



中华人民共和国国家标准

GB/T 37783—2019

金属材料 高应变速率高温拉伸 试验方法

**Metallic materials—High strain rate tensile test
method at elevated temperature**

2019-08-30 发布

2020-07-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号和说明	2
5 试验原理	4
6 试验设备	4
7 试样	5
8 试验程序	6
9 试验数据处理	9
10 试验结果有效性评估	10
11 试验报告	10
附录 A (规范性附录) 分离式霍普金森拉杆	11
附录 B (规范性附录) 数据测试系统	13
附录 C (资料性附录) 温度效应的修正方法	15
附录 D (资料性附录) 入射波、反射波和透射波起点的确定方法	17
附录 E (资料性附录) 分离式霍普金森拉伸试验方法数据处理公式	18
附录 F (资料性附录) 高应变速率高温拉伸试验测试示例	20
附录 G (资料性附录) 高应变速率高温拉伸试验测试异常示例	21
参考文献	23

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中国钢铁工业协会提出。

本标准由全国钢标准化技术委员会(SAC/TC 183)归口。

本标准起草单位：中国工程物理研究院总体工程研究所、钢研纳克检测技术有限公司、西北工业大学、中国科学技术大学、国防科技大学、冶金工业信息标准研究院、武汉钢铁股份有限公司、宝山钢铁股份有限公司、中国兵器工业集团第五三研究所。

本标准主要起草人：徐伟芳、胡文军、高怡斐、郭伟国、汪洋、钟卫洲、董莉、卢芳云、李荣峰、方健、侯慧宁、彭刚。

金属材料 高应变速率高温拉伸 试验方法

1 范围

本标准规定了采用分离式霍普金森试验杆对金属材料开展高应变速率高温拉伸试验的术语和定义、符号和说明、试验原理、试验设备、试样、试验程序、试验数据处理、试验结果有效性评估及试验报告等内容。

本标准适用于温度高于室温、应变速率范围为 $10^2 \text{ s}^{-1} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 时金属材料拉伸应力-应变曲线等力学性能的测定。

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(包括所有修改单)适用于本文件。

GB/T 228.2—2015 金属材料 拉伸试验 第2部分:高温试验方法

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 2975 钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备

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 30069.1 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 32967.1 金属材料 高应变速率扭转试验 第1部分:室温试验方法

JJG 623 电阻应变仪

3 术语和定义

GB/T 10623 和 GB/T 32967.1 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

弹性拉伸波 elastic tensile wave

在介质中传播拉伸应力的弹性应力波,其质点运动方向与波传播方向相反。

3.2

弹性拉伸波速率 elastic tensile wave velocity

弹性拉伸波波阵面传播的速率。

3.3

分离式霍普金森拉杆 split Hopkinson tensile bar

利用弹性拉伸波测试材料在高应变速率下拉伸应力-应变曲线等力学性能的装置。

3.4

冷接触时间 cold contact time

试样接触波导杆时刻与应力波到达试样/入射杆界面时刻的差值。

4 符号和说明

本文件使用的符号及其说明见表1。

表1 符号和说明

符号	说明	单位
温度测试参数		
T	温度	$^{\circ}\text{C}$
T_c	进行试验时的设定温度或规定温度	$^{\circ}\text{C}$
T_i	试验试样平行长度表面的测量温度	$^{\circ}\text{C}$
T_{\max}	波导杆材料力学性能测量时的最高温度	$^{\circ}\text{C}$
T_{∞}	距离热源无穷远处的温度,即室温	$^{\circ}\text{C}$
T_0	热源温度	$^{\circ}\text{C}$
h	空气热交换系数	$\text{W} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
k	波导杆的导热系数	$\text{W} \cdot (\text{mm} \cdot \text{K})^{-1}$
m	波导杆中温度随距离变化的系数	mm^{-1}
$C_i (i=0,1,2,3)$	弹性模量的温度相关系数	—
分离式霍普金森拉杆		
a_1	输入杆上应变计离试样端的距离	mm
a_2	输出杆上应变计离试样端的距离	mm
c_b	波导杆中的弹性拉伸波速率	mm/ms
v_b	波导杆中的质点速度	mm/ms
ρ_b	波导杆的密度	g/mm^3
D_b	波导杆的直径	mm
S_b	波导杆的横截面面积	mm^2
H_b	波导杆长度	mm
E_b, E_b^0, E_b^1	波导杆的弹性模量、常温弹性模量 and 高温弹性模量	MPa
L_T	输出杆的长度	mm
x	距离	mm
$E(T), E(x)$	与温度相关的弹性模量以及温度梯度引起呈空间分布的弹性模量	MPa
$R_Y(T)$	与温度相关的屈服强度	MPa
试样		
ρ_s	试样的密度	g/mm^3
E_s	试样的弹性模量	MPa
L, L_c	试验段长度、平行长度	mm
S_s	原始横截面面积	mm^2

表 1 (续)

符号	说 明	单 位
d_0	圆柱状试样标距段初始直径	mm
M_0	螺纹连接圆柱状试样的螺纹尺寸	mm
W, W_0	板状试样连接段和平行长度段的宽度	mm
r_s	过渡圆弧半径	mm
c_s	试样材料的弹性拉伸波速率	mm/ms
试验材料的力学性能参数		
$\dot{\epsilon}_s^0, \dot{\epsilon}_s$	温度效应修正前后的应变速率	ms^{-1}
$\bar{\dot{\epsilon}}_s$	平均工程塑性应变速率	ms^{-1}
e_s^0, e_s	温度效应修正前后的工程拉伸应变	—
R_s^0, R_s	温度效应修正前后的工程拉伸应力	MPa
应变测试系统		
U	电压	V
U_{0j}	第 j 通道单位应变对应的电压值, $j=1, 2, \dots, n$	V
U_j	第 j 通道测试信号的电压, $j=1, 2, \dots, n$	V
U_H	供桥电压	V
$\Delta U, \Delta U_0$	并联电阻 R_H 时的电压增量以及标定时电压增量	V
R_H	应变计电阻	Ω
R_c	模拟标准应变的桥臂并联电阻	Ω
K, K_d	应变计灵敏系数、应变计动态灵敏系数	—
测试信号		
n_1, n_2, n_3	入射波、反射波、透射波起点对应的数据点序号	—
λ	入射波的脉冲宽度	ms
L_λ	应力波在入射波脉冲宽度时间内传播的距离	mm
t	时间	ms
t_λ	应力波作用时间	ms
t_0	工程拉伸应力-时间曲线中屈服强度对应的时刻	ms
Δt	采样时间间隔	ms
ξ	时间变量	ms
e	工程弹性应变	—
e_j	第 j 通道的应变测量值, $j=1, 2, \dots, n$	—
e_I, e_R, e_T	分别由入射波、反射波和透射波产生的工程弹性应变	—
注: 在数据处理过程中, 拉伸应变速率和平均工程塑性应变速率的单位为 ms^{-1} ; 在结果表述时, 宜将其单位换算成为 s^{-1} 。		

