~5%作为应力台阶，对于解释性的研究要求最少15根试样估计疲劳强度的平均值和标准偏差，对于可靠性数据要求至少30个试样。

升降法从“单点试验法”（每个应力水平使用一个试样）出发，在试验时，保持应力比或平均应力不变，逐渐降低最大应力 S_{max} ，直到有一根试样在达到指定寿命时没有破坏（越出），则下一根试样就在高一级的应力水平下进行。依此类推，凡前一根试样不到指定寿命就破坏的，随后的一根试样就要在低一级应力水平下进行；凡前一根试样越出的，则后一根试样就要在高一级应力下进行。直至完成全部试验为止。处理试验结果时，在第一次出现相反结果以前的数据均舍弃，把所有邻近出现相反结果的数据点都配成对子。

条件疲劳强度的两种数据处理方法：

a) 方法1：

条件疲劳强度 S_N 按式（1）计算：

$$S_N = \frac{1}{n} \sum n_i S_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

标准偏差 σ 按式（2）计算：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum n_i (S_i - S_N)^2}{n-1}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- n ——有效试样对子总数；
- n_i ——第*i*和第*i*+1相邻两级应力间的对子数；
- S_i ——第*i*和第*i*+1相邻两级应力的平均值。

b) 方法2:

在不同应力水平下按照被测试样失效或非失效的计算频率安排试验数据，仅仅对于“失效”和“非失效”事件进行统计分析，对最少的观测数进行分组分析。

将应力水平按升序排序， $S_0 \leq S_1 \leq \dots \leq S_l$ ，这里*l*是应力水平数，指定事件数 f_i ，指定应力台阶*d*。条件疲劳强度 S_N 按式(3)计算：

$$S_N = S_0 + d \left(\frac{A}{C} \pm \frac{1}{2} \right) \dots\dots\dots (3)$$

标准偏差 σ 按式(4)计算：
$$\sigma = 1.62d(D + 0.029) \dots\dots\dots (4)$$

式中：
$$A = \sum_{i=1}^l i f_i, B = \sum_{i=1}^l i^2 f_i, C = \sum_{i=1}^l f_i, D = \frac{BC - A^2}{C^2}$$

在式(3)中，被分析事件失效时取-1/2；被分析事件非失效时取1/2。

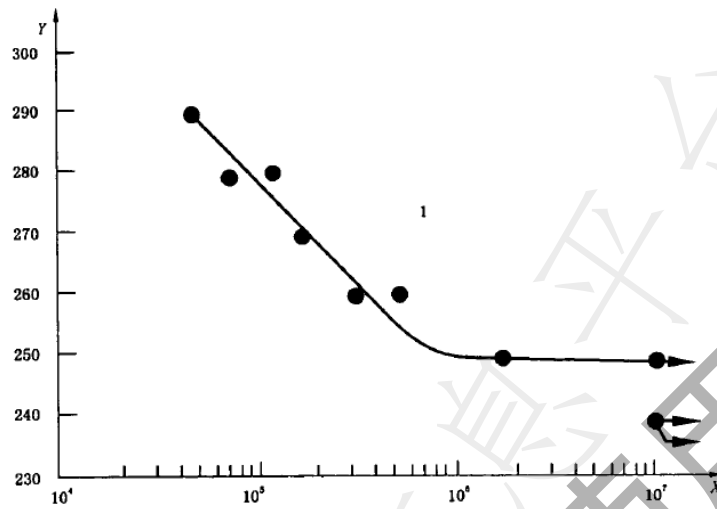
在式(4)中，仅仅当 $D > 0.3$ 时才有效，这一条件通常在变异系数 $\hat{\eta}_N = d/\sigma_y$ 的范围在0.5~2之间时才满足。

示例见附录A。

7.3 S-N 曲线的测定

通常，至少取3级应力水平。各级应力水平上试样的数量分配应随着应力水平的降低而逐渐增加，用升降法求得的条件疲劳强度作为S-N曲线上最低应力水平点。考虑到试验目的和试验材料的可靠性，最少选取8根试样用于解释试验，建议在4个等间距的应力水平下，每个应力水平测试两个试样。为了可靠性设计目的，至少需要30个试样。这时在5个等间距的应力水平下，每个应力水平测试6个试样。以Sa为纵坐标，可以用自然坐标或对数坐标；N为横坐标，一般为对数坐标用最佳拟合法绘制成一条曲线，如图6所示。

对于通常的高周疲劳试验，应力水平通常选取疲劳寿命介于3个量级之间，例如：从 5×10^4 到 1×10^6 周次。



标引序号说明:

X——失效循环次数, N ;

Y——应力幅, S_a , N/mm².

图6 典型的 $S-N$ 曲线图

8 试验报告

试验报告应当包括下列内容:

- a) 本文件编号;
- b) 材料的牌号、规格、热处理工艺及常规力学性能;
- c) 试样的制备工艺及其形状、尺寸和表面状态;
- d) 试验机型号;
- e) 应力循环形式、 S_m 、 $2S_a$ 、 R_s ;
- f) 试验频率 f ;
- g) 试验过程中任何对本文件的偏离;
- h) 试验结果。

附录 A

(资料性)

条件疲劳强度的测定示例

A.1 当采用升降法时,被测试样按照逐渐增加的应力水平顺序进行,直到发生失效。

A.2 表A.1给出了一套数据的例子。从开始计算,表A.1中不发生失效的第一个有效数据为500 MPa。在这一系列试验中,有7个试样失效,8个试样没有发生失效。失效试样在分析中被当作一种情况。因此只分析三个应力水平,如表A.2所示: $S_0=500$ MPa,应力级 $d=20$ MPa。

A.3 相关事件数 f_i 在表A.2中的第3列给出,A、B、C和D按以下值计算:

$$A=7 \quad B=11 \quad C=7 \quad D=0.571$$

表A.1 试验数据升降法的范例

应力 S_i /MPa																	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
540									×								×
520				×				○		×		×					○
500			○		×		○				○		×		○		
480		○*				○								○			
460	○*																
× 失效																	
○ 通过																	
○* 未计算																	

表A.2 表A.1中的数据

应力 S_i /MPa	水平 i	数值		
		f_i	if_i	i^2f_i
540	2	2	4	8
520	1	3	3	3
500	0	2	0	0
总和	/	7	7	11

A.4 疲劳强度的平均值和标准偏差根据式(3)和式(4)进行计算,结果如下:

$$S_N=500+20(7/7-1/2)=510 \text{ MPa}$$

$$\sigma=1.62 \times 20(0.571+0.029)=19.4 \text{ MPa}$$

$$\text{变异系数 } \hat{\eta}_N=19.4/510=0.038$$

附 录 B

(资料性)

起草单位和主要负责人

本文件起草单位：鞍钢股份有限公司、中汽研（天津）汽车工程研究院有限公司、上海大学、钢铁研究总院有限公司、泛亚汽车技术中心有限公司、山钢集团日照公司、中国第一汽车集团有限公司、河钢集团股份有限公司、中汽研汽车检验中心（天津）有限公司、中国汽车工程研究院股份有限公司。

本文件主要起草人：苏洪英、刘仁东、芦延鹏、徐鑫、林利、孟宪明、张赛、史文、王存宇、王真真、刘培星、朴志民、翟利平、吕冬、陆晓锋、李萧彤、张南、梁笑、李春林、郝志强、丁庶炜、曹政、吴萌、刘文博、熊自柳、李明贺、谢宇、冯毅、王光耀、赵奕炳、方刚、刘腾轼、徐京、金光宇。