



## AZ31 镁合金板材连续挤压-剪切成形的 数值模拟及实验研究

干松林<sup>1</sup>, 胡红军<sup>1</sup>, 张慧玲<sup>1</sup>, 袁婷<sup>1</sup>, 曾朝伟<sup>1</sup>, 赵健行<sup>1</sup>, 张丁非<sup>2</sup>

(1. 重庆理工大学 材料科学与工程学院, 重庆 400050;

2. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 为了提高AZ31镁合金板材的力学性能, 结合普通挤压成形与大塑性剪切成形的特点提出了挤压-剪切新型复合变形方式。采用DEFORM-3D软件对板材的挤压-剪切过程进行数值模拟, 探索塑性变形机理, 研究成形过程中温度场、速度场以及成形载荷的演变规律。结果表明: 成形过程中较大温升主要集中在剪切区域, 最大温升约为6℃; 随着温度的升高, 成形载荷逐渐降低, 金属的流动速度加快, 且内部流速明显大于外部; 经过挤压-剪切成形后板材的晶粒得到明显细化, 并且随着挤压温度的升高, 晶粒逐渐长大; 挤压-剪切成形使得板材表面硬度明显升高, 挤压温度为330℃、370℃和410℃时, 板材的硬度分别为77HV、75HV、72HV。挤压-剪切工艺是一种新型的板材成形工艺, 细化了板材的晶粒尺寸, 提高了板材的力学性能。

**关键词:** 镁合金; 板材; 数值模拟; 热挤压; 力学性能

文章编号: 1004-0609(2022)-12-3649-12

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

**引文格式:** 干松林, 胡红军, 张慧玲, 等. AZ31 镁合金板材连续挤压-剪切成形的数值模拟及实验研究[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(12): 3649-3660. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42474

GAN Song-lin, HU Hong-jun, ZHANG Hui-ling, et al. Numerical simulation and experimental study on continuous extrusion-shear forming of AZ31 magnesium alloy sheets[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(12): 3649-3660. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42474

镁及镁合金是实际工程应用中最轻的金属结构材料<sup>[1-4]</sup>, 具有密度低、比强度和比刚度高、阻尼减震性好、导热性好、电磁屏蔽效果佳、机加工性能优良、零件尺寸稳定和易回收等优点, 在航空航天、交通工具、军事工业以及电子和医疗器械等领域中成为了不可或缺金属材料<sup>[5-10]</sup>。随着人们越来越深刻地体会到节约能源和环境保护的重要性, 镁合金以其优异的特性倍受青睐, 这也大大推动了镁合金的研究和运用。但镁合金塑性变形能力不足, 室温下难以实现大塑性变形<sup>[11-12]</sup>。现阶段, 我

国的工业生产中镁合金产品主要以铸件的形式存在。铸造镁合金零件存在较多的缺陷, 如疏松多孔、晶粒粗大以及力学性能较差等缺点, 这均阻碍了镁合金的广泛应用<sup>[13-15]</sup>。

随着我国汽车、交通运输等产业的快速发展, 镁合金薄板越来越多用于制造汽车车体组件的外板(如车门、罩盖、护板、顶板等), 这大大减轻汽车质量。目前, 镁合金板材的应用主要受两方面因素的限制: 1) 镁合金板材性能达不到应用要求; 2) 镁合金板材价格较高。因此, 提高镁合金板材的制

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52071042, 51771038); 重庆英才计划资助项目(CQYC202003047)

收稿日期: 2021-09-30; 修订日期: 2021-10-25

通信作者: 胡红军, 教授, 博士; 电话: 18996100916; E-mail: hhj@cqut.edu.cn

备加工技术水平是扩大镁合金板材应用范围的最有效的途径,同时也是增强我国镁工业实力的必经之路。目前,我国镁合金板带发展需要解决的问题主要有以下几个方面:开发高质量、高成材率的镁合金板材制备工艺技术及装备,促进镁合金板材制备的产业化;研制高性能、易成形、低成本的镁合金板材型号;发展新型高性能、有针对性的镁合金板材的型号,扩大镁合金板材可选择种类;开发高性能镁合金板材成形技术,促进镁合金板材的应用。但常规板材制备工艺形成的强烈的基面织构严重制约了镁合金板材力学性能的提高,因此,在对镁塑性变形理论进行深入研究的基础上开发新型板材成形技术,是促进变形镁合金持续发展的重要举措<sup>[16-19]</sup>。

杨玄牧等<sup>[20]</sup>在挤压温度为400℃的条件下制得AZ31镁合金板材,在三个拉伸方向上的平均抗拉强度与平均伸长率达到333 MPa与19.6%,但当挤压温度升高板材综合力学性能有所下降。王忠堂

等<sup>[21]</sup>在对挤压态镁合金进行压痕-压平复合变形实验中发现,较低的变形温度和较大的变形程度有利于孪晶组织的形成,而且孪晶组织容易出现在大晶粒内部。尹振入等<sup>[22]</sup>对正挤压-弯曲的AZ31镁合金进行退火处理,结果显示随着退火温度的升高晶粒尺寸逐渐增大,最大尺寸为13.56 μm。胡忠举等<sup>[23]</sup>使用正挤压-弯曲剪切复合连续变形的方式,大幅细化了镁合金成形板材的晶粒,并使其综合力学性能得到了一定程度的改善。王伯宁等<sup>[24]</sup>设计了一种新型的镁合金挤压-剪切工艺,制备了高强度和高韧性的镁合金棒材。YAN等<sup>[25]</sup>采用扭转-反向挤压-挤压相结合,并在冲头上增加一个剪切装置的方法,使镁合金获得更大的变形量和更宽的变形范围,有效提高了合金硬度。

本文作者所在团队提出了将正挤压和连续多次剪切结合的复合变形制备镁合金板材的新方法,图1(a)所示为在试验和计算机模拟中采用的挤压模具示意图,图1(b)所示为适用于立式挤压机的具有连

