

文章编号: 1001-4888(2018)05-0816-07

金属材料准静态拉伸试验中 短哑铃片试样的标距修正^{*}

刘赛¹, 肖凯¹, 苏玲¹, 王月¹, 吕振华²

(1. 中国运载火箭技术研究院研究发展中心, 北京 100076; 2. 清华大学汽车工程系, 北京 100084)

摘要: 为了准确获取金属材料准静态拉伸试验中短哑铃片试样的应力—应变曲线, 本文以某钢材的短哑铃片试样的准静态拉伸试验为例, 采用有限元仿真分析方法, 分析了不同试验标距下的应力—应变曲线的差异及其原因, 研究了短哑铃片试样的修正标距与材料类型和试样厚度的关系, 提出了短哑铃片试样的一种标距修正方法。研究表明, 短哑铃片金属试样存在应变分布不均匀现象, 是由试样的边界效应引起的, 而不是由颈缩失稳引起的; 本文提出的标距修正方程可适用于大部分金属材料 and 材料厚度的短哑铃片试样, 采用标距修正方程确定的试验标距, 可以准确获取短哑铃片金属试样的应力—应变曲线。

关键词: 拉伸试验; 金属材料; 哑铃片试样; 标距修正; 有限元仿真; 边界效应

中图分类号: TG115.5⁺2

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-130

0 引言

哑铃片试样是一种应用范围十分广泛的材料试样^[1-5], 而本文研究的短哑铃片试样是一种非标准试样。受原材料尺寸或直接取样的工程样件材料尺寸的限制, 某些金属材料只能加工成短哑铃片试样, 此种试样在准静态拉伸试验中存在应力—应变关系曲线的测量误差较大的问题, 无法准确获取这些材料的力学特性, 目前针对此问题的相关研究并未开展。

本文以某钢材的短哑铃片试样的准静态拉伸试验为例, 通过有限元仿真分析, 研究不同试验标距下应力—应变关系曲线的差异及其原因, 分析短哑铃片试样的修正标距与材料类型和试样厚度的关系, 得到适用于大部分金属材料 and 材料厚度的短哑铃片试样的标距修正方程。

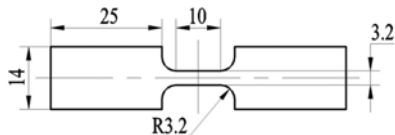


图 1 短哑铃片试样

Fig. 1 Short dumbbell plate specimen

1 短哑铃片试样的准静态拉伸试验

对钢材 S0 的板料进行准静态拉伸试验, 采用的短哑铃片试样如图 1 所示(单位 mm, 厚度 5mm), 采用万能试验机对试样加载, 加载应变率为 0.01s^{-1} 。试样表面喷涂散斑, 见图 2(a), 拍摄记录表面散斑点的位置变化, 通过计算得到标

距内的表面应变^[6-8], 此种方法的测量结果同引伸计的测量结果基本一致。本文中的标距不加说明时, 均为原始标距。试样加载前、断裂前和断裂后的照片见图 2, 试样断裂前出现类似弥散颈缩的现象。

