



中华人民共和国国家标准

GB/T 30069.1—2013

金属材料 高应变速率拉伸试验 第 1 部分：弹性杆型系统

Metallic materials—Tensile testing at high strain rates—
Part 1: Elastic-bar-type systems

(ISO 26203-1: 2010, MOD)

2013-12-17 发布

2014-09-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会

发布

目 次

前言	Ⅲ
引言	Ⅳ
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 试验原理	1
4 术语和定义	1
5 符号及说明	2
6 试验设备	3
7 试样	5
8 装置的标定	8
9 试验程序	8
10 试验结果有效性评估	10
11 试验报告	11
附录 A (资料性附录) 准静态拉伸试验方法	12
附录 B (资料性附录) 单杆法示例	14
附录 C (资料性附录) 分离式霍布金森撞杆法(SHB)示例	20
附录 D (资料性附录) 仪器化冲击拉伸法(IIT)示例	26
参考文献	31

前 言

GB/T 30069《金属材料 高应变速率拉伸试验》分为 2 个部分：

- 第 1 部分：弹性杆型系统；
- 第 2 部分：液压伺服与其他试验系统。

本部分为 GB/T 30069 的第 1 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分使用重新起草法修改采用 ISO 26203-1:2010《金属材料 高应变速率拉伸试验 第 1 部分：弹性杆型系统》。

本部分与 ISO 26203-1:2010 的技术性差异及其原因如下：

——关于规范性引用文件，本部分做了具有技术性差异的调整，以适应我国的技术条件，情况集中反映在第 2 章“规范性引用文件”中，具体调整如下：

- 用修改采用国际标准的 GB/T 228.1 代替了 ISO 6892-1(见第 1 章和 7.1)；
- 增加引用了 GB/T 10623《金属材料 力学性能试验术语》(见第 4 章)；
- 增加了资料性附录 D“仪器化冲击拉伸法(IIT)示例”；

本部分做了下列编辑性修改：

- 用“本标准”代替“本国际标准”；
- 删除了国际标准的前言；
- 删除了参考文献[17]。

本部分由中国钢铁工业协会提出。

本部分由全国钢标准化技术委员会(SAC/TC 183)归口。

本部分起草单位：宝山钢铁股份有限公司、上海电气电站设备有限公司、深圳万测试验设备有限公司、武汉钢铁(集团)公司研究院、钢铁研究总院。

本部分主要起草人：方健、周冶东、李荣锋、朱月梅、安建平、高怡斐、乐金涛。

引 言

金属板材高应变速率拉伸试验对于车辆碰撞可靠性分析而言非常重要。在碰撞发生时最大的应变速率经常可达到 10^3 s^{-1} , 在此情形下材料的强度将显著高于准静态加载时的性能指标。因此表征材料应变速率敏感性的输入参数是否准确将直接影响到碰撞模拟的可靠程度。

尽管已有多种高应变速率试验方法, 但对于以下三个问题依然需要有效的解决方法。

1) 有关力测量信号的噪声

——试验力通常由测力装置上的测量点探测, 而测量装置与试样往往间隔一定的距离。

——此外, 已通过测量点的弹性波到达测力装置端部时会反射折回。如果试验时间与应力波通过测量装置的传播时间相当的话, 应力-应变曲线将因直达波与间接波的叠加而发生严重的振荡。与此不同的是, 在准静态试验中试验时间足够长已至数倍于弹性波往返的时间 因而在测力装置任何部位的力信号已达到饱和与平衡态。

针对上述问题有以下两个截然不同的解决方法:

a) 使用较短的测力装置以利于较快的达到平衡态。液压伺服型系统经常采用这一方法。

b) 使用较长的测力装置, 当力反射波到达测量点时试验已经完成。弹性杆型系统即基于这种方法。

2) 针对位移或试样伸长快速准确的测量方法

——常规引伸计因存在较大的惯性效应而不适用。非接触式测量方法如光学及激光装置可应用于高应变速率拉伸。利用根据弹性波传播理论合理设计的装置测量位移也是可行的方法, 如在本标准中讨论的一些例子。

——杆端位移可利用相同的测力数据经简单计算获得, 比如在杆的特定位置记录应变随时间的变化过程。因此, 在弹性杆型系统中不需要评估设备的刚度。

3) 沿试样力分布的不均匀性

在准静态试验中, 推荐使用具有较长平行部位与较大过渡弧的试样以利于标距部位达到均匀的单轴应力状态。在动态试验中因满足有效试验所需的力平衡条件, 试样设计有别于典型的准静态试样。与准静态试验相比, 动态试样通常在其平行于加载轴线方向上的尺寸设计得较小。

弹性杆型系统为解决上述试验问题提供了有效的解决方法, 广泛应用于高达 10^3 s^{-1} 应变速率区间并能获得准确的应力-应变曲线。国际钢铁协会(International Iron and Steel Institute, IISI)基于各类实验室间的比对试验发布了“钢板动态拉伸试验推荐方法”。比对试验结果表明应用弹性杆型系统可获得高质量的数据结果。

金属材料 高应变速率拉伸试验

第 1 部分:弹性杆型系统

1 范围

GB/T 30069 的本部分规定了高应变速率条件下采用弹性杆型系统测定金属板材应力-应变特征的试验方法。

基于实验及数值计算,如碰撞有限元模拟(FEA)表明,处于 $10^{-3} \text{ s}^{-1} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 范围内的应变速率与车辆碰撞事故密切相关。

为准确评价车辆耐碰撞性能,在高于 10^{-3} s^{-1} 应变速率条件下得到金属材料可靠的应力-应变特征尤为关键。

本部分适用于高于 10^2 s^{-1} 应变速率范围的拉伸试验方法。

注 1: 当应变速率低于 10^{-1} s^{-1} 时,可使用 GB/T 16825.1 规定的准静态拉伸试验机^[1]。应变速率低于 0.0067 s^{-1} 时,直接采用 GB/T 228.1 方法试验;应变速率在 $0.0067 \text{ s}^{-1} \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$ 范围内,可参考 GB/T 228.1 方法试验。

注 2: 除本部分规定的矩形横截面试样外,本部分同样可应用于其他几何尺寸的拉伸试样。

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,仅注明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(包括所有修订单)适用于本文件。

GB/T 228.1—2010 金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法(GB/T 228.1—2010, ISO 6892-1: 2009, MOD)

GB/T 10623 金属材料 力学性能试验术语(GB/T 10623—2008, ISO 23718:2007, MOD)

3 试验原理

本部分用来评价金属材料在高应变速率条件下的应力-应变特征。

低应变速率(低于 10^{-1} s^{-1})试验可利用准静态拉伸试验机开展。然而,当利用此类试验机实施较常规应变速率高的试验时须特别加以关注。本部分须使用高应变速率试验方法规定的试样,附录 A 提供了此类试验的详细程序。

当应变速率高于 10 s^{-1} 时,准静态试验使用的力传感器由于波的多次反射将对力值信号造成严重干扰。因此需采用特殊的力值测量技术,可通过以下两类不同的方法加以实现:

一种是在加载方向上加长力测量装置,以实现当弹性波从另一端折返时力值测量已经结束,如附录 B 与附录 C;

另一种方法是缩短力测量装置,即减少力测量装置达到动态平衡所需要的时间以及实现较高的固有频率,如附录 D。

4 术语和定义

GB/T 10623 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

4.1

弹性杆型系统 elastic-bar-type system

在轴线方向上安装有加长的力测量装置的试验系统,可避免由设备端部折回的反射波影响力值的测量。

注:“弹性杆型系统”名称源于此类系统通常采用较长的弹性杆作为力测量装置。

5 符号及说明

符号及说明见表 1。

表 1 符号及说明

符号	单位	说明
试样		
a_0	mm	板状试样的原始厚度
b_0	mm	板状试样平行长度的原始宽度
b_g	mm	试样夹持部分的宽度
L_0	mm	原始标距长度[见 7.1e)]
L_c	mm	平行长度
L_{total}	mm	包括平行长度与肩部的试样总长
L_u	mm	断后标距长度
r	mm	肩部过渡弧半径
S_0	mm ²	平行长度原始横截面积
S_b	mm ²	弹性杆横截面积
时间		
t	s	时间
伸长		
A	%	断后伸长率 ^a
A_u	%	某平均应变速率时的指定伸长率上限
位移		
u	mm	弹性波的位移
u_1	mm	原始标距长度一端的位移
u_2	mm	原始标距长度另一端的位移
$u_B(t)$	mm	t 时刻弹性杆一端的位移
应变		
e	—	工程应变
e_s	—	达到平衡态前期望的工程应变
ϵ	—	弹性应变
ϵ_B	—	弹性杆末端的弹性应变(见附录 B)

表 1 (续)

符号	单位	说明
ϵ_g		C 截面处的弹性应变(见附录 B)
应变速率		
$\dot{\epsilon}$	s^{-1}	工程应变速率
$\bar{\dot{\epsilon}}$	s^{-1}	平均工程应变速率
力		
F	N	力
F_m	N	最大力
应力		
R	MPa	工程应力
R_m	MPa	抗拉强度
R_t	MPa	规定总延伸强度
弹性模量		
E	MPa	弹性模量
E_b	MPa	杆的弹性模量
波速		
c_0	$mm \cdot s^{-1}$	弹性杆中波的传播速度
c	$mm \cdot s^{-1}$	弹性波在试样中的传播速度
速度		
$v_A(t)$	$mm \cdot s^{-1}$	冲击块的速度(见附录 B)
v	$mm \cdot s^{-1}$	杆中任一位置的质点速度(见附录 C)
v_i	$mm \cdot s^{-1}$	输入质点速度(见附录 C)
v_r	$mm \cdot s^{-1}$	反射质点速度(见附录 C)
v_t	$mm \cdot s^{-1}$	透射质点速度(见附录 C)
^a 对于非比例试样,可对符号 A 加下标注明原始标距的长度(单位: mm),例如 $A_{20\text{ mm}}$ 表示原始标距长度 $L_0 = 20\text{ mm}$ 试样的断后伸长率。		

