

ICS 77.160

H 65

**YS/T XXXX-20XX**

钛合金室温高应变速率压缩试验方法

 Titanium alloy-High strain rate compression test method at ambient temperature

（送审稿）

20XX－XX－XX 发布 20XX－XX－XX实施

**中华人民共和国工业和信息化部** 发布

前 言

本标准按照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。

本标准由全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC243）提出并归口。

本标准起草单位：国合通用测试评价认证股份公司、有研工程技术研究院有限公司、北京理工大学、重庆红宇精密工业集团有限公司、国标（北京）检验认证有限公司、西安汉唐分析检测有限公司、西部超导材料科技股份有限公司、宝鸡钛业股份有限公司、湖南航天天麓新材料检测有限责任公司。

本标准主要起草人：邬小萍 骆雨萌 谭成文 廖雪松 李璞 焦磊 李瑶 刘宏伟 刘睿 纪红 卢硕 舒心

钛合金室温高应变速率压缩试验方法

# 1 范围

本标准规定了钛合金室温高应变速率压缩试验的试验原理、试验装置、试样、试验程序、数据处理及结果表述等内容。

本标准适用于室温条件下，钛合金材料在102 s-1~104s-1应变速率范围内的动态压缩试验，也适用于其它金属材料的动态压缩试验。

# 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 1804-2000 一般公差 未注公差的线性和角度尺寸的公差

GB/T 7314 金属材料 室温压缩试验方法

GB/T 8170-2016 数值修约规则与极限数值的表示和判定

GB/T 10623 金属材料 力学性能试验术语

GB/T 13992 金属粘贴式电阻应变计

GB/T 34108-2017金属材料高应变速率室温压缩试验方法

JJG 623 电阻应变仪

# 3 术语与定义

下列术语和定义适用于本文件。

（GB/T10623界定的以及下列术语和定义适用于本文件）。

3.1 分离式霍普金森压杆 split Hopkinson pressure bar（简称SHPB）

一种用于测试高应变速率下试样压缩应力-应变曲线等力学性能的测试装置。

3.2 撞击杆 striker

试验装置中撞击输入杆的短杆，用于在波导杆中产生弹性应力波。

3.3 波导杆 bar for wave transmit

试验装置中的输入杆和输出杆，用于弹性应力波的传导，实现对试样的加载。

3.4 输入杆 input bar

试验装置中用于传导入射波和反射波信号的波导杆。

3.5 输出杆 output bar

试验装置中用于传导透射波信号的波导杆。

3.6 吸收杆 absorption bar

试验装置中用于吸收输出杆动能的金属杆。

3.7 弹性纵波波速 longitudinal wave velocity

波导杆中无限波长一维弹性应力波的传播速度。

3.8 撞击应力 impact stress

一定速度的撞击杆撞击输入杆后，在输入杆中形成的压缩应力波（近似梯形）的幅值。

3.9 特征动态应力 characteristic dynamic stress

输入杆与试样截面积的比值乘以撞击应力的乘积，用以表征对试样施加动态载荷的程度。

3.10 撞击作用时间 impact action period

试验时一定速度、一定长度的撞击杆与输入杆发生同轴弹性撞击的理论作用时间。

3.11 平均应变速率 average plastic strain rate

试样在压缩应力作用下，塑性变形区间内应变速率的平均值。

3.12 动态压缩屈服强度

在动态压缩应力-应变曲线上发生塑性变形的曲线拐点，其对应的应力为动态压缩屈服强度，即试样开始发生塑性压缩变形时的压缩应力。

# 4 符号和说明

本标准使用的符号及其说明见表1。

表1 符号和说明

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 符号 | 单位 | | 说明 | |
