

镁合金双向挤压-螺旋变形的数值模拟与实验研究

卢立伟^{1,2}, 尹振入¹, 胡少华¹, 刘龙飞¹, 石东风³, 杨碧莲¹

(1. 湖南科技大学 高温耐磨材料及制备技术湖南省国防科技重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

(2. 中南大学, 湖南 长沙 410083)

(3. 重庆大学, 重庆 400045)

摘要: 利用双向挤压与螺旋变形的特性, 本研究提出镁合金双向挤压-螺旋复合变形的新技术。采用 DEFORM-3D 软件模拟分析螺旋角度和凹槽半径对坯料变形过程中累积应变的影响, 得出合适的结构参数并加工制造出模具进行实验研究。研究表明: 双向挤压-螺旋复合变形可极大地提高镁合金变形过程的等效应变, 随着螺旋角度和凹槽半径的增大, 等效应变值也相应的增大, 但不均匀程度有所变大。模具螺旋角为 40°和凹槽半径为 0.8 mm 时, 试样可获得良好的等效应变值和均匀的等效应变分布, 晶粒组织显著细化。

关键词: AZ31 镁合金; 复合挤压变形; 等效应变; 微观组织

中图分类号: TG376

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)06-1467-06

镁合金有弹性模量高、比强度高以及质量轻等一系列的优点, 同时在机械加工方面也有很好的加工性, 使其在航空航天, 汽车行业等方面都有很广泛的应用^[1]。但由于镁合金是密排六方结构, 滑移系少, 室温的条件下很难发生塑性变形, 在很大程度上限制了镁合金在一些领域的发展, 为此, 多年来很多学者对镁合金的塑性变形进行了研究。传统的挤压工艺已经被人们多次应用, 但利用传统工艺生产的镁合金强度和塑性较低, 无法满足现在领域对镁合金的强度和塑性要求, 用传统工艺生产的镁合金的晶粒细化效果不是很好且生产效率低, 无法满足现代化生产要求^[2]。现在常用的大塑性变形方法等径角挤压(ECAE), 在挤压的前后不改变工件的尺寸和形状, 因此可以通过多道次的挤压来得到塑性和强度较好的镁合金, 但由于挤压的道次多比较繁琐, 不利于大规模的生产^[3]。这样促使很多学者研究新的变形方法, L. P. Wang^[4] 采用往复挤压(CEC)变形对于 AM60B 镁合金组织有较好的细化。H. J. Hu^[5] 运用挤压剪切大变形工艺(ES)使 AZ31 镁合金的晶粒得到很好的细化。孔晶^[6] 在目前已经较成熟的工艺等通道转角挤压后, 提出了一种新型的挤压方式 T 型通道挤压(TCP), 通过实验证明了该方法可以使镁合金晶粒组织获得良好的细化和均匀化, 力学性能也有很好的改善。石磊^[7] 在 ECAP 的基础增加了螺

旋结构, 提出了等通道螺旋转角挤压(ECHE), 该工艺比 ECAP 有着更大的变形量, 挤压的道数也将减少, 镁合金的晶粒细化效果明显, 力学性能也有着相对的提高。这些新工艺的出现对于研究镁合金的塑性变形和力学性能等有很好的理论依据, 但是实际生产中还有很多方面的因素制约着, 比如挤压过程中模具的参数, 挤压速度、温度、载荷等。为了解决这些问题, 有限元模拟被广泛应用, 这是因为该方法可以定量其挤压过程中上述因素的数值, 大大减少了其成本和实验周期并可以更好的制订出最优的工艺参数和工艺路线, 用模拟得出最合适的参数, 来设计较合理的模具结构^[3]。

本研究设计出双向挤压-螺旋复合变形新工艺, 并用这种新工艺对 AZ31 镁合金进行双向挤压-螺旋复合变形的有限元分析和实验研究。该变形是将螺旋和正挤压相结合, 使得镁合金在经过双向挤压后再次发生螺旋变形, 在正挤压和螺旋剪切作用下更进一步提高其应变。同时, 在此过程中压力也不断提高, 这可很好的增加镁合金的塑性^[8]。

