



挤压-剪切薄壁中空镁合金型材成形过程 物理场及微观组织

田野¹, 胡红军¹, 干松林¹, 张丁非², 戴庆伟³, 欧忠文⁴

- (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;
3. 重庆科技学院 冶金与材料学院, 重庆 401331;
4. 陆军勤务学院 化学与材料学院, 重庆 401311)

摘要: 为研究镁合金圆管挤压成形薄壁中空方管的可行性及其性能, 本文通过挤压-剪切复合成形工艺将AZ31镁合金圆管坯料直接制备成厚度为2 mm的薄壁中空方形管材。结合DEFORM-3D软件对不同温度下镁合金方管成形过程中成形载荷、挤压速度、等效应变等进行了数值模拟。结果表明: 温度的大小影响成形载荷的分布, 合适的成形速度与温度有利于镁合金方管的成形。通过挤压-剪切复合工艺可直接一道次成形薄壁中空方管, 且成形方管的晶粒尺寸得到有效细化; 在400 °C下成形方管的屈服强度约为230 MPa, 伸长率约为20%, 断裂方式为准解理断裂; 在动态再结晶和较大的剪切作用下, 成形方管的基面织构分散程度较高, 强度明显弱化, 其综合性能得到提高。在挤压-剪切复合成形过程中, 可以通过降低变形速度和提高变形温度来获得良好性能的镁合金方管。

关键词: 镁合金; 薄壁中空型材; 挤压剪切; 数值模拟

文章编号: 1004-0609(2022)-09-2533-12

中图分类号: TG146.22

文献标志码: A

引文格式: 田野, 胡红军, 干松林, 等. 挤压-剪切薄壁中空镁合金型材成形过程物理场及微观组织[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(9): 2533-2544. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42290

TIAN Ye, HU Hong-jun, GAN Song-lin, et al. Physical field and microstructure of extrusion-shear thin-walled hollow magnesium alloy profiles during forming[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(9): 2533-2544. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42290

镁合金具有低密度、高比强度、高比刚度、良好导热性和优良的机械加工性能等特点, 在交通运输、航空航天、计算机通讯和电子产品等行业具有广泛的应用前景^[1-4]。然而镁合金由于其独特的密排六方(HCP)晶体结构, 在室温下塑性较差^[5]。通常采用二次加工工艺改善其塑形能力。镁合金常见的二次加工工艺有挤压^[6-7]、轧制^[8-10]和锻造^[11-12]

等。然而, 镁合金常见的二次加工工艺成形制品多为圆坯型材或板材, 不能满足中空方形型材的应用。随着镁合金产业的扩大与应用, 市场对薄壁中空方形镁合金型材的需求也日益增加, 对薄壁中空镁合金型材的壁厚要求以及性能也越来越高。薄壁中空镁合金型材具有省材、质轻等优点, 新型的薄壁中空镁合金型材挤压成形技术的研究开发将会成

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52071042, 51771038); 重庆英才项目(CQYC202003047); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2018JCYJAX0249, CSTC2018JCYJAX0653)

收稿日期: 2021-09-08; **修订日期:** 2021-11-10

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

为新的研究趋势。在现阶段的镁合金薄壁中空方管成形工艺中,一些研究者进行了大量深入的研究。结合数值模拟技术来优化薄壁中空管材成形工艺,致力于工艺参数对于薄壁中空镁合金成形的优化,其中应力应变、温度、摩擦因数等参数是主要是研究热点。郭丽丽等^[13]运用 Hyper Xtrude 软件对 ZK60 镁合金中空型材挤压过程进行有限元数值模拟,得到了型材断面的温度场、速度场、位移场及应变场。实验发现出口型材温度和速度呈平面对称分布,从型腔到挤压模具出口,温度呈梯段式下降。顶面的晶粒最大,底边拐角处晶粒尺寸最细小,由于型材断面各位置的温度、速度和应变不同导致动态再结晶程度不同。赵国群等^[14]采用基于 ALE 算法的 Hyper Xtrude 软件针对某一复杂薄壁空心型材的挤压过程进行数值模拟,分析模具型腔内材料的流动规律及成形机理;根据初始模具设计的不足,提出在下模开设二级焊合室和增设阻流坎两种优化设计方案,有效地解决了初始模具设计中速度分布不均的问题。孙颖迪等^[15]通过 DEFORM-3D 实验模拟研究方管成形过程中流速分布问题,通过优化模型制备出质量合格的镁合金方管。林涛等^[16]采用数值模拟分析了方钢管壁凹陷的原因,并采用中间加强筋使得金属流速均匀从而改善了方管的成形缺陷问题。马俊等^[17]研究不同焊合位置对 ZK60 镁合金方管分流挤压过程的影响规律,并进行了有限元仿真分析和实验研究;实验结果表明焊缝位于边中间可有效降低载荷,使得型材挤压更省力,有助于细化金属晶粒和提高 ZK60 镁合金方管的焊缝质量以及型材整体的力学性能。一般情况下型材的壁厚与模具的上下模配合间隙存在较大的差异,导致壁厚误差较大,模具的使用寿命短^[18]。目前,大多数的中空型材成形都是基于数值模拟及挤压焊合,对于直接挤压成形薄壁中空方管的实验研究较少。基于此,人们提出了如何将现有的圆管坯料直接加工为薄壁中空方管的研究。在薄壁中空方形镁合金成形过程中存在着以下的难点:一方面,成形方管的壁厚越小,对应横截面的稳定临界应力就越小,方管就容易出现管壁向内凹陷;另一方面,镁合金的原始坯料一般为圆坯型材,想要采用圆坯制备空心方形型材,对于模具的设计难度大。此外,

制备得到薄壁中空方形镁合金的力学性能能否得到有效提升,是否满足基本的使用要求等也是需要考虑的因素。

本研究将正挤压和连续剪切(两次剪切)相结合,即将普通正挤压与等通道挤压相结合的复合成形方法来开展镁合金薄壁方管的塑性成形加工,开发了挤压-剪切复合成形工艺。采用该工艺成功将镁合金圆管坯加工成形为镁合金薄壁薄壁中空方管。本文结合 DEFORM-3D 软件模拟分析了镁合金挤压方管成形过程中等效应变,挤压速度等的演变,并分析了成形过程中镁合金管材在不同区域的力学性能以及织构强度变化。

1 实验

1.1 实验材料

实验材料为商用 AZ31 镁合金,其化学成分如表 1 所示。将镁合金坯料制成内径 16.5 mm、外径 39.8 mm、长度为 80 mm 的圆管坯试样。在进行方管成形实验前,将坯料在 300 °C 下退火 12 h,将所制备的坯料放入如图 2 所示的模具中。进行方管挤压实验前,先将模具整体加热至低于挤压温度 20 °C。挤压实验在力鑫液压机上开展,挤压变形温度分别为 340 °C、370 °C、400 °C,采用热电偶对模具温度进行温度动态测量,挤压实验前将镁合金管材进行表面打磨和超声清洗,以去除表面杂质和表面氧化物。图 1 所示为挤压加热设备和初始圆管坯镁合金。基于本课题组先前的实验得到 AZ31 的本构方程如下所示^[19]:

$$\sigma = 47.62 \ln \{ (0.77 \times 10^{-11} \cdot Z)^{0.2} + [(0.77 \times 10^{-11} \cdot Z)^{0.4} + 1]^{0.5} \}$$

表 1 AZ31 镁合金化学成分

Table 1 Chemical composition of AZ31 magnesium alloy (mass fraction, %)

Al	Fe	Mn	Zn	Cu	Si	Mg
3.2	0.05	0.8	0.63	0.01	0.05	Bal.