6 试验设备

6.1 弹性杆

应用弹性长杆时,试验需在弹性波由试样另一边的杆端位置处折返前完成。因此,力值的测量可不受反射波的干扰。单杆(One-Bar)试验机与分离式霍布金森杆(SHB)试验机通常被用来实施此类方法(参见附录 B 与附录 C)。

6.2 输入装置

开环型加载通常被用做载荷输入的方法。加载输入的上限约为 $20\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对于 SHB 试验机,可

采用撞管或撞杆作为加载输入。而对于单杆试验机,通常采用锤击的方式。

6.3 夹持方式

夹持方式(试样与弹性杆的连接方法)直接影响数据的质量(见附录 B 与附录 C)。

SHB 与单杆试验机的夹持装置直接装配在弹性杆上。夹持装置应采用与弹性杆相同的材料与直径以保证应力波在加载传导过程中的阻抗最低。若采用的材料或尺寸不同时,后续处理应力与应变结果时需采用恰当的方法。

6.4 力值测量装置

采用适宜的短标距应变片测量力值,如 2 mm 标距,应变片粘贴在与试样直接相连的弹性杆上。

应变片粘贴的位置需避免顶端效应的影响。为确保测量到一维弹性波,应变片粘贴处距离杆的末端需至少 5 倍于杆的直径(见附录 B 与附录 C)。

注:本方法测量的应变速率通常高于 10^2 s^{-1} 。由于需采用数十米长的撞杆来实现低于 10^2 s^{-1} 的应变速率,因而不具备实际可操作性。

为确保应力-应变曲线的有效性,弹性杆的平直性非常重要。为实现这一目标,对弹性杆采用恰当的支撑与导向非常关键。

6.5 位移测量装置

拉伸试验中的应变通常采用标距部分两点相对位移的比值来表示,如试样的原始与结束时的标距长度。在准静态试验中,一般采用在试样标距部分加装引伸计的方法可获得准确的应变结果。然而在高应变速率试验中,由于引伸计的惯性效应影响而无法采用这种方法,此时,应采用非接触型装置或弹性杆上的应变片来测量位移或试样伸长。

6.5.1、6.5.2 和 6.5.3 说明了在弹性杆型系统中可用于测量位移的装置。使用这些装置时,建议应变速率条件达到 10^3 s^{-1} 左右,且位移测量需在试验过程中全程记录。这些装置可组合使用,例如,当组合使用 6.5.1 与 6.5.3 装置时,原始标距长度(L_0)一端的位移可使用非接触型位移计(6.5.1)测量,而另一端可使用粘贴在杆表面上的应变片测量(6.5.3)。

6.5.1 非接触型位移计

使用激光、光学或类似的装置测量原始标距长度(L_0)一端的位移。

使用 2 个 6.5.1 类型装置或 1 个 6.5.1 与 1 个 6.5.3 类型装置时,可测量图 1 中 L_{total} (第 7 章 A 型试样)随时间的变化及计算相应的伸长。

6.5.2 非接触式引伸计

使用高速摄像机、多普勒或激光引伸计以及其他非接触系统可测量图 2 中 L_c (第 7 章 B 型试样)的变化。

6.5.3 应变片

应使用式(1)并基于粘贴在弹性杆上的应变片所测量的应变过程记录计算得到弹性杆末端随时间的位移变化。

$$u_B(t) = c_0 \int_0^t \epsilon_B(t) dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$u_B(t)$ ——弹性杆末端在某时刻 t 的位移;

- c_0 ——弹性杆中波的传播速度；
 ϵ_B ——弹性杆末端的弹性应变(见附录 B)。

6.6 数据记录仪

使用放大器与数据记录仪,如示波器等,从原始信号中评测应力-应变曲线。这类仪器应具有足够高的频响性能。电子测量系统中所有元件的频响选择需保证仪器记录的数据不应受单独元件的频响性能影响。典型的频响性能至少要求达到 500 kHz。对于数字式数据记录仪来说,测量数据的最小分辨率应优于 10 位。

7 试样

7.1 试样形状、尺寸与制备

试样的几何尺寸应满足以下要求:

- 根据最大应变速率的需要确定平行长度。试样平行长度越短对应的应变速率越高。为使试样达到力平衡态,在设定的应变速率范围内应使平行长度足够短。
- 为确保能够在 10^3 s^{-1} 应变速率上实现力平衡,建议试样平行长度不大于 20 mm。为满足试样平行长度的均匀变形,应使得试样两端的受力同时达到平衡。由于力以弹性波形式传播,为实现平衡态应至少满足式(2):

$$\frac{L_c}{c} \leq \frac{e_s}{\dot{e}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

- L_c ——试样的平行长度;
 c ——弹性波在试样中的传播速度;
 e_s ——达到平衡态前期望的工程应变;
 \dot{e} ——工程应变速率。

- 试样的宽度应能满足在试验中获得单轴应力,并满足式(3)和式(4):

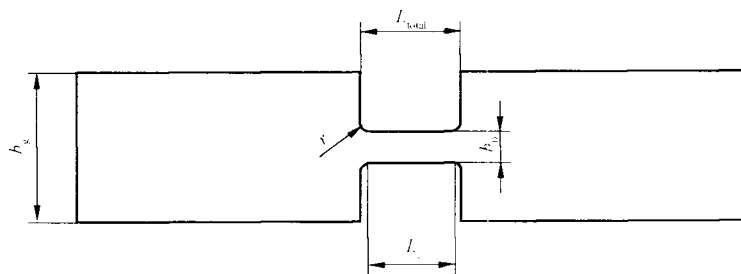
$$\frac{L_0}{b_0} \geq 2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{b_0}{a_0} \geq 2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

- a_0 ——板状试样的原始厚度;
 b_0 ——板状试样平行长度的原始宽度;
 L_0 ——原始标距长度。

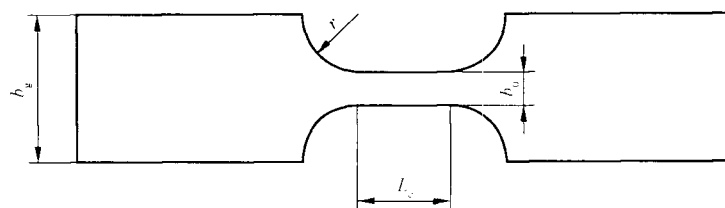
- 通常情况下,若试验机能力允许且无其他特殊要求,试样的厚度应保留材料的原始厚度。
- A 型试样(见图 1)肩部过渡弧半径应足够小,此时 L_{total} 可认作原始标距长度(L_0)。B 型试样(见图 2)肩部过渡弧半径应足够大,此时 L_c 可认作原始标距长度(L_0)。



说明:

- b_0 —— 平行长度的原始宽度;
- b_g —— 夹持部分的宽度;
- L_c —— 平行长度;
- L_{total} —— 包括平行长度与肩部的试样总长;
- r —— 肩部过渡弧半径。

图 1 A 型试样



说明:

- b_0 —— 平行长度的原始宽度;
- b_g —— 夹持部分的宽度;
- L_c —— 平行长度;
- r —— 肩部过渡弧半径。

图 2 B 型试样

对于 A 型与 B 型试样而言,由于计算应变需使用参考标距长度,而在原始标距长度内的轴向应变存在不均匀性,因此根据杆位移计算得到的单轴拉伸数据存在不确定性。为评估应变不均匀性的潜在影响,建议利用两套准静态加载时的真应力-真应变数据评估相符性。

- 1) 对于选定类型的高应变速率拉伸试样,根据杆的位移(即试样上与杆端相连的位置的位移)与 L_{total} 或 L_c 的比值获得一套应变数据;
- 2) 在 GB/T 228.1 标准规定的常规拉伸试样平行长度中央区域装夹引伸计,得到另一套应变数据。

在试验报告中宜包含针对上述结果的比较,以供潜在用户评估使用本技术规定获得的高应变速率拉伸试验结果。若两者偏差超出预期,应在试样标距长度内通过局域应变测量技术获得应变结果(如应变片,非接触式引伸计等)。

- f) 为确保夹持区域的变形可被忽略且无塑性变形,夹持部分的横截面须大于平行长度部分。通常试样夹持部分与标距长度的厚度相同,因此夹持部分与标距长度部分的宽度比需满足式(5):

$$\frac{b_0}{b_g} < \frac{R_t}{R_m} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