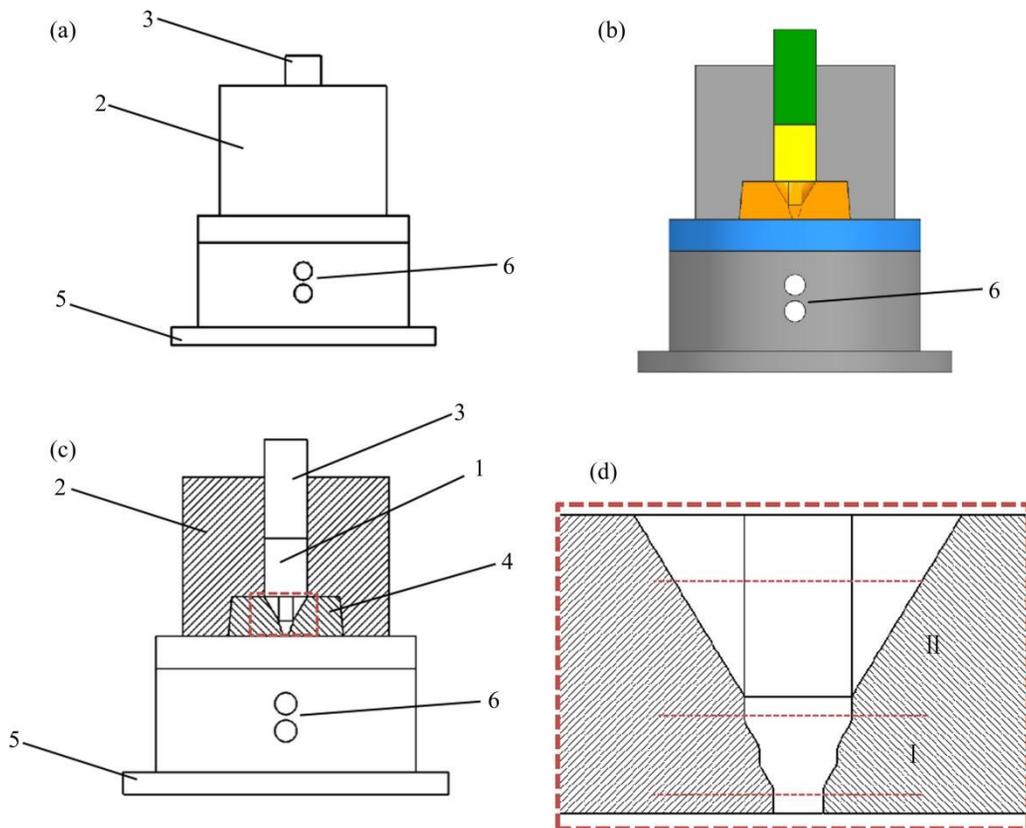


图1 板材挤压剪切工艺模具示意图

**Fig. 1** Die drawing of sheet extrusion-shearing process (1—Billet; 2—Extrusion cylinder; 3—Extrusion ram; 4—Die; 5—Base; 6—Support plate; I—Compression shear zone; II—Ordinary extrusion zone): (a) 2D die appearance drawing; (b) 3D die section drawing; (c) 2D die section drawing; (d) Local enlarged drawing of forming zone

续二次剪切的板材连续挤压剪切模具示意图。研究表明, 该技术在改善、提高镁材的成形性和力学性能方面具有潜力。本文所采用的高温镁合金连续挤压-剪切成形方式能够细化晶粒, 还能消除其组织中存在的孔隙等缺陷, 最终获得优异组织。

本研究将正挤压和连续剪切(两次剪切)相结合, 即普通正挤压与等通道挤压相结合, 提出了一种板材连续挤压-剪切工艺来开展镁合金板材的塑性成形加工。该工艺是在现有的 ECAP(Equal channel angular pressing)工艺基础上优化设计的新工艺。采用 DEFORM-3D 弹塑性有限元软件对棒材挤成板材的挤压-剪切过程进行数值模拟, 探索板材塑性变形机理, 研究成形过程中温度场、速度场以及成形载荷的演变。设计并制造出立式挤压机上使用的模具, 并进行了试验验证。采用连续挤压-剪切成形工艺成功将镁合金圆棒坯加工成板材, 对变形后镁合金板材的微观组织演化进行了分析, 并分析了成形过程中镁合金板材不同部位的硬度, 为高性能镁合金板材的连续挤压-剪切加工及试验提供了实验和理论依据。

## 1 实验

实验所采用的材料为商业镁合金 AZ31B, 挤压前将坯料加工为合适的尺寸。板材挤压成形的方法有很多种, 其中正向挤压应用最为广泛。板材连续挤压-剪切工艺是在板材普通正向挤压的基础上调整模具结构, 使得圆棒挤压成板材, 然后在成形过程中再受到两次剪切作用, 从而细化晶粒, 改善内部晶粒取向。板材连续挤压剪切模具如图 1 所示。其中, I 区和 II 区分别表示挤压-剪切区域和普通挤压区域(见图 1(d))。

图 2(a)所示为模拟所采用的 TESB 模具结构三维图。其中, 包括凹模、坯料、挤压筒、挤压杆。图 2(a')所示为挤压模具凹模三维放大图。图 2(b)所示为模具组装及加热系统实物图, 通过两块加热片在外围进行加热, 温控精度 $\pm 30^\circ\text{C}$ ; 图 2(c)所示为凹模实物图, 图 2(d)所示为凹模安装的情况及挤出的镁合金板材。

整个成形过程主要包含了五个阶段, 圆柱坯料

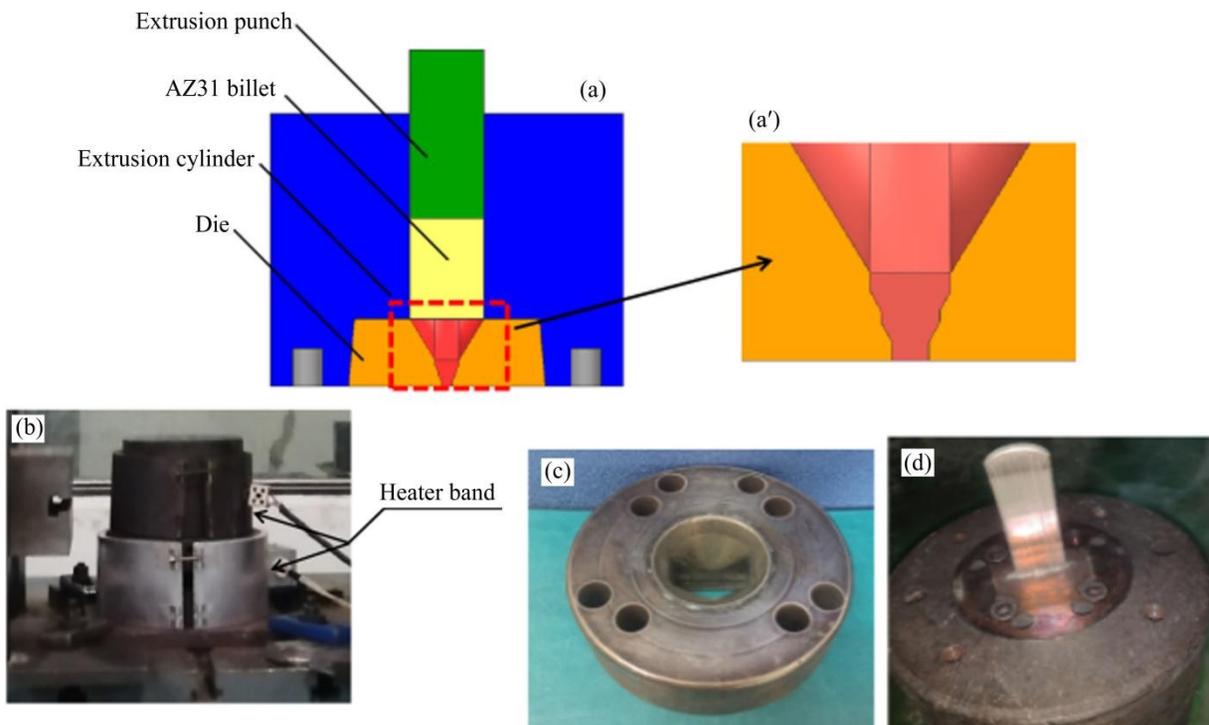


图 2 板材挤压剪切模具结构三维图及实物图

**Fig. 2** Three-dimensional drawing and physical drawing of plate extrusion and shearing die structure: (a) 3D drawing of die and enlarged drawing of forming area; (b) Die assembly drawing; (c) Actual die drawing; (d) Installation of die and extruded magnesium alloy sheet.