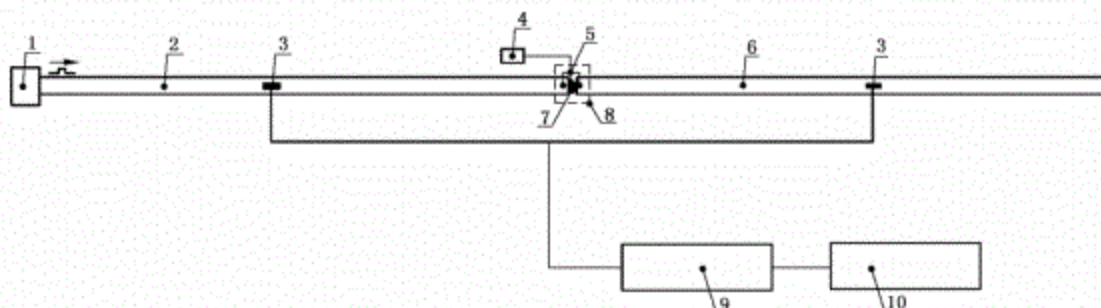
5 试验原理

在规定温度条件下,采用分离式霍普金森拉杆产生拉伸应力波对试样进行加载,测量波导杆(包含输入杆和输出杆)上的应变信号,利用一维应力波理论处理并获得材料不同应变速率下的拉伸力学性能。

6 试验设备

6.1 设备组成

金属材料高应变速率高温拉伸试验系统主要由入射波产生装置、输入杆、输出杆、应变计、加热装置、动态应变仪和数据采集与处理系统等组成,如图 1 所示。输入杆和输出杆应满足附录 A 中 A.3 的要求。



说明:

- 1——入射波产生装置;
- 2——输入杆;
- 3——应变计;
- 4——温度测量系统;
- 5——热电偶;
- 6——输出杆;
- 7——试样;
- 8——加热装置;
- 9——动态应变仪;
- 10——数据采集与处理系统。

图 1 金属材料高应变速率高温拉伸试验系统示意图

6.2 加热装置

6.2.1 总则

加热装置分为一体式加热装置和组合式加热装置,应能加热试样到规定温度 T_0 。当高温导致波导杆局部材料的弹性模量降低超过 20% 时,宜采用组合式加热装置。

6.2.2 一体式加热装置

一体式加热装置用于对已完成安装的试样加热。

6.2.3 组合式加热装置

组合式加热装置先加热试样至规定温度,然后快速安装。组合式加热装置应具备冷接触时间测试功能,冷接触时间应小于 100 ms。

6.2.4 温度的允许偏差

T_i 是指在试样平行长度表面上所测量的温度,该温度已进行系统误差修正,但未考虑温度测量装置的不确定度。测量温度 T_i 和规定温度 T_c 的允许偏差及温度梯度见表 2。规定温度大于 1 100 ℃时,温度允许偏差和温度梯度由双方协商确定。

注:温度梯度是指加热装置等产生的沿试样轴向存在的固定的温度差值。

表 2 温度的允许偏差和温度梯度

单位为摄氏度

规定温度 T_c	T_i 和 T_c 的允许偏差	温度梯度
$T_c \leq 600$	± 3	3
$600 < T_c \leq 800$	± 4	4
$800 < T_c \leq 1\ 000$	± 5	5
$1\ 000 < T_c \leq 1\ 100$	± 6	6

6.2.5 温度的测量

在波导杆与试样连接的端部(采用一体式加热装置时)和试样平行长度的中心位置各固定一只热电偶。热电偶测温端应与波导杆和试样的表面有良好的热接触,并应避免加热体对热电偶直接热辐射。

6.2.6 温度测量系统的检验

温度测量系统的最低分辨力应为 1 ℃,允许误差应在 $\pm 0.004T_c$ 或 ± 2 ℃内,取较大值。温度测量系统应在试验温度范围内检验和校准,其检验方法应溯源到国际单位。

注:温度测量系统包括所有测量组件链(传感器、导线、显示装置、联结点)。

6.3 应变计

应变计应满足附录 B 要求。

6.4 动态应变仪

动态应变仪的频率响应应高于 100 kHz,推荐不低于 500 kHz,且应按照 JJG 623 进行校准。

6.5 数据采集与处理系统

采样频率应不低于 400 kHz,宜不低于 1 MHz。

7 试样

7.1 形状与尺寸

7.1.1 试样端部应与波导杆连接匹配,宜采用圆柱状试样或板状试样(图 2),其中圆柱状试样平行长度应不小于 $1.6d_0$,板状试样平行长度应不小于 $0.75W_0$ 。