- b_0 —— 板状试样平行长度的原始宽度;

b_g 试样夹持部分的宽度；

R_t 规定总延伸强度；

R_m 抗拉强度。

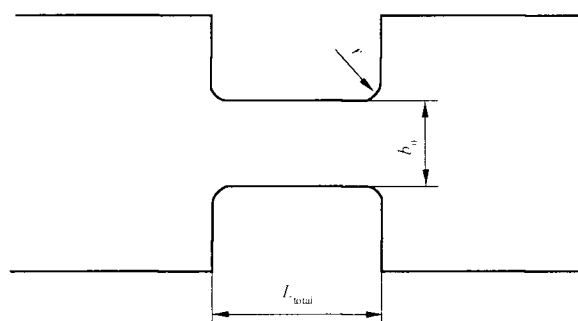
g) 试样表面应避免加工冷作、裂纹与其他表面缺陷造成的应力集中。

7.2 典型试样

试样的推荐尺寸见图3与图4所示，其中试样夹持部分与标距部分的宽度比值通常大于2。

根据试验方法或其他试验目的，也可以使用其他类型的试样。

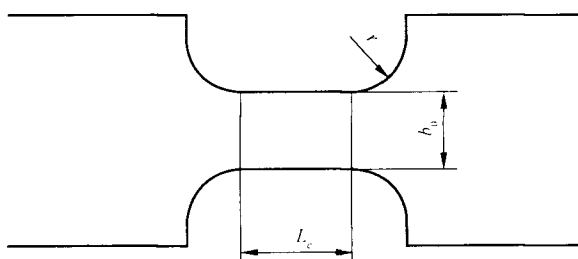
图3与图4中的典型试样可用于实测应变速率高至 10^3 s^{-1} 的试验，也可用于不同应变速率试验数据的比较。由于在拉伸试验均匀伸长阶段，试样的尺寸效应对性能影响较小，然而均匀变形结束后，试验测得的拉伸性能结果受试样的尺寸影响，因此建议不同应变速率的试验，包括低应变速率，均使用同一几何形状与尺寸的试样，便于得到一整套试验结果。



单位为毫米

b_0	最大 5
L_{total}	10
r	1.5

图3 A型试样的典型尺寸



单位为毫米

b_0	最大 5
L_c	10
r	5.0

图4 B型试样的典型尺寸

8 装置的标定

8.1 总则

应通过对粘贴有应变片的弹性杆施加已知的静态力来标定应变片的输出信号,图 B.3 给出了一台单杆试验机的标定示例。

当使用 SHB 试验机时,可根据密度、弹性模量以及弹性杆中的纵波传播速率应用理论公式计算应力与应变数据。此时,应当在准确测出各物性参数并确保其一致性后方能实施试验(详见附录 C)。

8.2 位移测量装置

采用合适的方法在静态条件下校准位移测量装置。

9 试验程序

9.1 总则

采用加载输入装置(6.2),在试样上沿轴向施加高速应变,力值测量装置(6.4)可测出在试样上施加的力。同时,试样上 L_{total} 、 L_c 或 L_0 的变化可由位移测量装置(6.5)记录。

根据试验应变速率范围确定试样形状、加载输入装置(6.2)、力值测量装置(6.4)与位移测量装置(6.5)。

除非另有规定,试验一般在室温 $10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内进行,根据需要记录试验时的温度。对温度要求严格的试验,试验温度应为 $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

9.2 试样安装

使用夹具时,需保证试样与夹头间良好的连接状态以施加单轴力,当使用弹性杆时也应当确保试样与弹性杆间良好的连接。

选用 A 型试样时,安装试样应满足两夹头端部的间距为 L_{total} 且试样标距部分居中(见图 1.3)。

9.3 施加力

根据 6.2 的方法施加力。为获得试验所需的目标应变速率,应在试验前预先确定撞管、撞杆或撞锤的速度。

注:有关单杆法撞锤速度与分离式霍布金森杆法撞杆速度的参考指南见 B.2 与 C.2。

9.4 测量与记录

试验中,6.4 规定的力值测量装置可测量弹性应变的变化,6.5 规定的位移测量装置可测量弹杆与试样连接点间的位移变化,或标距 L_0 端点间位移变化,应记录上述实测数据。

a) 工程应变与工程应变速率(e, \dot{e})

采用 6.5 规定的位移测量技术通过式(6)和式(7)计算得到工程应变(e)与工程应变速率(\dot{e})的结果。

$$e = (u_1 - u_2) / L_0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\dot{e} = \frac{e_{n-1} - e_n}{\Delta t} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

- u_1 ——原始标距长度一端的位移；
 u_2 ——原始标距长度另一端的位移；
 e_{n+1} —— $(n+1)$ 步长时刻的工程应变；
 e_n —— n 步长时刻的工程应变；
 Δt —— n 与 $(n+1)$ 步长时刻间的时间增量。

b) 工程应力(R)

根据 6.4 测量力值,并通过式(8)计算工程应力。

$$R = F/S_0 \quad \dots\dots\dots(8)$$

式中：

- R ——工程应力；
 F ——力；
 S_0 ——平行长度原始横截面积。

c) 断后伸长率(A)

选用式(9)或式(10)计算试样断后伸长率。

对于 A 型试样,

$$A = \frac{L_u - L_{total}}{L_{total}} \quad \dots\dots\dots(9)$$

式中：

- A ——断后伸长率；
 L_u ——断后标距长度；
 L_{total} ——包括平行长度与肩部的试样总长。

对于 B 型试样,

$$A = \frac{L_u - L_c}{L_c} \quad \dots\dots\dots(10)$$

式中：

- A ——断后伸长率；
 L_u ——断后标距的长度；
 L_c ——B 型试样原始标距长度。

d) 平均工程应变速率(\bar{e})

通过式(11)计算 1%(0.01)~10%(0.1)应变区间内的均值得到平均工程应变速率。

$$\bar{e} = \frac{(0.1 - 0.01)}{t_{10} - t_1} \quad \dots\dots\dots(11)$$

式中：

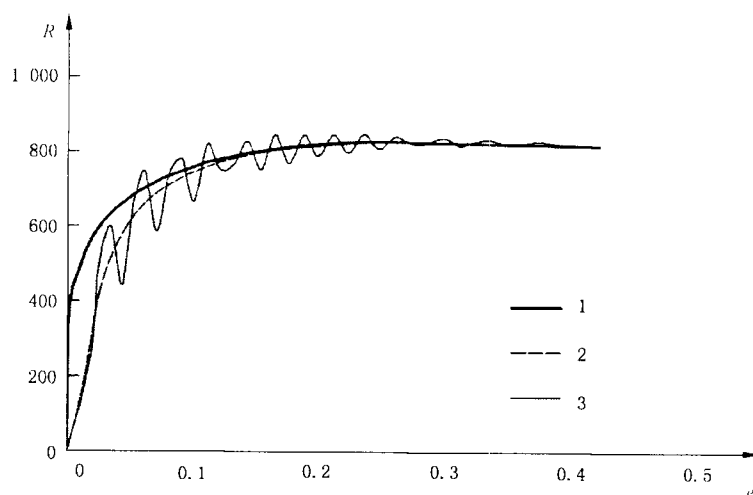
- \bar{e} ——平均工程应变速率；
 t_1 ——1%应变对应的时间；
 t_{10} ——10%应变对应的时间。

若试样断裂应变小于 10%，则根据 1%应变与测得的断裂应变计算平均应变速率。通过协商,计算平均应变速率的应变区间上限可由 10%更改为其他约定的应变点,如峰值力时刻的应变。当采用其他约定的伸长率作为应变区间上限时,平均应变速率的符号应标记为 \bar{e}_{1-A_u} ,其中 A_u 表示计算平均应变速率采用的应变区间上限所对应的试样伸长率。

10 试验结果有效性评估

以下情况将可能对材料性能评价带来影响,此时需重新试验或对试验结果给出恰当的解释说明:

- 断裂位置与试样中心的距离超过 1/4 标距长度;
- 应力信号发生较大的振荡(见图 5);
- 试验时平均应变速率与目标应变速率发生显著的偏差,且应变速率初始上升沿未处于约定的应变区间内(例如,约定 5% 应变区间);
- 处于约定应变区间内的,但应变速率超过平均应变速率的 $\pm 30\%$;
- 动态条件下的应力-应变曲线弹性段斜率与期望斜率存在显著差异(不规则斜率,见图 5)。



说明:

- 1——无测量问题的数据;
 2——不规则斜率;
 3——不规则斜率+振荡;
 R——工程应力;
 e——工程应变。

图 5 高应变速率试验中常见测量问题示例

载荷振荡与应力-应变曲线弹性段的不规则斜率是影响高应变速率拉伸试验质量的两大主要问题:

- 载荷振荡,即当试验机或加载链上元部件未恰当连接时(如对中性差或弹性杆间的不重合)较易发生载荷振荡现象,此时可通过仔细调节试验机装配、弹性杆系统的支撑与导向部件加以消除;
- 应力-应变曲线弹性段的不规则斜率,这是由于试样标距外加载链上的元部件发生变形造成的附加结果。这在杆型试验系统中不常出现,因为可通过弹性波传播理论计算得到杆末端的实际位移。然而当夹头与试样间的装配力或夹持力不充分(见图 B.2 与图 B.3),或试样边缘(即 L_{total} 的边缘)与杆端存在显著位置偏离时,则会发生不规则斜率现象。

针对上述情况,需相应调节试验装置。

11 试验报告

试验各方可协商在报告中包含以下内容：

- a) GB/T 30069 本部分编号；
- b) 材料名称、牌号(如已知)；
- c) 试验方法(力测量方法、位移测量方法以及测力传感器型号等)；
- d) 试样标识；
- e) 试样形状与尺寸；
- f) 试样的取样位置与方向；
- g) 试验结果,如应力-应变曲线、应变速率、平均应变速率、抗拉强度、最大力伸长率、断后伸长率等。

附 录 A
(资料性附录)
准静态拉伸试验方法

A.1 范围

本附录给出了 $10^{-3} \text{ s}^{-1} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 应变速率范围通过应变控制评价金属材料拉伸性能的试验方法。

