

工艺优化设计

镁合金板材等通道弯曲变形模拟与实验

陈帅峰^{1,2}, 程明¹, 张宏轩^{1,3}, 宋鸿武¹, 张士宏¹

(1.中国科学院金属研究所, 沈阳 110016; 2.中国科学院大学, 北京 100049;
3.中国科学技术大学, 合肥 230026)

摘要: **目的** 通过设计一种等通道弯曲变形工艺, 实现镁合金板材沿厚度方向较均匀的剪切应变。**方法** 利用 ABAQUS 数值模拟并结合应变非均匀性评估方法, 系统研究不同厚度镁合金板材在相同变形参数下剪切应变分布特征, 比较实验结果说明模型准确性。**结果** 等通道弯曲变形可以在不同厚度板材中实现较为均匀的剪切应变, 且随着板材厚度的增加而提高。关于成形力的模拟和实验结果吻合良好, 表明数值模拟方法能够较好实现 ECAB 变形过程的预测。**结论** 由于该工艺能够引入均匀剪切应变, 有望在镁合金板材组织和结构优化方面取得研究与应用价值。

关键词: 镁合金板材, 等通道弯曲; 剪切应变; 均匀度; 成形载荷

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.04.016

中图分类号: TG379 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)04-0090-06

Simulation and Experiment on Equal Channel Angular Bending of Magnesium Alloy Sheet

CHEN Shuai-feng^{1,2}, CHENG Ming¹, ZHANG Hong-xuan^{1,3}, SONG Hong-wu¹, ZHANG Shi-hong¹

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

ABSTRACT: The paper aims to realize homogeneous distribution of shear strain along the thickness direction by designing a new equal channel angular bending process. Combined with the inhomogeneity estimation method, the software ABAQUS was adopted to investigate distribution features of shear strain and effective strain under the same deformation parameters. The forming load between simulation and experiment was compared to indicate the accuracy of simulation results. The equal channel angular bending could induce homogeneous shear strain along the thickness direction, which increased with the thickness rising. The results of simulation and experiment on forming force agreed well, showing that the established simulation model could predict the deformation behavior of equal channel angular bending. The homogeneous shear strain induced during the equal channel angular bending has the desirable application meaning for the grain refinement and texture modification of magnesium alloy sheets.

KEY WORDS: magnesium alloy sheet; equal channel angular bending; shear strain; homogeneity; forming load

镁合金由于密度低、比刚度和比强度高, 以及电磁屏蔽性好等优点, 被誉为“21 世纪的绿色工程材

料”, 在汽车、电子、航空航天、医疗等行业中已得到较多应用^[1-2]。因镁合金的密排六方结构, 室温条

收稿日期: 2017-06-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) (61328203); 国家自然科学基金 (50775211, 51174189)

作者简介: 陈帅峰 (1987—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为镁合金加工与组织调控技术。

通讯作者: 程明 (1976—), 男, 副研究员, 主要研究方向为金属塑性加工先进技术。

件下易于开动的基面滑移数无法满足应变协调要求，导致其塑性较差，无法满足成形需求^[3]。采用温热塑性变形实现晶粒细化和织构调控是提高镁合金板材塑性的有效途径之一，同样是目前的研究热点^[4-5]。为实现上述目的，研究者们提出了不同塑性变形工艺^[6-8]，其中等通道挤压(Equal channel angular press, ECAP)通过在材料内部引入剪切应变，在有效细化晶粒组织的同时弱化基面织构强度，受到了广泛关注^[9-10]。基于 ECAP 的基本原理，研究者们提出了多种连续 ECAP 过程，以达到连续剪切应变累积，主要包括连续条带轧制挤压^[11]、等通道镦挤^[12]等。上述变形过程普遍存在成形力大、成形坯料尺寸受限、过程控制困难等缺点，特别是无法有效实现镁合金薄板材的组织 and 织构调节。

文中提出一种镁合金板材的等通道弯曲(Equal channel angular bending, ECAB)变形工艺，以在薄板材中实现均匀剪切应变的累积^[13]，并结合数值模拟和实验，系统研究不同厚度镁合金板材在温热 ECAB 工艺条件下的剪切应变分布和成形载荷。