^{*} 收稿日期: 2017-06-18; 修回日期: 2017-08-09

基金项目: 国防基础科研项目 JCKY2016601B001

通讯作者: 刘赛(1988—), 男, 博士, 工程师。主要研究领域: 材料动态力学行为、结构冲击动力学和防护结构设计。

Email: lsliusai@163.com

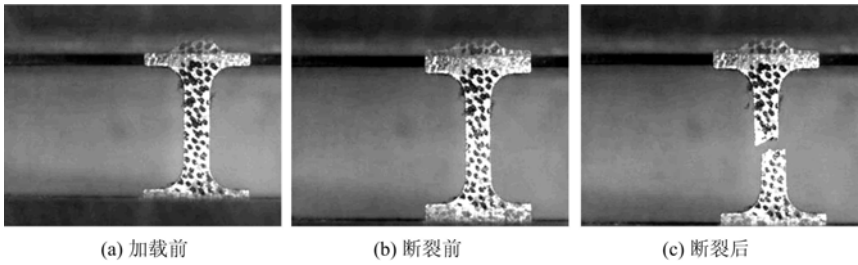


图 2 试样加载前、断裂前和断裂后的照片

Fig. 2 Pictures of specimen before loading, before fracture and after fracture

对同一个拉伸试样采用两种长度的标距(8mm 和 3mm)计算试样标距内的表面应变,见图 3,对应的真实应力—应变关系曲线(轴向,下同)如图 4 所示。

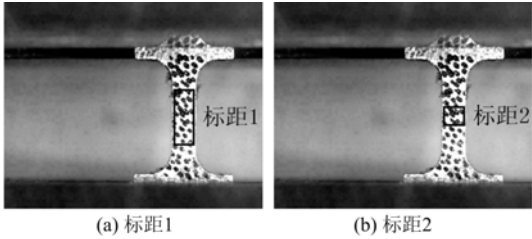


图 3 试验采用的两种标距
Fig. 3 Two gauge lengths in tests

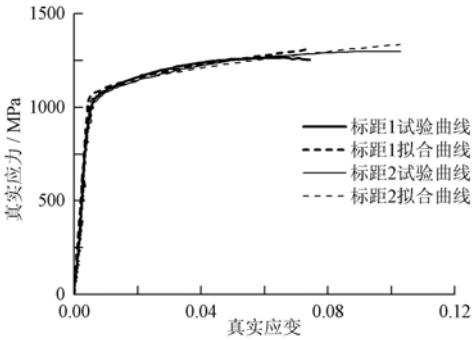


图 4 不同标距的真实应力—应变关系曲线
Fig. 4 True stress-strain curves with two gauge lengths

采用幂强化弹塑性模型拟合真实应力—应变关系曲线,幂强化弹塑性模型方程为:

$$\sigma_y = A + B\epsilon_{eq}^n \quad (1)$$

其中, σ_y 为屈服流动应力; ϵ_{eq} 为等效塑性应变(标距内轴向应变与等效应变基本一致); A 、 B 、 n 为拟合参数。拟合结果见图 4,拟合参数见表 1,两种标距的试验曲线、拟合曲线均差异较大,尤其是断裂应变的偏差为 18%,显著大于同一批次金属材料准静态拉伸重复性试验的偏差(一般小于 5%)。

表 1 真实应力—应变试验曲线的拟合参数
Tab. 1 Fit parameters of true stress-strain curves

标距	A/MPa	B/MPa	n	断裂应变
标距 1	1034	1146	0.54	0.07
标距 2	1025	1013	0.51	0.10

2 准静态拉伸试验的有限元仿真分析

准静态拉伸试验的有限元模型如图 5 所示,平行段的单元尺度为 0.4mm,边界条件同准静态拉伸试验一致。采用标距 2 对应的拟合参数进行仿真分析,试样断裂前平行段的轴向真实应变分布如图 6 所示,平行段的应变分布不均匀,而标距 2 内的应变分布较均匀,因此应采用标距 2 作为试验标距,采用标距 2 得到的拟合参数作为材料模型参数,仿真分析得到的材料真实应力—应变关系曲线如图 7 所示,仿真分析与试验结果差异较小。本文所做的仿真计算均进行了单元尺度对计算精度的影响分析,给出了单元尺

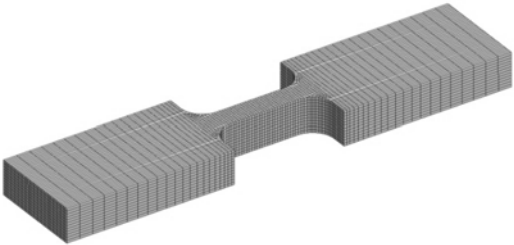


图 5 准静态拉伸试验的有限元模型
Fig. 5 Finite element model of quasi-static tensile test simulations