在挤压成形过程中依次经过普通挤压区-连续剪切区,最终成形板材。因此,该工艺的最大特点就是集挤压和剪切为一体,通过I区的两次剪切作用改变板材表面的金属流动方向以及金属流动速度,从而改善其内部的晶粒取向。在细化晶粒的同时减少了工序,提高了效率。

采用HVS-1000型数显显微硬度计检测成形板材的维氏硬度,加载载荷为0.98 N,保持15 s后卸除载荷,通过计算压痕对角线的长度来求出压痕表面积上的平均压力,最后换算为维氏硬度值。显微组织观察采用莱卡DMI500M金相显微镜,对挤压-剪切工艺下不同挤压温度的板材进行取样观察,研究其组织演变规律。影响挤压-剪切板材组织和性能因素很多,主要有模具结构、坯料预热温度、成形速度等。通过数值模拟优化不仅可以进一步优化模具结构,而且可以确定合适的挤压载荷,以确保镁合金板材可以顺利挤出。数值模拟需要采取的步骤包括:划分网格、选取摩擦因数、定义坯料等,具体数值模拟参数如表1所示。设定的挤压实验参数如下:挤压温度为330 °C、370 °C和410 °C,挤压速度为4 mm/s。

## 2 结果与讨论

### 2.1 数值模拟结果

#### 2.1.1 不同坯料预热温度下的温度场分布

挤压过程中温度场的分布是影响镁合金板材的

表1 数值模拟所采用的参数

Table 1 Parameters used in numerical calculations

Name	Value
Billet diameter/mm	39.8
Billet length/mm	80
Diameter of extrusion cylinder/mm	40
Extrusion ratio	8.33
Extrusion temperature/°C	330, 370, 410
Thermal conductivity of billet and die/ ( $\text{N} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{S}^{-1} \cdot \text{mm}^{-2}$ )	11
Friction factor	0.1, 0.4
Extrusion speed/( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	4
Total number of finite elements	32000
Minimum element size	0.7145
Simulation type	ALE extrusion

成形质量的主要因素之一。图3所示为不同预热温度下板材在挤压过程中温度场的分布图。由图3可知,挤压过程中,温度较高温度区域主要集中在剪切部分。一方面是由于坯料在剪切部分为阶梯形状,使坯料在此处产生较大程度的塑性变形,变形功以热量的形式使周围温度升高,致使模具散热变慢;另一方面是由于模具的结构较为复杂,坯料和模具的接触面积较大,在摩擦力的作用下产生较多的热量。基于以上原因,坯料在流经剪切区时,温度上升较为明显;当挤压温度为330 °C、370 °C和410 °C时,板材成形过程中的最大温升分别为9 °C、7 °C和5 °C。

#### 2.1.2 挤压剪切过程板材的速度场模拟

在对坯料进行挤压-剪切加工时,保持挤压速度不变,金属的流动速度随着模具结构的改变略有不同。模拟的挤压温度为330 °C,金属流动的速度场如图4所示。由图4可知,随着挤压的进行,模具的型腔逐渐变小,金属流动速度不断加快,坯料的速度场呈现拱形;在剪切转角处,同一横截面上坯料内部的金属流动速度大于外侧,挤压-剪切过程中坯料所产生的流速差,有利于剪切应力的产生<sup>[26]</sup>。图5所示为不同挤压温度下板材的速度场分布情况。由图5可知,挤压温度为330 °C、370 °C和410 °C时,成形的板材流出模口的速度分别为13.5 mm/s、16.5 mm/s和20.3 mm/s。随着挤压温度升高,剪切区的金属流动速度不断加快。这是由于在剪切区模具的结构较为复杂,坯料与模具充分接触,在摩擦力的作用下使坯料的温度升高,进而导致镁合金坯料的流动速度加快。

#### 2.1.3 工艺参数对挤压载荷演化的影响

在板材成形过程中,载荷是在不断变化的。随着温度的升高,将坯料挤出模具所需要的最大载荷不断减小,其原因是随着温度升高,坯料内部更多的滑移系被激活,坯料塑性变形需要的变形抗力变小<sup>[27]</sup>。图6所示为板材成形过程中的载荷-行程图(摩擦因子为0.4,挤压速度为4 mm/s)。由图6可知,当挤压温度为330 °C时,对应的最大载荷约为 $7 \times 10^4$  N;当挤压温度为370 °C时,载荷最大值约为 $6.3 \times 10^4$  N;当挤压温度为410 °C时,最大载荷约为 $5.7 \times 10^4$  N。可以看出,温度较高时的最大载荷