1 ECAB 变形工艺分析

ECAB 变形工艺原理见图 1，该变形工艺主要通过模具参数 $R_0, R_1, 2\theta$ 构成等通道变形区， L_0, L, L_1 分别表示了送料段、变形段、平整段。该模具重点通过上模的运动实现镁合金板材在等通道弯曲变形，以实现剪切变形的累积。图 1 中包括 ECAB-1 和 ECAB-2 这 2 个等通道弯曲变形段，基于同样原理可以设置多个等通道弯曲变形段，实现在一次加工变形中较大剪切变形的累积。该变形工艺结合等通道和弯曲变形的特点，实现镁合金薄板的变形加工。需要强调的是，采用一套模具即可实现不同厚度板变形加工，如初始设计加工板材厚度为 t_0 ，为了加工板材厚度为 t_1 的板材，可将下模上移 $(t_0 - t_1)$ 的距离，然后再将下模向右移动 ΔL ，其值可由式(1)计算得到。

$$\Delta L = (t_0 - t_1) \tan \theta_1 = (t_0 - t_1) \tan \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \quad (1)$$

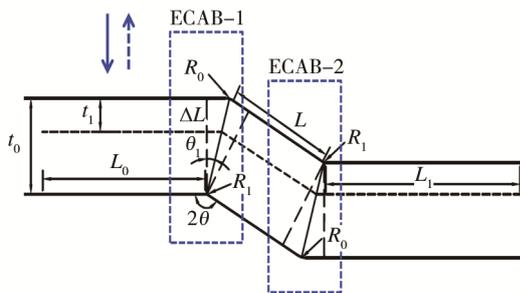


图 1 ECAB 工艺原理
Fig.1 Schematic of the ECAB technology

2 热力耦合模型建立和实验

根据图 1 所示的 ECAB 工艺原理，建立了不同厚度镁合金板材的热力耦合数值模型见图 2。沿图示的板材法向和横向箭头所示方向提取数据点，以研究该工艺在不同厚度板材中的剪切应变累积和成形力分布。模拟采用有限元软件 ABAQUS，模具设置为解析刚体，加热温度为 200 °C。坯料为变形体，初始厚度 t 分别为 2, 5, 9, 15 mm，单元类型为 C3D8RT。材料为 Mg-3Al-1Zn 合金，初始温度为 200 °C。镁合金板材温热应力-应变数据取自文献^[14]，接触界面热传导系数为 4.5 N/(s·°C·mm)，摩擦因数设为 0.3，功转换系数为 0.9。模拟过程中，坯料每步送进距离为 3 mm，上模开合速度为 100 mm/min，下模固定不动。模具闭合后高度 $H=0.95t$ ，即在板材厚度方向产生 5% 的压下量。模具中等通道剪切区参数 $R_0, R_1, 2\theta$ 分别为 5 mm, 1 mm, 150°。

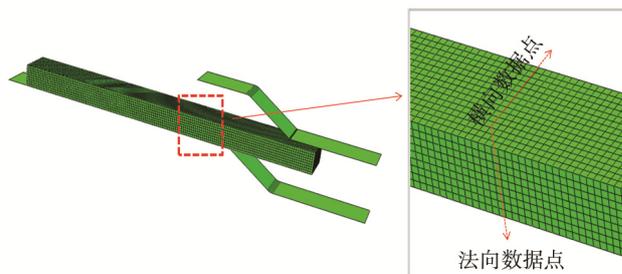


图 2 镁合金板材 ECAB 工艺三维热力耦合模型
Fig.2 The fully 3D coupled thermal-mechanical model of ECAB technology of magnesium alloy sheet

镁合金板材 ECAB 模具的三维图见图 3a，其中模具依靠导柱导套进行导向，复位弹簧结构进行工作复位，且设计挡墙结构以消除变形过程的模具径向力。带有控温系统的实验装置见图 3b，模具预热和控温以及板材的控温主要通过电阻加热棒和温度控制开关配合实现。实验过程中采用万能电子拉伸试验机平台加载，可准确控制 ECAB 工艺过程的加载速率，并获取成形载荷数据。利用上述模具，对 2 mm 厚挤压态 Mg-3Al-1Zn 板材分别在 150, 200, 250 °C 条件下进行 ECAB 变形实验。