度合理的有限元模型的计算结果。

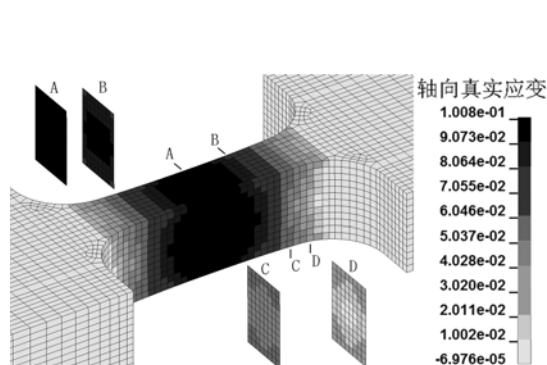


图 6 试样断裂前平行段的轴向真实应变分布
Fig. 6 Axial true strain distribution of parallel section of specimen before fracture

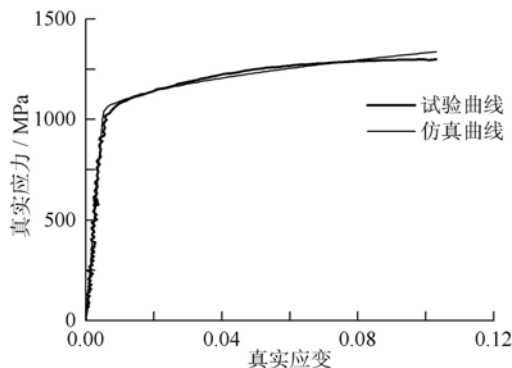


图 7 有限元仿真分析的真实应力—应变关系曲线
Fig. 7 True stress-strain curve of finite element simulation

3 短哑铃片试样的边界效应

在钢材 S0 的三次重复性准静态拉伸试验中,试样断裂前均出现类似弥散颈缩的现象,这有可能是导致平行段应变分布不均匀的原因。将试样平行长度增大为 40mm(ASTM 标准^[9]中的标准试样),在同样的加载应变率下,试样断裂前平行段的轴向真实应变分布如图 8 所示,试样在断裂前并未发生弥散颈缩现象,而且边界段的应变分布同图 6 一致,因此有可能是边界效应导致平行段应变分布不均匀。

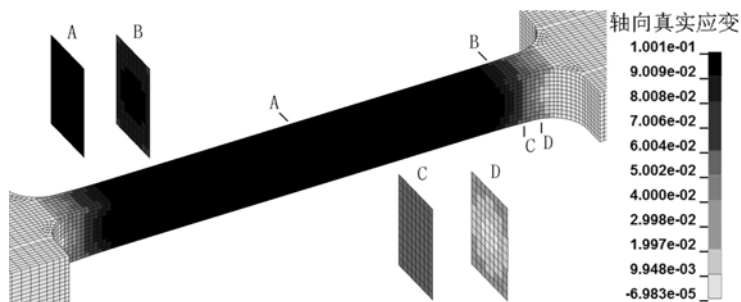


图 8 标准试样断裂前平行段的轴向真实应变分布

Fig. 8 Axial true strain distribution of parallel section of standard specimen before fracture

假设钢材 S0 可以承受较大的断裂应变,图 8 和图 6 中的试样发生颈缩失稳时,平行段轴向应变分布分别见图 9 和图 10,图中标识点的真实应变—时间曲线见图 11,根据真实应变—时间曲线特点和 Considère 准则^[10-12](拉伸载荷最大时,试样颈缩开始),可将试样的变形过程分为未颈缩段、弥散颈缩段和局部颈缩段,试验断裂应变为 0.10,处于未颈缩段,因此短哑铃片试样在断裂前并未颈缩。

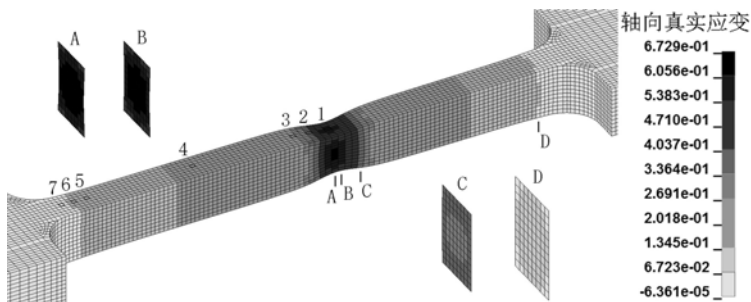


图 9 标准试样颈缩后平行段的轴向真实应变分布

Fig. 9 Axial true strain distribution of parallel section of standard specimen after necking

