

文章编号: 1001-4888(2024)04-0443-11

# 一种改进的金属薄板面内压缩试验方法<sup>\*</sup>

李庆磊, 周平, 翟彦博, 熊维清, 卫千泽

(西南大学 工程技术学院, 重庆 400715)

**摘要:** 针对金属薄板在面内压缩力学性能测试过程中容易出现的屈曲失效问题, 本文提出了一种改进的试验方法, 该方法通过在哑铃状试样表面加工浅槽, 利用其自平衡原理去抑制试样的过早屈曲变形。首先, 对以往试验工装与压缩试样进行了优化设计, 并通过理论分析与仿真分析相结合的方式证明了该方法的可行性与普适性。然后, 对 4 种不同类型的轻质金属薄板进行单向拉伸与压缩试验, 比较了各自拉伸与压缩时力学性能的差异。结果表明, 该试验方法能够有效抑制试样的过早屈曲变形, 从而获得较大的面内压缩变形, 并且可以使用数字图像相关法测量试样在长度与宽度方向上的应变, 进而精确计算出板材压缩时的厚向异性系数。

**关键词:** 金属薄板; 面内压缩; 力学性能测试; 自平衡原理; 数字图像相关法

**中图分类号:** TG759; U467.4<sup>+</sup>94 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-190

## 0 引言

金属薄板试样在压缩过程中, 常因约束不足或尺寸设计不合理, 而在达到较大压缩应变前发生屈曲失效, 如图 1 所示<sup>[1]</sup>, 屈曲失效形式主要分为以下 3 种: 平行段厚度方向的屈曲(T 型屈曲)、自由段厚度方向的屈曲(L 型屈曲)以及平行段宽度方向的屈曲(W 型屈曲)。除上述 3 种屈曲失效外, 试样平行段还可能产生应变分布不均匀问题, 即“桶形效应”, 从而影晌应变测量的精度。

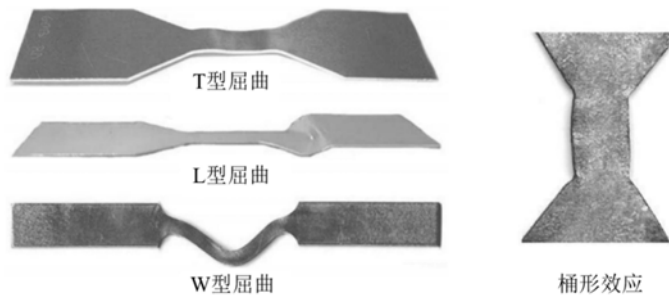


图 1 屈曲失效形式及桶形效应示例<sup>[1]</sup>

Fig. 1 Examples of buckling failure and barrelling behavior<sup>[1]</sup>

为抑制金属板材压缩过程中的过早屈曲失效并精确测量应变, 不同学者从多个角度出发, 提出了许多表征材料压缩或拉压循环时力学性能(如包辛格效应)的试验方法<sup>[2-12]</sup>。基于有、无厚向防屈曲装

\* 收稿日期: 2023-09-07; 修回日期: 2023-11-07

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(SWU7130200010/076)

通信作者: 周平(1983-), 男, 博士, 副教授。研究方向: 车辆先进结构设计与优化、大变形非线性有限元理论及高性能仿真软件开发。Email: pingzhou@swu.edu.cn

置,可将常见的金属板材压缩试验方法分为两大类:一是无防屈曲装置的方法,比较有代表性的是将试样加工成长度与截面积之比(长细比)较小的形状,或将多个试样堆叠起来;二是有防屈曲装置的方法,这种装置按照压缩过程中试样是否存在发生L型屈曲的风险又可分为2种,即非全支撑类装置与全支撑类装置。

宋广胜等<sup>[2]</sup>使用7mm厚的板材进行压缩试验,研究了织构对AZ31镁合金温热压缩变形机制的影响。郭晓倩等<sup>[3]</sup>采用厚度较大的板材进行压缩试验,研究了预压缩-反向拉伸加载路径下预压缩量对12mm厚AZ31B-F镁合金板材滑移和孪生行为的影响。将试样加工成厚度较大、长细比较小的形状,压缩时虽无需防失稳辅助工装,但可能会导致试样测量段产生桶形效应,引发变形不均匀问题,还会使得薄板应变测量困难。将多个薄片试样堆叠的方法由AITCHISON和TUCKERMAN提出<sup>[4]</sup>,通过黏合堆叠多个薄板试样,以抑制试样过早屈曲失效。GHAFFARI等<sup>[5]</sup>也通过堆叠法成功测试了中温(200℃)和高应变率下镁合金的性能。堆叠法虽然能够通过光学测量设备测量试样正面的变形,但试样制备复杂、耗时长、成本高,且多个薄板试样叠加类似于长细比较小的试样,会带来应变分布不均匀问题。

宋先邨等<sup>[6]</sup>利用厚向夹紧装置来抑制薄板件的屈曲变形,获得了高温合金钢薄板压缩时的力学性能。YOSHIDA等<sup>[7]</sup>同时使用非全支撑类抗屈曲装置与试样堆叠方法,研究了材料在循环加载过程时的弹塑性力学行为及其对回弹预测的影响。非全支撑类装置虽然能够在一定程度上抑制试样的T型屈曲,但却无法对试样裸露部分起到支撑作用,很难完全避免L型屈曲。针对非全支撑类装置的缺陷,CAO等<sup>[8]</sup>开发了一种可以随试验机压盘一起移动的楔形夹具,使得“翼形”试样主体在拉伸压缩过程中能够被夹具完全覆盖。KUWABARA等<sup>[9]</sup>、张志强等<sup>[10]</sup>分别设计了一套能够实现连续拉压的梳形夹具,梳形齿的存在避开了夹具压缩时的空间干涉问题。王宝堂<sup>[11]</sup>、陈新立等<sup>[12]</sup>利用哑铃状试样平行段宽度小于夹持段这一特点,在夹具夹紧板中间预留出了宽度与试样平行段宽度一致的支撑板活动空间。