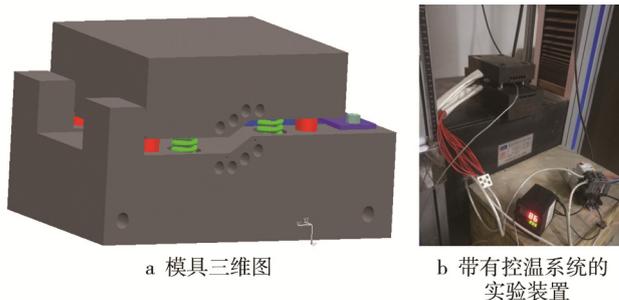


图 3 镁合金板材 ECAB 工艺
Fig.3 The ECAB method of magnesium alloy sheets

3 结果分析

3.1 剪切应变分布

不同厚度板材在 ECAB 过程中 ECAB-1 和 ECAB-2 变形区的法向剪切应变 γ_{12} 分布见图 4。由图 4a 可知, 在 ECAB-1 过程中, 剪切应变值随板材厚度的增加而升高, 其中 5 mm 和 9 mm 板材的剪切应变比较接近。在 ECAB 过程中剪切应变可以分为 2 个阶段: 初始稳定阶段和随后的快速下降阶段。这主要与模具的接触顺序相关。上模首先与板材接触, 在 ECAB-1 剪切弯曲变形区, 在上部产生均匀的剪切变形, 但无法传递到坯料底部。当坯料送进到 ECAB-2 剪切变形区时, 剪切应变进一步增大, 且剪切应变在坯料中心点处达到最大值。随着坯料厚度的增加, 剪切应变值逐渐升高, 且应变均匀度得到大幅度改善。即使是在厚度为 2 mm 的镁合金薄板材中, 单道次最大的剪切应变值也可达到 0.203。

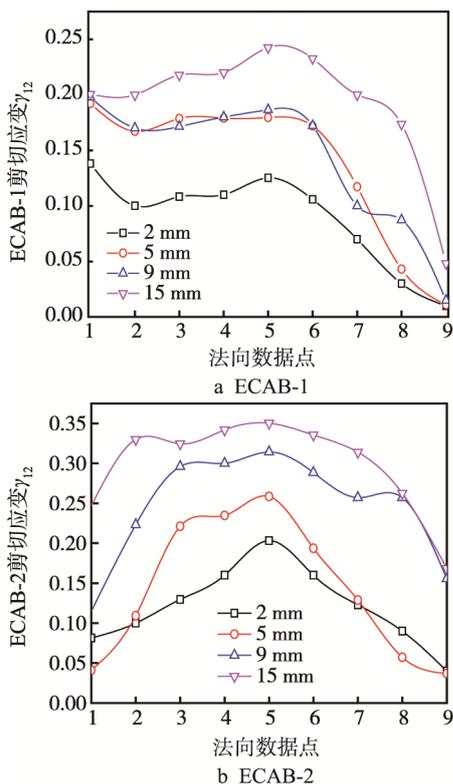


图 4 不同厚度镁合金板材 ECAB 过程中法向剪切应变 γ_{12} 分布

Fig.4 The distribution of shear strain γ_{12} along normal direction during the process with different thickness of magnesium alloy sheets

ECAB 变形过程中 ECAB-1 和 ECAB-2 的横向剪切应变分布见图 5。横向剪切应变数据从板材中心获取。由图 5 可知, 板材横向剪切应变同样随着板材厚度的增加而升高, 但其演化规律和法向剪切应变的演变规律不同。剪切应变在 2 个剪切弯曲变形区沿横向