根据已有文献^[13-18]中金属材料准静态拉伸试验的试验数据,总结了 7 种材料的幂强化弹塑性模型的参数,见表 2,对应的应力—应变关系曲线见图 12。7 种材料的仿真分析结果与钢材 S0 具有相同的特征,因此短哑铃片试样平行段应变分布不均匀的现象,是由试样的边界效应引起的,而不是由颈缩失稳引起的。

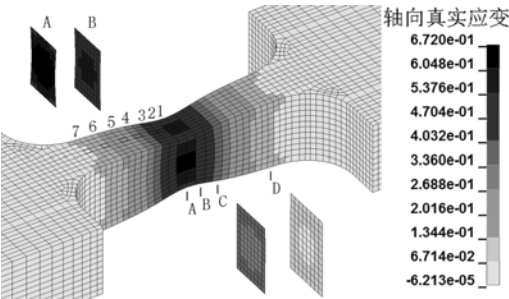


图 10 试样颈缩后平行段的轴向真实应变分布

Fig. 10 Axial true strain distribution of parallel section of specimen after necking

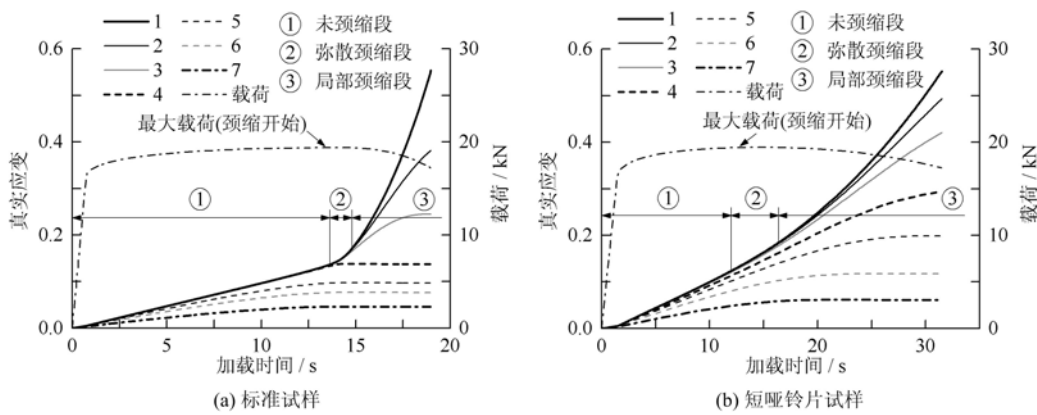


图 11 试样标识点的真实应变—时间曲线

Fig. 11 True strain-time curves of specimen mark points

表 2 7 种材料的幂强化弹塑性模型的参数

Tab. 2 Parameters of power hardening elastic-plastic model of seven materials

材料类型	序号	A/MPa	B/MPa	n
钢	S1	400	400	0.4
	S2	1000	400	0.2
	S3	1000	400	0.5
	S4	1000	400	1.0
	S5	2000	500	1.0
铝合金	Al	350	400	0.4
铜合金	Cu	150	400	0.4

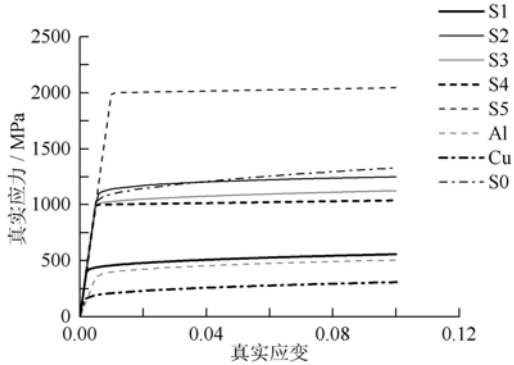


图 12 7 种材料的真实应力—应变关系曲线

Fig. 12 True stress-strain curves of seven materials

4 短哑铃片试样的标距修正

对上述材料进行有限元仿真分析,调整标距大小,使试样颈缩前标距内最大应变与最小应变的差值在应变均值的 10% 以内,修正后的标距见表 3,可见材料的弹性模量、屈服强度和塑性强化特性对修正标距有一定影响,但基于现有的数据很难得到明显规律,在后续工作中会对此进一步研究。