| 分离式霍普金森压杆试验系统 | | | | |
| A0 | | mm2 | | 波导杆横截面积 |
| c0 | | mm/ms | | 波导杆中纵波波速 |
| ρ0 | | g/mm3 | | 波导杆材料的密度 |
| D | | mm | | 波导杆直径 |
| E0 | | MPa | | 波导杆材料的弹性模量 |
| L | | mm | | 波导杆的长度 |
| Lp/LI/LT | | mm | | 撞击杆、输入杆和输出杆的长度 |
| σ0 | | MPa | | 撞击应力 |
| σe | | MPa | | 波导杆的屈服强度 |
| *V* | | mm/ms | | 撞击速度 |
| *V*max | | mm/ms | | 撞击杆允许的最大速度 |
| σε | | MPa | | 特征动态应力 |
| 试样 | | | | |
| *l0* | | mm | | 试样初始长度 |
| *d*0 | | mm | | 试样初始直径 |
| A | | mm2 | | 试样横截面积 |
| 试验材料的力学性能参数 | | | | |
|  | | μs-1 | | 试样工程应变速率 |
|  | | μs-1 | | 平均应变速率 |
| ε | | - | | 试样工程应变 |
| σ | | MPa | | 试样工程应力 |
|  | | MPa | | 平均塑性流变应力 |
| σm | | MPa | | 最大动态压缩应力 |
| σmc | | MPa | | 动态失效强度 |
| 应变测试系统 | | | | |
| R | | Ω | | 用于测量波导杆应变的应变片电阻值 |
| Rc | | Ω | | 标定电阻的电阻值 |
| H | | 无量纲 | | 试验波形记录高度 |
| Hc | | 无量纲 | | 由标定电阻给出的应变信号幅值的记录高度 |
| Hv | | 无量纲 | | 撞击速度为V时，入射波信号幅值的记录高度 |
| K | | 无量纲 | | 用于测量波导杆应变的应变片的灵敏度系数 |
| Kd | | 无量纲 | | 动态条件下应变片灵敏度系数修正，即动态灵敏度系数 |
| 测试信号 | | | | |
| λ | | μs | | 入射波脉冲宽度 |
| t | | μs | | 时间 |
| T | | μs | | 撞击作用时间 |
| ts | | μs | | 数据采样周期 |
| ε | | - | | 弹性压缩波产生的弹性应变 |
| εj | | - | | 第j通道的应变测量值，j=1,2....n |
| εI、εR、εT | | - | | 分别由入射波、反射波、透射波产生的弹性应变值 |
| εV | | 无量纲 | | 入射波应变的理论幅值 |

# 5 原理

在室温条件下，基于一维应力波理论和应力均匀性假定，采用分离式霍普金森压杆试验装置，通过一定速度的撞击杆撞击输入杆形成弹性压缩应力波，对输入杆和输出杆之间的试样进行动态压缩加载，测量波导杆（包含输入杆和输出杆）上的弹性应变信号并进行适当处理后获得试样动态压缩应力-应变曲线及其他动态压缩力学性能。

# 6 试验设备

## 6.1 设备组成

分离式霍普金森压杆试验装置主要由压杆系统和数据测试系统组成（见图1），压杆系统由驱动装置、撞击杆、波导杆（包括输入杆和输出杆）、吸收杆以及必要的波导杆支撑装置等部分组成；数据测试系统主要由测速装置、应变片、动态应变仪、波形存储器、计算机等部分组成。

**数据处理系统**

**波形存储器**

**输出杆**

**应变片**

**试样**

**输入杆**

**动态应变仪**

**驱动装置**

**测速装置**

**波导杆支撑装置**

**应变片**

**吸收杆**

**εR**

**εI**

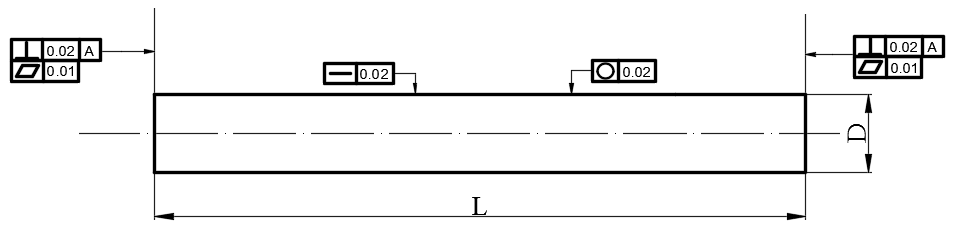
**εT**

图1 分离式霍普金森压杆装置示意图

## 6.2 撞击杆和波导杆

6.2.1 为保证撞击杆及波导杆在弹性状态下工作，撞击杆和波导杆材料应具有较高的屈服强度，且应大于被测材料的断裂强度，其值宜不小于1800MPa，一般选用马氏体时效钢等高强材料。