7.1.2 试样的形状及试验段尺寸如图 2,未注尺寸公差应按 GB/T 1804—2000 中的 m 级选取,推荐的

试样尺寸见表 3。

7.1.3 经双方协商可采用其他试样尺寸。

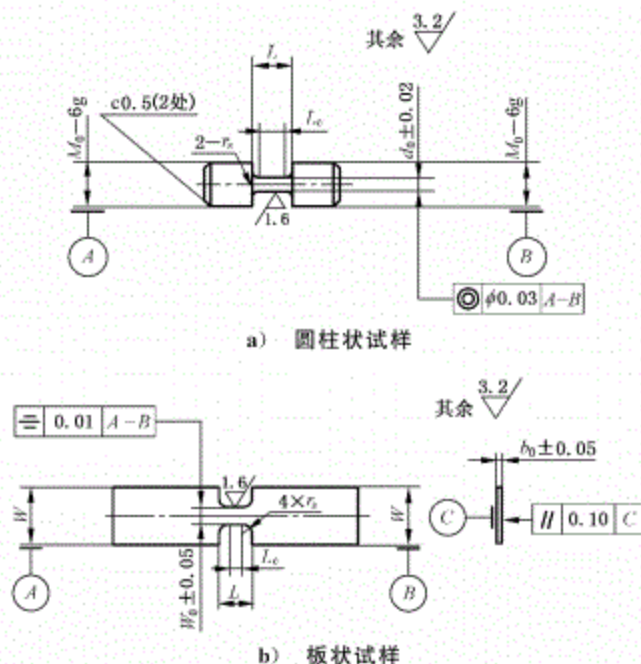


图 2 试样几何形状

表 3 典型试样尺寸

单位为毫米

圆柱状试样			板状试样			
L_c	d_0	r_c	L_c	W_0	r_c	b_0
5	3	1.5	3	4	2.5	1.3

7.2 试样制备

7.2.1 样坯切取

应按照相关产品标准或 GB/T 2975 的要求切取样坯。

7.2.2 试样制作

试样制作应满足 7.1 的要求。

8 试验程序

8.1 试验设备的组装

根据规定温度 T ，确定加热装置，并按照图 1 的方式组装试验设备。

8.2 数据测试系统

根据附录 B 组建数据测试系统，标定应变计的灵敏系数，对各测试通道设置单位应变对应的电压值 U_{0j} 、数据采集与处理系统的采样频率、量程等参数，采样时长应能记录一组完整的波形，一般不小于

20 ms。

8.3 试验设备状态的检测

8.3.1 测试系统的联试

轻微敲击波导杆端部,数据采集与处理系统应有信号产生。

8.3.2 波导杆状态的检测

波导杆间应保持良好的同轴度,同轴度的具体检测方法是:在室温条件下,将输入杆和输出杆直接固连,施加载荷,检测入射波和透射波状态。当入射波和透射波移位后,两者的波形相同,且两曲线的幅值最大偏差不超过5%,则波导杆的同轴度满足试验要求(见图3)。

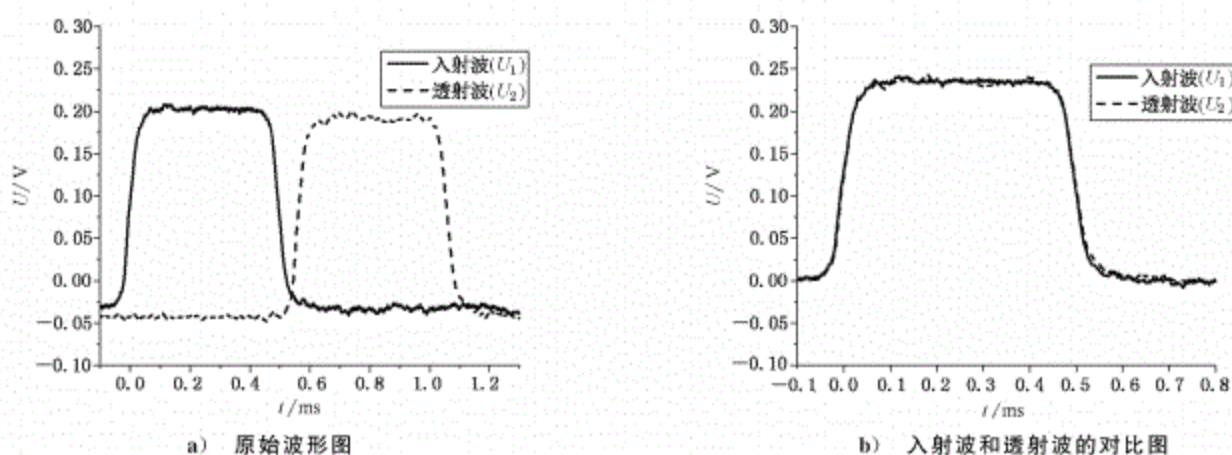


图3 输入杆、输出杆直接固连时的波形图

8.3.3 测试系统的检测

在室温条件下,将试样安装于输入杆和输出杆之间,开启入射波产生装置加载试样,采集波导杆上的应变计输出信号。典型的测试信号如图4所示。

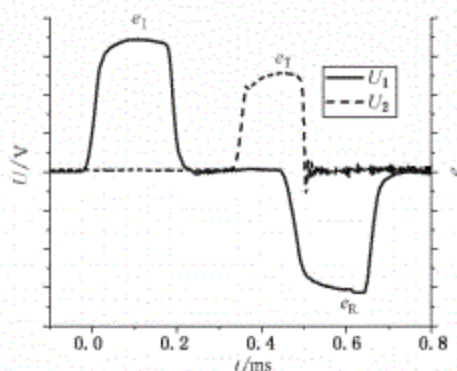


图4 典型的测试信号

8.4 试样尺寸测量

8.4.1 原始横截面积的测定

宜在试样平行长度中心区域以足够的点数测量试样的相关尺寸。原始横截面积 S_0 是平均横截面积,应根据测量的尺寸计算。原始横截面积的计算准确度依赖于试样本身特性和类型。

8.4.2 平行长度的测定

不少于三个位置测量试验段长度 L ,取其算数平均值,平行长度 $L_0 = L - 2r_0$,其中 r_0 为设计值。

8.5 试样安装与加热

8.5.1 加热方法的确定

根据 6.2 的要求可选用一体式或组合式加热方法。

8.5.2 一体式加热方法

一体式加热按以下步骤进行:

- 安装试样,试样与波导杆应同轴且无间隙连接;
- 安装加热装置,应使试样位于加热装置的均温区;
- 开启加热装置,加热试样至规定温度,标距段温度应保持均匀。

8.5.3 组合式加热方法

组合式加热按以下步骤进行:

- 安装加热装置;
- 在加热装置恒温区安装试样;
- 加热试样至规定温度,并至少保持 10 min(保温时间);
- 快速将试样与波导杆连接,在入射波到达试样时,试样与波导杆应无间隙连接。

8.6 施加力

开启入射波产生装置对试样进行加载。

8.7 测量记录

试验过程中应测量并记录以下信息:

- 波导杆尺寸、弹性波速和弹性模量;
- 应变计尺寸、灵敏系数和电阻值等参数及其在波导杆中的位置;
- 数据测试系统的状态,包括应变的标定值;
- 试样的温度;
- 波导杆靠近试样端(必要时)的温度;
- 原始波形;
- 冷接触时间(必要时)。

9 试验数据处理

9.1 波导杆中的应变

波导杆中的应变按式(1)计算。波导杆高温区材料的弹性模量降低超过10%时,采用附录C的方法可修正波导杆温度梯度对试验数据的影响,推荐采用C.3的方法。

$$e_j(t) = U_j(t)/U_{0j}(t) \quad \dots\dots\dots(1)$$

9.2 波形处理

9.2.1 波形基线的确定

9.2.1.1 当采用对称贴片时,应分别取对称应变计测试信号的平均值作为数据处理时的入射波、反射波和透射波。

9.2.1.2 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(2)。

$$e_I + e_R = e_T \quad \dots\dots\dots(2)$$

9.2.4 应力波作用时间 t_A 的确定

宜以波形进入下降沿前的最后一个极大值点作为入射波的末点,确定应力波的作用时间 t_A ,并以此作为数据处理的结束时刻,如在工程拉伸应变计算式(E.2)、式(E.6)或式(E.10)中,设定 $t = t_A$ 。

9.3 工程拉伸应变速率

工程拉伸应变速率的计算公式参见附录E,宜采用式(E.5)。

9.4 工程拉伸应变

工程拉伸应变的计算公式参见附录E,宜采用式(E.6)。

9.5 工程拉伸应力

工程拉伸应力的计算公式法参见附录E,宜采用式(E.7)。

9.6 工程拉伸应力-拉伸应变曲线

利用9.5的工程拉伸应力和9.4的工程拉伸应变,获得工程拉伸应力-拉伸应变曲线。

9.7 平均工程塑性应变速率

按照GB/T 30069.1的方法,根据式(3)处理9.3中的工程应变速率历程曲线获得平均工程塑性应

变速率。

$$\bar{\epsilon}_s = \frac{1}{t_\lambda - t_0} \int_{t_0}^{t_\lambda} \bar{\epsilon}_s(\xi) d\xi \quad \dots\dots\dots (3)$$

9.8 典型示例

高应变速率高温拉伸力学性能试验典型示例参见附录 F。

10 试验结果有效性评估

10.1 金属材料高应变速率拉伸试验中,波导杆中入射波、反射波和透射波的典型波形图如图 4 所示。若试验装置与数据采集设备设置不当将引起测试信号异常,导致试验结果无法真实反映材料力学性能。数据处理前需对试验纪录信号进行分析,评估试验结果的有效性,几类典型试验测试异常示例参见附录 G。

10.2 试验出现下列情况之一,试验结果无效,应补做同样数量的试验:

- a) 波形明显异常,参见附录 G;
- b) 试样未达到力平衡。

11 试验报告

试验报告应至少包括以下信息,除非双方另有约定:

- a) 本标准编号;
- b) 试样标识;
- c) 材料名称、牌号、状态(如已知);
- d) 试样类型和尺寸;
- e) 试验设备;
- f) 加热方法;
- g) 试验温度;
- h) 试验结果。

附录 A
(规范性附录)
分离式霍普金森拉杆

A.1 总则

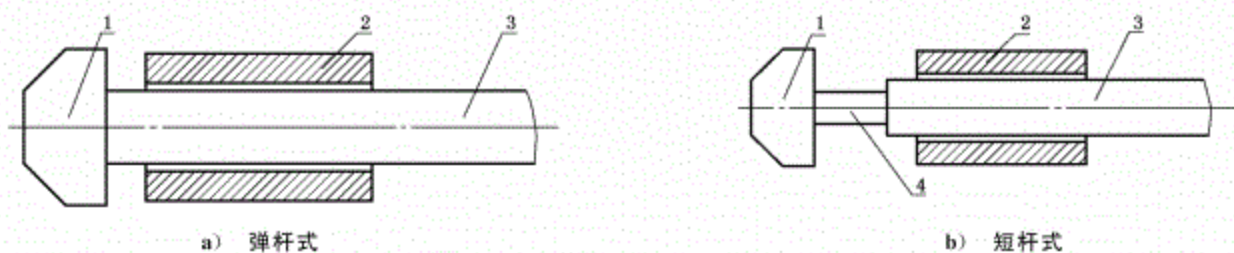
A.1.1 本附录规定了分离式霍普金森拉杆各部组件的技术要求。

A.1.2 分离式霍普金森拉杆的基本结构见图 1。

A.2 入射波产生装置

A.2.1 入射波产生方式

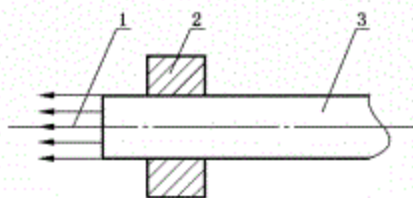
根据入射波产生的方式,可将入射波产生方式分为撞击型、储能型,分别如图 A.1 和图 A.2 所示,推荐采用撞击型中的短杆式[图 A.1b)]。



说明:

- 1—挡块;
- 2—撞击体;
- 3—输入杆;
- 4—金属短杆。

图 A.1 撞击型入射波产生装置示意图



说明:

- 1—力;
- 2—夹持及释放机构;
- 3—输入杆。

图 A.2 储能型入射波产生装置示意图

A.2.2 入射波的幅值

入射波的幅值应使波导杆处于弹性状态。

A.3 波导杆

A.3.1 波导杆的材料应相同,宜采用温度不敏感的高温合金。

A.3.2 应根据 GB/T 228.2—2015 的方法测量波导杆材料的弹性模量 $E(T)$ 和屈服强度 $R_Y(T)$ 随温度 T 的变化规律,测波导杆材料性能时的最高温度 T_{max} 应高于波导杆作为加载装置试验时的最高规定温度 T_c 。

A.3.3 输入杆和输出杆的直径宜相同,波导杆长度不小于 $40D_b$ 且不小于 $1.5L_\lambda$,其中 $L_\lambda = \lambda c_b$ 。

A.3.4 波导杆(连接接口除外)应具有图 A.3 所示的加工精度,连接接口应与试样形状匹配,且与波导杆的同轴度应不大于 $20 \mu\text{m}$,直线度应不大于 $10 \mu\text{m}$ 。

单位为毫米

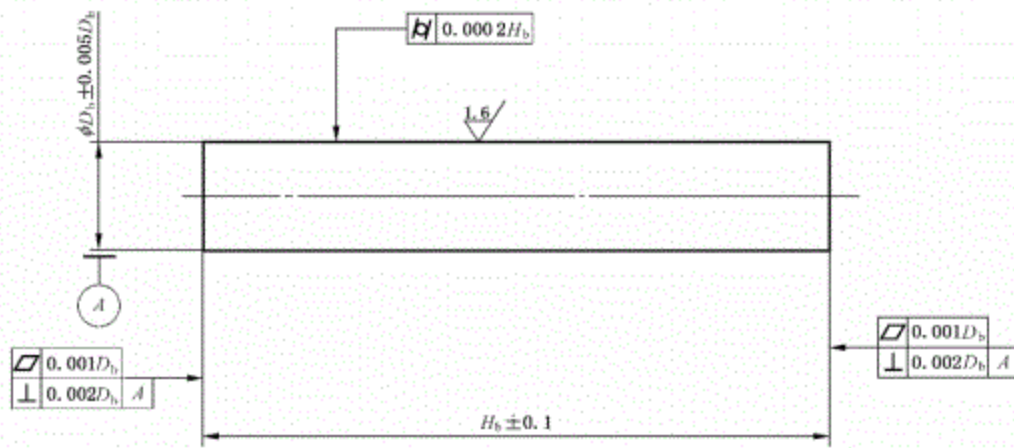


图 A.3 波导杆的形状及尺寸

附录 B
(规范性附录)
数据测试系统

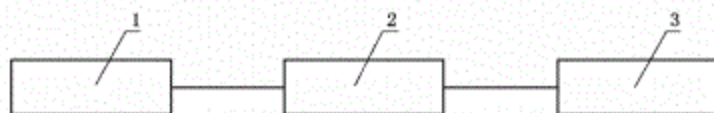
B.1 总则

B.1.1 本附录规定了数据测试系统的使用方法和技术要求。

B.1.2 数据测试系统的基本组成见图 1。

B.2 数据测试系统的构成

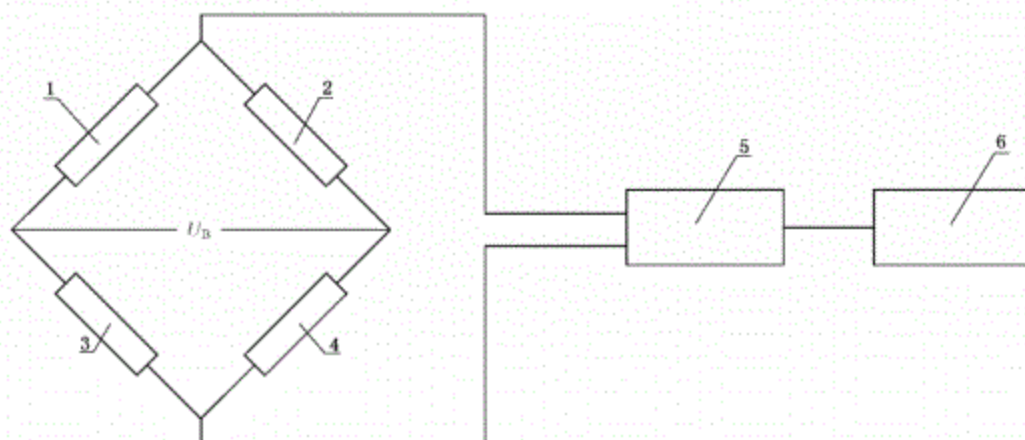
根据应变计的连接方式可分为非桥式数据测试系统(见图 B.1)或桥式数据测试系统(见图 B.2),推荐采用惠更斯电路组成桥式数据测试系统。当采用桥式电路时,推荐同时在与波导杆材料相同的金属块上粘贴相同的应变计作为温度补偿。



说明:

- 1——应变计;
- 2——动态应变仪;
- 3——数据采集与存储装置。

图 B.1 非桥式测试电路



说明:

- 1 —— 工作应变计;
- 2 —— 温度补偿应变计;
- 3、4 —— 标准电阻;
- 5 —— 动态应变仪;
- 6 —— 数据采集与存储装置。

图 B.2 桥式测试电路

B.3 应变计

应按 GB/T 13992 和下列要求选择和使用应变计：

- a) 应变计极限响应频率应不低于 100 kHz, 推荐不低于 300 kHz。
- b) 根据波导杆直径确定应变计的栅长, 栅长应不大于 5 mm。
- c) 宜采用两个应变计在波导杆的同一轴向位置对称贴片。
- d) 应变计的敏感栅方向与波导杆轴向成 0° , 其偏差应不大于 5° 。
- e) 输入杆、输出杆上应变计的粘贴位置应分别满足式(B.1)和式(B.2), 且应变计粘贴处波导杆的温度应为环境温度。

$$a_1 > 10D_b \text{ 且 } a_1 > L_\lambda \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

$$a_2 > 10D_b \text{ 且 } L_T - a_2 > L_\lambda \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