A.2 加载输入方法与试验机类型

用于加载的试验机需符合 GB/T 16825.1 标准的要求,试验双方协商确定试验机级别,通常使用电子式或液压式试验机。

A.3 夹持方法

试验机应当配备与试样匹配的夹具,在整个试验过程中夹具夹持试样时应保证其对中性。除拉伸试验力外夹具不应产生其他轴向力。

A.4 力测量方法

通常使用一个在弹性体上粘贴电阻式应变片所构成的力传感器来测量试验过程中的力值。

A.5 位移测量

根据试样形状,测量 L_0 、 L_c 或 L_{total} 。

通过测量横梁位移,或优先采用在试样上夹装引伸计来测量位移的变化。

当采用测量横梁位移的方法,由于未考虑试验机的柔度性能,试样上测出的应变速率可能低于从横梁位移测得的应变速率,GB/T 228.1—2010 附录 F 给出了相关说明。

注:可使用差动转换器类、光学视频类与应变片等各类型引伸计。

A.6 试样

推荐在高应变速率试验与准静态试验中使用相同构造的试样,经试验双方协商,也可使用其他尺寸的试样。

注:在评价汽车碰撞性能时需提供不同应变速率时的材料性能数据,为满足不同应变速率相同应变范围内数据的一致性,优先采用相同的试样。

A.7 试验程序

A.7.1 试样安装

选用与试样形状相符的夹具,并确保在整个试验过程中轴向力仅作用于试样上。

A.7.2 拉紧试样

基于引伸计的反馈控制,试样以设定的应变速率受拉变形。当采用横梁位移法时,应控制横梁位移速度以确保试样平行长度的应变速率符合试验所需的应变速率条件。

如有需要,可设置试验预拉段以确保在达到所需的应变速率时方能拉紧试样。

A.7.3 测量与记录

试验中记录力与试样位移随时间的变化,并通过式(A.1)和式(A.2)计算工程应变速率、工程应力与平均应变速率。

a) 工程应变速率($\dot{\epsilon}$)

$$\dot{\epsilon} = \frac{e_{n+1} - e_n}{\Delta t} \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

e_{n+1} —— $(n+1)$ 步长时的工程应变;

e_n —— n 步长时的工程应变;

Δt —— n 与 $(n+1)$ 步长间的时间增量。

b) 工程应力(R)

根据 6.4 测量力值,并通过式(A.2)计算工程应力。

$$R = \frac{F}{S_0} \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

F —— 力;

S_0 —— 平行长度的原始横截面积。

c) 平均工程应变速率($\bar{\dot{\epsilon}}$)

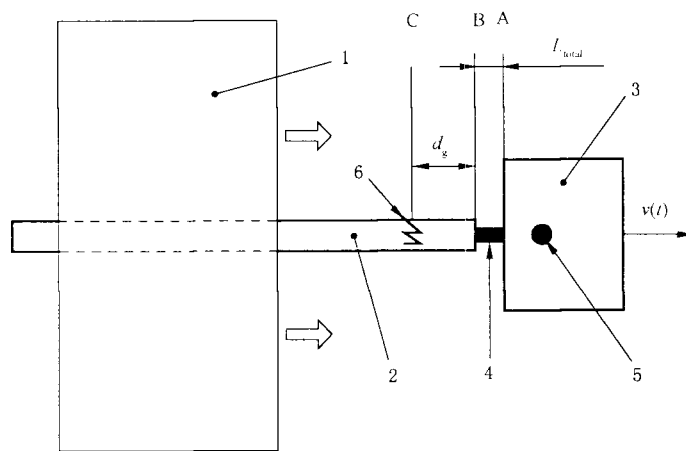
根据 9.4d)得到平均工程应变速率。

附录 B
(资料性附录)
单杆法示例

B.1 单杆法原理

单杆法利用一根弹性长杆作为输出杆测量力值,并在弹性波自输出杆末端反射折回前完成力值测量。利用撞锤直接击打挡块实施动态加载,载荷传递至试样致使其变形破断。原则上,此类构造的试验装置对于试验持续时间没有特别限制。

原则上,使用单杆法时对于可供实施的应变速率而言并无固定的上限。然而由于试样本身具有一定的长度,因此单杆法常用的应变速率上限区间为 $2 \times 10^3 \text{ s}^{-1} \sim 3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 。加载后由于受应力波从杆另一端折回至应变片处的影响,单杆法的应变速率下限通常在 10^2 s^{-1} ,并取决于输出杆的长度 [参^[2~6]],见图 B.1。



说明:

- 1 — 撞锤;
- 2 — 输出杆;
- 3 — 挡块;
- 4 — 试样;
- 5 — 紧固栓;
- 6 — 应变片;
- d_g — B 与 C 截面间距;
- L_{total} — 包括平行长度与肩部的试样总长;
- $v_A(t)$ — 冲击块的速度;
- A — 挡块顶端;
- B — 输出杆顶端;
- C — 应变片位置。

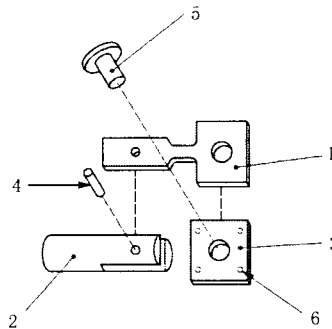
图 B.1 高应变速率拉伸试验机单杆法原理图

B.2 输入方法/试验机类型

撞锤击打挡块致使试样变形,因此对撞锤的速度进行开环控制可调节变形输入的条件。撞锤与挡块的最大速度可分别达到 10 m/s 与 (15~20) m/s。挡块的速度不仅取决于锤击的速度,也与试样的性能有关,因此需全面考虑这些因素来确定锤击速度以获取期望的应变速率。

B.3 夹持方法

利用夹头与紧固栓夹持试样。夹头的直径应与输出杆相同,见图 B.2 所示。夹头中部开有安装槽可将板状试样紧密置入其中并用粘合剂粘结牢固,从而确保夹头与试样连为一体。通过螺纹将夹头精密准直地安装在输出杆上并确保紧密接触,以降低声阻抗的失配。通过上述方式,夹持后夹头端部可视为输出杆的顶端位置。试样另一端通过紧固栓与挡块固定,试验时拉伸力经由穿过夹持部销孔的紧固栓传递至试样。为增加试样销孔区的强度,可通过点焊的方式在试样夹持部增设加固板。



说明:

- 1——试样;
- 2——夹头;
- 3——加固件;
- 4——定位销;
- 5——紧固栓;
- 6——点焊区。

图 B.2 单杆法的试样

B.4 力值测量

由装夹试样的输出杆直接测量力。输出杆应足够长以保证在弹性波自输出杆另一端反射折回前力值测量已经结束。根据试样在试验中承受的最大力确定杆的直径。例如,输出杆的长度为 5 m,其直径处于 12 mm~20 mm 范围。

试验中,图 B.1 中 B 截面的轴向力与此处的弹性应变幅成正比,由式(B.1)计算得到:

$$F(t) = E_b S_b \epsilon_B(t) \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

- E_b ——杆的弹性模量;
- S_b ——弹性杆横截面积;

ϵ_B ——弹性杆末端的弹性应变。

考虑到弹性波在杆中的传播, ϵ_B 与 C 截面处的弹性应变有如下关系, 见(B.2)式。

$$\epsilon_B(t) = \epsilon_g(t + d_g/c_0) \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

ϵ_g ——C 截面处的弹性应变;

d_g ——B 与 C 截面间距;

c_0 ——弹性杆中波的传播速度。

当试样长度 L_0 足够小且在试样平行长度上的应力均匀分布时, 试样的工程应力如式(B.3) 所示。

$$R(t) = \frac{F(t)}{S_0} = \left(\frac{S_b}{S_0}\right) E_b \epsilon_g(t + d_g/c_0) \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

B.5 位移测量

用两种不同的技术同时测量试样两端位移, 在弹性杆型试验系统中, 试样与输出杆连接端的位移, u_B , 通常都由粘贴在输出杆并与杆端间距 d_g 的应变片测得(见图 B.1), 而另一端与挡块相连处的位移, 即 u_A , 则通过非接触式光电位移传感器测得。

假定弹性波仅在杆中以一维方式传播, 则弹性波逆向传播至 x 位置处的位移可由式(B.4) 确定,

$$u = f(x + c_0 t) \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

因此, 位移对时间的偏导数与对应变的偏导数有以下关系, 见式(B.5),

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_0 \frac{\partial u}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (B.5)$$

B 截面处的位移见式(B.6),

$$u_B = \int_0^t \frac{\partial u_B}{\partial t} dt = c_0 \int_0^t \epsilon_B dt \quad \dots\dots\dots (B.6)$$

考虑到弹性波传播的延迟效应, 见式(B.2), B 截面处的位移可改写为式(B.7),

$$u_B = \int_0^t \frac{\partial u_B}{\partial t} dt = c_0 \int_0^t \epsilon_g(t + d_g/c_0) dt \quad \dots\dots\dots (B.7)$$

在挡块侧的位移, u_A , 可通过记录挡块的速度 $v_A(t)$ 并对时间积分获得, 通常可使用模拟差分装置。A 截面处的位移如式(B.8)所示,

$$u_A = \int_0^t v_A(t) dt \quad \dots\dots\dots (B.8)$$

当试样长度 L_0 足够小且在试样平行长度上的应变均匀分布时, 试样的工程应变如式(B.9) 所示,

$$e(t) = \frac{u_A - u_B}{L_0} = \frac{1}{L_0} \int_0^t [v_A(t) - c_0 \epsilon_g(t + d_g/c_0)] dt \quad \dots\dots\dots (B.9)$$