6.2.2 每套波导杆和撞击杆应采用相同材料和相同工艺加工而成，波导杆与撞击杆的加工精度应符合图2要求，同时为减小摩擦效应，应保证杆的端面和表面不应有锈斑等增加表面粗糙度的因素。



1.6

0.8

A

单位为毫米

图2 波导杆与撞击杆加工要求

6.2.3 撞击杆和波导杆直径应相同，一般直径为10mm~20mm，推荐采用直径为14.5mm的波导杆，撞击杆的长径比应不小于12，其长度一般不小于100mm，输入杆和输出杆的长径比应大于40，输入杆和输出杆长度应为撞击杆长度的2.5倍以上，且一般不小于700mm。

6.2.4 一般输出杆的长度等于输入杆长度，以保证输出杆与输入杆的互换性。

## 6.3应变片

6.3.1 一般采用箔式电阻应变片测量波导杆的应变，如果波导杆上的应变信号很弱时，应选用灵敏系数较高的半导体应变片，应尽量选用敏感体标长较小的应变片，其值宜不大于5mm。

6.3.2 应变片极限响应频率应不低于120kHz，推荐不低于300kHz。

## 6.4 动态应变仪

动态应变仪应具有较好的频率响应，最高频率响应应高于120kHz，推荐不低于500kHz。动态应变仪增益应满足数据采集仪对输入信号幅值的要求，最小增益应不小于20。

## 6.5 数据采集仪

6.5.1 数据采集仪应有较高的采样频率，采样频率一般应不小于240kHz，推荐采用1MHz。

6.5.2 数据采集通道数量应至少为两个，每个通道的记录长度应大于8K。

## 6.6 测速系统

测速系统宜采用光电测速装置或光电计时装置，测速系统的测速误差小于0.01m/s。

## 6.7 撞击杆驱动装置

6.7.1 一般采用压气枪作为撞击杆的驱动装置，撞击杆与压气枪膛应保持间隙配合。应保证有足够的枪膛长度，以保证对撞击杆的驱动能力。

6.7.2 撞击杆驱动装置的基座应与波导杆的支撑装置分离，防止驱动装置工作时的振动传递。

6.7.3 应保证压气枪膛与输入杆的同轴性，以保证撞击杆与输入杆发生同轴弹性碰撞。

6.7.4 对于不同长度的撞击杆，应通过理论计算及试验获得驱动装置的驱动压力-撞击杆速度曲线。

## 6.8 支撑装置

支撑装置应与地基牢固连接，并应具备水平调节能力，以调整波导杆与撞击杆驱动装置的同轴性。支撑导杆的支撑滑块宜采用绝缘体材料制作，每根杆的支撑滑块数量以2个为宜，且支撑块与支撑导杆间最好是点接触或线接触。

# 7 样品

## 7.1 样品制备

7.1.1 样坯切取的数量、部位、取向应符合相关产品标准或双方协议规定。

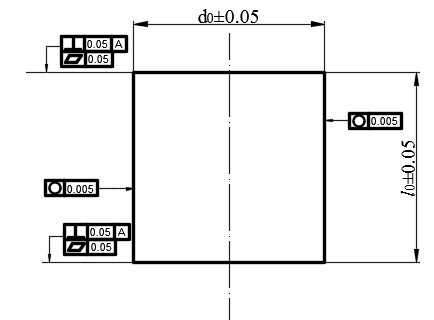
7.1.2 切取样坯和机加工试样时，应防止因冷加工或热影响而改变材料的初始状态而对其动态力学性能造成影响。