1 模拟参数和实验方法

图 1 为双向挤压-螺旋变形复合挤压模具的示意图。该模具是由双向挤压的挤压比变形区和与此衔接

收稿日期: 2015-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(51505143); 湖南省自然科学基金(14JJ3111); 湖南省教育厅项目(14C0455); 中国博士后科学基金(2014M562128)

作者简介: 卢立伟, 男, 1983 年生, 博士, 讲师, 湖南科技大学机电工程学院, 湖南湘潭 411201, 电话: 0731-58290047, E-mail: cqulqyz@126.com

的螺旋变形区组成。螺旋变形结构主要涉及 2 个重要的参数，图 2 分别所示模具凹槽的螺旋角 γ 和凹槽的半径 r ，这 2 个参数对试样在挤压过程中的应力和应变等都有重大影响。

随着挤压的进行，试样依次通过转角变形、挤压比和螺旋变形，累积应变逐渐增加，以往研究表明累积应变超过极限应变时动态再结晶才可发生^[9]，其公式如下：

$$\epsilon_c = a_2 \cdot \epsilon_p \tag{1}$$

$$\epsilon_p = a_1 \cdot d_0^{n1} \cdot \dot{\epsilon}^{m1} \cdot \exp(Q/RT) + C1 \tag{2}$$

式中， ϵ_c 为动态再结晶发生时的应变； ϵ_p 为最大流动应力对应的应变； a_1, a_2 为系数； $\dot{\epsilon}$ 为应变速率； $n1, m1, C1$ 是与材料有关的常数； Q 为激活能 (kJ/mol)； T 为变形温度； R 为气体常数 (8.31 J/mol)； d_0 为初始晶粒尺寸。

在 Deform-3D 软件中进行模拟研究，将试样的料筒直径定为 30 mm，挤压比变形区的直径为 10 mm，

螺旋剪切变形区和挤压比变形区相衔接，外径和挤压比变形区一致为 10 mm，内径随着螺旋凹槽的半径变化而相应的变化。螺旋角度分别取 20°、30°、40°和 50°。螺旋凹槽的半径分别取 0.5, 0.8, 1.1, 1.4 mm。为了更好的研究螺旋角度和螺旋凹槽半径对镁合金的应变和细化晶粒的影响，将挤压比均定为 4.5。该模具在实际的应用加工的过程中，凸模和凹模发生塑性变形量很小，几乎不发生塑性变形，所以将凸模和凹模定义为刚性体，挤压的试样定义为塑性体，该模具的运动关系可以定义为凹模静止不动，凸模为主动件，挤压试样视为从动件^[2]。将坯料的尺寸设置为直径 30 mm，长度 60 mm，划分的网格数目为 30 000，步长设置为 0.2 mm，体积补偿为 42 315.4 mm³，试样与模具间的容差为 0.0441 mm，摩擦的类型为螺旋剪切摩擦，摩擦因数为 0.3。试样材料为 AZ31 镁合金，该实验材料的流动应力模型： $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T)$ ，屈服行为服从 Von Mises 准则。结合有限元分析的结果，自制了

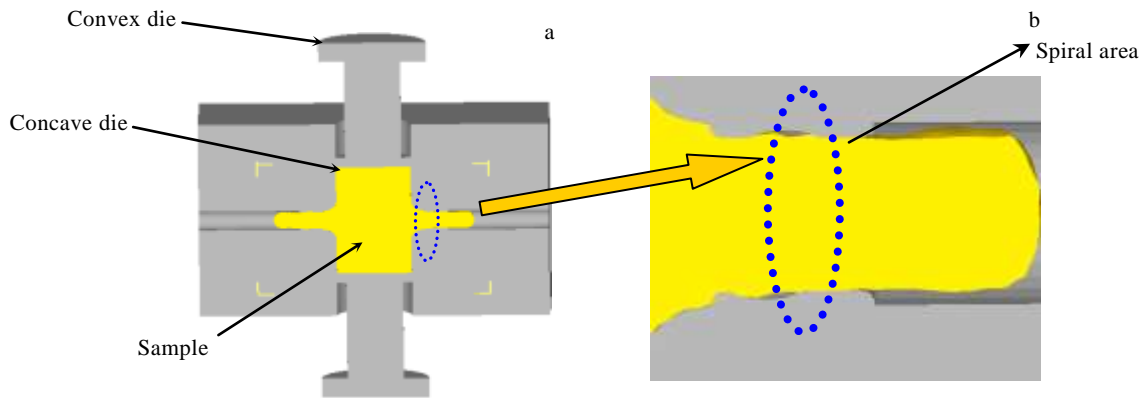


图 1 双向挤压-螺旋变形建模示意图

Fig.1 Schematic molding of dual-directional extrusion and spiral deformation: (a) half-sectional view of the die and (b) partial enlarged drawing