以防屈曲装置为基础的试验方法,大都采用机械式引伸计或应变片测量应变,引伸计的安装与应变片的黏贴过程较为复杂,且无法进行全场应变测量。此外,使用防屈曲装置的试验方法大都通过螺栓提供夹紧力,夹紧力很难灵活调控,需要很大的试错成本。

针对已有试验方法的不足,ZHOU等<sup>[13-14]</sup>提出了一种基于自平衡原理的试验方法(自平衡法),从理论上解决了试样屈曲与应变测量两大难题,但也存在一些可改进之处:如抗屈曲板自由度较大,试验过程中容易发生转动,影响试样厚向夹持力的均匀性;试样夹持段与平行段宽度之比较小,无法将有效变形集中在平行段等。本研究在ZHOU等<sup>[13-14]</sup>的研究基础上,提出了一种改进的金属薄板面内压缩试验方法,并使用4种不同类型的材料验证了改进后方法的准确性与普适性。

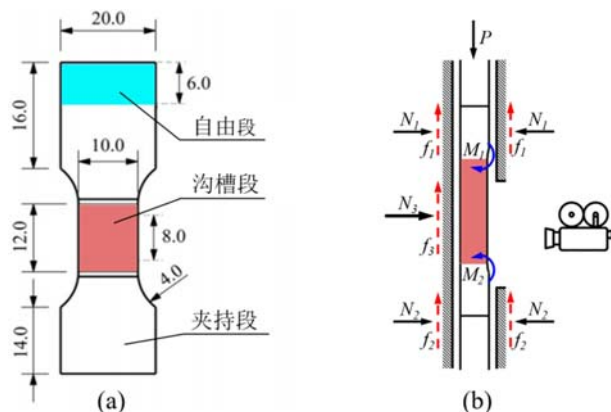


图2 沟槽试样<sup>[14]</sup>(单位:mm):(a)试样形状;(b)受力分析

Fig. 2 Grooved specimen<sup>[14]</sup>(unit:mm):

(a) shape of specimen; (b) force analysis

## 1 基本原理

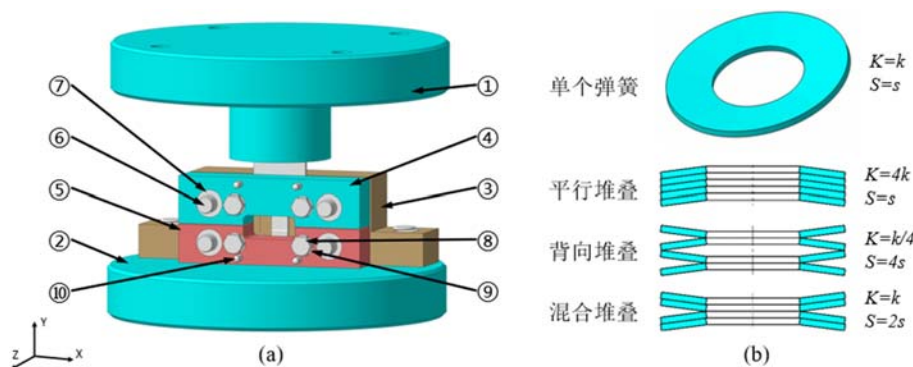
自平衡法基本原理为:在哑铃状试样单侧表面开设沟槽,利用沟槽特征在压缩过程中产生的力矩来抑制试样的T型屈曲。对于L型及W型屈曲,则通过设计合理的试样尺寸来抑制。自平衡法原理图如图2<sup>[14]</sup>所示,所用试样可分为自由段、夹持段与沟槽段3部分。自由段顶端与试验机压盘接触,以端部加载的方式为试样施加压缩载荷;夹持段前后两侧均与支撑板接触,可以保持试样整体在空间中处于竖直状态;沟槽段为仅有单侧表面与支撑板接触的区域,该区域在压缩过程中同时受到

弯矩( $M_1$ 、 $M_2$ )与支撑力( $N_3$ )的作用,能够处于一种平衡状态,减小了过早屈曲失效的风险。试样沟槽段前、后表面平行,当T型屈曲受到抑制时,两表面应变分布无太大差异,能够保证试样仅产生面内压缩变形。另外,由于自平衡原理的存在,试验过程中无需太大的夹持力便可抑制试样屈曲,在一定程度上减小了摩擦力对载荷测量结果的影响。对于应变测量问题,自平衡法允许在靠近试样沟槽侧的前支撑板上开设观测窗口,以便使用数字图像相关法(DIC)进行沟槽段表面应变分布的测量。

## 2 夹具及试样设计

### 2.1 夹具设计

自平衡试验方法所用夹具如图3(a)所示,主要包含:①上压盘、②下底座、③后支撑板、④前上支撑板、⑤前下支撑板、⑥固定销、⑦含油衬套、⑧螺栓、⑨碟片弹簧、⑩定位销。试样位于上压盘与下底座之间,前、后表面与支撑板接触,左、右两侧无约束。上压盘与试验机上横梁相连,为试样提供压缩载荷;下底座置于试验机底座上,无需额外机械连接。后支撑板通过螺栓拧紧在下底座上,与前上、前下支撑板一起为试样提供厚向支撑力,前上、前下支撑板开有观测窗口,能够使用光学方法测量试样表面变形。8只含油衬套通过过盈配合嵌于支撑板上,衬套内部插入固定销,使前上、前下支撑板在试样压缩过程中仅能沿Z向运动。碟片弹簧与螺栓配合使用,为试样提供Z向支撑力。定位销则用于保证试样的X向对中性。



①上压盘,②下底座,③后支撑板,④前上支撑板,⑤前下支撑板,⑥固定销,⑦含油衬套,⑧螺栓,⑨碟片弹簧,⑩定位销

图3 压缩夹具:(a)示意图;(b)碟片弹簧

Fig. 3 Compression fixture:(a) diagram;(b) disc spring

相较于ZHOU等<sup>[13-14]</sup>所用工装,本文所设计压缩夹具的主要改进之处在于:(1)增加了固定销,对夹具前支撑板自由度进行约束,避免其在试验过程中发生转动,影响试样厚向夹持力的均匀性。(2)采用变形量与刚度系数已知的碟片弹簧代替开口弹簧垫圈,使得支撑力能够被灵活调节。