1.2 有限元模型

图 2 所示为镁合金圆坯挤压方管成形的三维有限元模型,其中模具主要由五个部分组成,即挤压

杆、挤压筒、凹模、芯轴及底座。将挤压杆、挤压筒、芯轴和底座定义为刚形体,其中模具、芯轴、挤压杆为主动件,坯料为从动件^[20]。数值模拟参数如表2所示。凹模主要包括三个部分,第一部分为墩粗变形区;第二部分为转换区;第三部分为挤压剪切区。转换区上部分为圆棱台底,下部分为空心正方体,芯轴为正方体实体,如图2所示,通过定径减壁,在该区域可以将镁合金圆管坯通过模具结构变化转变为镁合金方形管材。在挤压剪切区,镁合金方管通过凹模与芯轴相互配合进一步成形,其中 $d_1=40\text{ mm}$ 、 $d_2=20\text{ mm}$ 、 $d_3=26\text{ mm}$,剪切转角角

度为 150° ,ED为挤压方向,ND方向与挤压方向垂直。

图3所示为薄壁中空方管成形示意图、拉伸试样图和微观组织观察取样示意图。将挤压实验所得薄壁中空方管镁合金试样用金相显微镜观察其显微组织结构,其取样示意图如图3(e)和(f)所示,将样品分别用400#、600#、800#、1000#和1200#砂纸打磨至光滑,再用苦味酸腐蚀液(苦味酸+冰乙酸+乙醇)进行表面腐蚀。将成形方管进行拉伸断口分析,将成形管材制备为图3(c)所示的拉伸样。拉伸试验在MTS万能拉伸机上进行,拉伸速度为 1 mm/min 。

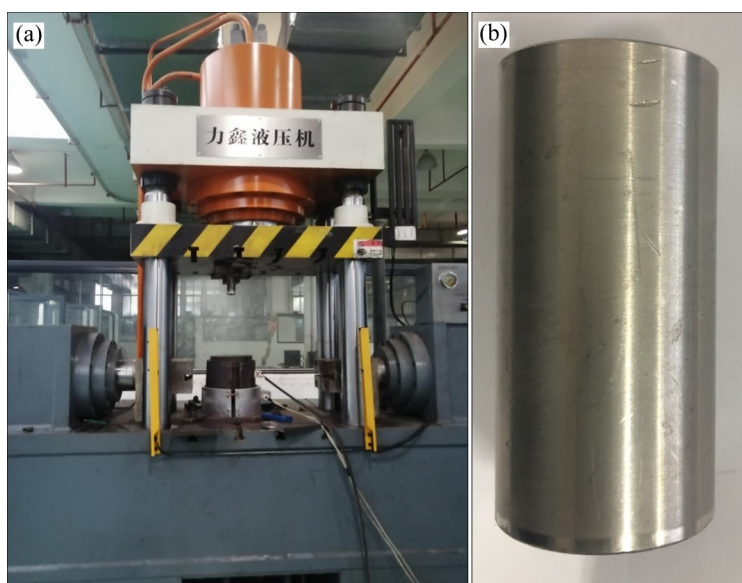


图1 挤压加热设备和初始圆管坯镁合金

Fig.1 Extrusion heating equipment and initial round tube billet magnesium alloy

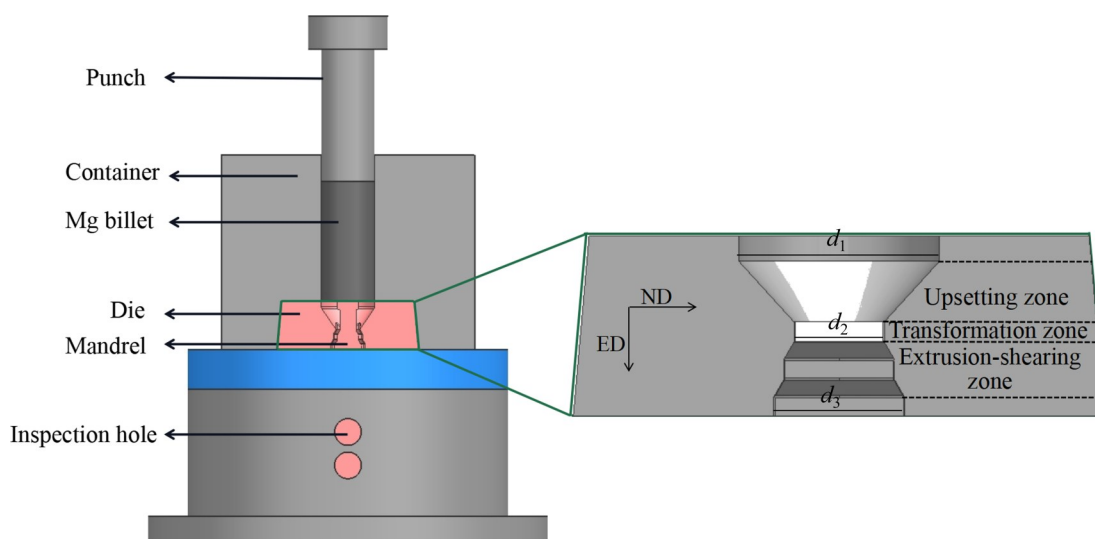


图2 方管成形有限元模拟及局部放大示意图

Fig. 2 Schematic diagram of finite element simulation and local amplification of square tube forming

表2 数值模拟参数

Table 2 Parameters of numerical simulation

Parameter	Value
Billet length/mm	80
Billet outer diameter/mm	39.8
Billet of internal diameter/mm	16.5
Extrusion temperature/°C	340, 370, 400
d_1 /mm	40
d_2 /mm	20
d_3 /mm	26
Extrusion velocity/(mm·s ⁻¹)	5, 15
Coefficient of linear expansion/°C ⁻¹	26.8×10^{-6}
Friction coefficient	0.2
Thermal conductivity between billet and die/(N·°C ⁻¹ ·S ⁻¹ ·mm ⁻²)	11
Diameter of extrusion container/mm	40
Number of mesh	32000
Simulation type	Lagrangian incremental