7.1.3 每组样品不少于五个。

## 7.2 样品的尺寸

样品采用实心圆柱体，样品直径应小于波导杆直径，且样品长径比为0.7~1.0，其要求见图3。

对于一定直径的波导杆，应根据试验材料的断裂强度水平，选择样品的尺寸。波导杆直径D为φ14.5mm时，推荐长径比为1.0的样品，推荐的样品尺寸如表2所示。



A

图3 样品的形状和加工要求

表2 推荐的试样尺寸

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 尺寸，mm | | | |
| 试验材料的屈服强度  MPa | 试样尺寸 | 标准试样 | 小尺寸试样 |
|  | 非比例 |
| ≤600 | d0-试样直径 | 8±0.05 | 8±0.05 |
| *l*0-试样长度 | 8±0.05 | 6±0.05 |
| ＞600~1100 | d0-试样直径 | 5±0.05 | 5±0.05 |
| *l*0-试样长度 | 5±0.05 | 4±0.05 |
| ＞1100 | d0-试样直径 | 4±0.05 | 4±0.05 |
| *l*0-试样长度 | 4±0.05 | 3±0.05 |
| 小尺寸试样通常用于获得更高应变速率下的性能数据，当试验用于测定其他动态性能数据时，可采用其他长径比的试样。 | | | |

## 7.3 样品贮存

试验前，样品应置于干燥无腐蚀介质的室温下存放，并防止存放期间受到损伤和变形。

## 7.4 样品尺寸的测量

测量并记录样品直径和长度，测量装置分辨力应不低于0.02mm。

# 8 试验程序

## 8.1 试验条件

除非另有规定，试验一般在室温10℃~35℃范围内进行，对温度要求严格的试验，试验温度应为23℃±5℃。

## 8.2 测量系统建立

输入杆上应变片的粘贴位置应保证可明确区分入射波和反射波，粘贴的位置以距试样端不小于最长撞击杆长度加50mm为宜，输出杆上应变片的粘贴位置宜以试样为中心与输入杆应变片位置对称，采用分辨力不低于0.1mm测量装置测量应变片距波导杆试样端的轴向距离。

按附录B要求在波导杆适当位置粘贴应变片，布置应变片引线连接数据采集与存储装置。

根据试验要求，按照6.4和6.5的要求合理设置并记录动态应变仪和数据采集仪的工作参数，以保证记录信号的完整性。

## 8.3 撞击杆安装

向驱动装置的控制气室和驱动气室充入预设压力的惰性气体，将撞击杆置于驱动装置内，调整撞击杆与波导杆，使之同轴，并确保撞击杆置于枪膛底部。

## 8.4 试验系统检验与标定

8.4.1 波导杆同轴度检测

波导杆的支撑平台应保持水平，撞击杆、输入杆、输出杆、吸收杆应保持良好的同轴。杆的同轴可通过无试样的压缩试验检测，具体方法是，将输入杆和输出杆直接同轴接触，施加载荷，检测入射波和透射波状态，得到相似的近似梯形的入射波和透射波，并且不出现反射波，且两曲线平台值相差小于5%时，则波导杆的同轴度满足试验要求。

8.4.2 应变片灵敏系数标定

试验前，按附录A的规定对输入杆和输出杆上应变片的灵敏度系数进行动态标定，当动态灵敏系数Kd与应变片灵敏系数K的相对偏差超过1%时，应采用Kd替代K进行修正。

8.4.3 波速标定

试验前，应对波速进行标定，将测试结果与理论值（两应变片间的距离与应力波传播时间的比值为波导杆中的弹性纵波传播速度）进行比对，当测试值与理论值相差小于2%时满足要求。

## 8.5 试样安装

将待测试样两端均匀涂抹一层润滑剂（如凡士林）薄层，置于输入杆和输出杆之间的对中位置，与波导杆同轴，在输出杆另一端安放吸收杆，并保证输入杆、试样、输出杆、吸收杆同轴紧密接触。