表 3 多种材料的短哑铃片试样的修正标距

Tab. 3 Corrected gauge lengths of short dumbbell

plate specimen of materials above		
材料类型	序号	修正标距/mm
钢	S0	3.9
	S1	3.9
	S2	3.1
	S3	3.1
	S4	7.7
	S5	7.7
铝合金	Al	6.2
铜合金	Cu	4.6

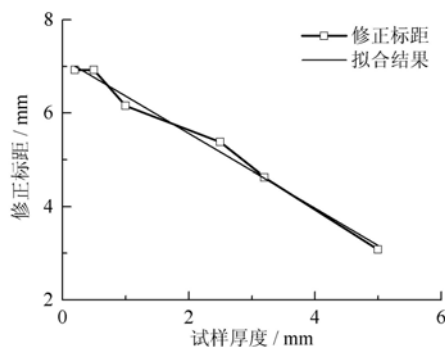


图 13 短哑铃片试样的修正标距

Fig. 13 Corrected gauge length of short dumbbell plate specimen

选择表 3 中试样平行段应变分布均匀性较差的材料(S2),改变其试样厚度进行仿真分析,调整标距大小,使试样颈缩前标距内最大应变与最小应变的差值在应变均值的 10%以内,修正后的标距见图 13。修正标距随着试样厚度增大而减小,即试样平行段应变分布的均匀度与试样厚度成反比,大致呈线性关系,线性拟合后的标距修正方程为:

$$L = -0.80t + 7.16 \quad (2)$$

其中, L 为修正标距; t 为试样厚度, t 取值 0~5mm。上述标距修正方程对应于试样平行段应变分布均匀性较差的材料,当然也适用于试样平行段应变分布均匀性较好的材料,因此上述标距修正方程可适用于大部分金属材料 and 材料厚度的短哑铃片试样。当材料厚度大于 5mm 时,为了保证试样标距内垂直于拉伸方向的截面内的应变分布基本一致,须将短哑铃片试样的厚度加工至 5mm 或低于 5mm。

5 结论

本文进行了某钢材短哑铃片试样的准静态拉伸试验和有限元仿真分析,发现短哑铃片金属试样存在应变分布不均匀现象,分析表明是由试样的边界效应引起的,而不是由颈缩失稳引起的。研究了短哑铃片试样的修正标距与材料类型和试样厚度的关系,提出了适用于大部分金属材料 and 材料厚度的短哑铃片试样的标距修正方程,从而改进了金属材料准静态拉伸试验的应变测量方法,克服了传统方法应变测量不准确的缺陷,可获得短哑铃片金属试样的高精度应力-应变关系曲线,为非标准哑铃片试样的力学本构关系特性测试分析提供了一种可行的解决途径。本文研究了金属材料短哑铃片试样颈缩前发生的应变分布不均匀现象和标距修正方法,本文中的标距修正方法、幂强化弹塑性本构方程及其参数,并不适用于试样颈缩后的情况,在后续工作中会进一步研究短哑铃片试样颈缩后的试验数据处理方法。

参考文献:

- [1] Wang L, Tong W. Identification of post-necking strain hardening behavior of thin sheet metals from image-based surface strain data in uniaxial tension tests[J]. International Journal of Solids and Structures, 2015, 75-76:12-31.
- [2] Scheider I, Brocks W, Cornec A. Procedure for the determination of true stress-strain curves from tensile tests with rectangular cross-section specimens [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2004, 126(1):70-76.
- [3] 王从约,夏源明. 带有哑铃状扁平形试件的杆杆型冲击拉伸试验系统的三维弹塑性有限元分析[J]. 应用力学学报, 2000, 17(1):121-126, 171(WANG Congyue, XIA Yuanming. Three-dimensional analysis of bar-bar tensile impact testing apparatus with a flat specimen by elastoplastic FEM [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2000, 17(1):121-126, 171).