分布较为均匀, 且 ECAB-2 的均匀性要优于 ECAB-1。

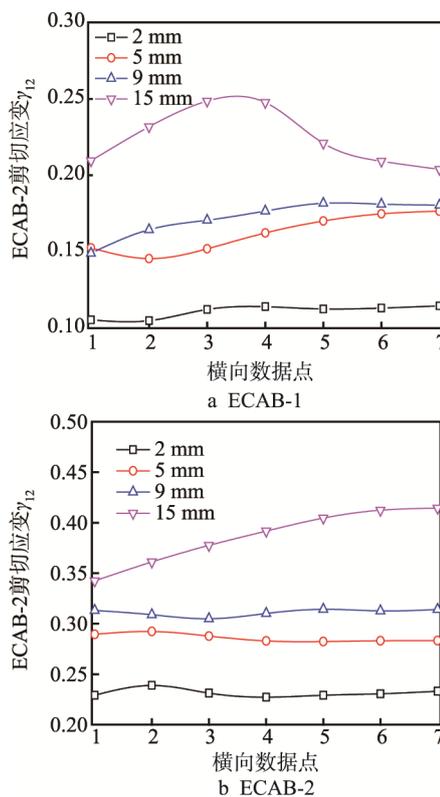


图 5 不同厚度镁合金板材 ECAB 过程中横向剪切应变 γ_{12} 分布

Fig.5 The distribution of shear strain γ_{12} along normal direction during the process with different thickness of magnesium alloy sheets

ECAB-1 和 ECAB-2 变形后不同厚度镁合金板材的最大剪切应变 γ_{12} 对比见图 6。可知最大剪切应变随着厚度增加不断升高, 且通过拟合曲线表明, 最大剪切应变与板材厚度 t 之间基本呈线性关系, ECAB-1 和 ECAB-2 的最大剪切应变描述方程见式(2)和式(3)。

$$\gamma_{12,max}^{ECAB-1} = 0.137 + 0.0072t \tag{2}$$

$$\gamma_{12,max}^{ECAB-2} = 0.192 + 0.0112t \tag{3}$$

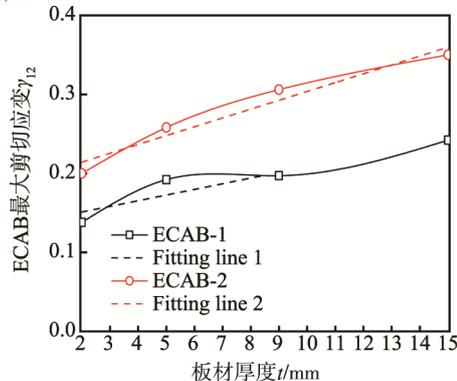


图 6 不同厚度镁合金板材 ECAB-1 和 ECAB-2 过程中的最大剪切应变 γ_{12}

Fig.6 The maximum shear strain γ_{12} of ECAB-1 and ECAB-2 with different thickness of magnesium alloy sheets

3.2 等效应变及应变均匀性分析

不同厚度镁合金板材在 ECAB-1 和 ECAB-2 变形后法向等效应变分布见图 7。从图 7a 中经过 ECAB-1 变形后，等效应变分布较为均匀，且呈现出和剪切应变相同的演化规律。需要注意的是，9 mm 和 15 mm 板材具有几乎相同的等效应变，最大等效应变值约为 0.38。在 ECAB-2 变形后，等效应变的分布趋势和均匀性与 ECAB-1 基本相同。经过第 2 次剪切弯曲变形后，2 mm 和 5 mm 板材等效应变有些许下降，而 9 mm 和 15 mm 板材在变形后等效应变却呈现升高趋势。这主要是由于镁合金板厚减小后，其表面摩擦力影响层与厚度比值增大，进而约束中心区域材料的变形。特别是 ECAB-2 为板材出口段，出口板材与模具的摩擦行为直接约束该段板材的压缩伸长变形。