## 8.6 驱动撞击杆

将测速装置和应变信号采集系统置于待触发状态，选择合适的量程，预置一定的记录长度，以保证记录完整波形。

根据试验的应变速率要求，选择适当的驱动压力及撞击速度，应保证撞击杆及波导杆在弹性范围内工作，采用式（1）计算撞击应力σ0，且最大允许撞击应力应小于波导杆屈服强度的0.85倍。撞击杆的最大允许冲击速度Vmax，按式（2）计算：

（1）

（2）

撞击杆的最小冲击速度产生的撞击应力应保证试样产生塑性变形，即当撞击应力σ0大于试样材料的屈服强度时，试样才有可能发生塑性变形，动态压缩试验的特征动态应力由式（3）计算：

（3）

## 8.7 测量与记录

试验过程中应测量和记录以下信息：

a)撞击杆与波导杆的尺寸、弹性模量和弹性纵波波速

b)应变计的型号、灵敏系数和电阻值等参数及其在波导杆中粘贴位置

c)数据测试系统的参数（测试电路、应变的标定值等）

d)撞击杆速度

e)试样尺寸

f)输入杆和输出杆原始波形

g)试验后试样破坏情况

# 9 试验数据处理

## 9.1 基本计算

动态压缩试验涉及的基本计算公式参见附录C。

## 9.2 波形处理

9.2.1 波形基线的确定

取入射波起点前平直段数据的平均值作为入射波和反射波的波形基线值；取透射波起点前平直段数据的平均值作为透射波的波形基线值。数据处理时，应使入射波、反射波和透射波的波形基线归零。

9.2.2 波形起点的确定

根据入射波、反射波和透射波的波形，确定对应的波形起点。所确定的起点应在对应波形的基线上且靠近波形的起跳点，推荐采用附录D中的方法确定入射波、反射波和透射波的起点。