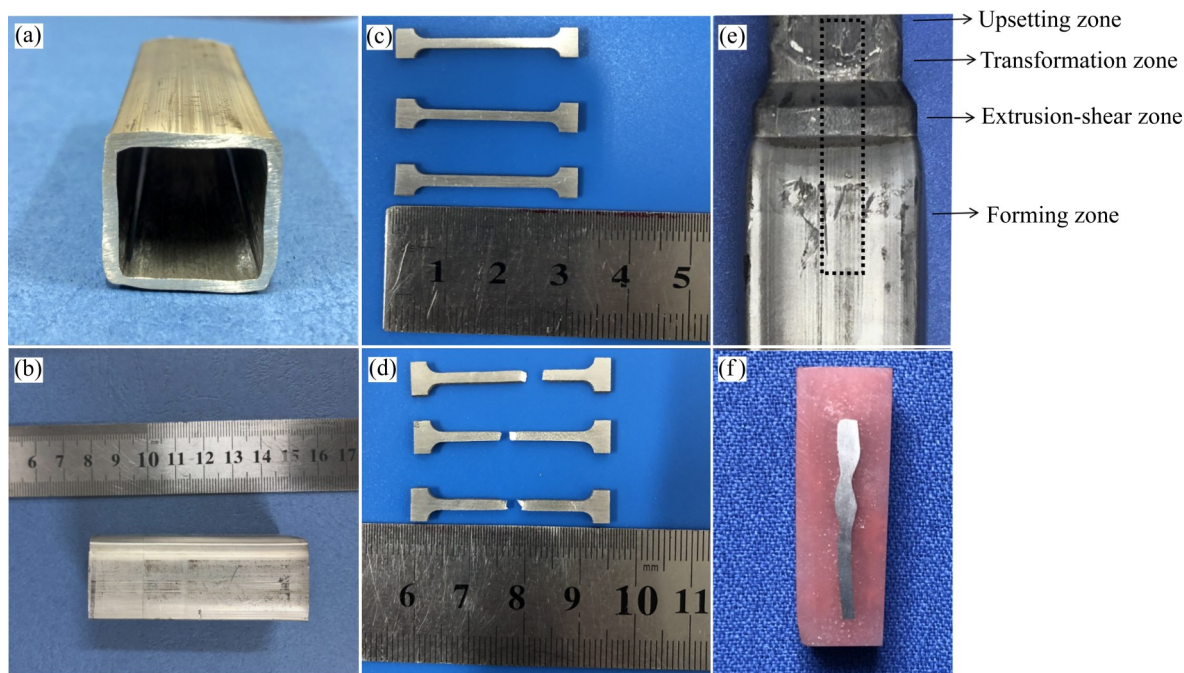


图3 成形的镁合金方管及拉伸试样照片

Fig. 3 Photos of magnesium alloy square tube and tensile samples: (a) Cross section of square tube sample; (b) Longitudinal section of square tube sample; (c) Tensile sample; (d) Tensile fracture specimen; (e) Forming thin-walled tube; (f) Observation position of microstructure

2 实验结果与分析

2.1 薄壁中空方管挤压-剪切成形演变

图4所示为370 °C时镁合金圆管坯挤压为方管的挤压-剪切成形过程及网格变化。由图4可以看

出，薄壁中空方管的成形主要是由于模具的变化而得到，在挤压杆的作用下圆管坯料经过墩粗阶段，转换阶段和挤压剪切成形阶段而得到薄壁中空方管镁合金。在方管成形过程中壁厚均匀，形状规则且成形方管无曲折，褶皱等现象，成形质量良好。由图4可知，在成形过程中坯料发生强烈的塑性变

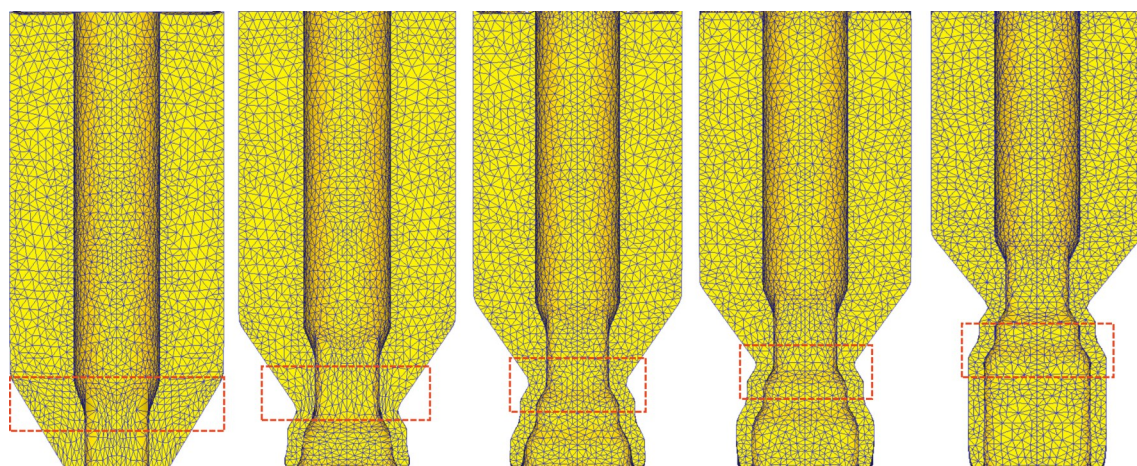


图4 圆管坯挤压为方管的挤压-剪切成形过程及网格变化

Fig. 4 Extrusion-shear forming process and flow grids change of round tube billet extruded into square tube

形,坯料网格连续变化,在坯料上方发生墩粗塑形变形,网格相对均匀且畸变不明显,网格呈现明显的均匀三角形;在转换阶段和挤压剪切阶段,坯料受到强烈的三向应力使网格不断发生畸变,网格畸变越大,所呈现的网格大小及形状越不均匀。在模拟过程中,网格的畸变会影响模拟成形的难易程度,大的畸变会使网格不断细化,从而加大了模拟成形的难度。由模拟可知,在实际试验中,网格剧烈畸变处会产生大的塑性变形,尤其在圆坯到方管成形转变过程中,会使得薄壁中空镁合金型材成形变得困难。畸变网格如图4红色矩形线框所示。