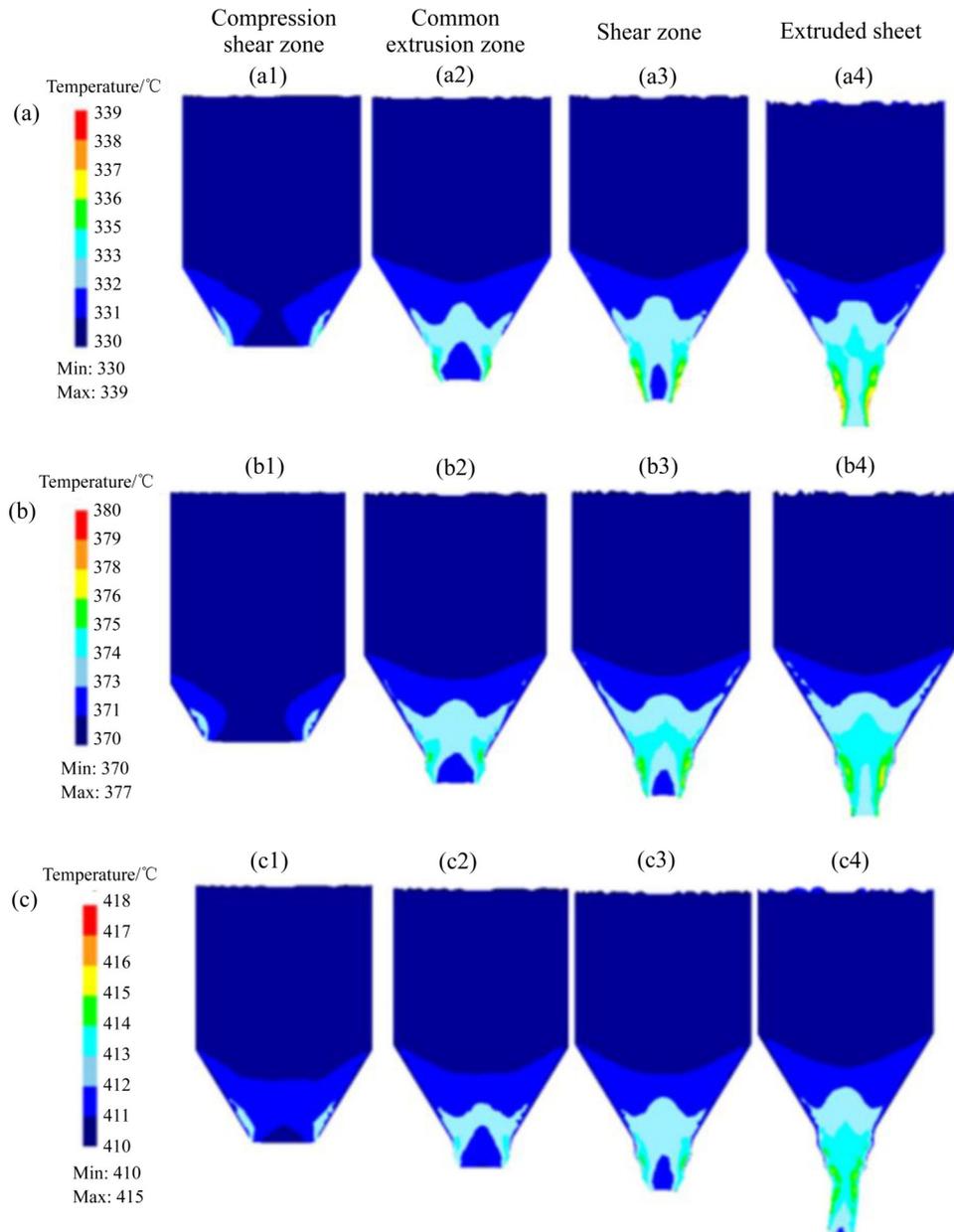


图3 不同坯料预热温度下板材的温度场分布

**Fig.3** Temperature field distribution of sheet metal at different preheating temperatures: (a) 330 °C ; (b) 370 °C ; (c) 410 °C

明显低于挤压温度较低时的最大载荷。载荷的变化趋势主要分为三个阶段, 分别是普通挤压阶段(见图6中II区)、挤压-剪切阶段(见图6中I区)、成形阶段(挤压力在一定范围内波动)。从整个载荷-行程来看, 随着坯料流经的位置不同, 载荷的变化不同, 但总体趋势相同。图6中坯料在经过II区时的流动速度趋向稳定, 所以载荷-行程近似线性关系。当坯料进入剪切区时, 图中载荷-行程曲线的斜率增大(见图6)。这是剪切模具的作用导致坯料的变

形阻力增大, 因此, 坯料变形时所需要的载荷增大。而当坯料进入定形阶段后, 载荷在一定范围内波动, 数值变化趋于稳定。

挤压温度对挤压力的影响是通过变形抗力的大小反映出来的。一般来讲, 随着变形温度的升高, 坯料的变形抗力下降, 所需的挤压力也下降。实际上, 大多数金属与合金的变形抗力随温度的升高而下降, 不能保持线性关系, 所以挤压力与温度的关系也一般为非线性关系。温度越高最大挤压力值越

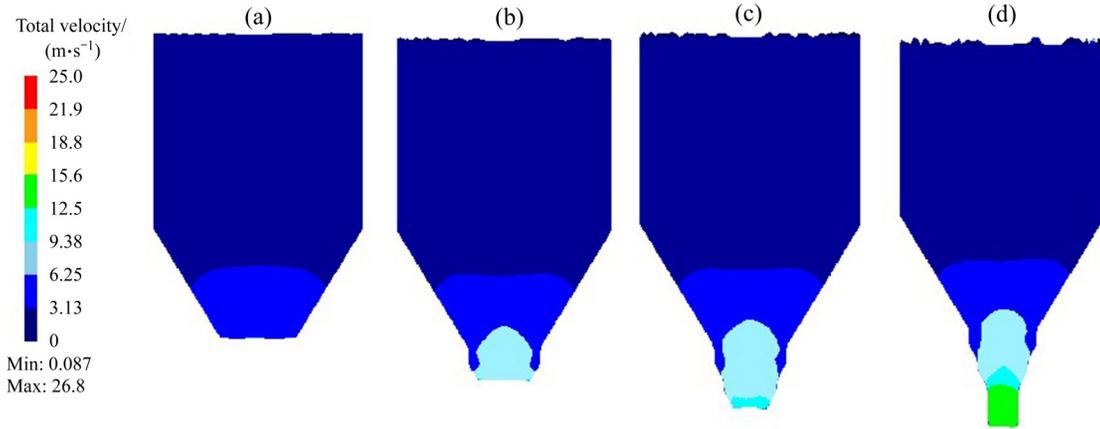


图4 挤压温度 330 °C 时挤压-剪切过程坯料的速度场演变云图

Fig.4 Evolution cloud of billet velocity fields during extrusion-shear process at extrusion temperature of 330 °C:

(a) Compression shear zone; (b) Common extrusion zone; (c) Shear zone; (d) Extruded sheet

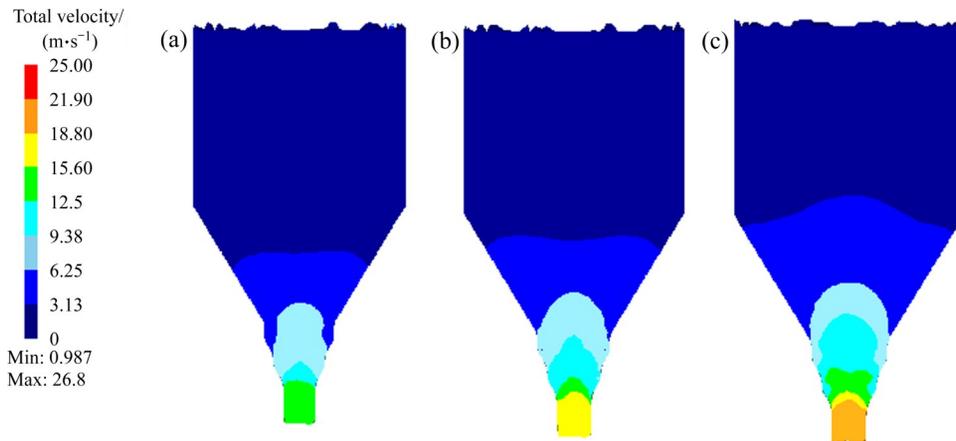


图5 不同挤压温度下挤压-剪切过程坯料的速度场演变云图

Fig. 5 Evolution cloud of billet velocities fields during extrusion-shear process at different extrusion temperatures: (a)