9.2.3 对齐波形起点

移动入射波、反射波和透射波，使其起点位于相同的时刻，并以此时刻作为数据处理中的起始时刻。起点对齐后的入射波、反射波和透射波应满足均匀化假设，即满足式（4）：

（4）

注：理论上，数据处理后应满足，但由于试验过程中不可避免的振荡、波弥散等影响，一般试验中不可能每个时刻始终满足的条件，通常认为=0.9~1.2视为有效的数据。

9.2.4 波形结束点的确定

根据入射波、反射波和透射波的波形，与确定波形起点的方法类似，确定入射波的结束点，根据入射波脉冲宽度，推荐采用附录D中的方法确定反射波和透射波的结束点。

## 9.3 试验结果

9.3.1 试样工程应变速率

试样工程应变速率的计算公式参见附录C，推荐采用(C.5.1)，如客户有特殊要求，可采用其他计算公式。

9.3.2 试样工程应变

试样工程应变的计算公式参见附录C，推荐采用(C.5.3)，如客户有特殊要求，可采用其他计算公式。

9.3.3 试样工程应力

试样工程应力的计算公式参见附录C，推荐采用(C.5.5)，如客户有特殊要求，可采用其他计算公式。

9.3.4 动态压缩应力-应变曲线

根据C.5.3和C.5.5获得试样工程应变、工程应力数据，得到试样动态压缩应力-应变曲线。典型的钛合金动态压缩应力-应变曲线如图4所示。

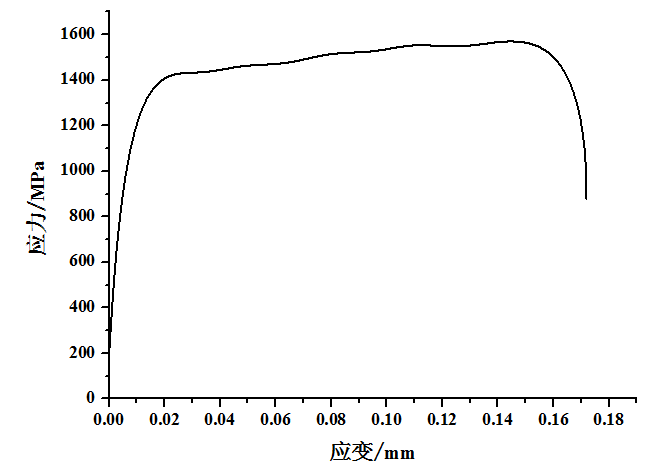
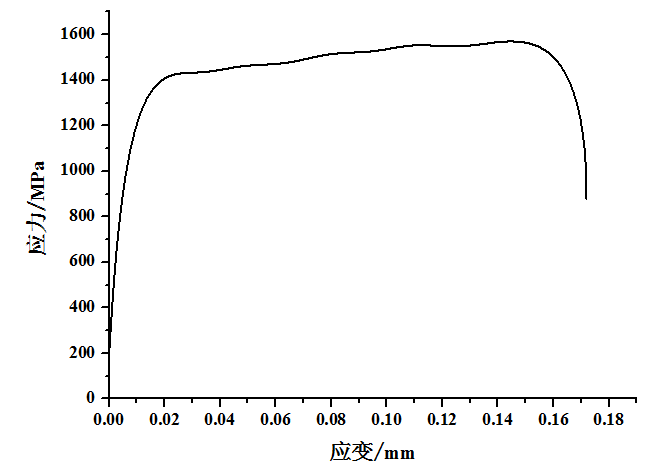


图4 钛合金典型的动态压缩应力-应变曲线

9.3.5 平均应变速率

按照式（5）确定9.3.1中应变速率历程曲线的平均应变速率：

（5）

式中：—平均

n—应变速率值的取值数量，无量纲。

9.3.6 最大动态压缩应力和动态失效强度

根据试样的动态压缩试验数据及相关曲线，取动态压缩应力-应变曲线上的应力最大值作为试样的最大动态压缩应力σm。当试样在动态压缩试验时发生压缩破坏，此时试样的最大应力为动态失效强度σmc，对于塑性较好的金属材料，在发生不均匀塑性变形之前，可能不发生压缩破坏。

注：当透射波波宽等于入射波波宽时，认为试样在第一轮应力波加载时未发生破坏，如观察到试样破坏，也认为是后续几轮应力波造成的，此时认为试样未发生压缩破坏，当透射波波宽小于入射波波宽时，试样在第一轮应力波加载下已发生破坏，此时认为试样发生了压缩破坏。