2.2 不同温度下成形载荷演变

图5所示为不同坯料预热温度下挤压-剪切成形过程中成形载荷演变。模具结构及坯料预热温度对载荷演变会产生影响,在方管成形前期坯料外径与凹模内径存在一定的间隙,坯料在挤压杆的作用下向下运动,几乎没有发生塑性变形,坯料与模具之间几乎没有接触,因此在前期成形载荷几乎为零;在坯料进入墩粗阶段,坯料发生塑性变形,需要克服镁合金变形抗力,以及坯料与凹模、坯料与芯轴之间的摩擦力;随着挤压杆持续向下移动,当坯料通过墩粗区进入转换区时,由于发生较大的塑性变形,变形抗力增加,同时坯料会发生反挤压,与墩粗阶段相比,载荷增加更加明显;圆管坯到方管的转化完成后,成形载荷进入稳定塑性变形阶段,载荷呈现稳定的上下波动变化。从图5中可以看出,成形温度对载荷有着重要的影响,温度越高

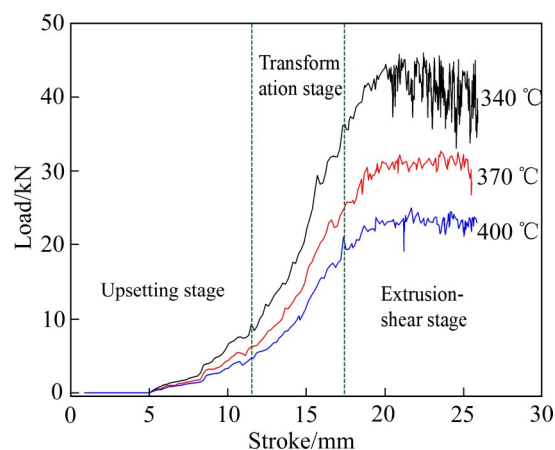


图5 不同坯料预热温度下挤压-剪切成形过程成形载荷演变

Fig. 5 Forming load evolution of extrusion-shear forming process at different preheating temperatures

所需要的载荷越低,坯料的流动性越好,易于薄壁型材的成形。当温度由340 °C上升到400 °C时,成形载荷约减小了50%。

2.3 不同挤压速度下的等效应变

挤压速度对于坯料成形具有显著作用,相同温度下挤压速度越大,坯料成形越快,出口流速越大,增大挤压速度导致塑性变形更为迅速剧烈,而导致更为显著的热效应^[21]。在方管成形过程中挤压速度大小影响着方管的成形质量,速度过大会造成管材内壁凹陷、管壁破裂等缺陷。图6所示为挤压速度5 mm/s、15 mm/s时对坯料等效应变演变的影响。由图6可知,在成形过程中挤压剪切变形区应

变最大,当挤压速度为15mm/s时,最大的应变值约为6.5;当挤压速度为5 mm/s时,最大的应变值约为3.5;在方管成形过程中,方管直角位置如图黑色圆圈所示,由于在凹模与芯轴的共同作用下容易产生应力集中,因此产生较大的应变。同时,坯料顶部与挤压杆之间存在反挤现象,也会产生较大的应变量。在挤压-剪切区,由于坯料内外侧存在流速差,会促进剪切应变的形成^[22]。

2.4 坯料在不同阶段的显微组织结构

沿挤压方向对方管成形过程中不同阶段进行了显微组织结构观察和分析。图7所示为坯料预热温度为400℃时圆管坯到方管成形不同区域的显微组织结构。图7(a)所示为墩粗变形阶段的镁合金的显微组织,在该区域,坯料在挤压杆的作用下发生墩粗变形,部分晶粒在应力作用下发生破碎,仍存在

大尺寸晶粒,在部分大晶粒晶界处存在细小均匀的小尺寸晶粒。小尺寸晶粒的形成由于在一定温度下由于镁合金的晶体特性,在晶界处发生动态再结晶^[23-27]。图7(b)所示为坯料在一次剪切区的显微组织结构。在经过挤压-剪切后,在模具和芯轴的共同作用下,在挤压-剪切区形成强的剪切应力,累计应变量增大,再结晶程度增加,晶粒进一步发生了细化,粗大晶粒的占比明显下降,存在更多的细小的晶粒。图7(c)所示为二次剪切区的显微组织,在较大的塑性变形和较大的应变作用下,减小粗大晶粒尺寸的同时进一步促进了再结晶的进行,在粗大晶粒晶界周围形成更多的再结晶晶粒,显微组织进一步细化。随着挤压的继续,再结晶晶粒逐渐增多,大晶粒所占的面积比例越来越小,再结晶晶粒逐渐占据粗大晶粒的位置^[28]。图7(d)所示为成形方管的显微组织结构,为均匀的等轴晶粒。在两次挤