330 °C; (b) 370 °C; (c) 410 °C

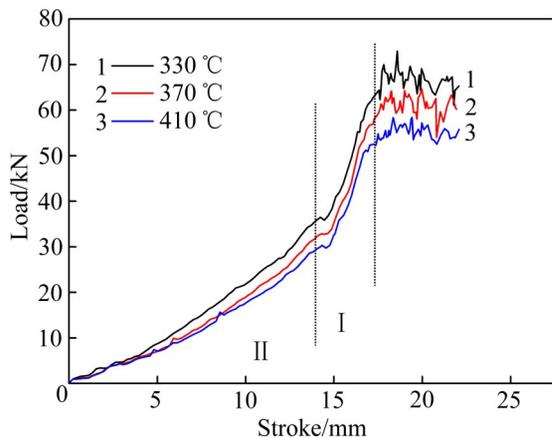


图6 不同挤压温度条件下板材挤压剪切过程的载荷-行程曲线

Fig. 6 Load - stroke curves of sheet extrusion-shearing process at different extrusion temperatures

小。370 °C 时板材挤压所需挤压力超过 6.2 t，因此在当前的设备能力 20 t 的条件下，镁合金板材是可以被挤出的。随着温度的升高，镁合金潜在的柱面以及锥面滑移系被激活，塑性变形能力增强；之后挤压力稍许下降并进入波动阶段。由于受到剪切变形及高温的影响，镁合金发生了动态再结晶；在加工硬化与动态再结晶软化共同作用下，挤压力呈现出波动变化趋势。

除了温度，摩擦因子也是影响挤压成形载荷的重要工艺参数。图 7 所示为不同摩擦因子下的载荷-行程图。由图 7 可以看出，保持其他条件不变，在挤压温度为 330 °C、摩擦因子分别为 0.4 和 0.1 时，两条载荷曲线在普通挤压阶段的变化较小，且趋势相同。此阶段影响载荷大小的因素主要是挤

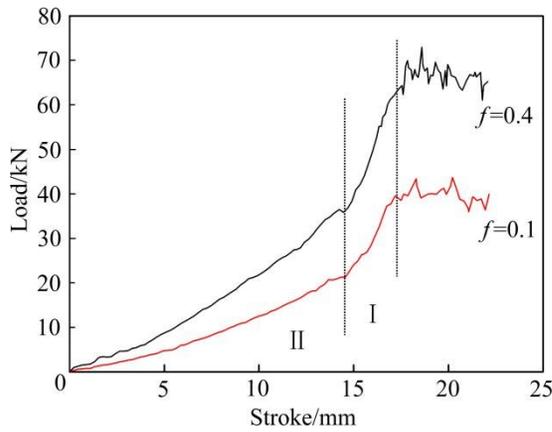


图 7 不同摩擦因子下镁合金的载荷-行程曲线  
**Fig. 7** Load - stroke curves of magnesium alloy with different friction factors

压筒的内壁和坯料之间的摩擦。当坯料进入剪切区后, 摩擦因子为 0.1 的载荷曲线上升缓慢, 最大载荷为  $4.3 \times 10^4$  N, 这是由于模具在剪切区的结构较

为复杂, 使摩擦因子对载荷的影响变大。由此可以得出, 在实验中加入润滑条件可以有效降低板材挤压-剪切成形时的最大载荷。

## 2.2 实验结果与分析

### 2.2.1 显微组织

板材成形过程中表面受剪切力作用较为明显。挤压完成后, 取出样品并冷却到室温, 按图 8(d)所示位置取样, 观察不同挤压温度下板材的显微组织。图 8(a)、(b)、(c)所示分别为挤压温度为 330 °C、370 °C 和 410 °C 时成形板材的最终显微组织, 可以看出, 挤压-剪切变形过程中发生了晶格畸变。随着挤压过程的进行, 晶格畸变不断加剧, 使再结晶的形核点增多; 经过反复动态再结晶后, 晶粒得到明显细化, 且组织均匀性较好。这说明挤压-剪切作用可对板材的组织均匀性以及晶粒细化

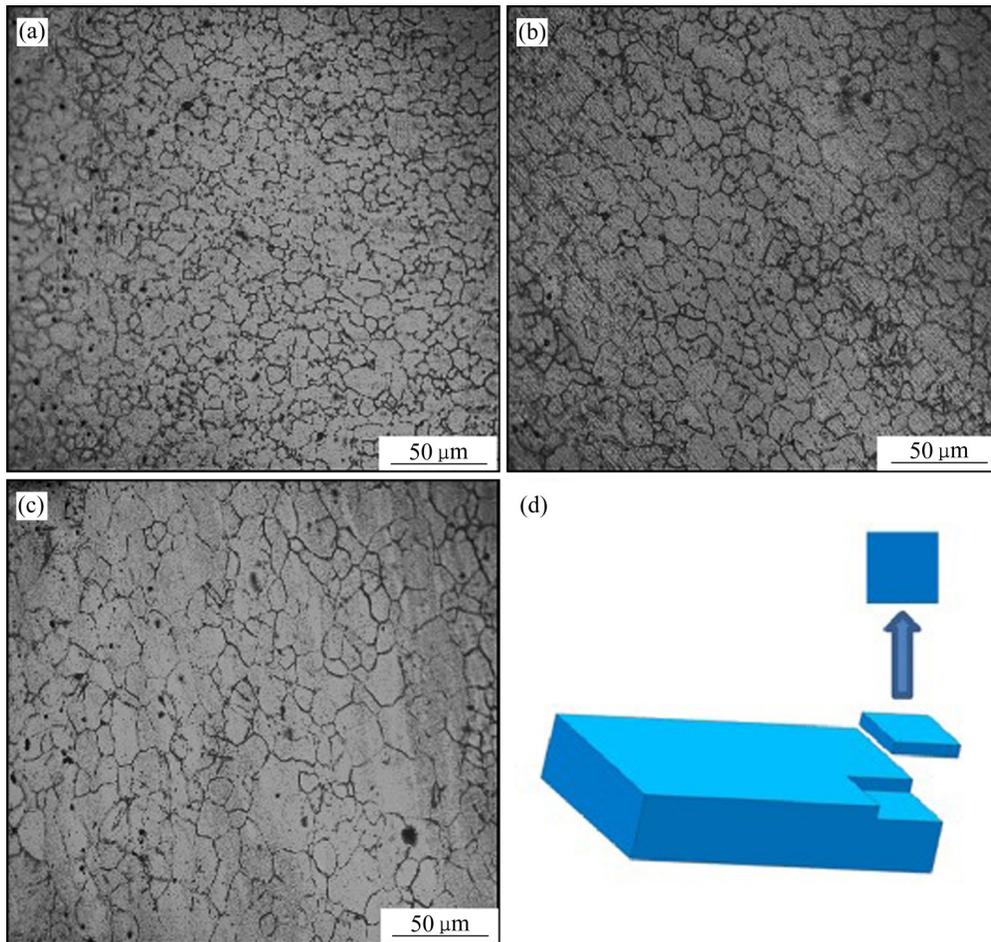


图 8 不同挤压温度下挤压剪切成形镁合金板材的显微组织  
**Fig. 8** Microstructures of magnesium alloy sheets formed by extrusion-shearing at different extrusion temperatures: (a) 330 °C; (b) 370 °C; (c) 410 °C; (d) Sampling location