图3(b)所示为夹具所用碟片弹簧,与普通弹簧不同,碟片弹簧有着能够自由堆叠的特点,可为试样提供更多不同大小的支撑力。例如:当单个碟片弹簧刚度系数 $K=k$ 、最大变形量 $S=s$ 时,将4个碟片弹簧平行堆叠、背向堆叠、混合堆叠时的整体刚度系数与最大变形量分别如图3(b)所示。碟片弹簧与螺栓配合使用时,支撑力由碟片弹簧的变形量决定,而碟片弹簧刚度系数较小,同等变形量下能够提供的支撑力远小于螺栓,这与在自平衡法中抑制沟槽试样屈曲所需的支撑力较小相吻合。同时,较小的厚向支撑力也能够减小支撑板对试样自由变形的约束,使试样变形方式更接近于单向压缩。

### 2.2 试样设计

本文对ZHOU等<sup>[13-14]</sup>所用沟槽试样进行了优化设计,改进后的试样如图4所示,与图2所示试样不同之处在于:(1)增加自由段与平行段的宽度比,保证屈强比(屈服强度与抗拉强度的比值)较低的试样塑性变形都能够集中在平行段。(2)对夹持段拓扑结构进行了优化,在沟槽段与自由段之间加设了过渡区,以改善由于几何特征突变引起的应变分布不均匀问题,同时起到抑制桶形效应的作用。因试样过渡区与沟槽段宽度相同,为后续表述方便,将两者整体定义为平行段。

自平衡试验方法中,试样3种类型屈曲的影响因素各不相同。T型屈曲主要受试样平行段长度与

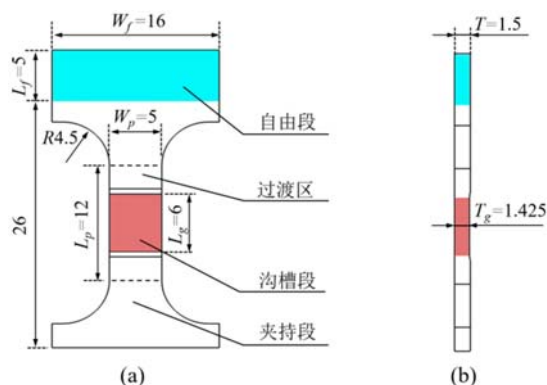


图4 优化后的沟槽试样尺寸(单位:mm):

(a)主视图;(b)左视图

Fig. 4 Optimized grooved specimen size(unit:mm):

(a)front view;(b)left view

变形量,因此,设计自由段长度时,不仅要考虑到能够抑制试样L型屈曲,也要考虑到目标最大压缩应变变量。本文所用沟槽试样尺寸如图4所示,图中 $W_f$ 为自由段宽度, $L_f$ 为自由段长度, $W_p$ 为平行段宽度, $L_p$ 为平行段长度, $L_g$ 为沟槽区域长度, $T$ 为板厚, $T_g$ 为沟槽段厚度。

### 3 试样屈曲分析

本文所设计防屈曲装置属于非全支撑类型,载荷加载方式为端面加载,沟槽试样存在发生前述3种屈曲失效的可能性,因此需要对图4所示试样尺寸进行优化设计与分析,以抑制过早屈曲变形。

#### 3.1 L型屈曲理论分析

试样L、W型屈曲失效分别容易发生在自由段和平行段,可以使用柱体屈曲失效判别公式进行辅助设计。屈曲失效判别准则主要有2种:一种适用于粗短型柱体的弱失效准则,只要材料所受应力小于自身的屈服强度,即可认为不会发生屈曲;另一种适用于细长型柱体的强失效准则,需要借助标准的柱体屈曲判别公式(如割线公式与欧拉公式)进行计算<sup>[15]</sup>。

本文所用压缩试样的自由段长度较小,属于粗短型柱体,应采用弱失效准则作为判断依据。根据弱失效准则,若要确保试样自由段不会发生屈曲,则要使其始终处于弹性变形区间,而哑铃状试样自由段能够达到的最大应力主要受自由段宽度与平行段宽度比值 $W_f/W_p$ 的影响。理论上, $W_f/W_p$ 的取值大于材料自身的抗拉强度与屈服强度的比值时,即使试样平行段材料达到自身抗拉强度,自由段也不会产生屈服。通过文献调查,我们了解到大多数钢、铝合金材料抗拉强度与屈服强度的比值均小于2<sup>[16-17]</sup>。又根据郭晓倩等<sup>[3]</sup>的研究可知,在镁合金材料的压缩试验中,当压缩应变达到0.1时,最大压缩应力与屈服应力的比值约为3.2。因此,为确保镁合金材料压缩应变达到0.1时自由段不发生L型屈曲失效,需将 $W_f/W_p$ 设计为3.2。另外,若只针对钢、铝合金材料进行压缩试验,可将 $W_f/W_p$ 减小;若要针对镁合金材料进行更大应变量的压缩试验, $W_f/W_p$ 需根据所需应变调整。

#### 3.2 W型屈曲理论分析

试样平行段属于细长型柱体,采用强失效准则作为判断依据更为合理。柱体屈曲判别公式中,割线公式适用于偏心加载条件,欧拉公式适用于同心加载条件,本设计采用端部加载,压缩载荷均匀分布在试样端面上,能够保证良好的载荷均匀性,故采用欧拉公式来判断沟槽试样是否会发生W型屈曲失效。欧拉公式表达式<sup>[15]</sup>为

$$F = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (1)$$

式中: $E$ 为材料弹性模量; $I$ 为惯性矩; $K$ 为系数; $L$ 为柱体高度; $F$ 为柱体屈曲所需压力。

试样平行段的W型屈曲属于非弹性屈曲失效,式(1)中的弹性模量应由切线模量 $E_t$ 代替<sup>[18]</sup>。试

板厚之比(平行段长厚比)以及沟槽深度与试样板厚之比(深厚比)影响。试样平行段长厚比越小,发生T型屈曲的概率越低,但过小的平行段长厚比会带来变形不均匀问题。与平行段长厚比不同,深厚比只有在一个合理的范围内,才能起到抑制T型屈曲的作用。除T型屈曲外,平行段也可能发生W型屈曲,主要受试样平行段长度与其宽度之比(平行段长宽比)影响,较小的平行段长宽比能够有效抑制W型屈曲,但过小的平行段长宽比会导致平行段材料进入平面应变状态。L型屈曲主要受试样自由段长度与板厚之比(自由段长厚比)的影响,虽然更小的自由段长厚比能够有效抑制L型屈曲,但自由段长度与平行段长度的比值会影响到试样的最大压缩