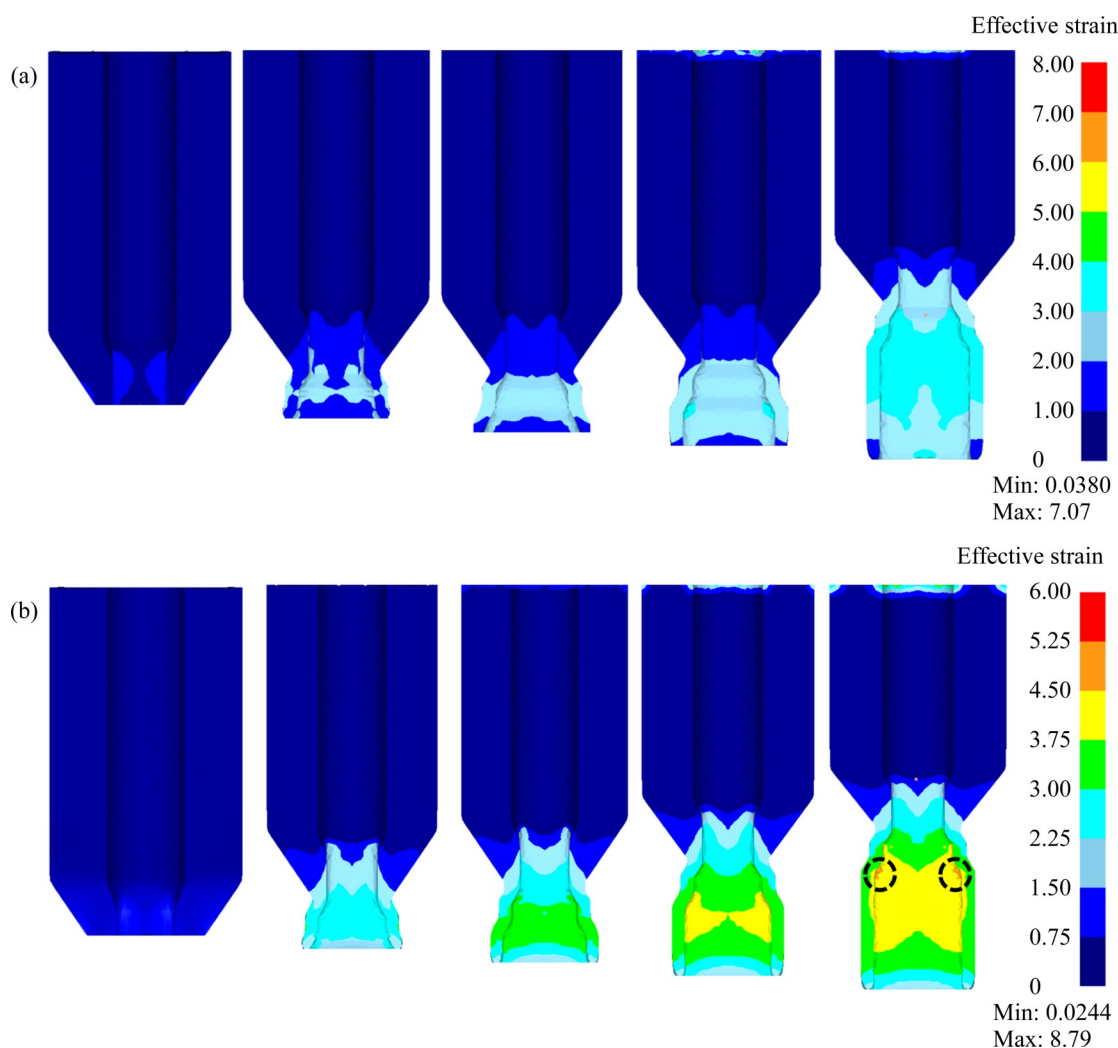


图6 挤压速度对坯料等效应变演变的影响

Fig. 6 Effect of extrusion speed on equivalent strain evolution of billet: (a) 5 mm/s; (b) 15 mm/s

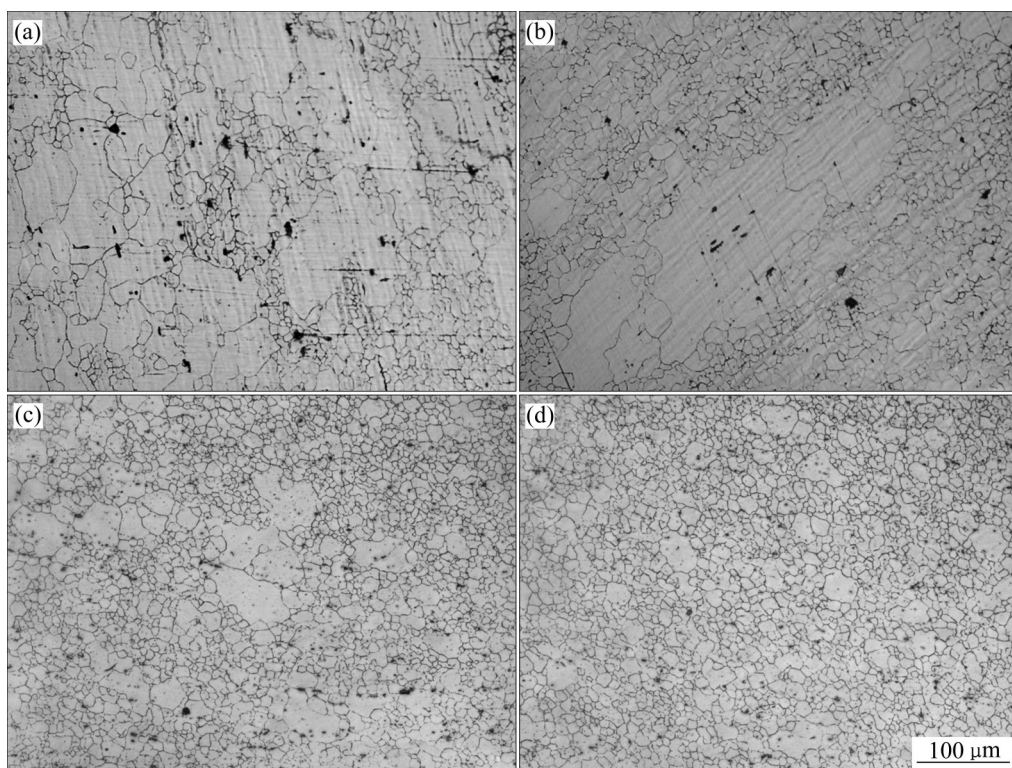


图7 挤压-剪切过程坯料在不同成形区的显微组织

Fig. 7 Microstructures of billets in different forming regions during extrusion-shearing process: (a) Upsetting region; (b) First extrusion-shearing deformation region; (c) Second extrusion-shearing deformation region; (d) Forming square tube region

压剪切作用下促使晶粒细化, 呈现为均匀的等轴晶, 该温度下部分再结晶晶粒形核长大, 同时存在一些再结晶变形晶粒。实验表明, 经过挤压-剪切成形后晶粒得到明显细化。

2.5 不同温度下镁合金方管织构演变

图8所示为不同挤压温度下的镁合金方管的宏观织构, 其中RD平行于ED。由图8可知, 在方管挤压成形过程中形成较强(0002)基面织构, 当挤压温度为340℃时, 其最大极密度值为24.7; 当挤压温度为370℃时, 其最大极密度值为23.9; 当挤压温度为400℃时, 其最大极密度值为19.9。由此可知, 在方管挤压剪切成形过程中, 挤压温度越高, 其织构强度越低, 当挤压温度为400℃时, 其(0002)基面织构沿ED方向发生明显偏转, 其分散程度较高, 极图变得相对弥散。一方面坯料在成形过程中经过挤压剪切阶段, 在该阶段拥有较大的剪切应力, 部分晶粒的取向会发生转变; 另一方面, 随着温度的增加, 镁合金开启更多的滑移系, 其

晶粒的取向发生转变, 同时高温和累计应变条件下, 镁合金发生动态再结晶, 新形核的晶粒的取向也会发生偏转。

2.6 力学性能

三种不同温度条件下薄壁中空镁合金型材的应力-应变曲线如图9所示。由图9可知, 在不同温度下, 薄壁中空型材的屈服强度与抗拉强度相差不多。然而, 在400℃的薄壁空心方形管材的伸长率(约20%)要明显高于370℃的伸长率(17.5%)和340℃的伸长率(约16%), 表明温度越高, 空心型材的伸长率越高。这可能是由于在挤压-剪切变形过程中, 温度越高, 镁合金发生动态再结晶的程度越高, 其晶粒更加细化; 同时, 由图8可知, 在挤压剪切过程中温度越高, 极密度值越小, 所形成的基面织构也更加分散。以上原因都可以提高成形空心型材的力学性能。薄壁空心型材在340℃下的伸长率约为16%, 仍高于普通挤压状态的AZ31镁合金平均水平^[29]。