程度产生较大的影响<sup>[28-32]</sup>。

图8所示为不同挤压温度下的镁合金显微组织,发现随着温度由330℃升高到410℃,镁合金的动态再结晶进行得越来越充分。当挤压温度为330℃时,原始粗大晶粒已经被破坏,垂直于压缩方向的晶界上出现了许多细小的等轴晶粒;这时镁合金组织具有动态再结晶的特征,并产生一定量的再结晶晶粒。当温度升至370℃时,金相照片中大部分位置被再结晶的晶粒占据,原始粗大晶粒较少。当温度升至410℃时,镁合金发生了完全动态再结晶,粗大的原始晶粒已经不存在,但晶粒平均尺寸变大,分布变得不均匀。说明挤压温度低能够抑制晶粒的进一步长大,且再结晶晶粒尺寸随着温度的升高不断增大。镁合金金属密排六方晶体结构,由于其缺少滑移系,在塑性变形过程中,产生大量的孪晶,并沿晶体的一边以周期性的形式大量地出现。随挤压温度的提高,晶体内的孪晶数量减少,同时,晶粒尺寸有所增加。这是因为当挤压温度较低时动态回复再结晶的速度较慢,大量的孪晶保留到室温;随着温度的升高,镁合金动态回复再结晶的速度明显加快,晶体中的孪晶数量明显减少。式(1)<sup>[33]</sup>给出了再结晶晶粒尺寸 $d$ 与Zener-Hollomon参数之间的关系。从式(1)可以看出,随着 $Z$ 参数的增加,晶粒尺寸逐渐减小。

$$\left(\frac{d}{d_0}\right)^n = 10^3 \times Z^{1/3} \quad (1)$$

图9所示为挤压温度370℃时不同挤压区域板材的显微组织。由图9(b)~(c)可以看出,晶粒得到显著细化,但不同挤压区晶粒的细化程度不同。镁合金坯料经历一次剪切后的纤维组织(见图9(b)),

部分晶粒在剪切力的作用下,发生晶格畸变,破碎重组为更小的晶粒。图9(c)所示为成形区域的板材显微组织,相较于一次剪切区域组织,其均匀性明显提高。这是因为在剪切力的作用下,晶粒不断破碎,并发生反复的动态再结晶,晶粒逐步细化。

在普通挤压区,晶粒比较粗大并且很不均匀;在一次剪切区时,晶粒变细,但是存在部分粗大晶粒,因此晶粒显得不均匀;经过第二次剪切后,等轴晶粒变得更加致密细小,而且分布均匀。由此可以得出,随着板材挤压剪切变形的进行,晶粒明显得到细化。随着变形量的增加,在变形过程中新晶粒所占体积分数越来越大,且在板材挤压-剪切变形的条件下动态再结晶分阶段连续进行,因此使晶粒得到明显细化。当应变逐渐增大时,大的塑性变形造成金属晶体结构严重畸变,为再结晶的发生提供了有利的条件,加上板材挤压剪切产生的热量,使得镁合金很容易在该条件下发生动态再结晶。再结晶时在晶格严重畸变的高能区域产生大量晶核,新的晶粒又在再结晶晶粒边界形核长大,从而促使晶粒细化。

### 2.2.2 显微硬度

为了研究挤压过程中镁合金各个阶段的硬度变化,对板材不同的区域进行硬度检测。图10所示为不同挤压温度下镁合金不同成形区域横截面的硬度分布。由图10可以看出,在同一挤压温度下,横截面的硬度呈现出先上升后减小的趋势。在整个的变形过程中,普通挤压区、第一及第二剪切区的硬度值均呈现持续上升趋势。主要原因是镁合金发生塑性变形,导致位错交割、堆积,晶粒在压应力的作用下发生破碎,并不断细化<sup>[34-35]</sup>,从而导致板

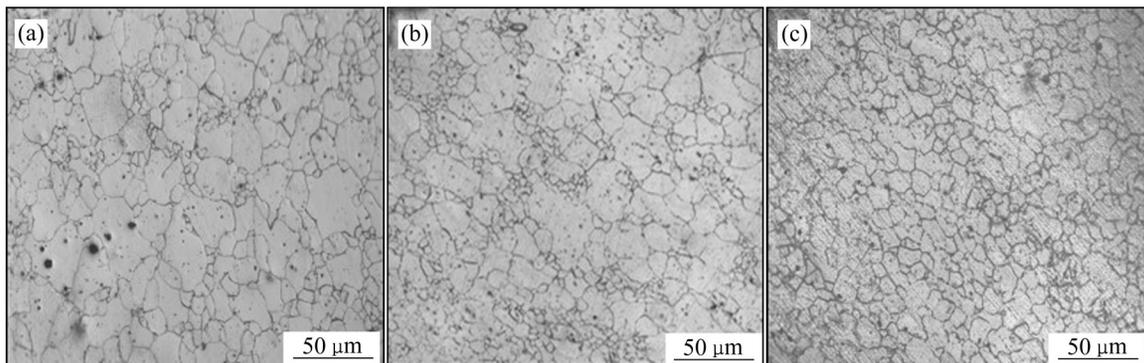


图9 挤压温度370℃时镁合金不同成形区域的显微组织

Fig. 9 Microstructures of different forming zones of magnesium alloy during extrusion-shearing process at extrusion temperature of 370 °C: (a) Ordinary direct extrusion zone; (b) Primary shearing zone; (c) Formed sheet

材的硬度值提高。挤压温度为330℃、370℃和410℃时,板材最大硬度值依次为85HV、78HV和75HV;随着温度的升高,板材的最终硬度分别为77HV、75HV和72HV。温度升高加速了镁合金坯料的再结晶,且使晶粒在一定程度上长大。在加工硬化和再结晶软化同时作用下,成形板材的硬度随着温度的升高有所下降<sup>[36]</sup>。

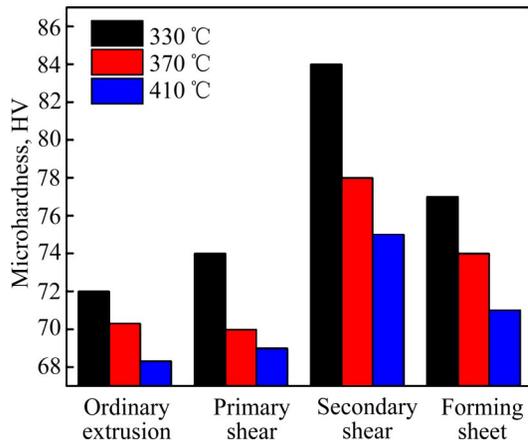


图10 不同挤压温度下不同成形区域的镁合金硬度分布  
Fig. 10 Hardness distribution diagram of different forming zones with different extrusion temperatures (Error range:  $\pm 5$  HV)