样自由段边界条件属于两端固定,所以取  $K=1/2$ 。将  $E=E_t$ 、 $K=1/2$ 、 $I=TW_p^3/12$ 、 $L=L_p$  代入式(1)可得 W 型屈曲的临界压力为

$$F_0^L = \frac{\pi^2 E_t T W_p^3}{3 L_p^2} \tag{2}$$

临界应力为

$$\sigma_0^W = \frac{\pi^2 E_t}{3} \left( \frac{W_p}{L_p} \right)^2 \tag{3}$$

对于金属材料,切线模量通常会随着应变的增加而减小,这就导致临界应力  $\sigma^W$  也随着应变的增加而减小,所以,材料压缩时的应力应变曲线与临界应力曲线存在一个交点,应变小于该临界点的应变时,试样不发生 W 型屈曲,反之,发生 W 型屈曲。

从图 5 可以看出,材料的屈服强度越小,强化能力越弱,临界点处对应的应变就越大。临界应力与平行段长宽比  $L_p/W_p$  的平方成反比,选择较小的  $L_p/W_p$  能够有效抑制试样 W 型屈曲,但过小的  $L_p/W_p$  会带来应变分布不均匀的问题。综上所述,由于材料强化行为不同,无法计算出统一的 W 型屈曲临界应力,因此,本文采用 Ludwik 强化模型(见式(4))构建多种“虚拟材料”,计算了各自的临界应力。结果表明,平行段长宽比为 2.4 时,试样能够在较大应变时保持稳定。

$$\sigma = \sigma_0 + K\epsilon^n \tag{4}$$

式中: $\sigma$ 为应力; $\sigma_0$ 为初始屈服强度; $K$ 为材料常数; $\epsilon$ 为应变; $n$ 为硬化指数。

### 3.3 T 型屈曲仿真分析

沟槽试样 T 型屈曲失效机理相对复杂,受材料自身力学性能、试样尺寸、沟槽深度、厚向支撑力位置等诸多因素的影响,为此,本文采用了有限元方法对 T 型屈曲失效的影响因素进行研究。研究所用有限元软件为 ABAQUS/Standard, 仿真模型如图 6 所示。

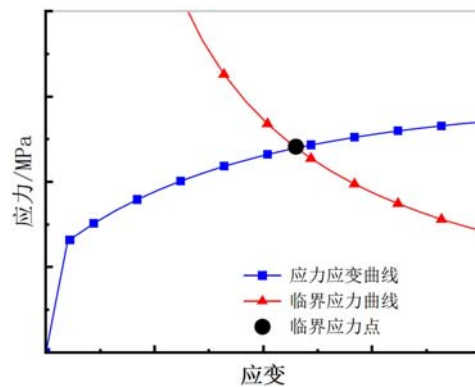


图 5 W 型屈曲理论分析示意图

Fig. 5 Diagram of W-buckling theory analysis

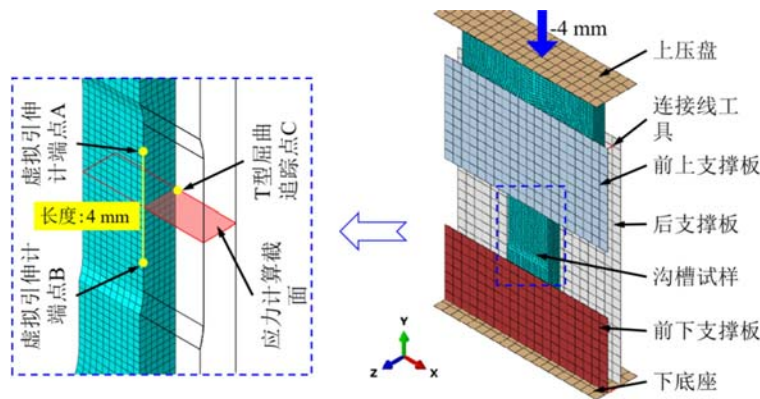


图 6 压缩夹具仿真模型

Fig. 6 Finite element model of compression fixture

仿真模型中,下底座与后支撑板为完全固定约束;2 块前支撑板仅释放 Z 向自由度,并通过连接线工具代替碟片弹簧为试样提供夹紧力;为完成试样的压缩变形,将压盘边界条件设置为沿 Y 轴负方向运动 4mm。同时,为节省计算时间,试样与夹具采用 2 种不同的单元尺寸,分别为 0.25mm 与 1mm,且试样为变形体,夹具为离散刚体。模型中各接触面间的接触方式均为摩擦系数为 0.1 的摩擦接触。仿真所用材料模型以常用的 AA6061-T6 铝合金材料为例,其输入应力应变曲线如图 7 所示。材料模型的

弹性行为采用弹性模量加泊松比的方式来表达,弹性模量为 56082MPa,泊松比为 0.33;塑性行为采用 Mises 各向同性屈服准则与等向强化准则来描述。

仿真结果的评价标准有以下 3 点:(1)观察沟槽试样等效塑性应变(PEEQ)的分布情况,并比较其与传统试样的差异。(2)查看试样是否发生 T 型屈曲,为量化试样 T 型屈曲的程度,提取图 6 所示屈曲追踪点 C 处的 Z 向位移分量,通过该值大小来评估试样 T 型屈曲的程度。(3)比较试样的应力应变曲线,其中应力通过图 6 沟槽段截面上的支反力来获取,应变通过虚拟引伸计端点 A、B 的 Y 向位移来获取。