9.3.7 平均塑性流变应力

按照式（7）确定9.3.3中的工程应力历程曲线的平均塑性流变应力：

（7）

式中：

n—应力值的取值数量，无量纲。

## 9.4 试验结果修约

试验测定的性能结果数值应按照相关产品标准的要求进行修约，如未规定具体要求，应按照如下要求进行修约：

—强度性能值修约至5MPa；

—平均应变速率修约至5s-1；

—应变修约至小数点后保留两位。

## 9.5 试验结果有效性判定

出现下列任何一种情况，应视为试验无效，重新进行试验：

a）试验波形记录不完整、试验数据溢出或失真；

b）试验波形的极大值小于记录量程的20%；

c）试样出现不均匀变形（如鼓状变形或倾斜变形）或试样未发生塑性变形；

# 10 试验报告

试验报告应包括以下内容：

a）本标准的编号；

b）材料名称和牌号、状态及取样方向；

c）试样形状及尺寸；

d）试验环境条件；

e）试验条件：撞击杆和波导杆密度、弹性模量、泊松比、长度、直径、撞击速度、撞击应力等；

f）试验结果，如原始波形、平均应变速率、压缩应力-应变曲线、动态失效强度、动态压缩屈服强度、平均塑性流变应力等；

g）试验、审核及批准人员签字；

h）试验日期。

# 附录A

（资料性附录）

电阻应变片标定

A.1 总则

本附录给出了电阻应变片的动态标定方法，在试验前，需对每一组粘贴好的电阻应变片灵敏系数进行动态标定。

A.2 动态标定方法

应变测量系统的校验是以一定速度的撞击杆撞击波导杆产生的入射波脉冲的理论应变幅值为基准，对系统的应变标定的增益条件（或灵敏系数）进行验证或修正。

当撞击速度为V时，入射波应变的理论幅值由式（A.1）导出：

（A.1）

设应变测量系统记录的幅值高度为Hv，应变测量系统的标定条件为：标定电阻Rc，标定记录高度为Hc，则灵敏系数修正（即动态灵敏系数）由公式（A.2）导出：

（A.2）

当动态灵敏系数Kd与应变片灵敏系数K的相对偏差超过1%时，应采用Kd替代公式（C.4）中的K进行应变片计算修正。A.3校验步骤

1）对系统的两个应变测量通道进行应变标定，得到稳定的标定数；

2）撞击杆以一定的速度（一般取15m/s~25m/s）撞击输入杆，得到入射波脉冲；

3）计算得到输入杆撞击端的波形，计算去除波形上升沿和下降沿之后的波形平均高度Hv；

4）以公式（A.2）计算动态灵敏系数，与静态灵敏系数进行比较，确定是否进行修正；

5）将输出杆与输入杆互换位置，重复2)~4)，对输出杆应变通道进行校验。

# 附录B

（资料性附录）

电阻应变片粘贴方法

B.1 总则

本附录给出了电阻应变片的推荐粘贴方法，也可采用其他粘贴方法。

B.2 应变片准备

1）外观检查：

检查基底、覆盖层是否破损，敏感栅是否平直、排列整齐，是否有锈斑、霉点、气泡，引线是否有折断的危险，如果上述条件不符合，则认为该片不合格。

2）阻值测量：

用万用电表检查应变片的初始电阻值，剔出断路、短路者，保证同一组应变片的阻值相差在±0.5Ω范围内，（同一批应变片的阻值相差不应超过出厂规定的范围）记录该片的阻值和灵敏系数。

3）粘贴表面准备

定出试件被测位置，画出贴片定位线，在贴片处处理出不小于应变片基底面积3倍的区域，用浸有丙酮的棉球去油污、锈斑、氧化膜等，然后用细砂布相对贴片轴向交叉45°打磨，直到表面粗糙度为3.2 左右（表面粗糙度过高或过低均影响应变片的粘贴牢固程度）。用蘸有丙酮（酒精）的脱脂棉球擦洗干净，直至棉球洁白为止。擦过的表面要避免再次被污染，待溶剂挥发，表面干燥后，立即涂胶贴片。如不能及时粘贴，隔段时间后必须重新清洗。

B.3 贴片

注意应变片的正、反面(有引出线引出的一面为正面)，一手用镊子镊住应变片引出线，一手上胶，在应变片的粘贴面(反面)上匀而薄地涂上一层粘结剂(推荐使用502 室温快干胶)，将应变片放置于杆件上（使应变片基准线对准定位线）。用一小片聚四氟乙烯薄膜盖在应变片上，用手指沿应变片轴线朝一个方向滚压， 以挤出多余的粘结剂和气泡（注意此过程要避免应变片的滑移或转动），保持1~2分钟后，使应变片完全贴和、贴牢为止。由应变片无引线一端向有引线一端，沿着与试件表面平行方向轻轻揭去聚四氟乙烯薄膜，用镊子将引出线与试件轻轻脱开（切勿用力过猛以防拉断引线），检查应变片是否通路。