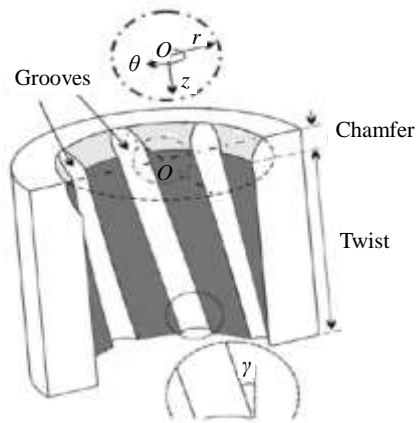


图 2 螺旋结构示意图

Fig.2 Diagram of spiral structure^[10]



图 3 双向挤压-螺旋复合变形模具结构及样品

Fig.3 Dual-directional extrusion and spiral compound die and specimen

双向挤压螺旋复合变形的模具以及挤压后样品如图3所示, 该模具的结构参数挤压比为4.5, 螺旋角度为 40° , 凹槽的螺旋半径为0.8 mm。坯料经双向挤压-螺旋变形后, 对成形试样的横截面和纵截面进行金相组织观察, 采用的腐蚀剂为乙酸苦味酸溶液。

2 结果与讨论分析

2.1 螺旋角度对塑性成形的影响

螺旋角度分别为 20° 、 30° 、 40° 和 50° 模具下产生的试样纵截面上的等效应变分布如图4所示。可将试样分为3个部分。试样随着挤压的进行, A为料头部分, 最先发生形变且形变较复杂, 可以看出等效应变梯度变化比较明显。B为螺旋部分, 试样表面和内部的等效应变呈梯度变化, 最大等效应变达到了1.88。螺旋角度为 20° 时, 试样边缘的等效应变有小幅度的提高但不明显, 内部的应变比较均匀, 总体来说等效应变的值不是很大, 大部分集中在1.13~1.50, 说明螺旋角度较小时, 对等效应变的提高、影响较小。随着螺旋角度的逐渐增加, 从图4b, 4c, 4d可以得出, 试样边缘的等效应变值有明显的提高, 但是内部的等效应变的不均匀性也随之提高, 最大等效应变值主要集中在螺旋部分; 试样在经过螺旋变形时, 金属的流动方向在螺旋部分发生了改变, 金属的边缘最先产生螺旋剪切变形, 在金属的流动过程中, 产生螺旋变形的边缘金属会带动内部金属一起发生螺旋变形, 使得试样内部的等效应变有着相应的改变。螺旋角度从 20° 升高到 50° 时, 试样的等效应变有显著的提高, 尤其是内部的等效应变1.13可以增大至1.88。Faramarz Fereshteh-Saniee^[11]所描述的模具几何形状对AZ80镁合金非等通道横向挤压的影响中, 当内径 r 取0, 2, 4 mm, 相应外径 R 取4, 7 mm对应模具几何形状因数所产生的等效应变为1.25~1.69。对于AZ31镁合金Y形异径三通管热态内高压成形的研究表明^[12], 最大等效应变可达到1.50。此外, 王斌^[13]等研究了ZK60镁合金

型材的挤压过程, 在挤压比为25, 挤压温度 300°C 的情况下最大等效应变在2.0~2.4。通过比较可得出, 在挤压比为4.5的双向挤压-螺旋复合工艺, 随螺旋角的增大能够使镁合金的等效应变增加, 累积相对较高的等效应变, 使得动态再结晶更好的发生, 为以后螺旋工艺的发展提供一定的理论依据。C为挤压比变形部分, 试样经过挤压比变形时, 在转角处应变变化最大, 等效应变也随之升高。