- 2000, 17(1):121—126, 171(in Chinese))
- [4] 闫东明, 林皋. 混凝土动态拉伸试验及其数据分析方法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(4):622—625, 643(YAN Dongming, LIN Gao. Dynamic tensile experiments of concrete and its data analysis method [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(4):622—625, 643(in Chinese))
- [5] 闫东明, 林皋, 王哲. 变幅循环荷载作用下混凝土的单轴拉伸特性[J]. 水利学报, 2005, 36(5):593—597(YAN Dongming, LIN Gao, WANG Zhe. Uniaxial tensile properties of concrete under the action of cyclic variable amplitude load [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(5):593—597(in Chinese))
- [6] Wattrisse B, Chrysochoos A, Muracciole J-M, et al. Kinematic manifestations of localisation phenomena in steels by digital image correlation[J]. European Journal of Mechanics A—Solids, 2001, 20(2):189—211.
- [7] Kim J-H, Serpantié A, Barlat F, et al. Characterization of the post-necking strain hardening behavior using the virtual fields method[J]. International Journal of Solids and Structures, 2013, 50(24):3829—3842.
- [8] 桂良进, 高付海, 范子杰. 双相钢板料的单向拉伸断裂失效研究(I)——数字图像相关技术试验[J]. 应用力学学报, 2010, 27(2):380—383, 447(GUI Liangjin, GAO Fuhai, FAN Zijie. Fracture of dual phase steel sheets under uniaxial tension (I): experimental study with dic techniques[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010, 27(2):380—383, 447(in Chinese))
- [9] ASTM E8/E8M—09, Standard test methods for tension testing of metallic materials[S]. United States: ASTM, 2009.
- [10] Considère M. Mémoire sur l'emploi du fer et de l'acier dans les constructions[J]. Annales des Ponts et Chaussées, 1885, 9(6):574—775.
- [11] Choung J M, Cho S R. Study on true stress correction from tensile tests[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(6):1039—1051.
- [12] Jeschke J, Ostermann D, Krieg R. Critical strains and necking phenomena for different steel sheet specimens under uniaxial loading[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(6):2045—2052.
- [13] Dey S, Børvik T, Hopperstad O S, et al. The effect of target strength on the perforation of steel plates using three different projectile nose shapes [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(8-9):1005—1038.
- [14] Børvik T, Dey S, Clausen A H. Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(7):948—964.
- [15] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1):31—48.
- [16] Børvik T, Hopperstad O S, Pedersen K O. Quasi-brittle fracture during structural impact of AA7075-T651 aluminium plates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(5):537—551.
- [17] Børvik T, Forrestal M J, Hopperstad O S, et al. Perforation of AA5083-H116 aluminium plates with conical-nose steel projectiles—Calculations [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(3):426—437.
- [18] Seidt J D, Pereira J M, Gilat A, et al. Ballistic impact of anisotropic 2024 aluminum sheet and plate [J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 62:27—34.

On the gauge length correction for short dumbbell sheet specimen in quasi-static tensile experiment of metallic materials

LIU Sai¹, XIAO Kai¹, SU Ling¹, WANG Yue¹, LV Zhen-hua²

(1. Research and Development Center, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;

2. Department of Automotive Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to accurately obtain the stress-strain curve of the short dumbbell sheet specimen in quasi-static tensile experiment of metallic materials, taking the quasi-static tensile experiment of short dumbbell sheet specimen of a certain steel as an example, adopting finite element simulation analysis method, the difference of stress-strain curves under different experimental gauge length condition and its causes were analyzed. Relations among the gauge length correction distance of short dumbbell sheet specimen, the type of material and the specimen thickness were studied. A method for correcting the gauge length of short dumbbell sheet specimen is proposed in this paper. Study results show that the strain distribution of short dumbbell sheet metal specimen is nonuniform, which is caused by specimen boundary effect, not by the necking instability. Gauge length modified equation proposed in this paper can be applied to most short dumbbell sheet metal specimen with different thicknesses. Stress-strain curves of short dumbbell sheet metal specimen can be accurately obtained by using the experimental gauge length determined by the calibration equation.

Keywords: tensile experiment; metallic material; dumbbell sheet specimen; gauge length correction; finite element simulation; boundary effect