通过仿真分析发现,T 型屈曲受沟槽试样深厚比影响较大。为探究试样外轮廓尺寸如图 4 所示时,深厚比对 T 型屈曲的影响,本文分别设计了深厚比为 0.025、0.05、0.075、0.1 的沟槽试样进行仿真分析(同时设计无沟槽的传统试样作为对照组)。仿真结果表明试样深厚比为 0.025~0.05 时,T 型屈曲能够被较好地抑制,深厚比取值太小会导致加工困难,取值太大发生 T 型屈曲的风险反而更高。图 7 为传统试样与深厚比为 0.05 的沟槽试样的仿真结果对比,图 7(a)为试样的等效塑性应变分布图,由图可以看出沟槽试样的沟槽段(平均应变测量区域)应变分布较为均匀,且应变分布情况与传统试样对应位置差距不大。通过观察图 7(b)所示结点 C 处 Z 向位移曲线可以看出,沟槽试样在压缩应变达到 0.25 时 Z 向位移依旧很小,仅为 0.016 左右,可以认为无过早 T 型屈曲失效。由图 7(b)可知,2 种试样的输出应力应变曲线与输入曲线重合性均较好,说明沟槽的存在对试样力学性能无太大影响。

为验证自平衡压缩试验方法的普适性,本文构建了涵盖多种初始屈服强度、硬化指数与厚向异性系数的“虚拟材料”进行仿真分析(虚拟材料面内各向异性指数  $\Delta r$  为 0),仿真结果表明该方法能够有效抑制 T 型屈曲,完成多数材料的压缩力学性能测试。

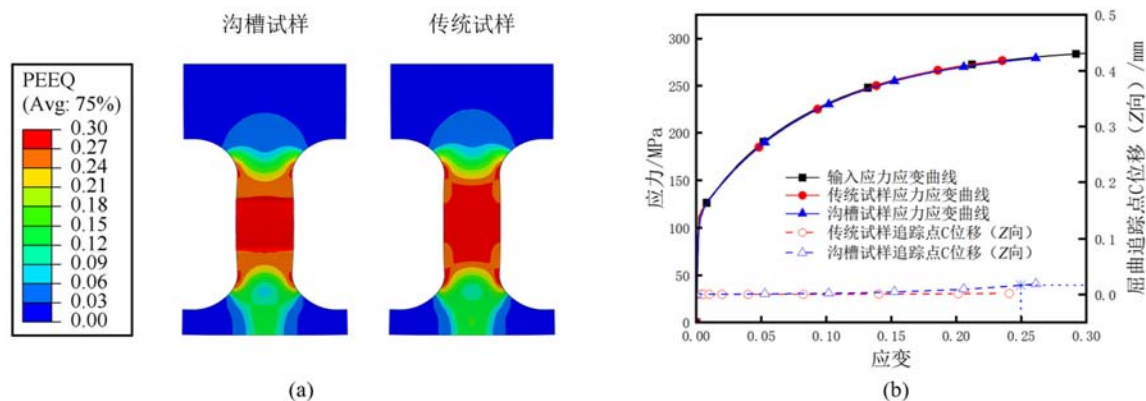


图 7 2 种试样仿真结果对比:(a)等效塑性应变分布云图;(b)应力应变曲线与 T 型屈曲追踪点 C 的 Z 向位移量

Fig. 7 Comparison of simulation results between two types of specimens:(a)nephogram of equivalent plastic strain(PEEQ);(b)stress strain curve and Z-direction displacement of T-buckling tracking point C

## 4 试验方法的应用与验证

### 4.1 试验方案

为验证改进的自平衡试验方法的可行性与适用性,本文对 2.0mm 厚的 AA5052 铝合金、1.6mm 厚的 AA7075 铝合金、1.5mm 厚的 DP590 高强钢和 1.55mm 厚的 AZ31B 镁合金进行了拉伸与压缩力学性能测试,试样取向均为轧制方向。试样的加工方式采用线切割“中走丝”切割外轮廓,铣床铣削沟槽,同时为避免沟槽段与过渡区之间尺寸突然变化带来的应力集中,使用铣床铣削出多级阶梯以近似代替图 4(b)中所示圆角,最后对该区域进行手工打磨。另外,为减小摩擦力的影响,试验过程中试样的前后表面均采用聚四氟乙烯喷剂(PTFE)进行润滑处理。

试验采用 MTS-E45 万能试验机,压缩速度为 0.72mm/min,温度为室温。为获得随试验的进行而不断增加的试样厚向支撑力,本文使用了刚度系数与最大变形量可灵活调节的碟片弹簧,碟片弹簧型

号、数量与堆叠方式的选择可采用仿真与试验相结合的方法。首先,基于仿真分析获得数值最优的刚度系数与弹簧变形量;然后以此为目标,根据碟片弹簧性能参数数据库,完成弹簧搭配方式的选择;最后,通过试验调试,获得最优的搭配方式。本文主要用到的弹簧类型有:A 型号,刚度系数约为 1000 N/mm,单个最大变形量约为 0.2mm;B 型号,刚度系数约为 1500N/mm,单个最大变形量约为 0.2mm。不同试样所用碟片弹簧及搭配形式见表 1。

表 1 试验所用碟片弹簧及其组合方式

Tab. 1 Disc springs and combination methods used in the experiment

材料	碟片弹簧	数量	堆叠方式
AA5052	A	2	背向堆叠
AA7075	A	4	混合堆叠
DP590	B	2	背向堆叠
AZ31B	A	2	背向堆叠

如图 8(a)所示,使用数字图像相关法对拉伸与压缩试样变形量进行非接触应变测量,采集所用设备为 Flir 公司生产的 GS3-U3-123S6M-C 工业相机与 Schneider 公司生产的 EMERALD 镜头,采集分辨率为 4096pixel×3000pixel。同时,为测量试样纵向、横向平均应变与厚向异性系数( $r$ 值),分别在测量段的纵向、横向创建了如图 8(b)所示的 3 个虚拟引伸计,并进行了平均化处理。