- f) 试验时, 推荐采用 B.5 的方法标定应变计的实际灵敏系数。

B.4 导线

推荐采用屏蔽导线组建测试系统, 且导线的长度宜小于 10 m。

B.5 应变计灵敏系数的标定

B.5.1 静态标定

与应变计并联一定的电阻 R_c , 模拟在实验过程中应变计电阻的变化, 则：

$$e = \frac{1}{K} \frac{R_g}{(R_g + R_c)} \frac{\Delta U}{\Delta U_0} \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

B.5.2 动态标定

应变计的实际灵敏度在动态试验时宜重新标定。标定的基本原理是：将材料和直径与波导杆相同的短杆以已知速度 v_0 撞击波导杆, 则波导杆中应力波的平均幅值为式(B.4)。

$$e = \frac{v_0}{2c_b} \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

联立式(B.3)得到波导杆上应变计的动态灵敏系数 K_d 为式(B.5)：

$$K_d = \frac{2\Delta U R_g c_b}{\Delta U_0 (R_g + R_c) v_0} \quad \dots\dots\dots (B.5)$$

附 录 C
(资料性附录)
温度效应的修正方法

C.1 总则

本附录介绍了组合式加热方法中波导杆温度梯度对试验数据影响的修正方法。

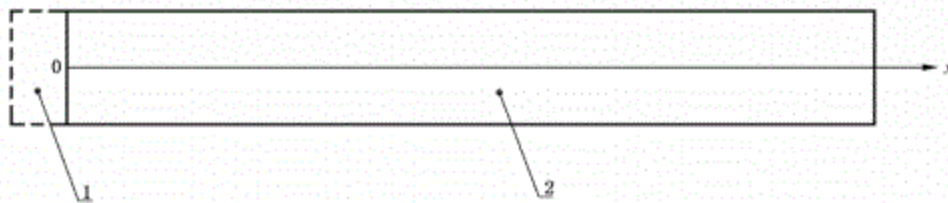
C.2 差分方法

C.2.1 建立如图 C.1 所示的求解坐标系,由式(C.1)计算波导杆上的温度分布;

$$T = (T_0 - T_\infty)e^{-mx} + T_\infty \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

$$m = \sqrt{\frac{4h}{kD_b}}$$



说明:

- 1——热源;
2——波导杆。

图 C.1 一维热传导求解坐标系

C.2.2 波导杆弹性模量随温度变化的关系见式(C.2):

$$E(T) = E_b^0 / (C_0 + C_1 T + C_2 T^2 + C_3 T^3) \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

C.2.3 结合式(C.1)~式(C.2)建立弹性模量沿波导杆轴向变化的关系式 $E(x)$,将 $E(x)$ 代入一维应力波传播控制方程组得到含温度影响的波导杆一维应力波传播控制方程组[式(C.3)]:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_b}{\partial x} = \frac{\partial e}{\partial t} \\ \rho_b \frac{\partial v_b}{\partial t} = \frac{\partial E(x)e}{\partial x} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

C.2.4 基于边界条件[式(C.4)]求解方程组[式(C.3)]修正透射波:

$$e(x, t)_{x=a_2} = e_T(t) \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

C.2.5 基于边界条件[式(C.5)]和初始条件[式(C.6)]求解方程组[式(C.3)]修正入射波:

$$e(x, t)_{x=a_1} = e_I(t) \quad \dots\dots\dots (C.5)$$

$$e(x, t)_{t=0} = 0 \quad \dots\dots\dots (C.6)$$

C.3 加权方法

C.3.1 应变/应变率修正

见式(C.7)、式(C.8)。

$$\dot{e}_s(t) = \sqrt{\frac{E_b^0}{E_b^\lambda}} \dot{e}_s^0(t) \dots\dots\dots (C.7)$$

$$e_s(t) = \sqrt{\frac{E_b^0}{E_b^\lambda}} e_s^0(t) \dots\dots\dots (C.8)$$

C.3.2 应力修正

见式(C.9)。

$$R_s(t) = \frac{R_s^0(t)}{\sqrt{\frac{E_b^0}{E_b^\lambda}}} \dots\dots\dots (C.9)$$

附录 D

(资料性附录)

入射波、反射波和透射波起点的确定方法

D.1 总则

D.1.1 试验获得的典型数据如图 4 所示。在数据处理过程中,应将入射波、反射波和透射波的起点移动到同一时刻。因此,需准确确定入射波、反射波和透射波的起点。在实际的测试中,由于噪声的影响,是不可能找到真正的起点,但可以找到一个比较合理的起点,其要求是: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。

D.1.2 本附录介绍一种波形起点的确定方法,鼓励采用先进的起点确定方法。

D.2 入射波、反射波和透射波起点的确定

入射波起点确定的步骤为:

- 根据入射波波形确定入射波最大值;
- 确定幅值为入射波最大值的十分之一时所在的时刻及其对应的离散数据点序号;
- 最后向前推一定数量的点(如 100)作为入射波的起点 n_1 。

在确定入射波的起点后,通过式(D.1)和式(D.2)确定反射波和透射波的起点。

$$n_2 = \text{int} \left[\frac{2a_1}{c_b \Delta t} \right] + n_1 \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

$$n_3 = \text{int} \left[\frac{a_1 + a_2}{c_b \Delta t} + \frac{L}{c_s \Delta t} \right] + n_1 \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

式中:

$\text{int}[\]$ ——取整函数;

$$c_s = \sqrt{\frac{E_s}{\rho_s}}。$$

附录 E

(资料性附录)