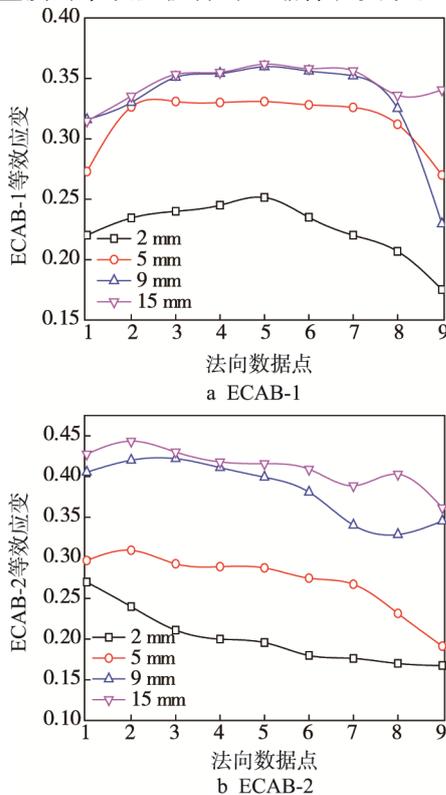


图 7 不同厚度镁合金板材 ECAB 过程中等效应变分布
Fig.7 The effective strain of magnesium alloy sheets with different thickness in ECAB processing

为了更好地衡量 ECAB 过程中各种应变的非均匀性，采用式(4)的非均匀度系数进行衡量^[15]：

$$C_i = \frac{\gamma_{12}^{\max} - \gamma_{12}^{\min}}{\gamma_{12}^{\text{avg}}} \quad (4)$$

式中： C_i 为非均匀度系数， $i=1, 2, 3$ 分别表示法向剪切应变，横向剪切应变和等效应变的非均匀度系数； \max, \min, avg 分别表示上述不同应变类型的最大值、最小值和平均值。

表 1 和表 2 分别给出了不同厚度板材经过 ECAB-1 和 ECAB-2 变形后，法向、横向剪切应变以及等效应变非均匀度分布。可知，在 ECAB-1 过程中，各厚度板材的法向剪切应变的非均匀度都超过 1，且 2 mm 和 5 mm 板材非均匀度要大于 9 mm 和 15 mm 板材。经过 ECAB-2 后该趋势更加明显，5 mm 板材的非均度为 1.56，显著高于 15 mm 板材的 0.612。可见变形过程中，摩擦对于薄板的影响明显大于厚板，该结果与文献[15]一致。与法向剪切应变对比可知，横向剪切应变和等效应变的非均匀度明显变小。ECAB-1 和 ECAB-2 的横向剪切应变非均匀度的最大值分别为 0.24 和 0.18，最小值分别为 0.115 和 0.024。等效应变的非均匀度的最大值分别为 0.404 和 0.362，最小值分别为 0.137 和 0.140。上述对比结果也表明，在板材横向可以累积较为均匀的剪切应变，有望实现均匀组织和织构控制。

3.3 成形载荷分析对比

镁合金板材的模拟和实验成形载荷曲线见图 8。可知，ECAB 成形过程中载荷曲线可分为前段的缓慢增长和后续快速增长阶段。随着板材厚度的增加，成形载荷明显升高，最大成形力分别为 22, 49.1, 85.2, 119.2 kN。在成形过程中，需要考虑复位弹簧力的影响。经过测试弹簧的刚度系数 k 为 70.67 N/mm。文中根据胡克定律，利用式(4)对成形载荷进行修正：

$$F_M = F_T - 4kx \quad (5)$$

式中： F_M 为修正后的成形载荷； F_T 为测试成形载荷； x 为变形位移(mm)。

未修正前的最大成形载荷为 24.6 kN，修正后的成形载荷为 21.6 kN。修正前后，模拟和实验的相对

表 1 ECAB-1 剪切弯曲变形后法向、横向剪切应变以及等效应变非均匀度

Tab.1 The inhomogeneity of normal shear strain, transitive shear strain and effective strain after the ECAB-1 deformation