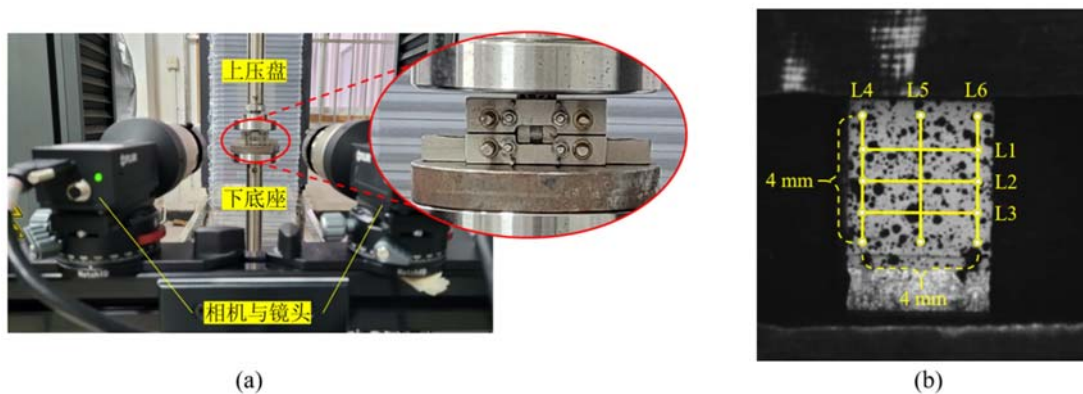


图 8 数字图像采集与应变分析系统:(a)采集系统;(b)虚拟引伸计

Fig. 8 Digital image acquisition and strain analysis system:(a)acquisition system;(b)virtual extensometer

## 4.2 试验结果与分析

压缩试样变形前、后的对比如图 9 所示,从变形后试样的正面可以看出,平行段没有出现宽度方向 W 型屈曲,沟槽段(测量段)也均未出现明显的桶形效应,说明试样始终处于单向压缩变形,未进入多轴应力状态;从侧面可以看出,试样未出现厚度方向的 L 型屈曲与 T 型屈曲。因此,从整体上看,自平衡试验方法能够抑制试样的过早屈曲失效,过渡段的存在也减轻了桶形效应的影响。

图 10 所示为试验测得的单调拉伸与压缩应力应变曲线与  $r$  值变化曲线。其中,拉伸应力应变曲线与  $r$  值变化曲线均截取颈缩前的数据作为有效数据;同时,由于高强钢材料具有屈服平台,会导致该区域的  $r$  值计算结果极不稳定,因此删除该部分数据点。为便于对比材料各自拉伸、压缩应力应变曲线的差异性,对压缩应力应变曲线进行了“旋转处理”,使所有曲线都位于第一象限内。另外,本文所用自平衡试验方法因所需侧向夹紧力较小,测量区域始终处于面内单向压缩应变状态,所以并未对试验数据进行双向应力效应与摩擦效应修正。

从应力应变曲线的变化规律来看,AA5052、AA7075、DP590 作为单轴拉伸、压缩对称性较好的材料,拉伸、压缩应力应变曲线重合度较好,该现象也有力证明了自平衡方法能够精确表征材料压缩时的力学行为;AZ31B 镁合金作为典型的拉压不对称性材料,其拉伸、压缩应力应变曲线存在明显差异,拉