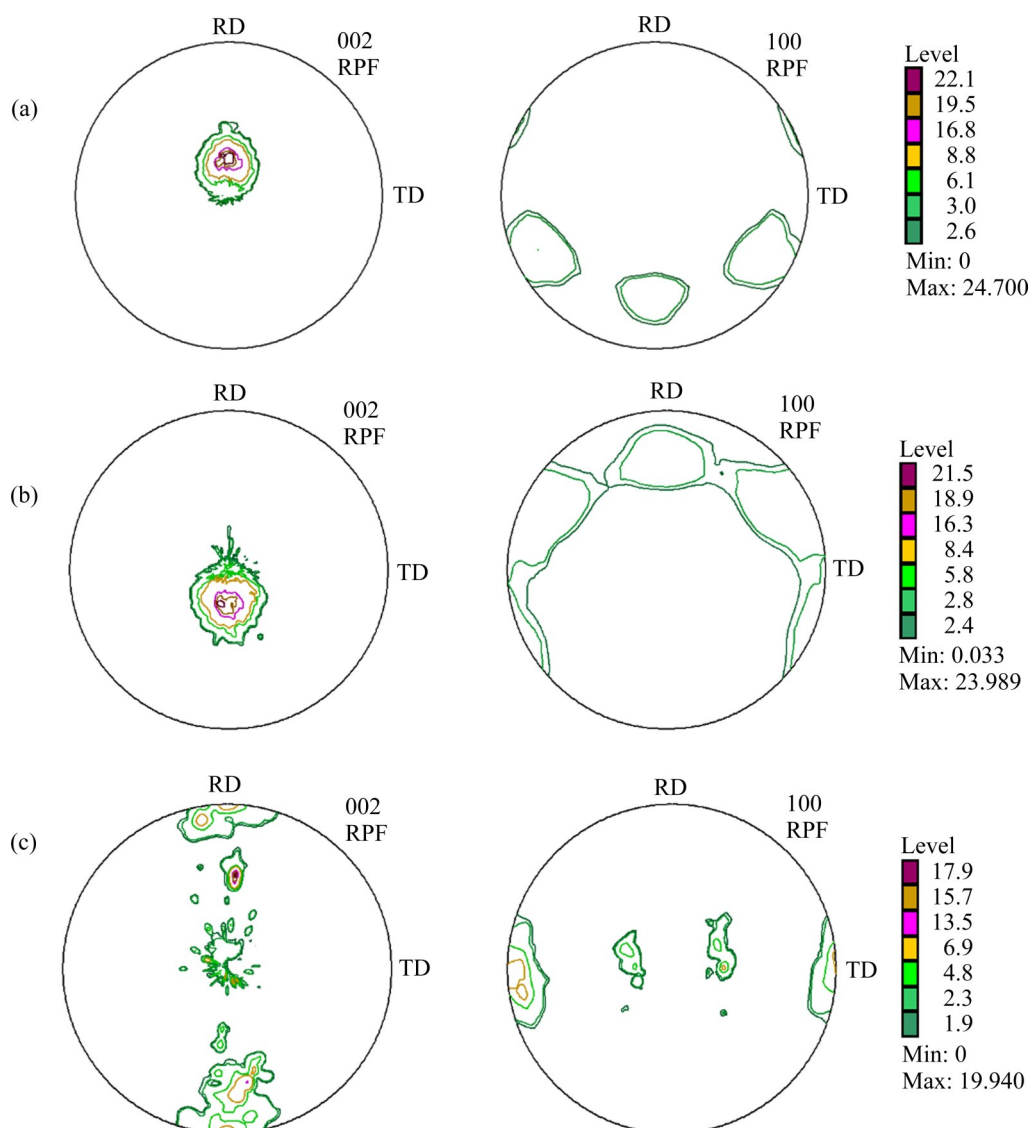


图8 不同挤压温度下镁合金方管的极图

Fig. 8 Polar diagrams of Mg alloy tube at different extrusion temperatures: (a) 340 °C; (b) 370 °C; (c) 400 °C

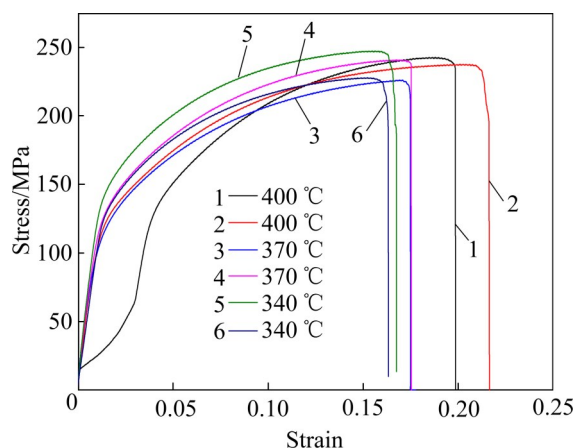


图9 不同温度下薄壁中空镁合金型材的应力-应变曲线

Fig. 9 Stress-strain curves of thin-walled hollow Mg alloy at different temperatures

2.7 断口形貌分析

对不同挤压温度下成形的镁合金方管进行断口形貌分析, 图10所示为不同挤压温度下镁合金方管的断口形貌。镁合金在室温下极易氧化, 拉伸断裂后的新鲜表面更容易被氧化。为了避免断口被氧化, 在断裂后将样品立即用进行断口形貌分析。根据断裂前塑形变形的大小, 可以将断裂分为韧性断裂和脆性断裂^[30]。由图10可知, 340 °C时镁合金方管的拉伸断口为明显的脆性断裂, 断口形貌呈现明显的类似河流状的典型解理断裂的特征; 在370 °C时, 镁合金方管的拉伸断口局部出现了解理面和解理台阶以及部分撕裂棱, 其塑性相对于340 °C时镁合金方管有了相对的增加, 这表明在该温度下其塑