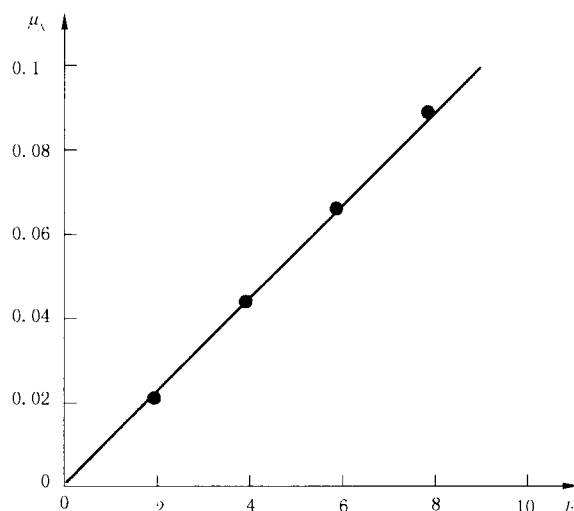
工程应变速率为工程应变对时间的导数, 见式(B.10),

$$\dot{e}(t) = \frac{1}{L_0} [v_A(t) - c_0 \dot{\epsilon}_g(t + d_g/c_0)] \quad \dots\dots\dots (B.10)$$

B.6 试验程序

B.6.1 力测量装置的标定与确认

在开始试验前, 应先对力测量装置进行标定与确认。对输出杆静态加载并记录应变片的输出信号 ϵ_g , 标定过程中需保持加载的准直性。图 B.3 给出了一则示例, 图中 ϵ_g 用其放大的信号值(u_g)表示。标定后需确认输出杆的应变输出(ϵ_g)与力值存在线性关系。



说明:

F ——力,单位为千牛顿(kN);

u_A ——应变片输出放大信号,单位为伏特(V)。

图 B.3 单杆法力测量装置标定示例

B.6.2 试样夹持

与试样一端紧密相连的夹头通过螺纹安装在输出杆顶端,另一端通过紧固栓与挡块装夹。此时,应严格保证输出杆与试样沿拉伸加载方向的准直与同轴性,必要时可利用合适的支撑或导向来实现。然而,需指出的是杆与支撑/导向间过多的接触会降低应变片输出信号的质量。

B.6.3 变形输入

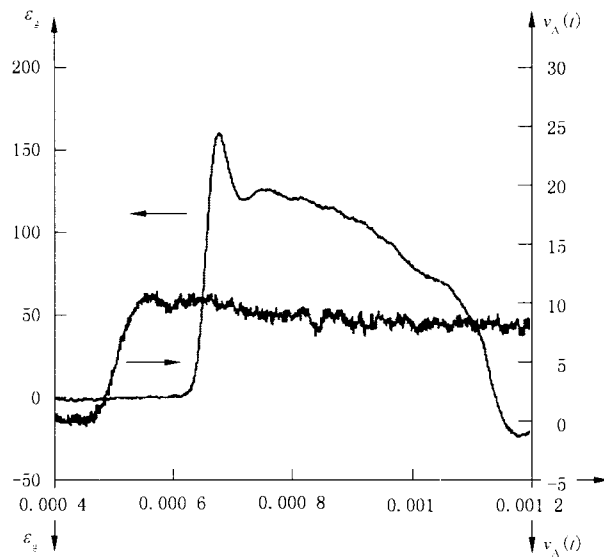
撞锤以一定速度击打挡块,载荷经由紧固栓由挡块传递至试样致使其拉伸变形。

B.6.4 测量与记录

测量并记录粘贴在输出杆上的应变片信号 ϵ_g 与时间的关系,根据速度是位移对于时间的导数关系,同时测量并记录挡块速度 $v_A(t)$ 随时间的变化。

B.7 采用单杆法开展高应变速率拉伸试验的实施例子

针对一例软钢实施的高应变速率拉伸试验如图 B.4 所示。图 B.4 a)给出了由数字式示波器记录的输出信号。一条曲线是应变输出信号 ϵ_g ,另一条是挡块的速度信号 $v_A(t)$ 。至此,工程应力,工程应变与工程应变速率可通过这些数据计算得到,见图 B.4 b)所示。图 B.5 给出了一例高强钢的高应变速率拉伸示例。



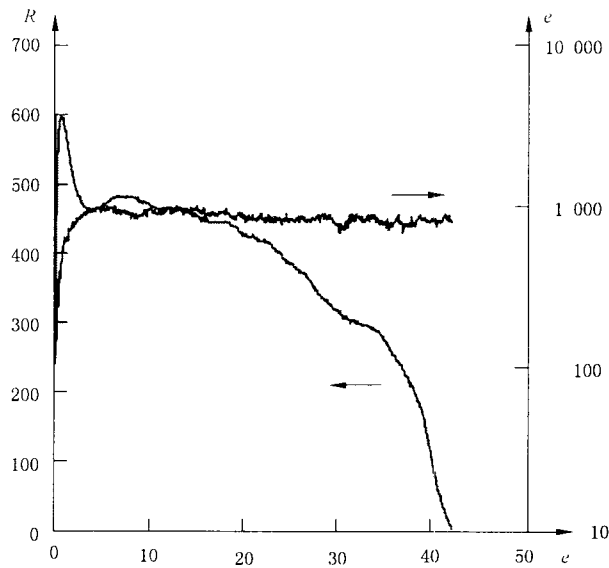
说明：

t ——时间；

ϵ_z ——C截面处的弹性应变 (10^{-6})；

$v_A(t)$ ——冲击块的速度,单位为 10^3 毫米每秒 ($10^3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)。

a) 应变片与光电位移传感器记录的原始输出信号



说明：

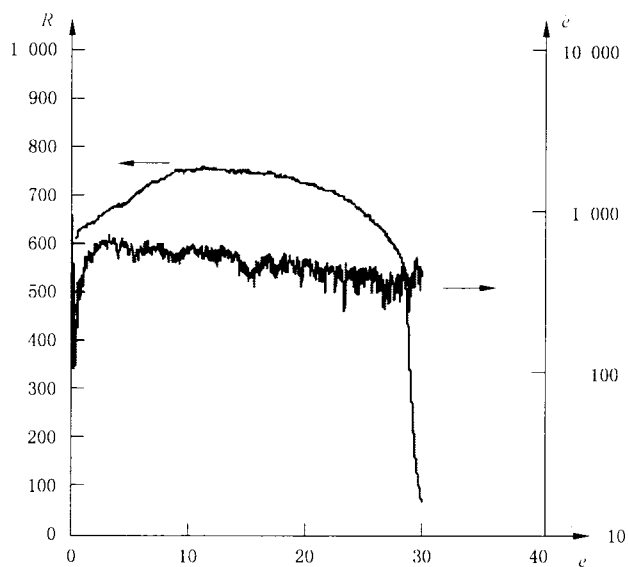
e ——工程应变, %；

R ——工程应力；

\dot{e} ——工程应变速率。

b) 由原始数据分析得到的工程应力、工程应变与工程应变速率

图 B.4 使用单杆法实施高应变速率拉伸试验示例(软钢)



说明：

e —— 工程应变，%；

R —— 工程应力；

$\dot{\epsilon}$ —— 工程应变速率。

图 B.5 使用单杆法实施高应变速率拉伸试验示例(高强度钢)

附录 C

(资料性附录)

分离式霍布金森撞杆法(SHB)示例

C.1 SHB 方法的原理

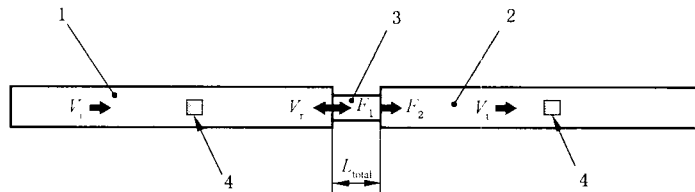
SHB 试验机原先设计用于测量材料在高应变速率压向加载条件下的力学行为,因为装置的便捷性,改装后的霍布金森撞杆已能够对试样进行轴向拉伸与扭转加载^[7~8]。

SHB 试验机包含两根相同材料与直径的弹性杆(一根输入杆,另一根为输出杆),与一个对输入杆施加入射波的加载机构。当等幅弹性波由加载机构引入输入杆后,在输入杆/试样与试样/输出杆连接处将依次产生入射波、反射波与透射波,如图 C.1 所示,根据式(C.1)可测算试样上的工程应变速率^[9]。

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{1}{L_{\text{total}}} \{v_i(t) - [v_i(t) - v_r(t)]\} \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

- $\dot{\epsilon}$ —— 工程应变速率;
- v_i —— 输入质点速度;
- v_r —— 反射质点速度;
- v_t —— 透射质点速度;
- L_{total} —— 包括平行长度与肩部的试样总长。



说明:

- 1 —— 输入杆;
- 2 —— 输出杆;
- 3 —— 试样;
- 4 —— 应变片;
- F_1 —— 输入杆末端的力;
- F_2 —— 输出杆末端的力。

图 C.1 输入杆、输出杆中应变波的入射、反射与透射示意图

速度与应变的关系如式(C.2)和式(C.3)所示,

$$\sigma = -\rho c_0 v, c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \dots\dots\dots (C.2)$$

$$v = -\frac{\sigma}{\rho c_0} = -\frac{E\epsilon}{\rho c_0} = -\frac{\rho c_0^2 \epsilon}{\rho c_0} = -c_0 \epsilon \dots\dots\dots (C.3)$$

式中:

- σ —— 传导应力;
- c_0 —— 弹性杆中波的传播速度;

ρ ——撞杆的密度；
 E ——弹性模量；
 ϵ ——弹性应变；
 v ——杆中任一位置的质点速度。

将式(C.3)代入式(C.1)中,则工程应变速率见式(C.4),

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{1}{L_{\text{total}}} \{v_i(t) - [v_i(t) - v_r(t)]\} = -\frac{c_0}{L_{\text{total}}} \{\epsilon_i(t) - [\epsilon_i(t) - \epsilon_r(t)]\} \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