不同螺旋角度所对应的挤压力如图5所示。在挤压开始进行时, 挤压力均呈升高的趋势, 随着挤压的进行, 由于转角剪切的作用, 在进入挤压比区时挤压力达到一个峰值, 紧接着进入螺旋区, 随着螺旋角度的不同, 可以看出挤压力也有明显的区别, 20° 和 50° 的螺旋角度所对应的挤压力明显的高于其余2个角度, 且波动相对较大, 不利于工业的实际生产和模具使用寿命。通过分析螺旋角度为 30° 和 40° 的挤压力可以看出, 40° 的挤压力相对较小, 波动较平稳, 说明在螺旋剪切作用下动态再结晶和加工硬化达到了动态平衡。经对比分析得出螺旋角为 40° 时可获得良好的等效应变和挤压力。

2.2 凹槽半径对塑性成形的影响

采用螺旋角度为 40° 作为定量, 凹槽半径分别为0.5, 0.8, 1.1和1.4 mm的模具下产生的AZ31镁合金试样纵截面上的等效应变分布如图6所示。从图6可以看出, 试样经过双向挤压-螺旋变形后同样可以分为3个部分。A为料头部分, 在挤压的进行中最先发生形变, 等效应变梯度分布较明显, 形变较复杂。B为螺旋部分, 随着凹槽半径的增加, 试样表面和内部的等效应变梯度分布较明显, 试样外表面的等效应变提高较大, 内部的等效应变相对较小。但随着凹槽半径的增加, 进入凹槽的金属也会增多, 流动量增大, 表层的金属经过螺旋剪切变形将会带动内部的金属一起流动, 使得内部等效应变趋向均匀, 能更好的诱发动态再结晶使得晶粒细化更加均匀。C为挤压比变形部分, 该部分试样经过转角剪切作用, 使得等效应变有

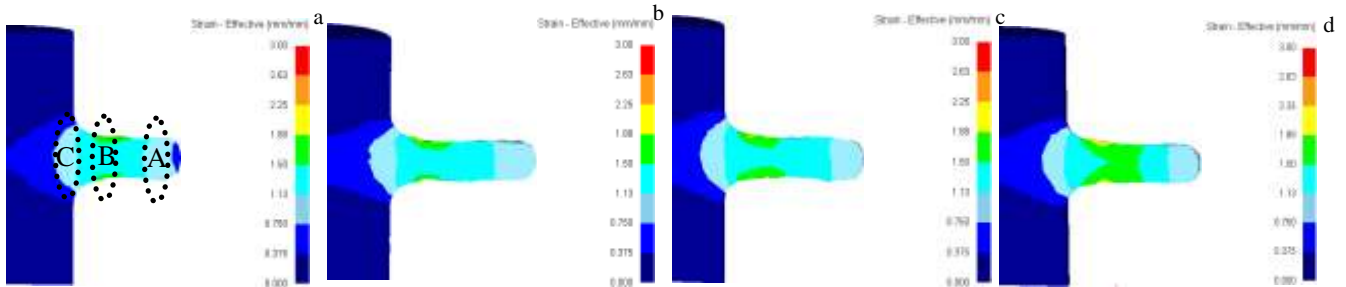


图4 螺旋角度对等效应变的影响

Fig.4 Effect of spiral angle on equivalent strain distribution: (a) 20° ; (b) 30° ; (c) 40° ; and (d) 50°

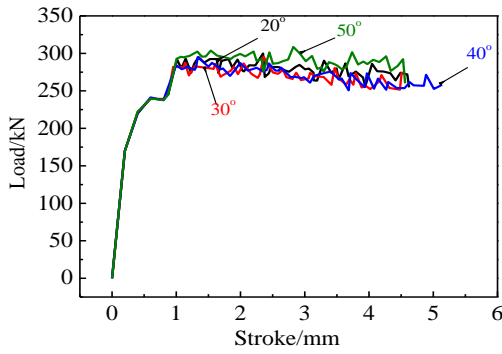


图 5 螺旋角度对挤压力的影响

Fig.5 Effect of spiral angle on extrusion load

所提升，呈梯度分布，转角处的等效应变相对较高。

图 7 为凹槽半径对挤压力的影响图。在挤压初始阶段，挤压力呈升高趋势。凹槽半径为 0.8 mm 时所对应的挤压力相对于其他参数较小，说明凹槽半径为 0.8 mm，加工硬化和动态再结晶达到了动态平衡，能更好的利于实际加工生产。