板材厚度/mm	法向剪切应变				横向剪切应变				等效应变			
	γ_{12}^{\max}	γ_{12}^{\min}	γ_{12}^{avg}	C_1	γ_{12}^{\max}	γ_{12}^{\min}	γ_{12}^{avg}	C_2	$\bar{\epsilon}_{\text{eq}}^{\max}$	$\bar{\epsilon}_{\text{eq}}^{\min}$	$\bar{\epsilon}_{\text{eq}}^{\text{avg}}$	C_3
2	0.125	0.010	0.089	1.30	0.115	0.102	0.111	0.115	0.252	0.175	0.221	0.346
5	0.180	0.010	0.138	1.23	0.176	0.145	0.162	0.176	0.331	0.27	0.31	0.196
9	0.187	0.014	0.142	1.21	0.182	0.149	0.172	0.182	0.36	0.229	0.323	0.404
15	0.243	0.048	0.193	1.01	0.249	0.204	0.224	0.249	0.362	0.315	0.343	0.137

表2 ECAB-2 剪切弯曲变形法向、横向剪切应变以及等效应变均匀度

Tab.2 The inhomogeneity of normal shear strain, transitive shear strain and effective strain after the ECAB-2 deformation

板材厚度/mm	法向剪切应变				横向剪切应变				等效应变			
	γ_{12}^{\max}	γ_{12}^{\min}	γ_{12}^{avg}	C_1	γ_{12}^{\max}	γ_{12}^{\min}	γ_{12}^{avg}	C_2	$\bar{\varepsilon}_{\text{eq}}^{\max}$	$\bar{\varepsilon}_{\text{eq}}^{\min}$	$\bar{\varepsilon}_{\text{eq}}^{\text{avg}}$	C_3
2	0.203	0.04	0.121	1.35	0.239	0.227	0.231	0.052	0.196	0.168	0.201	0.140
5	0.258	0.036	0.142	1.56	0.29	0.283	0.286	0.024	0.29	0.191	0.271	0.362
9	0.314	0.155	0.245	0.649	0.314	0.3	0.311	0.045	0.411	0.329	0.384	0.213
15	0.350	0.168	0.300	0.612	0.414	0.342	0.386	0.187	0.443	0.361	0.411	0.200

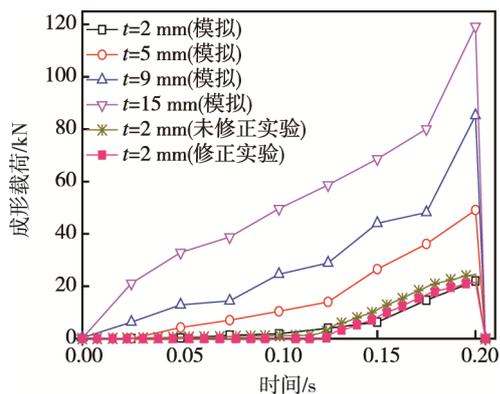


图8 不同厚度镁合金板材 ECAB 过程中模拟和实验成形载荷分布

Fig.8 The simulation and experiment results of forming load of magnesium alloy sheets with different thickness in ECAB process

误差分别为 11.8%和 1.82%。对比结果表明,修正后的实验载荷和模拟结果高度吻合,采用该模拟模型可以很好的预测 ECAB 过程的成形载荷。

4 结论

1) 设计了新型 ECAB 模具,可实现在不同厚度镁合金板材中较均匀剪切应变的累积,在镁合金薄板中实现单道次 0.203 的剪切应变。

2) ECAB-1 和 ECAB-2 非均匀应变均匀参数分布表明,板材横向剪切应变和等效应变非均匀度明显低于法向剪切应变。

3) 修正的实验和模拟成形结果表明,利用建立的数值模型可以较好的预测 ECAB 成形过程中的成形载荷。

参考文献:

[1] 丁云鹏,崔建忠,乐启炽,等. 镁合金板材的生产历史和现状[J]. 精密成形工程, 2014, 6(6): 7—21.
DING Yun-peng, CUI Jian-zhong, LE Qi-chi. Production History and Present Study Status of Magnesium Alloy Sheet[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(6): 7—21.

[2] FRIEDRICH H, SCHUMANN S. Research for a New Age of Magnesium in the Automotive Industry[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 117(3): 276—281.