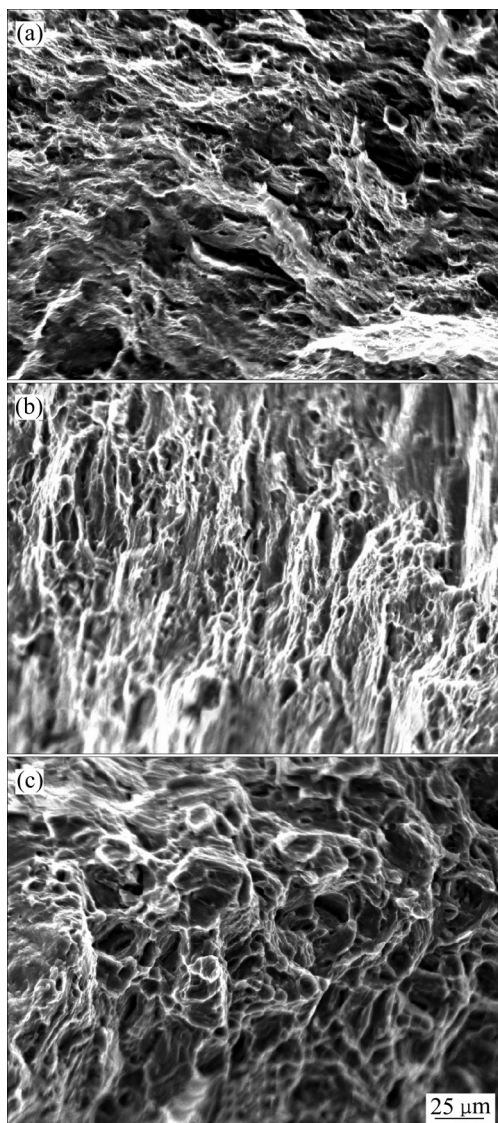


图10 不同挤压温度下镁合金方管的拉伸断口形貌

Fig. 10 Fracture morphologies of Mg alloy tube at different temperatures: (a) 340 °C; (b) 370 °C; (c) 400 °C

性得到了一定的提升;当温度达到400 °C时,镁合金方管的拉伸断口出现更多的台阶状分布,有大小不一的韧窝和微孔出现,在此温度下其塑性得到了明显的提升,其断裂方式可归属为准解理断裂^[31-36]。

3 结论

1) 通过挤压-剪切工艺可以将镁合金圆管坯料制备为表面质量和性能良好的薄壁中空镁合金方管,制备所得的方管在再结晶作用下其晶粒尺寸明显减小且呈现均匀化。

2) 在挤压-剪切薄壁方管成形过程中,其载荷与成形温度紧密相关,挤压温度越高,所需的载荷越小,当挤压温度有340 °C上升为400 °C其载荷约减小了50%,易于薄壁型材的成形;挤压速度对于方管的成形有着重要作用,挤压速度越大,在挤压剪切区所形成的等效应变越大,不利于方管的均匀形成。通过降低变形速度和提高变形温度可以获得良好性能的镁合金方管。

3) 通过拉伸断口分析可知,随着挤压温度的升高,镁合金方管的塑性也增加;在400 °C挤压成形时其塑性得到了明显的提升,其屈服强度约为230 MPa,伸长率约为20%,断裂方式为准解理断裂。同时,随着温度的增加,镁合金方管的组织强度也发生明显弱化,在400 °C挤压成形时,在动态再结晶和较大的剪切作用下,组织分散程度较高,组织强度明显弱化。

REFERENCES

- [1] 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 Jin-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.
- [2] 刘婷婷, 潘复生. 镁合金"固溶强化增塑"理论的发展和应用[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 2050-2063.
LIU Ting-ting, PAN Fu-sheng. Development and application of "solid solution strengthening and ductilizing" for magnesium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 2050-2063.
- [3] ZHANG Jing-huai, LIU Shu-juan, WU Rui-zhi, et al. Recent developments in high-strength Mg-RE-based alloys: Focusing on Mg-Gd and Mg-Y systems[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2018, 6(3): 277-291.
- [4] 丁文江, 吴国华, 李中权, 等. 轻质高性能镁合金开发及其在航天航空领域的应用[J]. 上海航天, 2019, 36(2): 1-8.
DING Wen-jiang, WU Guo-hua, LI Zhong-quan, et al. Development of high-performance light-mass magnesium alloys and applications in aerospace and aviation fields[J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(2): 1-8.
- [5] HONG S G, PARK S H, CHONG S L. Role of {10 $\bar{1}$ 2} twinning characteristics in the deformation behavior of a

- polycrystalline magnesium alloy[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(18): 5873–5885.
- [6] 孙德河, 王丽薇, 解文科. AZ31B 镁合金薄板挤压成形模拟分析[J]. *锻压技术*, 2016, 41(1): 61–66.
- SUN De-he, WANG Li-wei, XIE Wen-ke. Simulation analysis on thin sheet of magnesium alloy AZ31B in the extrusion process[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2016, 41(1): 61–66.
- [7] 何杰军, 吴鲁淑. 挤压态 AZ31 镁合金变形组织演变机制[J]. *材料热处理学报*, 2017, 38(1): 43–49.
- HE Jie-jun, WU Lu-shu. Microstructure evolution mechanism of extruded AZ31 magnesium alloy during deformation[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2017, 38(1): 43–49.
- [8] MA Li-na, YANG Yan, ZHOU Gang, et al. Effect of rolling reduction and annealing process on microstructure and corrosion behavior of LZ91 alloy sheet[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30(7): 1816–1825.
- [9] LIU Di, LIU Zhu-yan, WANG Er-de. Evolution of twins and texture and its effects on mechanical properties of AZ31 magnesium alloy sheets under different rolling process parameters[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(11): 3585–3594.
- [10] GUO Fei, ZHANG Ding-fei, YANG Xu-sheng. Microstructure and texture evolution of AZ31 magnesium alloy during large strain hot rolling[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(1): 14–21.
- [11] 吴远志, 严红革, 朱素琴, 等. 多向锻造 ZK60 镁合金组织和性能的均匀性[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(2): 310–316.
- WU Yuan-zhi, YAN Hong-ge, ZHU Su-qin, et al. Homogeneity of microstructure and mechanical properties of ZK60 magnesium alloys fabricated by high strain rate triaxial-forging[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(2): 310–316.
- [12] 支盛兴, 袁家伟, 李兴刚, 等. 多向锻造对 AZ40 镁合金组织和力学性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2020, 41(9): 132–138.
- ZHI Sheng-xing, YUAN Jia-wei, LI Xing-gang, et al. Effect of multidirectional forging on microstructure and properties of AZ40 magnesium alloy[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2020, 41(9): 132–138.
- [13] 郭丽丽, 苑菁茹, 汪建强, 等. ZK60 镁合金中空型材挤压成形的有限元模拟及组织和性能[J]. *材料导报*, 2020, 34(2): 2072–2076.
- GUO Li-li, YUAN Qing-ru, WANG Jian-qiang, et al. Finite element simulation of extrusion process of ZK60 magnesium hollow profile and its microstructure and properties[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(2): 2072–2076.
- [14] 陈浩, 赵国群, 张存生, 等. 薄壁空心铝型材挤压过程数值模拟及模具优化[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(24): 34–39.
- CHEN Hao, ZHAO Guo-qun, ZHANG Cun-sheng, et al. Numerical simulation of extrusion process and die structure optimization for a hollow aluminum profile with thin wall[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(24): 34–39.
- [15] 孙颖迪, 李光振, 陈秋荣. AZ31 镁合金方管挤压成形的数值模拟[J]. *机械工程材料*, 2015, 39(10): 84–89, 94.
- SUN Ying-di, LI Guang-zhen, CHEN Qiu-rong. Numerical simulation of square tube extrusion for AZ31 magnesium alloys[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2015, 39(10): 84–89, 94.
- [16] 林涛, 刘运腾, 唐守秋, 等. 基于 Deform 的镁合金薄壁方管挤压模具设计与改进[J]. *轻合金加工技术*, 2016, 44(10): 41–45.
- LIN Tao, LIU Yun-teng, TANG Shou-qiu, et al. Design and improvement of the extrusion die for the thin-walled square-tube of Mg alloy based on Deform[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2016, 44(10): 41–45.
- [17] 马俊, 梁胜龙. 焊缝对 ZK60 镁合金方管分流挤压成形的影响[J]. *锻压技术*, 2016, 41(7): 46–50.
- MA Jun, LIANG Sheng-long. Influence of welding line on magnesium alloy ZK60 square tube in shunt extrusion[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2016, 41(7): 46–50.
- [18] 祝志荣, 傅洁琼, 邓汝荣. 大型铝合金矩形管分流模结构的优化改进[J]. *铝加工*, 2020(3): 58–61.
- ZHU Zhi-rong, FU Jie-qiong, DENG Ru-rong. Improvement for die structure of the large Al alloy flat tube[J]. *Aluminium Fabrication*, 2020(3): 58–61.
- [19] 张钧萍. 镁合金挤压剪切复合变形工艺研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- ZHANG Jun-ping. Study on extrusion-shearing composite deformation process of magnesium alloys[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [20] 马健, 郭学锋, 杨文朋. 基于 DEFORM-3D 对 AZ31 镁合金往复挤压变形均匀性有限元分析[J]. *塑性工程学报*, 2019, 26(3): 17–24.
- MA Jian, GUO Xue-feng, YANG Wen-ming, et al. Finite element analysis of uniformity deformation of reciprocating extruded AZ31 magnesium alloy by DEFORM-3D[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2019, 26(3): 17–24.
- [21] 李荣兵. ZK60 镁合金薄壁矩形管等温挤压仿真研究[J]. *锻压技术*, 2013, 38(6): 170–173.
- LI Rong-bing. Numerical study of isothermal extrusion