2.3 等效应变均匀性分析

取螺旋角度 40°和凹槽半径 0.8 mm 双向挤压螺旋变形后试样横截面进行分析，在截面中取 L1~L5 进行等效应变均匀性分析如图 8 所示。可以看出 5 条线变化相差不大，说明等效应变在截面上分布的相对均匀。

为了进一步说明试样横截面等效应变均匀性程度，采用等效应变不均匀程度的参数 C_i 来计算说明^[14]。

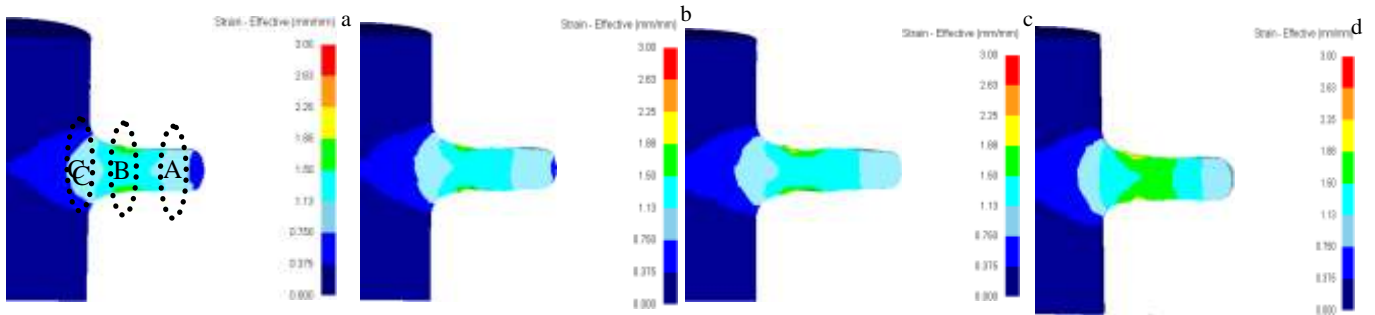


图 6 凹槽半径对等效应变分布的影响

Fig.6 Effect of groove radius on equivalent strain distribution: (a) 0.5 mm, (b) 0.8 mm, (c) 1.1 mm, and (d) 1.4 mm

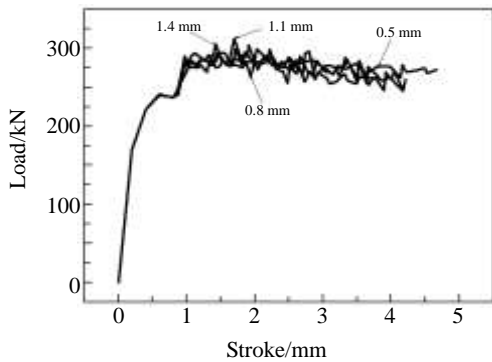


图 7 凹槽半径对挤压力的影响

Fig.7 Effect of groove radius on extrusion load

$$C_i = \frac{\bar{\epsilon}_{\max} - \bar{\epsilon}_{\min}}{\bar{\epsilon}_{\text{Avg}}} \quad (3)$$

式中， $\bar{\epsilon}_{\max}$ 、 $\bar{\epsilon}_{\min}$ 、 $\bar{\epsilon}_{\text{Avg}}$ 为横截面上等效应变的最大值、最小值和平均值，等效应变的平均值由公式求得：

$$\bar{\epsilon}_{\text{Avg}} = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i}{n} \quad (4)$$

横截面最大等效应变为 1.885，最小等效应变为 1.184，通过上述公式算出 $\bar{\epsilon}_{\text{Avg}}$ 为 1.377，等效应变不均匀程度的参数 C_i 为 0.509。相对于 ECAP 模具外角为 90°时，

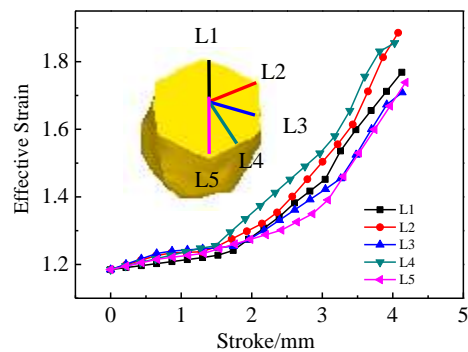


图 8 成形试样横截面等效应变分布

Fig.8 Effective strain distribution in cross-section of the specimen

等效应变不均匀程度参数 C_i 为 0.583 稍低^[15]。周超^[16]分析了影响 ECAP 的相关因素, 在选取最优变形均匀性方案得到的等效应变不均匀程度 C_i 为 4.19。本实验中螺旋角度 40° 和凹槽半径 0.8 mm 的双向挤压螺旋复合变形等效应变较高, 均匀性程度良好。