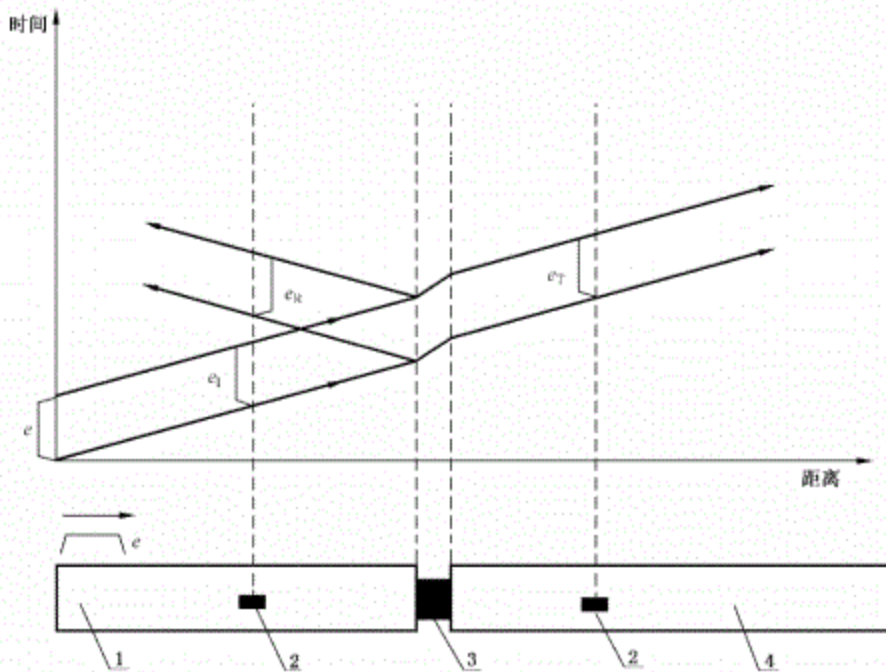
分离式霍普金森拉伸试验方法数据处理公式

E.1 总则

本附录介绍了基于一维弹性应力波原理对入射波、反射波和透射波进行处理获得工程拉伸应变速率、工程拉伸应变和工程拉伸应力的计算公式。

E.2 测试原理

通过一定方式在输入杆中产生拉伸应力波，向试样传播对其进行加载，并在试样两端产生反射和透射(见图 E.1)，分别在输入杆和输出杆中形成反射波和透射波；根据一维应力波理论，利用应变计测得的入射波、反射波和透射波信号(见图 4)获得试样的应力和应变历程[式(E.1)~式(E.3)]，进而得到试样材料在特定应变速率下的拉伸应力-拉伸应变曲线等拉伸力学性能。



说明：

- 1—输入杆；
- 2—应变计；
- 3—试样；
- 4—输出杆。

图 E.1 分离式霍普金森拉杆的测试原理示意图

E.3 三波公式

E.3.1 工程拉伸应变速率按式(E.1)计算。

$$\dot{\epsilon}_s(t) = \frac{c_b}{L_c} [e_I(t) - e_R(t) - e_T(t)] \quad \dots\dots\dots (E.1)$$

式中：

$$c_b = \sqrt{E_b/\rho_b}$$

E.3.2 工程拉伸应变按式(E.2)计算。

$$e_s(t) = \frac{c_b}{L_c} \int_0^t [e_I(\xi) - e_R(\xi) - e_T(\xi)] d\xi \quad \dots\dots\dots (E.2)$$

E.3.3 工程拉伸应力按式(E.3)计算。

$$R_s(t) = \frac{S_b}{2S_s} E_b [e_I(t) + e_R(t) + e_T(t)] \quad \dots\dots\dots (E.3)$$

式中：

 S_b ——波导杆横截面面积； S_s ——试样试验段横截面面积。

E.4 二波公式

E.4.1 入射波和透射波

E.4.1.1 根据分离式霍普金森拉伸试验方法的均匀性假设,入射波、反射波和透射波满足式(E.4)。

$$e_R(t) = e_T(t) - e_I(t) \quad \dots\dots\dots (E.4)$$

E.4.1.2 工程拉伸应变速率按式(E.5)计算。

$$\dot{\epsilon}_s(t) = \frac{2c_b}{L_c} [e_I(t) - e_T(t)] \quad \dots\dots\dots (E.5)$$

E.4.1.3 工程拉伸应变按式(E.6)计算。

$$e_s(t) = \frac{2c_b}{L_c} \int_0^t [e_I(\xi) - e_T(\xi)] d\xi \quad \dots\dots\dots (E.6)$$

E.4.1.4 工程拉伸应力按式(E.7)计算。

$$R_s(t) = \frac{S_b}{S_s} E_b e_T(t) \quad \dots\dots\dots (E.7)$$

E.4.2 反射波和透射波

E.4.2.1 根据分离式霍普金森拉伸试验方法的均匀性假设,入射波、反射波和透射波满足式(E.8)。

$$e_I(t) = e_T(t) - e_R(t) \quad \dots\dots\dots (E.8)$$

E.4.2.2 工程拉伸应变速率按式(E.9)计算。

$$\dot{\epsilon}_s(t) = -\frac{2c_b}{L_c} e_R(t) \quad \dots\dots\dots (E.9)$$

E.4.2.3 工程拉伸应变按式(E.10)计算。

$$e_s(t) = -\frac{2c_b}{L_c} \int_0^t e_R(\xi) d\xi \quad \dots\dots\dots (E.10)$$

E.4.2.4 工程拉伸应力按式(E.11)计算。

$$R_s(t) = \frac{S_b}{S_s} E_b e_T(t) \quad \dots\dots\dots (E.11)$$

附录 F

(资料性附录)

高应变速率高温拉伸试验测试示例

本附录给出了由不同温度和应变速率下 99%CP-Ti 合金^[1](图 F.1)和 45 钢^[2](图 F.2)的工程拉伸应力-应变曲线转换获得的拉伸真应力-真应变曲线。

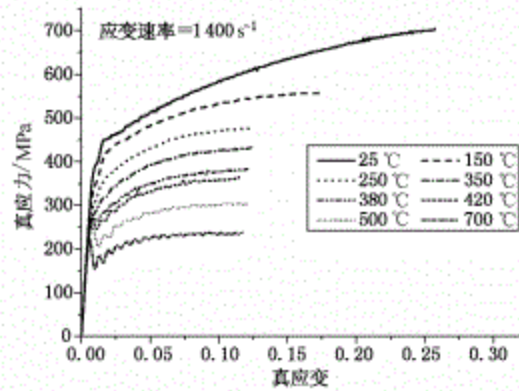


图 F.1 钛合金的高应变速率高温拉伸应力-拉伸应变曲线示例^[1]