### 3 结论

1) 在板材挤压-剪切成形过程中,温度场中高温区主要集中在剪切区,且会随着挤压温度的升高而升高。坯料的内部金属流动速度大于外部,这有利于剪切力的产生,且温度升高使得坯料流出模口的速度增大。

在其他条件不变的情况下,随着挤压温度的升高,挤压-剪切的成形载荷逐渐减小。当减小坯料与模具的摩擦因子(加入润滑剂)时,坯料的成形载荷从 $7 \times 10^4$  N降低至 $4.3 \times 10^4$  N。

2) 连续挤压-剪切成形工艺对镁合金板材的晶粒细化效果较为明显,且经过剪切变形后板材的组织均匀性得到有效提升。在不同的挤压温度下,连续挤压-剪切成形工艺制备的板材的晶粒尺寸有一定差异。

3) 经过挤压-剪切变形后,板材的硬度在二次剪切区达到最大值;挤压温度为330℃、370℃和410℃时,最大硬度依次为85HV、78HV和

75HV,随着温度继续升高,镁合金板材的硬度逐渐降低,但相较于原始状态,硬度得到显著提升。

### REFERENCES

- [1] 徐仕豪,温璐,彭翔,等. 镁锂合金熔体保护和净化的研究现状与展望[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(7): 1774-1785.  
XU Shi-hao, WEN Lu, PENG Xiang, et al. Research status and prospect of Mg-Li alloys melt protection and purification[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(7): 1774-1785.
- [2] 张玉,李明,杨文龙,等. T4和T6热处理参数对Mg-12Zn-2Al镁合金组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(10): 2322-2330.  
ZHANG Yu, LI Ming, YANG Wen-long, et al. Effect of T4 and T6 heat treatment parameter on microstructure and hardness of Mg-12Zn-2Al magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(10): 2322-2330.
- [3] 宋广胜,牛嘉维,张士宏,等. 镁合金棒材扭转变形的孪晶机制[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(7): 1574-1583.  
SONG Guang-sheng, NIU Jia-wei, ZHANG Shi-hong, et al. Twinning mechanism of magnesium alloy rod torsion[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(7): 1574-1583.
- [4] 徐淑波,孙海波,刘婷,等. 模具几何形状对镁合金ECAP变形均匀性的影响[J]. 锻压装备与制造技术, 2021, 56(2): 100-105.  
XU shu-bo, SUN hai-bo, LIU ting, et al. Influence of die geometry on ECAP deformation uniformity of magnesium alloy[J]. China Metalforming Equipment and Manufacturing Technology, 2021, 56(2): 100-105.
- [5] 查敏,王思清,方圆,等. 高性能轧制镁合金研究进展[J]. 精密成形工程, 2020, 12(5): 20-27.  
ZHA Min, WANG Si-qing, FANG Yuan, et al. Advancement in research of rolled magnesium alloys with high performance[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(5): 20-27.
- [6] LI Wen-ya, LI Jin-feng, ZHANG Zhi-han, et al. Improving mechanical properties of pinless friction stir spot welded joints by eliminating hook defect[J]. Materials & Design, 2014, 62: 247-254.
- [7] BADARINARAYAN H, SHI Y, LI X, et al. Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminum 5754-O sheets[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49(11): 814-823.

- [8] 樊栋祥, 马勤. 镁合金细晶超塑性的研究进展[J]. 热加工工艺, 2019, 48(10): 47-50.  
FAN Dong-xing, MA Qing. Research progress of grain refinement superplasticity of magnesium alloy[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(10): 47-50.
- [9] 余琨, 黎文献, 王日初. 镁合金塑性变形机制[J]. 中国有色金属学报, 2005(7): 1081-1086.  
YU Kun, LI Wen-xian, WANG Ri-chu. Plastic deformation mechanism of magnesium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005(7): 1081-1086.
- [10] SIAHSARANI A, FARAJI G. Processing and characterization of AZ91 magnesium alloys via a novel severe plastic deformation method: Hydrostatic cyclic extrusion compression (HCEC)[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(5): 1303-1321.
- [11] YU Kun, LI Wen-xian, WANG Ri-chu. Plastic deformation mechanism of magnesium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(7): 1081-1086
- [12] 王敬丰, 彭星, 王奎, 等. 超大规格宽幅薄壁中空镁合金型材挤压成形的数值模拟及实验研究[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(12): 2809-2819.  
WANG Jing-feng, PENG Xing, WANG Kui, et al. Numerical simulation and experimental study on extrusion forming of ultra-large size wide thin-walled hollow magnesium alloy profiles[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(12): 2809-2819.
- [13] 张坤敏, 敬学锐, 何雄江川, 等. Mn对Mg-4Zn变形镁合金组织与性能的影响[J]. 精密成形工程, 2020, 12(5): 46-52.  
ZHANG Kun-min, JING Xue-rui, HE Xiong-jiang-chuan, et al. Effect of Mn on microstructure and properties of Mg-4Zn wrought magnesium alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(5): 46-52.
- [14] 郭丽丽, 郭浩然, 汪建强, 等. 轧制工艺对连续挤压AZ31镁合金板材成形性的影响[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(7): 56-63.  
GUO Li-li, GUO Hao-ran, WANG Jian-qiang, et al. Influence of rolling process on formability of continuously extruded AZ31 magnesium alloy sheets[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(7): 56-63.
- [15] ZHANG H M, CHENG X M, ZHA M, et al. A superplastic bimodal grain-structured Mg-9Al-1Zn alloy processed by short-process hard-plate rolling[J]. Materialia, 2019, 8: 100433
- [16] 梁书锦, 王欣, 刘祖岩, 等. AZ31镁合金不同温度挤压后组织性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(7): 1276-1279.  
LIANG Shu-jin, WANG Xin, LIU Zu-yan, et al. Mechanical properties of AZ31 Mg alloy extruded at different die temperatures[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(7): 1276-1279.
- [17] 胡波, 李德江, 李子昕, 等. 铸造镁合金热裂行为的研究进展[J]. 精密成形工程, 2020, 12(5): 1-19.  
HU Bo, LI De-jiang, LI Zi-xin, et al. Research progress on hot tearing behavior of cast magnesium alloys[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(5): 1-19.
- [18] 孔晶, 侯文婷, 彭勇辉, 等. T型通道挤压变形ZK60镁合金的组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(6): 1199-1204.  
KONG Jing, HOU Wen-ting, PENG Yong-hui, et al. Microstructure and mechanical properties of ZK60 magnesium alloy processed by T-shape channel pressing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(6): 1199-1204.
- [19] 于彦东, 周浩. MB15合金等通道转角挤压组织模拟和实验分析[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(2): 296-302.  
YU Yan-dong, ZHOU Hao. Simulation and experiment analysis of grain structure of MB15 alloy prepared by equal-channel angular pressing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(2): 296-302.
- [20] 杨牧轩, 张华, 王利飞, 等. AZ31镁合金挤压板材的显微组织与力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(17): 18-22.  
YANG Mu-xuan, ZHANG Hua, WANG Li-fei, et al. Study on microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy extruded sheet[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(17): 18-22
- [21] 王忠堂, 张宏亮, 王明浩, 等. 挤压态镁合金板材复合变形过程中的孪晶组织演变规律[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(2): 37-42.  
WNAG Zhong-tang, ZHANG Hong-liang, WANG Ming-hao, et al. Evolution of twin structure in the process of compound deformation of as-extruded magnesium alloy sheet[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41(2): 37-42.
- [22] 尹振入, 卢立伟, 盛坤, 等. 正挤压-扭转变形镁合金的组织热稳定性[J]. 金属热处理, 2017, 42(10): 227-231.  
YIN Zhen-ru, LU Li-wei, SHENG Kun, et al. Microstructural thermal stability of forward extrusion and torional deformed magnesium alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(10): 227-231.
- [23] 胡忠举, 刘雁峰, 卢立伟, 等. 镁合金正挤压-弯曲剪切复合连续变形工艺及挤压力计算[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(5): 923-930.  
HU Zhong-ju, LIU Yan-feng, LU Li-wei, et al. Continuous deformation technology and extrusion load calculation of Mg