式中:

ϵ_i ——由入射波产生的弹性应变；
 ϵ_r ——由反射波产生的弹性应变；
 ϵ_t ——由透射波产生的弹性应变。

此外,试样两端的力计算方法见(C.5)和(C.6),

$$F_1(t) = ES_b [\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t)] \quad \dots\dots\dots (C.5)$$

$$F_2(t) = ES_b \epsilon_t(t) \quad \dots\dots\dots (C.6)$$

式中:

F_1 ——输入杆末端的力；
 F_2 ——输出杆末端的力；
 S_b ——弹性杆横截面积。

工程应力见式(C.7),

$$R(t) = \frac{F_1 + F_2}{2S_0} = \frac{ES_b}{2S_0} [\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t) + \epsilon_t(t)] \quad \dots\dots\dots (C.7)$$

式中:

R ——试样的工程应力；
 S_0 ——试样的原始横截面积。

若试样两端受力相等,则满足式(C.8),

$$\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t) = \epsilon_t(t) \quad \dots\dots\dots (C.8)$$

由式(C.8),工程应变速率($\dot{\epsilon}$),工程应变(e)与工程应力(R)通常可由式(C.9)~式(C.11)确定^[10]。

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{2c_0}{L_{\text{total}}} [\epsilon_i(t) - \epsilon_t(t)] \quad \dots\dots\dots (C.9)$$

$$e(t) = \int_0^t \dot{\epsilon}(t) dt \quad \dots\dots\dots (C.10)$$

$$R(t) = \frac{ES_b}{S_0} \epsilon_t(t) \quad \dots\dots\dots (C.11)$$

使用 SHB 方法可实现应变速率处于 $10^2 \text{ s}^{-1} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 的高应变速率拉伸试验,通过缩短试样的标距长度也可将应变速率上限提高到 10^4 s^{-1} 水平,然而过高的应变速率会导致撞杆的冲击变形。试样的最大应变取决于应变速率与加载时间(即入射波的持续时间)。因此若应变速率过低的话,只能评测得到试样的初始塑性变形。

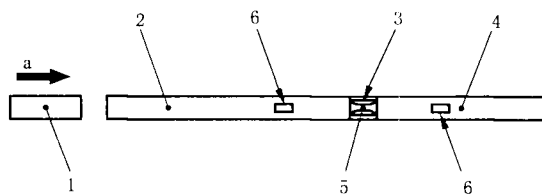
C.2 加载输入方式

图 C.2 给出了 SHB 方法典型的三种加载机构原理,这三种方法都为开环控制。

- 撞块击发产生压缩波,利用由加载点另一端折返的反射波实施高应变速率拉伸试验[如图 C.2a)所示]。
- 利用撞块击发直接施加拉伸应力波[如图 C.2b)所示]。

夹持时累积的拉伸应力波释放至输入杆[如图 C.2c)所示]^[11-12]。

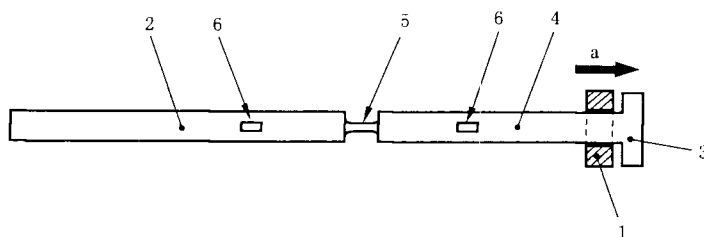
注：可以使用文献报道的其他类型的 SHB 试验机^[13]。



说明：

- 1 撞块；
- 2 1号撞杆；
- 3 拼合环(圈)；
- 4 2号撞杆；
- 5 试样；
- 6 应变片；
- a 力加载方向。

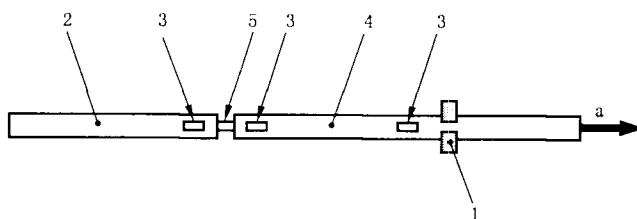
a) 撞杆型



说明：

- 1 撞块；
- 2 1号撞杆；
- 3 撞管；
- 4 2号撞杆；
- 5 试样；
- 6 应变片；
- a 力加载方向。

b) 撞管型



说明：

- 1 夹具；
- 2 透射杆；
- 3 应变片；
- 4 入射杆；
- 5 试样；
- a 力加载方向。

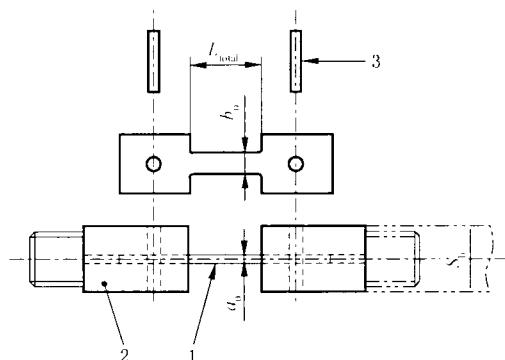
c) 夹持型

图 C.2 SHB 试验机的加载输入方法

C.3 夹持方法

通常可采用图 C.3 所示的夹头夹持试样,夹头的直径与输入杆及输出杆相同以防止弹性波在夹头处反射。夹头中部开有安装槽可将板状试样紧密置入其中并用粘合剂粘结牢固,从而确保夹头与试样连为一体。通过螺纹将夹头精密准直地旋入输入杆以降低两者间声阻抗的变化。通过上述方式固定试样后,夹头端部可视为输入杆与输出杆的端部。

注:可以使用其他夹持方法。



说明:

- 1——试样;
- 2——夹头;
- 3——定位销。

图 C.3 SHB 试验机试样夹持方法

C.4 应力测量方法

输入杆与输出杆(均为弹性杆)与试样直接连接,粘贴在撞杆上的应变片测量弹性应变并计算得到应力,通过式(C.11)获得试样的工程应力。

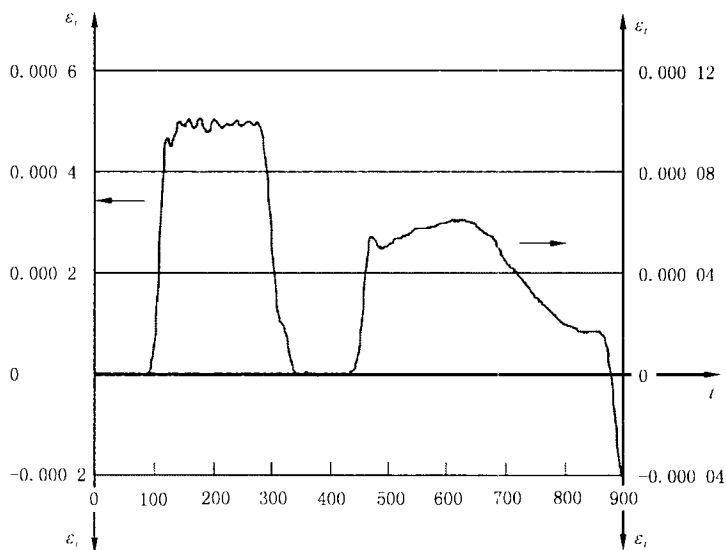
C.5 应变测量方法

SHB 法通过测量粘贴在输入杆与输出杆上的应变片在加载过程中的弹性应变,并根据式(C.10)计算得到试样的工程应变。

C.6 采用 SHB 法开展高应变速率拉伸试验的实施例子

图 C.4 给出了一个使用 SHB 方法的实施例子。

试验过程中,粘贴在输入杆与输出杆上的应变片输出测量信号,经由一台数字式示波器记录处理。这些信号反映了弹性杆上粘贴应变片的位置点上弹性应变随时间的变化过程。反射波、透射波与理论值间略微存在时延,这与应力波在杆间试样中的传播有关。因此需恰当地确定输出波形的起始点位置。根据图 C.4a 所示的数据,采用式(C.9)、式(C.10)与式(C.11)可分别计算得到工程应变速率、工程应变与工程应力,结果见图 C.4b)^[14]。



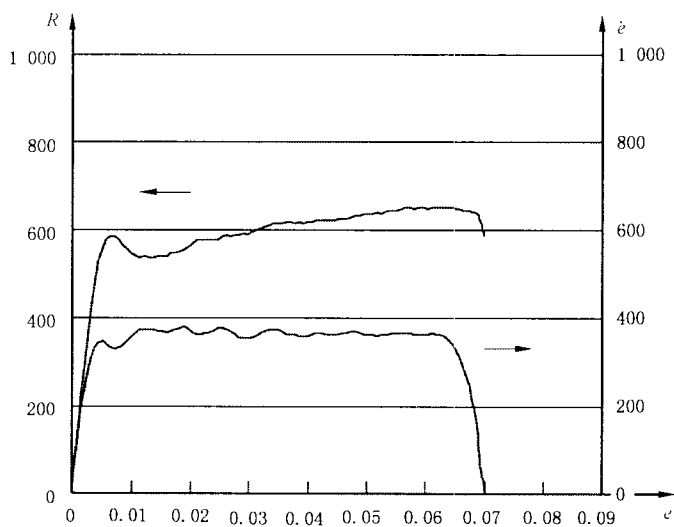
说明：

t ——时间,单位为微秒(10^{-6} s)；

ϵ_1 ——输入杆的弹性应变；

ϵ_2 ——输出杆的弹性应变。

a) 输入杆与输出杆上应变片的输出信号



说明：

ϵ ——工程应变；

R ——工程应力,单位为兆帕(MPa)；

$\dot{\epsilon}$ ——工程应变速率,单位为每秒(s^{-1})。

b) 根据输出信号得到的应力-应变曲线与应变速率-应变曲线

图 C.4 从 SHB 试验机上获取的试验结果

C.7 确定常数的方法

C.7.1 总则

由于 SHB 试验方法需要借助理论公式计算应力、应变与应变速率,因此确保计算公式中有关输入杆、输出杆物性常数的准确性非常关键,包括 ρ 、 E 与 c_0 。

C.7.2 密度

预先制备密度(ρ)测试试样,试样材料应与输入杆输出杆的用材完全相同。优先采用国际、区域、国家标准^[15]或其他合适的准则进行密度试验,试验结果应至少保留 3 位有效数字。