至此贴片结束，然后对贴片的质量进行以下几项检查：

1）基底或盖层有无破坏，敏感栅有无变形；

2）贴片有无引起断路；

3）应变片与试件之间有无气泡、翘曲、脱胶等情况；

4）检查表面是否短路，其绝缘强度是否达到要求，（用兆欧表检查，要求在100 兆欧以上），发现上述问题，如无法排除则必须刮掉后经清洗再重新贴片。

B.4 焊线

应变片与应变仪之间需要用导线连接，用胶纸带或其他方法把导线固定在试件上，应变片的引出线与导线之间用电烙铁焊接，焊接要准确迅速，焊点要光滑，防止虚焊。

B.5 检查

用数字万用表检查各应变片的电阻值，检查应变片与试件间的绝缘电阻。如果检查无问题，应变片要作较长时间的保留，作好防潮与保护措施。

# 附录C

（资料性附录）

钛合金室温高应变速率压缩试验数据处理方法

C.1 总则

本附录给出了波导杆弹性纵波波速、撞击应力与作用时间等基本计算公式，以及采用入射波、反射

波和透射波计算试样工程应变速率、工程应变和工程应力的公式，在试验测试数据有效的情况下，基于

波形起点确定误差及计算方便等综合考量，推荐采用C.5中入射波和透射波进行处理。

C.2 波导杆弹性纵波波速

波导杆中无限波长一维应力弹性纵波的波速，由式（C.1）导出：

（C.1）

C.3 撞击应力与作用时间

撞击杆以速度V撞击输入杆后，在输入杆中形成的撞击应力由式（C.2）导出，撞击作用时间由式（C.3）导出：

（C.2）

（C.3）

C.4 波导杆中的应变计算

通过撞击过程中应变片测得的信号幅值H，试验时波导杆应变由公式（C.4）导出：

(C.4)

C.5 试样工程应变速率、试样工程应变、试样工程应力的计算

根据分离式霍普金森压杆压缩试验方法的均匀性假设，试验记录的入射波、反射波和透射波在任意

时刻应满足式（C.5）:

(C.5)

C.5.1 二波法

根据入射波和透射波或反射波和透射波对试验数据进行处理，相关公式如下：

a)试样工程应变速率按式(C.5.1)、(C.5.2)计算：

(C.5.1)

(C.5.2)

b)试样工程应变按式(C.5.3)、(C.5.4)计算：

(C.5.3)

(C.5.4）

c)试样工程应力按式(C.5.5)计算：

(C.5.5)

C.5.2 三波法

基于一维应力波理论，对波导杆上的应变片测得的入射波、反射波和透射波进行处理，相关公式如

下：

a) 试样工程应变速率按式(C.5.6)计算：

(C.5.6)

b) 试样工程应变按式(C.5.7)计算：

(C.5.7)

c) 试样工程应力按式(C.5.8)计算：

(C.5.8)

实际进行数据处理时，为避免由于波形叠加引入的误差，推荐采用二波法(C.5.1)、(C.5.3)、(C.5.5)进行数据处理。

# 附录D

（资料性附录）

入射波、反射波和透射波起点及结束点的确定方法

D.1 总则

本附录给出了入射波、反射波和透射波波形起点和结束点确定方法，也可采用其他起点确定方法。

D.2 波形起点的确定

对于经过数字滤波的波形系列xi，推荐采用数值微分方法，利用式（D.1）计算向后有限差分作为波形系列的数值微分：

xi＇= （D.1）

式（D.1）中下标i为采样数据的索引值，从数值微分的最大值对应的索引值回溯至数值微分小于等于零的点，其对应的索引值即为波形的起点。

可通过origin等数据处理软件对入射波采集信号（电压-时间）进行差分运算，得到时间微分V´(t)，查看波形起跳点前一定数量的数据点（如采样频率为1MHz，取20个数据点），寻找时间微分极大值之后的第一个接近零的极小值或等于零的值对应的点，其对应的索引值即为波形的起点。反射波和透射波的波形起点，可选择下列方法之一确定：

1）分别采用数值方法，确定反射波和透射波的波形起点；

2）采用数值方法，确定入射波的波形起点，根据应变片的位置，通过弹性波速分布计算反射波和透射波的波形起点。

D.3 波形结束点的确定

与确定波形起点的方法类似，可确定入射波的结束点，从而确定入射波宽度，可由入射脉冲宽度

计算反射波和透射波的结束点，即认为在试样端部，入射波、反射波和透射波具有同样的长度。