- alloys fabricated by direct extrusion and bending shear deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(5): 923-930.
- [24] WANG Bo-ning, WANG Feng, WANG Zhi, et al. Fabrication of fine-grained, high strength and toughness Mg alloy by extrusion-shearing process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(3): 666-678.
- [25] YAN L, ZHANG Z, LI G, et al. Evolution of the microstructure, texture and mechanical properties of ZK60 alloy during processing by rotating shear extrusion[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 877(3): 160229.
- [26] 黄宣彬, 吴志林, 袁人枢, 等. AZ80 镁合金扩管静液挤压成形的数值模拟与试验[J]. 热加工工艺, 2017, 46(11): 102-106.
- HUANG Xuan-bin, WU Zhi-lin, YUAN Ren-shu, et al. Numerical simulation and experiment of tube-expanding hydrostatic extrusion forming of AZ80 magnesium alloy[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(11): 102-106.
- [27] 何宜柱, 雷廷权, 吴惠英, 等. 动态再结晶晶粒尺寸同 Zener-Holloman 参数间的理论模型[J]. 华东冶金学院学报, 1995, 12(2): 139-145.
- HE Yi-zhu, LEI Ting-qun, WU Hui-ying, et al. Dependence of dynamically recrystallized grain size with Zener - Holloman parameter[J]. Journal of East China Institute of Metallurgy, 1995, 12(2): 139-145.
- [28] Önder AYER. A forming load analysis for extrusion process of AZ31 magnesium[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(4): 741-753.
- [29] 王凌浩, 杨 斌, 伍先明, 等. 变形参数对挤压态 AZ41M 镁合金热变形行为和组织演变的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(1): 50-57.
- WANG Ling-hao, YANG Bin, WU Xian-ming, et al. Effect of deformation parameters on thermal deformation behavior and microstructure evolution of extruded AZ41M magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 42(1): 50-57.
- [30] 王翠菊, 孙雪飞, 聂凯波, 等. 热挤压对双尺度  $\text{SiC}_p/\text{AZ91}$  镁基复合材料显微组织与拉伸性能的影响[J]. 精密成形工程, 2021, 13(3): 70-76.
- WANG Cui-ju, SUN Xue-fei, NIE Kai-bo, et al. Microstructure and tensile properties of bimodal size  $\text{SiC}_p/\text{AZ91}$  magnesium-based composite influenced by hot extrusion[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(3): 70-76.
- [31] 卢立伟, 赵 俊, 陈胜泉, 等. 镁合金正挤压-扭转变形的数值模拟与实验研究[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(9): 2350-2357.
- LU Li-wei, ZHAO Jun, CHEN Sheng-jun, et al. Numerical simulation and experimental research of AZ31 Mg alloys processed by direct extrusion and torsional deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(9): 2350-2357.
- [32] BNWA B, FENG, W, ZHI W, et al. Fabrication of fine-grained, high strength and toughness mg alloy by extrusion shearing process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(3): 666-678.
- [33] MA Y Z, WANG D X, LI H X, et al. Microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of quaternary  $\text{Mg}_1\text{Zn}_{0.2}\text{Ca}_x\text{Ag}$  alloy wires applied as degradable anastomotic nails[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(1): 111-124.
- [34] ZHANG Jia-ying, ZUO Li-jie, FENG Jian, et al. Effect of thermal exposure on microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu-Ni-Mg alloy produced by different casting technologies[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(7): 1717-1730.
- [35] FAN Cai-he, OU Ling, HU Ze-yi, et al. Effect of rapid cold stamping on fracture behavior of long strip  $S'$  phase in Al-Cu-Mg alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(10): 2590-2598.
- [36] 干松林. AZ31 镁合金/6063 铝合金复合板材挤压-剪切成形及组织性能研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2022.
- GAN Song-lin. Study on extrusion-shear forming and microstructure and properties of AZ31 magnesium alloy/6063 aluminum alloy composite plate[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2022.

## Numerical simulation and experimental study on continuous extrusion-shear forming of AZ31 magnesium alloy sheets

GAN Song-lin<sup>1</sup>, HU Hong-jun<sup>1</sup>, ZHANG Hui-ling<sup>1</sup>, YUAN Ting<sup>1</sup>, ZENG Chao-wei<sup>1</sup>,  
ZHAO Jian-xing<sup>1</sup>, ZHANG Ding-fei<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University of Technology,  
Chongqing 400050, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** In order to improve the mechanical properties of AZ31 magnesium alloy sheet, the extrusion-shear composite deformation process was proposed by combining the characteristics of direct extrusion and continuous shearing. The extrusion-shear forming process of sheet was simulated by DEFORM-3D software. The plastic deformation mechanism was explored, and the evolution laws of temperature fields, velocity fields and forming loads during the forming process were studied. The results show that the larger temperature rise is mainly concentrated in the shearing zone during forming process, and the value of temperature rise is about 6 °C. With the increase of temperatures, the forming load decreases gradually, and flow velocities of metal quickens, and internal flow velocities are obviously higher than those of outside. The microstructures of sheets are refined obviously after extrusion-shear forming process. With the increase of temperature, the grains grow gradually. The hardnesses of sheet surfaces prepared by extrusion-shear forming process increase obviously. When the extrusion temperatures are 330 °C, 370 °C and 410 °C, the hardnesses of the formed sheets are 77 HV, 74 HV and 72 HV, respectively. The extrusion-shear process is a new sheet forming process, which refines the grain sizes of sheets and improves the mechanical properties of sheets.

**Key words:** magnesium alloy; sheet; numerical simulation; extrusion-shear plate; mechanical property

**Foundation item:** Projects(52071042, 51771038) supported by the General Project of National Natural Science Foundation of China in published papers of 2022; Project(cqyc202003047) supported by the Talent Project of Chongqing.

**Received date:** 2021-09-30; **Accepted date:** 2021-10-25

**Corresponding author:** HU Hong-jun; Tel: +86-18996100916; E-mail: hhj@cqut.edu.cn

(编辑 龙怀中)