C.7.3 弹性模量

优先采用国际、区域、国家标准^[16~17]或其他合适的准则进行弹性模量试验,测得输入杆与输出杆的弹性模量(E)结果应至少保留 3 位有效数字。

C.7.4 纵波传播速度

对弹性撞杆提供输入波,并在撞杆若干位置粘贴应变片,输入杆与输出杆中纵波的传播速度(c_0)可由应变片的相对位置及其采集到波谱的先后时间计算得到。

将上述物性常数,密度(ρ)、弹性模量(E)与纵波传播速度(c_0),代入式(C.12)中,若所测结果准确有效,则应满足式(C.12),

$$c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \dots\dots\dots (C.12)$$

针对纵波传播速度(c_0)而言,实际测得的结果与式(C.12)计算得到的结果偏差应小于 2%,若满足上述有效性判据,则可使用(c_0)结果计算应力与应变。

附录 D

(资料性附录)

仪器化冲击拉伸法(IIT)示例

D.1 IIT 方法的原理

IIT(Instrumented Impact Tensile)方法在仪器化摆锤式冲击试验机上构建,如图 D.1 所示。原有仪器化冲击试验机主要用于测定金属材料在简支梁式冲击加载时的动态断裂韧性与裂纹行为。根据仪器化冲击试验标准^[18],试验机具备瞬态测力与位移的能力,改装后的仪器化冲击试验机能够对试样进行轴向冲击拉伸加载,因装置的便捷性且无须应变片的粘贴与标定,可视作弹性杆型系统特别是单杆法在中等应变速率(10^2 s^{-1})时的变通与简化^[19~20]。

IIT 法包括与试样相连具有较高刚度的测力锤刃与止摆挡块(挡块型),或活动横梁与固定支座(横梁型)。当摆锤冲击试验机打击锤通过最低点水平处时,试验机砧座与止摆挡块作用,或打击锤(套)与活动横梁作用产生冲击载荷,传递至试样使其变形断裂。测力传感器记录力值变化,经计算获得工程应力、位移与工程应变。

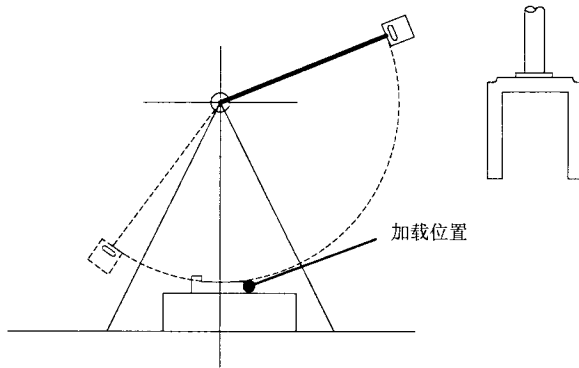


图 D.1 仪器化摆锤式冲击拉伸法加载原理

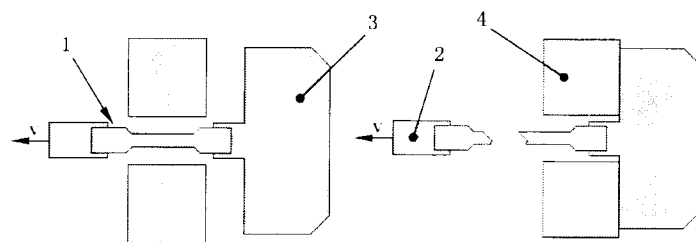
D.2 加载输入方式

图 D.2 给出了 IIT 方法典型的两种加载机构原理,这两种方法都为开环控制。

——挡块型:“测力锤刃-试样-挡块”形成刚性连接体随同锤套提升至释放位,试验时由摆锤冲击机两侧砧座对挡块施加冲击力,对试样形成拉伸应力波,挡块在试样断裂时随残样坠落

——横梁型:试样放置在由砧座改装的工装台面上,形成“活动横梁-试样-固定支座”刚性连接体,试验时摆锤打击活动横梁两侧翼部,对试样形成拉伸应力波,横梁在试样断裂时随残样分离。

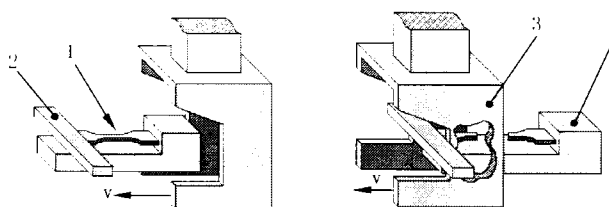
注: U 型锤套易于实现以上载荷输入方式,也可以使用其他类型的仪器化摆锤或落锤试验装置,以及其他试样与工装连接的类型。



说明:

- 1——试样;
- 2——测力锤刃;
- 3——挡块;
- 4——砧座。

a) 挡块型



说明:

- 1——试样;
- 2——活动横梁;
- 3——摆锤锤体;
- 4——固定支座(测力工装)。

b) 横梁型

图 D.2 IIT 试验机的加载输入方法

D.3 试样

典型的 IIT 方法采用的试样尺寸如图 D.3 所示,需满足本部分第 7 章对于高应变速率拉伸试验试样的要求,即试样平行部位长度与宽度的比值,宽度与厚度的比值以及夹持部位宽度与平行部位宽度的比值均大于 2。

注 1: 可以采用其他尺寸的拉伸试样,可参考本部分 A 型试样与 B 型试样;

注 2: 通常情况下,金属材料的屈强比高于 50%,因此建议试样夹持部分宽度与平行部分宽度比值大于 2。

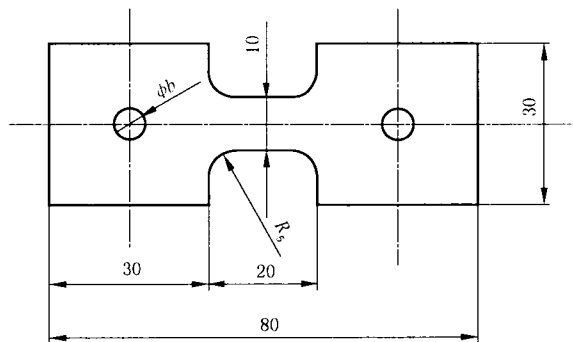


图 D.3 IIT 方法的试样

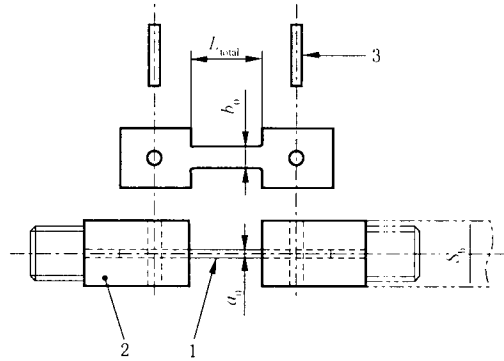
D.4 夹持方法

通常可采用图 D.4 所示的夹头夹持试样,夹头中部开有安装槽可将板状试样紧密置入其中并用粘合剂粘结牢固,从而确保夹头与试样连为一体。通过上述方式固定试样后,夹头端部可视为板状试样夹持端部的延长。

挡块型:两侧夹头通过螺纹精密准直地旋入测力锤刃与挡块间,形成刚性连接体;

横梁型:两侧夹头通过螺纹精密准直地旋入活动横梁与固定支座间,形成刚性连接体

注:可以使用其他夹持方法,如试样与工装直接连接的方式。



说明:

1——试样;

2——夹头;

3——固定销。

图 D.4 IIT 方法试样夹持方法

D.5 力、工程应力测量方法

根据 GB/T 19748《钢材 夏比 V 型缺口摆锤冲击试验 仪器化试验方法》规定的测力方式测量并采集动态载荷,并通过摆锤试验机角度表盘直接测量的试样断裂能量基于动量与能量守恒原理对力信号动态修正,见式(D.1)和式(D.2)。

挡块型:由电阻应变片构成的全桥电路安装在锤刃上构成动态力传感器;

横梁型:由电阻应变片构成的全桥电路安装在工装上构成动态力传感器。

注:可使用满足要求的其他仪器化测力方式构成动态力传感器。

$$\int_0^t c \cdot F'(t) dt = mv_0 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{K}{E_0}}\right) \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

c ——动态力传感器修正系数;

$F'(t)$ ——动态测力传感器某时刻的原始力信号;

m ——摆锤质量,单位为千克(kg);

v_0 ——摆锤试验机最低水平位置处的打击初速度,单位为米每秒(m/s);

E_0 ——冲击试验机初始打击能量,单位为焦耳(J);

K ——板材试样断裂吸收能量,单位为焦耳(J)。

$$F(t) = c \cdot F'(t) \dots\dots\dots (D.2)$$

式中:

$F(t)$ —— 某时刻经修正后的力值。

仪器化冲击拉伸法得到的工程应力信号见式(D.3)。

$$R(t) = \frac{F(t)}{S_0} \dots\dots\dots (D.3)$$

D.6 延伸、工程应变、工程应变速率测量方法

根据 GB/T 19748 规定的测量位移方式测量试样延伸,并通过直接测量试样断后标距 L_u 得到断后伸长率 A 对应变进行修正,见式(D.4)。

注:可由力-时间曲线经计算获得速度进而得到位移,也可以采用其他非接触的方式直接测量试验延伸,如光、电、磁等,并经过对时间求导得到速度。

$$e(t) = \frac{L_u - L_c}{L_c} \cdot \frac{S(t)}{S_{total}} \times 100\% \dots\dots\dots (D.4)$$

式中:

$e(t)$ —— 某时刻经修正后的应变值,单位为百分数(%);

$S(t)$ —— 某时刻原始位移值,单位为毫米(mm);

S_{total} —— 原始位移信号中的最大位移(断裂点位移),单位为毫米(mm);

L_c —— 试样平行部分长度,单位为毫米(mm);

L_u —— 试样断后标距,单位为毫米(mm)。

根据 GB/T 19748 规定采用计算或直接测量的方式获得某时刻试样加载点的线速度 $v(t)$,工程应变速率为即时速度与试样平行部分长度的比值,见式(D.5),

注:推荐冲击试验机初始能量 $E_0 \geq 3K$,此时试验前后工程应变速率的变化率 $\leq 20\%$ 。

$$\dot{e}(t) = \frac{v(t)}{L_c} \dots\dots\dots (D.5)$$

式中:

$\dot{e}(t)$ —— 某时刻工程应变速率;

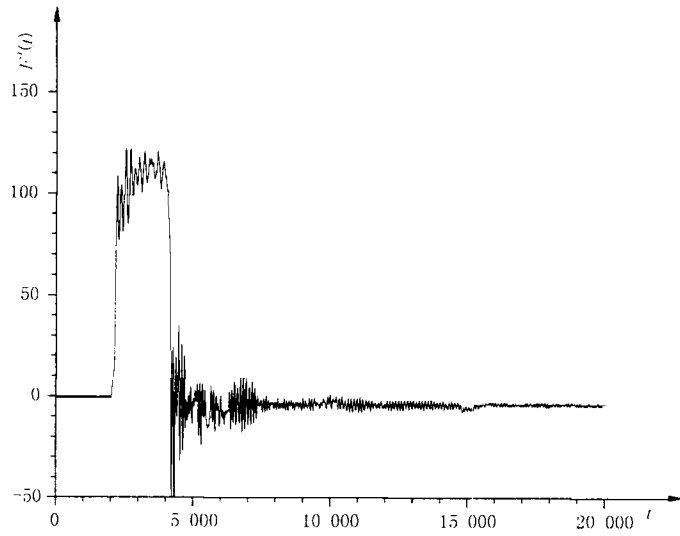
$v(t)$ —— 某时刻速度值。

D.7 采用 IIT 法开展中等应变速率冲击拉伸试验的实施例子

图 D.5 给出了一个使用 IIT 方法的实施例子。

利用一台 450 J 的仪器化摆锤式冲击试验机,摆锤初始释放角度为 70° ,对应打击初速度($v_0 = 3 \text{ m/s}$,即加载应变速率 $1.5 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$)。采用挡块型加载与测力方式,由安装在测力锤刃上的动态测力传感器测量冲击拉伸加载过程中瞬态力随时间的变化,经由一台数字式示波器记录处理,如图 D.5 所示。

采用式(D.1)~式(D.5)计算分别得到工程应变速率、工程应变与工程应力,结果见图 D.5 所示。

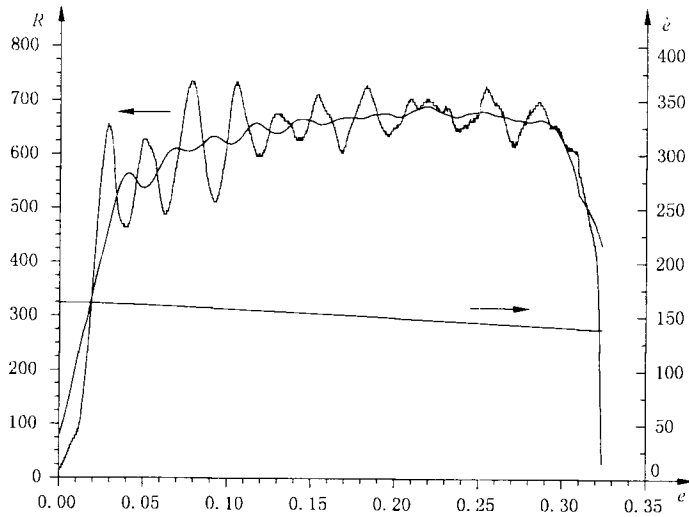


说明：

t 时间,单位为微秒(10^{-6} s);

$F'(t)$ ——力随时间变化的原始采集信号。

a) 测力传感器输出的冲击拉伸原始力值信号



说明：

ϵ ——工程应变；

R ——工程应力,单位为兆帕 (MPa),同时进行了数学光滑处理；

$\dot{\epsilon}$ ——工程应变速率,单位为每秒 (s^{-1})。

b) 根据输出信号得到的应力-应变曲线与工程应变速率-应变曲线

图 D.5 根据 IIT 方法获取的试验结果

参 考 文 献

- [1] 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).
- [2] KAWATA, K., HASHIMOTO, S., KUROKAWA, K. and KADYAMA, N. Mechanical Properties at High Rates of Strain[J]. (ed. Harding, J.), Inst. of Phys. Conf. Ser. No. 1979, 47: 71-80.
- [3] DKANISHI, E., ITABASHI, M. and KAWATA, K. Structural Failure, Product Liability and Technical Insurance, IV[J]. (ed. Rossmannith, H.P.), Elsevier Science Publishers B.V., 1993: 423-430.
- [4] YOSHIDA, H., UENISHI, A., HASHIMOTO, K. and KURIYAMA, Y. Comparison Between Experiments and FEM Simulation of High Velocity Tensile Test Methods to Clarify Test Methods Influence of High Strength Steel[J]. In: [Proceedings of the 2000 InterDtioDl Body Engineering Conference], 2000, SAE Technical Paper Series 2000-01-2725.
- [5] YOSHIDA, H., KURIYAMA, Y., UENISHI, A. and TAKAHASHI, M. Extended summary of the 2002 JSAE Annual Congress[C]. 2002, JSAE Technical Paper 20025235.
- [6] UENISHI, A. and TEODOSIU, C. Constitutive modeling of the high strain-rate behaviour of interstitial-free steel[J]. Int. J. Plasticity, 2004, 20:915-936.
- [7] LINDHOLM, U.S. and YEAKLEY, L.M. High Strain Rate Testing: Tension and Compression[J]. Exp. Mech., 8, 1968:1-9.
- [8] DUFFY, J., CAMPBELL, J.D. and HAWLEY, R.H. On the use of a torsioDl split Hopkinson bar to study rate effects in 1100-0 aluminum[J]. Trans. ASME: J. Appl. Mech., 1971, 38:83-91.
- [9] KOLSKY, H. An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading[J]. Proc. Phys. Soc., London, B62, 1949:676-700.
- [10] NICHOLAS, T. Tensile Testing of Materials at High Rates of Strain[J]. Exp. Mech., 1981, 21:177-185.
- [11] HARDING, J., WOOD, E.O. and CAMPBELL, J.D. Tensile Testing of Materials at Impact Rates of Strain[J]. J. Mech. Eng. Sci., 2, 1960:88-96.
- [12] BAKER, W.W. and YEW, C.H. Strain rate effects in the propagation of torsioDl plastic waves[J]. J. Appl. Mech., 1966, 33:917-923.
- [13] GRAY III, G.T. Classic Split-Hopkinson Pressure Bar Testing[J]. In: [ASM Handbook, (ed. Kuhn, H. And Medlin, D.), Vol. 8, Mechanical Testing and Evaluation], ASM InterDtioDl, Materials Park, Ohio, 2000:462-476.
- [14] MASUDA, T., SAITO, K., MORITA, I, IKEDA, S., MAKII, K. and OGAWA, K. Split-Hopkinson Bar Experimental Result Validity from One-dimensioDl Stress Wave Theory Perspective[J]. Kobe Steel Engineering Reports, 2007, 57 (2):86-89.
- [15] JIS Z 8807, 固体比重测定方法 (Measuring methods for specific gravity of solid).
- [16] JIS Z 2280, 金属材料高温杨氏模量试验方法 (Test method for Young's modulus of metallic materials at elevated temperature).
- [17] ASTM E1875, 动态杨氏模量, 剪切模量和泊松比试验方法 (共振法) (Standard Test Method for DyDmic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Sonic ResoDnce).
- [18] GB/T19748 钢材 夏比 V 型缺口摆锤冲击试验 仪器化试验方法.

- [19] 方健,周冶东,魏毅静. 汽车用金属板材冲击拉伸响应性能的实验研究. 宝钢技术, 2008, 6: 48-51.
- [20] 方健,周冶东,王磊. 评测车用钢动态变形吸能特性的试验方法. 塑性工程学报, 2012, 9(1): 92-96.
-

中华人民共和国
国家标准
金属材料 高应变速率拉伸试验
第1部分：弹性杆型系统
GB/T 30069.1—2013

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100013)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址 www.spc.net.cn

总编室:(010)64275323 发行中心:(010)51780235
读者服务部:(010)6852394

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 2.5 字数 64 千字
2014年3月第一版 2014年3月第一次印刷

*

书号: 155066·1-48248 定价 36.00 元



GB/T 30069.1-2013

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107