[3] 刘庆. 镁合金塑性变形机理研究进展[J]. 金属学报, 2010, 46: 1458—1472.
LIU Qing. Research Progress on Plastic Deformation Mechanism of Mg Alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46: 1458—1472.

[4] 丁文江, 靳丽, 吴文祥, 等. 变形镁合金中的织构及其优化设计[J]. 中国有色金属学报, 2011(10): 2371—2381.
DING Wen-jiang, JIN Li, WU Wen-xiang, et al. Texture and Texture Optimization of Wrought Mg Alloy[J]. The Chinese Journal Nonferrous Metals, 2011(10): 2371—2381.

[5] VICTORIA-HERNANDEZ J, YI S, BOHLEN J, et al. The Influence of the Recrystallization Mechanisms and Grain Growth on the Texture of a Hot Rolled AZ31 Sheet during Subsequent Isochronal Annealing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 616: 189—197.

[6] HUANG G S, LI H C, SONG B, et al. Tensile Properties and Microstructure of AZ31B Magnesium Alloy Sheet Processed by Repeated Unidirectional Bending[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(1): 28—33.

[7] KIM W J, YOO S J, CHEN Z H, et al. Grain Size and Texture Control of Mg-3Al-1Zn Alloy Sheet using a Combination of Equal-channel Angular Rolling And-high-Speed-Ratio Differential Speed-Rolling Processes[J]. Scripta Materialia, 2009, 60: 897—900.

[8] QIAO X G, ZHAO Y W, GAN W M, et al. Hardening Mechanism of Commercially Pure Mg Processed by High Pressure to Rosinate Room Temperature[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 619: 95—106.

[9] KAIM, HORITA Z, LANGDON T G. Developing Grain Refinement and Superplasticity in a Magnesium Alloy Processed by High-pressure Torsion[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 488: 117—124.

[10] DOGAN E, VAUGHAN M W, WANG S J, et al. Role of Starting Texture and Deformation Modes on Low-tem-

- perature Shear Formability and Shear Localization of Mg-3Al-1Zn Alloy[J]. Acta Materialia, 2015, 89: 408—422.
- [11] WEI W, ZHANG W, WEI K X, et al. Finite Element Analysis of Deformation Behavior in Continuous ECAP Process[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 516: 111—118.
- [12] GÖRTAN O M, GROCHE P. Tool Design Guidelines for the Equal Channel Angular Swaging (ECAS)[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214: 2220—2232.
- [13] 宋鸿武, 陈帅峰, 程明, 等. 不同压剪复合应变路径下连续大塑性变形的装置: 中国, ZL201621057982.9[P]. 2016.
- SONG Hong-wu, CHEN Shuai-feng, CHENG Ming, et al. Setup for Continues Serve Plastic Deformation under the Compress-shear Composed Strain Path: China, ZL201621057982.9[P]. 2016.
- [14] SHI T, YU K, LI W X, et al. Hot-compression Constitutive Relation of As-cast AZ31 Magnesium Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17: 336—341.
- [15] SUO T, LI T L, GUO Y Z, et al. The Simulation of Deformation Distribution during ECAP Using 3D Finite Element Method[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 432: 269—274.

连续大塑性变形中压剪复合应变路径的变化与实现方法

压缩-剪切(简称压剪)复合变形是大塑性变形(SPD)工艺的一种。通过剪切变形有效细化组织(超细晶乃至纳米晶),制备高性能金属材料。目前常用的压剪工艺如高压扭转(HPT)、等通道挤压(ECAP)、旋转模挤压(TE)等均存在成形载荷大、制备样品尺寸有限、变形均匀性较差、难以连续生产和调节压剪复合变形路径等不足。为此中科院金属所研究人员提出一种实现不同压剪复合应变路径下连续大塑性变形的的方法和装置(ZL201621057982.9)。通过弯曲模设计,在材料中引入均匀的剪切变形。配合其他方向压缩,能够方便实现金属板材或棒材的纯剪、一剪一压、一剪二压、一剪三压等多种变形状态。在经过多个变形段或多道次变形,能够有效实现塑性变形的累积。采用的连续喂料也便于实现材料的连续化加工,制备出超细晶结构的高性能材料。