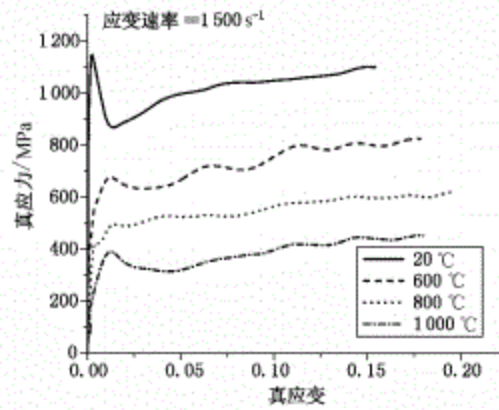


图 F.2 高温高应变速率(1 500 s⁻¹)下 45 钢的拉伸应力-拉伸应变曲线示例^[2]

附录 G

(资料性附录)

高应变速率高温拉伸试验测试异常示例

G.1 总则

本附录给出了在高温条件下采用霍普金森拉杆测试金属材料动态拉伸力学性能的异常示例,以下情况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和说明。

G.2 试验测试异常示例

霍普金森拉杆试验中,数据采集设备设置或试验设计不当将导致测试结果无效,典型异常示例如下:

- a) 应变计导线连接不牢,采集波形明显异常(见图 G.1),需重新连接应变计导线再试验。

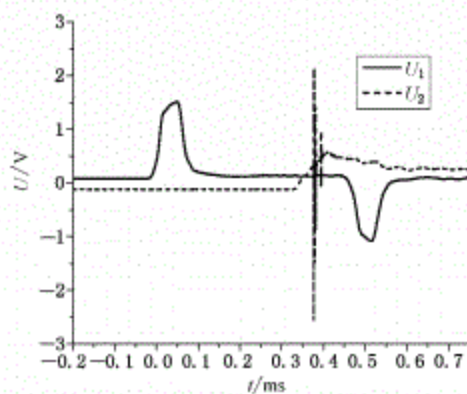


图 G.1 应变计连接问题引起的异常情况

- b) 试验过程中数据采集设备设置不当,未能对信号进行完整采集(见图 G.2)。

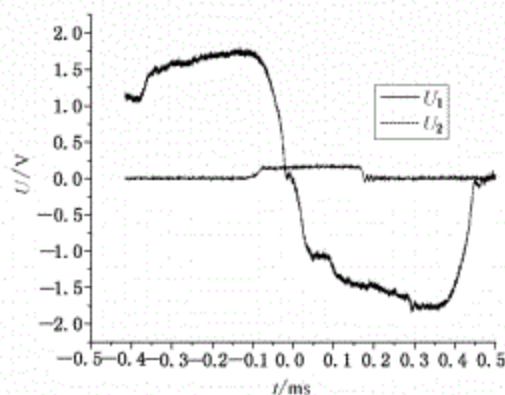


图 G.2 数据采集设备设置不当引起的异常示例

- c) 试验过程中数据采集设备设置不当,采集信号出现限幅现象(见图 G.3)。

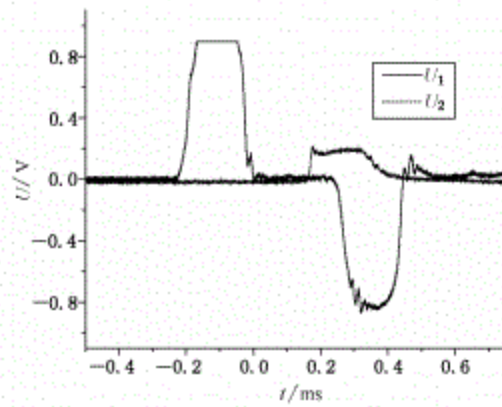


图 G.3 数据采集设备设置不当引起的采集信号限幅情况

d) 数据采集设备采样频率设置不当,引起信号失真现象(见图 G.4)。

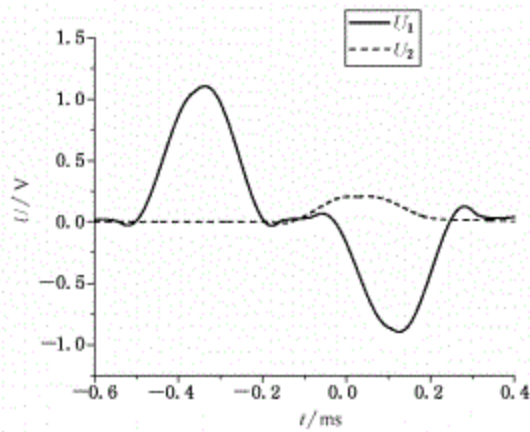


图 G.4 数据采集频率设置不当引起的采集信号失真情况

e) 噪声过大,影响测试信号处理(图 G.5)。

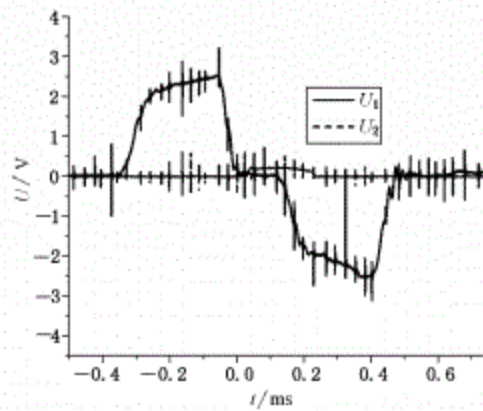


图 G.5 噪声过大的情况

参 考 文 献

[1] HUANG W, ZAN X, NIE X, et al. Experimental study on the dynamic tensile behavior of a poly-crystal pure titanium at elevated temperatures [J]. Materials Science & Engineering A, 2007, 443(1-2): 33-41.

[2] TAN X, GUO W, GAO X, et al. A new technique for conducting split hopkinson tensile bar test at elevated temperatures [J]. Experimental Techniques, 2017, 41(2): 191-201.

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
金属材料 高应变速率高温拉伸
试验方法

GB/T 37783—2019

*

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(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址: www.spc.org.cn

服务热线: 400-168-0010

2019年7月第一版

*

书号: 155066 · 1-62947

版权专有 侵权必究



GB/T 37783-2019