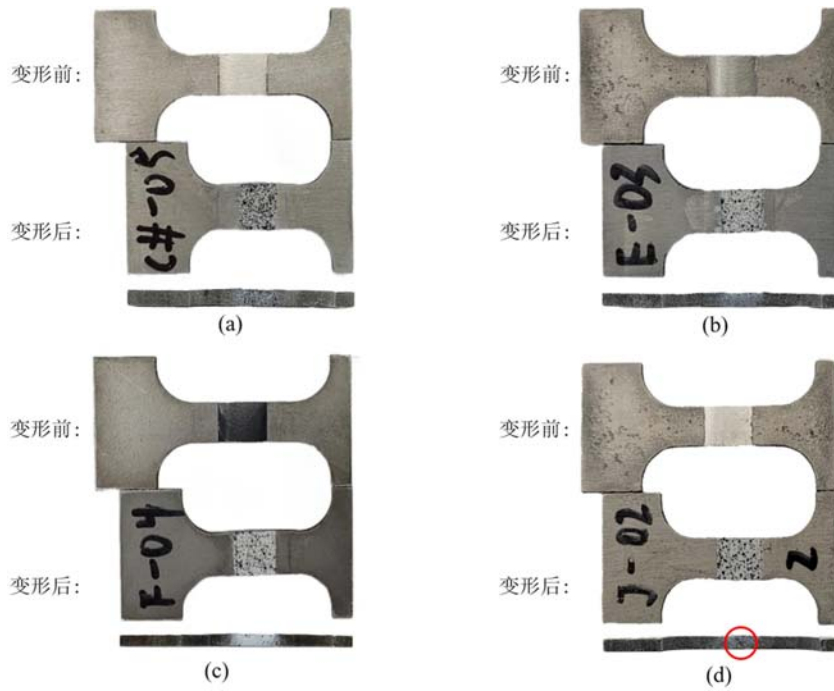


图9 金属薄板压缩试样:(a)AA5052;(b)AA7075;(c)DP590;(d)AZ31B

Fig. 9 Metal sheet compression specimens:(a)AA5052;(b)AA7075;(c)DP590;(d)AZ31B

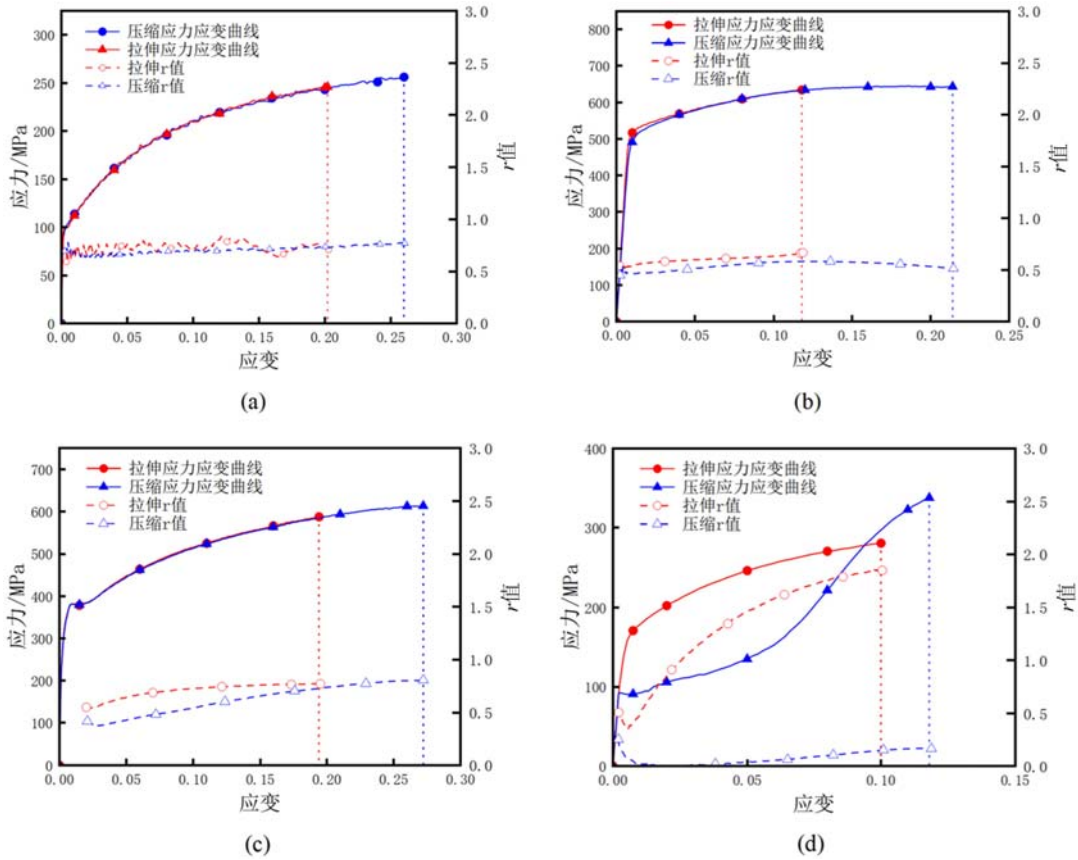


图10 拉伸、压缩应力应变曲线与r值:(a)AA5052;(b)AA7075;(c)DP590;(d)AZ31B

Fig. 10 Stress strain curves and *r*-values under tension and compression:

(a)AA5052;(b)AA7075;(c)DP590;(d)AZ31B



伸应力在材料屈服之后增速逐渐变缓,压缩应力则呈“S”形增加,符合镁合金材料的强化规律<sup>[19]</sup>。AA5052、AA7075、DP590、AZ31B材料的最大压缩应变分别能够达到0.26、0.21、0.27、0.12,均大于单向拉伸试样颈缩时刻的应变,说明自平衡试验方法能够获得较大的压缩应变。另外,镁合金材料因压缩过程中强化行为显著,很快就因达到自身的强度极限而发生了断裂<sup>[19]</sup>,所以最大压缩应变相较于铝合金与高强钢要小。

通过比较不同材料 $r$ 值变化规律可以看出,AA5052与AA7075铝合金材料发生塑性变形后,随着塑性应变的增大,拉伸与压缩 $r$ 值几乎保持不变,分别稳定在0.75与0.6左右。DP590高强钢材料拉伸 $r$ 值与铝合金一样稳定在0.75左右,但压缩 $r$ 值有着随塑性应变增加而逐渐增大的趋势。AZ31B镁合金材料拉伸 $r$ 值与压缩 $r$ 值的变化规律存在明显差异,拉伸 $r$ 值随着塑性应变的增加,以对数函数形式不断增大,在颈缩点处达到1.8左右;压缩 $r$ 值先是趋近于零,而后虽然缓慢增加,但整体仍较小,压缩断裂处仅为0.2左右,说明镁合金材料在压缩时宽度方向上的变形量相较于厚度方向要大很多。

另外,本文也针对多种厚度为1mm左右的金属薄板,按照图4所示尺寸进行试样加工与压缩试验,结果表明1mm厚的金属薄板在应变达到0.05左右便发生T型屈曲。因此,图4所示试样适用于最小厚度为1.5mm左右的试样,对于厚度更小的板材,需减小沟槽段长度,以保证沟槽段长度与试样厚度的比值(长厚比)不大于4。

## 5 结论

本文基于自平衡原理,提出了一种改进的金属薄板面内压缩试验方法,并使用该方法研究了多种金属板材压缩时的力学性能,得出的结论主要如下:

(1)改进的自平衡试验方法适用于不同材质、不同厚度金属薄板的面内压缩,能够有效抑制试样的过早屈曲失效,获得较大的压缩应变与压缩工况下的厚向异性系数,具有良好的普适性。

(2)所设计试样能够保证沟槽区域的均匀变形,使其始终处于单向压缩应变状态,避免了繁琐的双向应力效应修正,应变测量结果精度较高。

(3)由于沟槽特征的存在,试验所需支撑力较小,试验过程中只需用手简单拧紧螺母,碟片弹簧便可提供足以抑制T型屈曲的厚向支撑力,使试样始终能够稳定变形,较小的支撑力也使得试验结果受摩擦力影响较小。