2.4 显微组织观察

图 9a 为铸态 AZ31 镁合金经过 400 °C 保温 15 h 均匀化处理后的组织, 其组织粗大并伴有少量的析出相, 晶粒尺寸约 280 μm 。图 9b 和图 9c 为试样经过双向挤压-螺旋复合变形后纵截面和横截面的光学显微组织, 其晶粒得到明显的细化, 析出相均匀的分布在细小晶粒组织中, 但是局部组织还有较粗大的晶粒。观察横截面发现

局部粗大晶粒 18~22 μm , 细小晶粒尺寸约 5 μm , 平均尺寸约 6 μm 。在纵截面上呈现出细小晶粒沿挤压方向的流线形分布, 内部个别粗大晶粒尺寸约 14 μm , 小晶粒约 2 μm , 平均晶粒尺寸约 3.5 μm 。相关研究表明: ZK60 镁合金在 240 °C 经 ECAP 变形 4 道次和 8 道次后, 其晶粒分别细化至 2 和 1.6 μm ^[17], 挤压比为 16 的传统挤压在 330 °C 时可以得到平均晶粒尺寸为 6 μm ^[18], AZ31 镁合金在 350 °C 的内交角为 90° 和外接弧角为 20° 的 ECAP 中, 经 Bc 路线挤压 8 道次后, 120 μm 原始晶粒可以细化到 8 μm ^[19]。经对比可知, 挤压比为 4.5 的双向挤压-螺旋复合变形工艺在细化镁合金晶粒方面已经初显其独特的优势。

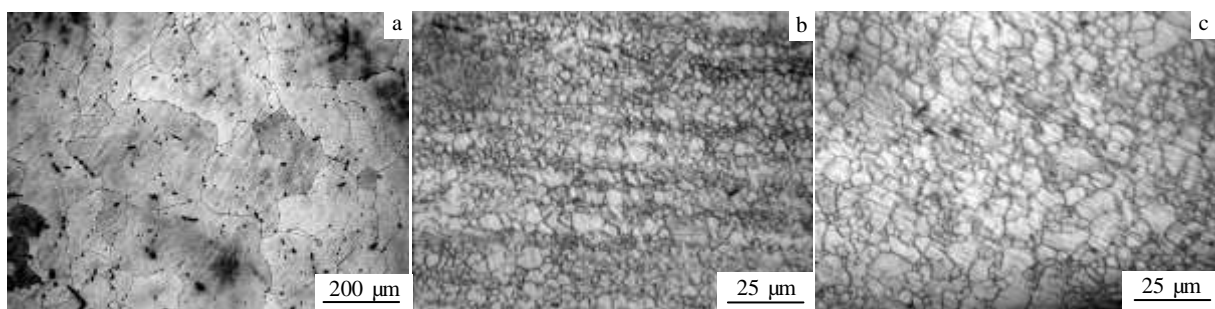


图9 挤压前后 AZ31 镁合金显微组织

Fig.9 Microstructures of AZ31 magnesium alloys before and after extrusion: (a) original; (b) longitudinal-section after extrusion; (c) cross-section after extrusion

3 结 论

1) 在双向挤压-螺旋复合变形过程中, 试样的等效应变呈明显的梯度分布, 在螺旋变形部分达到最大值, 经过挤压比部分和螺旋部分的剪切变形, 能累积较高的等效应变, 更好的诱发动态再结晶。

2) AZ31 镁合金经双向挤压-螺旋复合变形, 随着螺旋角度和凹槽半径的增加, 等效应变有明显的增加, 但不均匀性也随之提高。

3) 螺旋角度为 40° 和凹槽半径为 0.8 mm 的双向挤压-螺旋复合模具, 可以得到较高等效应变和均匀性良的等效应变分布, 最大等效应变为 1.88, 不均匀程度参数 C_i 为 0.509, 晶粒细化较好, 晶粒尺寸从 280 μm 细化至约 6 μm 。

参考文献 References

- [1] Wang Shuncheng(王顺成), Zhong Fanghua(钟芳华), Qi Wenjun(戚文军) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(6): 1361
- [2] Han Fuyin(韩富银), Wang Ping(王萍), Tian Linhai(田林海) et al.

Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(7): 1497

- [3] Zhang Dingfei(张丁非), Zhang Junping(张钧萍), Hu Hongjun(胡红军) et al. *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2012, 33(9): 140
- [4] Wang L P, Chen T, Jiang W Y et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2013, 23: 3200
- [5] Hu H J, Zhang D F, Yang M B et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2011, 21: 243
- [6] Kong Jing(孔晶), Hou Wenting(侯文婷), Peng Yonghui(彭勇辉) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2011, 21(6): 1199
- [7] Shi Lei(石磊), Yang He(杨合), Guo Lianggang(郭良刚) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(11): 1955
- [8] Hu Hongjun(胡红军). *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2013, 34(4): 202
- [9] Lu Liwei(卢立伟), Liu Tianmo(刘天模), Chen Yong(陈勇) et al. *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2011, 32(12): 17

- [10] Khoddam S, Farhoumand A, Hodgson P D. *Mechanics of Materials*[J], 2011, 43: 684
- [11] Feresteh-Saniee Faramarz, Asgari Mohammad, Barati Mahmoud *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2014, 24: 3274
- [12] Liang Xiaohui(梁晓辉), Yu Xinhong(余心宏), Suo Xiaolin(索小琳). *Metallic Functional Materials*(金属功能材料)[J], 2012, 19(6): 29
- [13] Wang Bin(王 斌), Yi Danqing(易丹青), Gu Wei(顾 威) *et al. Materials Science and Technology*(材料科学与工艺)[J], 2010, 18(2): 272
- [14] Basavaraj V P, Chakkingal U, Kumar T S P. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2009, 209(1): 89
- [15] Ren Guocheng(任国成), Zhao Guoqun(赵国群), Xu Shubo(徐淑波) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2011, 21(4): 848
- [16] Zhou Chao(周 超), Peng Biyou(彭必友), Shen Bing(沈 冰) *et al. Forging and Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2013, 38(3): 145
- [17] He Yunbin(何运斌), Pan Qinglin(潘清林), Tan Yinjiang(覃银江) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(12): 2274
- [18] Han Minyu(韩敏玉), Zhang Xiuqing(张修庆), Chen Ke(陈 舸) *et al. Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2013, 42(3): 5
- [19] Zhang Jinlong(张金龙), Zhao Xicheng(赵西成), Xie Hui(谢 辉). *Journal of Xi'an Aeronautical University*(西安航空学院学报)[J], 2014, 32(5): 30

Numerical Simulation and Experimental Research of AZ31 Mg Alloys Processed by Dual-directional Extrusion and Spiral Compound Deformation

Lu Liwei^{1,2}, Yin Zhenru¹, Hu Shaohua¹, Liu Longfei¹, Shi Dongfeng³, Yang Bilian¹

(1. Hunan Provincial Key Defense Laboratory of High Temperature Wear-resisting Materials and Preparation Technology,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

(2. Central South University, Changsha 410083, China)

(3. Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Using the characteristics of dual-directional extrusion and spiral deformation, a new extrusion technique of dual-directional extrusion and spiral compound deformation was proposed. Effect of spiral angle and groove radius on the accumulated strain of the deformed billet was analyzed by DEFORM-3D software, the proper structure parameters were obtained, and the actual die was manufactured for experimental research. The results show that the dual-directional extrusion and spiral compound deformation can greatly improve the effective strain of magnesium alloy. With the increase of spiral angle and groove radius, the effective strain value is increased accordingly; however, the degree of strain inhomogeneity grows at the same time. In the case of 40° spiral angle and 0.8 mm groove radius, superior equivalent strain value and uniform equivalent strain distribution can be obtained, and grain structure is refined dramatically.

Key words: AZ31 magnesium alloy; compound extrusion; equivalent strain; microstructure

Corresponding author: Lu Liwei, Ph. D, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, P. R. China, Tel: 0086-731-58290047, E-mail: cqulqyz@126.com