- process for ZK60 magnesium alloy thin-wall rectangular tube[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2013, 38(6): 170–173.
- [22] 冯靖凯, 张丁非, 袁圆, 等. 挤压-剪切转角对AZ31镁合金组织和性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2019, 40(12): 159–168.
- FENG Jing-kai, ZHANG Ding-fei, YUAN Yuan, et al. Effect of extrusion-shear angle on microstructure and properties of AZ31 magnesium alloy[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2019, 40(12): 159–168.
- [23] 乐泰和, 陈梦茹, 王金辉, 等. La和Ce含量对挤压态AE44-2镁合金组织与力学性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(6): 1463–1474.
- LE Tai-he, CHEN Meng-ru, WANG Jin-hui, et al. Effect of La and Ce contents on microstructure, texture and mechanical properties of extruded AE44-2magnesium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(6): 1463–1474.
- [24] XU Yan, HU Lian-xi, SUN Yu. Dynamic recrystallization kinetics of as-cast AZ91D alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(6): 1683–1689.
- [25] 汪建强, 郭丽丽, 王长峰. AZ31镁合金位错密度模型及热压缩的微观组织预测[J]. *中国有色金属学报*, 2020, 30(1): 48–59.
- WANG Jian-qiang, GUO Li-li, WANG Chang-feng. Dislocation density model of AZ31 magnesium alloy and microstructure prediction of thermal compression[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(1): 48–59.
- [26] DU Yu-zhou, LIU Dong-jie, GE Yan-feng, et al. Effects of deformation parameters on microstructure and texture of Mg-Zn-Ce alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30(10): 2658–2668.
- [27] 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.
- [28] 胡红军. 变形镁合金挤压-剪切复合制备新技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- HU Hong-jun. Studies on a new composite preparation technology of wrought magnesium alloy by extrusion-shearings[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [29] 吴章斌, 桂良进, 范子杰. AZ31B镁合金挤压材料的力学性能与本构分析[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(2): 293–300.
- WU Zhang-bin, GUI Liang-jin, FAN Zi-jie. Mechanical properties and constitutive analysis of extruded AZ31B magnesium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(2): 293–300.
- [30] 苏娟华, 周铁柱, 任凤章. 工业纯钛高温拉伸性能及断口形貌[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(6): 1471–1479.
- SU Juan-hua, ZHOU Tie-zhu, REN Feng-zhang, et al. High-temperature tensile properties and fracture morphology analysis of commercially pure titanium[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(6): 1471–1479.
- [31] 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. Effects of T4 and T6 heat treatment parameters on microstructure and mechanical properties of Mg-12Zn-2Al magnesium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(10): 2322–2330.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.

Physical field and microstructure of extrusion-shear thin-walled hollow magnesium alloy profiles during forming

TIAN Ye¹, HU Hong-jun¹, GAN Song-lin¹, ZHANG Ding-fei², DAI Qing-wei³, OU Zhong-wen⁴

(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;

3. School of Metallurgy and Materials, Chongqing University of Science and Technology,
Chongqing 401331, China;

4. School of Chemistry and Materials, Army Service College, Chongqing 401311, China)

Abstract: In order to study the feasibility and properties of magnesium alloy round tube extrusion forming thin-walled hollow square tube, the round tube billet of AZ31 magnesium alloy was directly prepared into thin-walled hollow square tube with thickness of 2 mm by extrusion-shear composite forming process in this paper. DEFORM-3D software was used to simulate the forming load, extrusion speed and equivalent strain of the square tube forming at different temperatures. The results show that the temperature has great influence on the distribution of forming load, and the proper extrusion speed is beneficial to the formation of magnesium alloy square tube. The thin-walled hollow square tubes can be directly fabricated by one-pass with extrusion-shear composite process, and the grain size of square tubes can be effectively refined. At 400 °C, the yield strength of square tube is about 230 MPa, the elongation is about 20%, and the fracture mode is quasi-cleavage fracture. And due to dynamic recrystallization and large shear effect, the dispersion degree of basal plane texture of square tube is higher, the strength is obviously weakened, and the comprehensive performance is obviously improved. The thin-walled hollow square tube with good properties can be obtained by reducing the extrusion speed and increasing the deformation temperature during the extrusion-shear composite forming process.

Key words: magnesium alloy; thin wall hollow profile forming; extrusion-shear; numerical simulation

Foundation item: Projects(52071042, 51771038) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(CQYC202003047) supported by the Chongqing Talent Project, China; Projects (CSTC2018JCYJAX0249, CSTC2018JCYJAX0653) supported by the Chongqing Natural Science Foundation, China

Received date: 2021-09-08; **Accepted date:** 2021-11-10

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

(编辑 李艳红)