## 参考文献:

- [1] 李扬. 中锰第三代汽车钢包辛格效应研究[D]. 大连:大连理工大学,2018:27 (LI Yang. Research on the Bauschinger effect of the third-generation automotive medium-Mn steel [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018:27 (in Chinese))
- [2] 宋广胜,赵原野,张士宏,等. 织构对AZ31镁合金温热压缩变形机制影响[J]. 中国有色金属学报,2018,28(11):2206-2216 (SONG Guangsheng, ZHAO Yuanye, ZHANG Shihong, et al. Effect of texture on deformation mechanism of AZ31 Magnesium alloy warm compression[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(11):2206-2216 (in Chinese))
- [3] 郭晓倩,段星,马超,等. 预压缩-反向拉伸加载路径下镁合金AZ31轧制板材的孪生-退孪生行为[J]. 中国有色金属学报,2023,33(4):1047-1062 (GUO Xiaoqian, DUAN Xing, MA Chao, et al. Twinning and detwinning behavior of rolled Mg alloy AZ31 plate under compression-tension loading[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(4):1047-1062 (in Chinese))
- [4] AITCHISON C S, TUCKERMAN L B. The pack method for compressive tests of thin specimens of materials used in thin-wall structures[R]. Washington: National Advisory Committee on Aeronautics, 1939.
- [5] GHAFFARI T D, WORSWICK M J, ALI U, et al. Mechanical response of AZ31B-F magnesium alloy: experimental characterization and material modeling considering proportional loading at room temperature[J]. International Journal of Plasticity, 2014, 55:247-267.
- [6] 宋先邨,郑文龙. 金属板材高温压缩试验[J]. 实验力学,1988,3(2):154-160 (SONG Xiancun, ZHENG

- Wenlong. Compression test of the metallic sheets at elevated temperatures [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1988, 3(2):154–160 (in Chinese))
- [7] YOSHIDA F, UEMORI T, FUJIWARA K. Elastic-plastic behavior of steel sheets under in-plane cyclic tension-compression at large strain[J]. *International journal of plasticity*, 2002, 18:633–659.
- [8] CAO J, LEE W, CHENG H S, et al. Experimental and numerical investigation of combined isotropic-kinematic hardening behavior of sheet metals[J]. *International Journal of Plasticity*, 2009, 25(5):942–972.
- [9] KUWABARA T, KUMANO Y, ZIEGELHEIM J, et al. Tension-compression asymmetry of phosphor bronze for electronic parts and its effect on bending behavior[J]. *International Journal of Plasticity*, 2009, 25(9):1759–1776.
- [10] 张志强, 贾晓飞, 袁秋菊. 基于 Yoshida-Uemori 模型的 TRIP800 高强度钢回弹分析[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2015, 45(6):1852–1856 (ZHANG Zhiqiang, JIA Xiaofei, YUAN Qiuju. Springback analysis of trip high strength steel based on Yoshida-Uemori model [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2015, 45(6):1852–1856 (in Chinese))
- [11] 王宝堂. 金属板材连续拉压试验装置及回弹仿真研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018:30–33 (WANG Baotang. Continuous tension/compression experimental device of sheet metals and the springback simulation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018:30–33 (in Chinese))
- [12] 陈新力, 张军, 詹华, 等. 超高强度钢 DP980 包辛格效应测量与参数识别[J]. *塑性工程学报*, 2022, 29:183–187 (CHEN Xinli, ZHANG Jun, ZHAN Hua, et al. Bauschinger effect measurement and parameter identification of ultra-high strength steel DP980[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2022, 29:183–187 (in Chinese))
- [13] ZHOU P, BEEH E, FRIEDRICH H E. A novel testing method for uniaxial compression of thin-sheet magnesium alloys[J]. *Experimental Mechanics*, 2016, 56:513–519.
- [14] ZHOU P, BEEH E, FRIEDRICH H E. Influence of tension-compression asymmetry on the mechanical behavior of AZ31B-F magnesium alloy sheets in bending[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, 25:853–865.
- [15] 孙训方. 材料力学[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2009:309 (SUN Xunfang. *Mechanics of Material*[M]. Fifth Edition. Beijing: Higher Education Press, 2009:309 (in Chinese))
- [16] 张晓川, 任春华, 王琰, 等. 带状组织对高强度低合金钢力学性能影响的实验研究进展[J]. *实验力学*, 2023, 38(3):317–326 (ZHANG Xiaochuan, REN Chunhua, WANG Yan, et al. Experimental research progress on the effect of banded structure on mechanical properties of high-strength low-alloy steel[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2023, 38(3):317–326 (in Chinese))
- [17] 顾然, 王强, 侯亮, 等. 铝合金 2A70 高应变率力学性能及其本构关系实验研究[J]. *实验力学*, 2014, 29(5):543–548 (GU Ran, WANG Qiang, HOU Liang, et al. Experimental study of mechanical properties at high strain rate and constitutive relation of aluminum alloy 2A70[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2014, 29(5):543–548 (in Chinese))
- [18] HIBBELER R C. *Mechanics of materials*[M]. Hoboken: MacMillan Publishing Company, 1994:692–693.
- [19] 何进, 何建丽, 赵卫东, 等. 挤压态 WE43 镁合金低温断裂研究[J]. *塑性工程学报*, 2020, 27(10):172–177 (HE Jin, HE Jianli, ZHAO Weidong, et al. Study on low temperature fracture of as-extruded WE43 magnesium alloy[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2020, 27(10):172–177 (in Chinese))

## An improved in-plane compression test method for metal sheet

LI Qinglei, ZHOU Ping, ZHAI Yanbo, XIONG Weiqing, WEI Qianze

(College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** In order to overcome the buckling failure in the in-plane compression mechanical testing of metal thin plates, this paper proposed an improved method by the self-balancing of the specimen to suppress the premature buckling by the single-sided grooves of dogbone specimen. First, the previous fixture and specimen of this method was designed and optimized. The feasibility and universality of this method were demonstrated through theoretical analysis and simulation analysis. Second, this method was applied in uniaxial in-plane compression testing of four types metal sheets. Additionally, uniaxial tensile tests were conducted for the purpose of comparison. The experimental results indicate that this method can effectively suppressed the premature buckling. The strain was obtained accurately in the length and width direction of the specimen by using the Digital Image Correlation method(DIC). The anisotropy coefficient( $r$ -value) can subsequently be calculated precisely.

**Keywords:** metal sheet; in-plane compression; mechanical testing; self-balancing; digital image correlation