

加热方式对镁合金板材温渐进成形性能及力学性能的影响

郑志洋, 陈宇祥, 廖娟

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350116)

摘要: 不同加热方式会影响板材的温度分布, 使板材不同位置出现温差, 造成材料内部出现性能差异。针对上述问题, 采用碳纤维电热管和热空气这两种整体加热方式对镁合金板材进行加热, 通过成形变角度圆锥件和恒定成形角的方锥件来研究加热方式和成形温度对镁合金板材成形性能及其成形零件的力学性能的影响。结果表明: 在 150~275 °C 成形温度范围内, 镁合金板材的成形性能随着成形温度的升高而增强; 当成形温度为 250 °C 时, 镁合金板材具有较好的成形性能, 且其成形零件也获得了最优的力学性能; 在相同成形温度下, 采用碳纤维电热管加热时镁合金板材具有更好的成形性能, 其成形零件也具有更好的力学性能。

关键词: 镁合金; 温渐进成形; 加热方式; 成形性能; 力学性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.02.007

中图分类号: TG306 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 02-0049-07

Influence of heating method on formability and mechanical properties for magnesium alloy sheet in warm incremental forming

Zheng Zhiyang, Chen Yuxiang, Liao Juan

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: The temperature distribution of sheet is affected by different heating methods. Meanwhile, the temperature difference appears in the different positions of sheet, which resulting in material internal performance difference. In view of the above problems, the magnesium alloy sheets were heated by two overall heating methods of carbon fiber electric pipe heating and hot air heating, and the influences of heating methods and forming temperature on the formability of magnesium alloy sheet and the mechanical properties of its formed parts were studied by forming variable-angle cone parts and square cone parts with constant forming angle. The results show that in the forming temperature range of 150~275 °C, the formability of magnesium alloy sheet is enhanced with the increasing of forming temperature. When the forming temperature is 250 °C, the magnesium alloy sheet has better formability, and its formed parts also obtain the best mechanical properties. At the same forming temperature, the magnesium alloy sheet heated by carbon fiber electric pipe heating has better formability, and its formed parts also have better mechanical properties.

Key words: magnesium alloy; warm incremental forming; heating method; formability; mechanical properties

随着越来越严格的环境保护法规 (例如二氧化碳排放和燃料消耗等) 的颁布, 汽车制造商一直在研究减少车辆燃料消耗的有效措施^[1-2]。汽车的高效发展受到二氧化碳排放量和燃料消耗的限制, 一种可行的措施是通过采用轻质结构材料代替传统的钢材来减轻车身重量, 而不影响车身的力学性

能^[3]。作为一种潜在的轻质结构材料, 镁合金具有良好的力学性能, 例如高比强度、低密度和高比刚度。因此, 镁合金已成为军工、航空航天、汽车和医疗领域中极具吸引力的轻质结构材料之一^[4-5]。然而, 由于镁合金为密排六方晶体结构 (Hexagonal Closed-Packed, HCP), 以及在塑性变形过程中强烈的织构演化, 导致镁合金在室温下的成形性能较差^[6-7]。于是, 学者们通过采用热辅助成形工艺来提高成形温度以增强镁合金的成形性能^[8-9]。

金属板材渐进成形技术, 是一种具有柔性的新兴成形技术^[10]。由于渐进成形是逐点局部成形方式, 其成形性能要高于其他金属板材成形工艺^[11]。针对镁合金板材室温下塑性变形能力较低的问题,

收稿日期: 2020-12-31; 修订日期: 2021-03-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51805087); 福建省自然科学基金面上基金 (2018J01761, 2018J01764)

作者简介: 郑志洋 (1994-), 男, 硕士

E-mail: n180227088@fzu.edu.cn

通信作者: 廖娟 (1984-), 女, 博士, 教授

E-mail: jliao@fzu.edu.cn

许多学者在板材渐进成形的基础上开发了各种温/热渐进成形工艺。将其按照加热方式进行分类,可以分为 2 种方式:整体加热、局部加热。整体加热方式有油浴加热^[12-13]、热风加热^[14-15]等;局部加热有激光加热^[16-17]、摩擦热^[18-19]、电阻热^[20-21]等。但是,这些研究均只考虑了某一种加热方式的可行性及其相关工艺参数对成形性能的影响,针对加热方式不同会对材料成形性能和成形零件的力学性能造成影响的研究鲜见报道。

在各种加热方式下的镁合金温/热渐进成形工艺中,温度始终是影响材料成形性能的主要因素。然而,加热方式主要影响板材的温度分布,使板材不同位置出现温差,造成材料内部性能差异,从而影响材料的成形性能和成形零件的力学性能。本文通过采用热空气(Hot Air, HA)加热和碳纤维电热管(Carbon Fiber Electric Pip, CFEP)加热这 2 种整体加热方式对镁合金板材进行加热,并采用单因素方法,研究了加热方式和成形温度对 AZ31B 镁合金板材的成形性能和成形零件的力学性能的影响及其原因。

1 实验设备及材料

1.1 实验装置

本实验使用 1 台改造过的三轴数控铣床作为镁

合金温渐进成形设备。采用 2 种整体加热装置对镁合金板材进行加热,即热空气加热装备和碳纤维电热管加热装备,如图 1 所示。热空气加热装置采用鼓风机将室温空气以一定的流速通过热空气加热芯后进入渐进成形工作台内部,实现热空气与镁合金板材的对流换热,从而实现对镁合金板材的加热。碳纤维电热管加热装置采用 4 根 500 W 的电热管呈“井”字分布,通过发射远红外线对镁合金板材进行辐射加热。这 2 种加热装置均采用相同的保温系统和温度控制系统,其中,保温系统采用在渐进成形工作台内部放置硅酸铝隔热板以起到保温隔热作用。在成形温度控制过程中,使用在线式红外测温仪测量镁合金板材中心区域温度,其测量范围为板材中心直径约为 $\Phi 22$ mm 的圆形区域,由于不同材料的反射率不同,因此,在实验前期需反复通过接触式测温仪对其进行校正,使两者测得的温度值相同。在线式红外测温仪测量板材中心区域温度后,使用 4~20 mA 的电流信号,将该区域的平均温度信号反馈给带 PID 功能的温度控制器,由温度控制器根据反馈的温度信号实时调整热空气加热线圈/碳纤维电热管功率,以实现恒温闭环温度控制。另外,本实验采用 1 台 Guide IPT384 热成像仪对实验过程中的全温度场进行实时观测,用于对比分析 2 种加热方式的温度场演化。

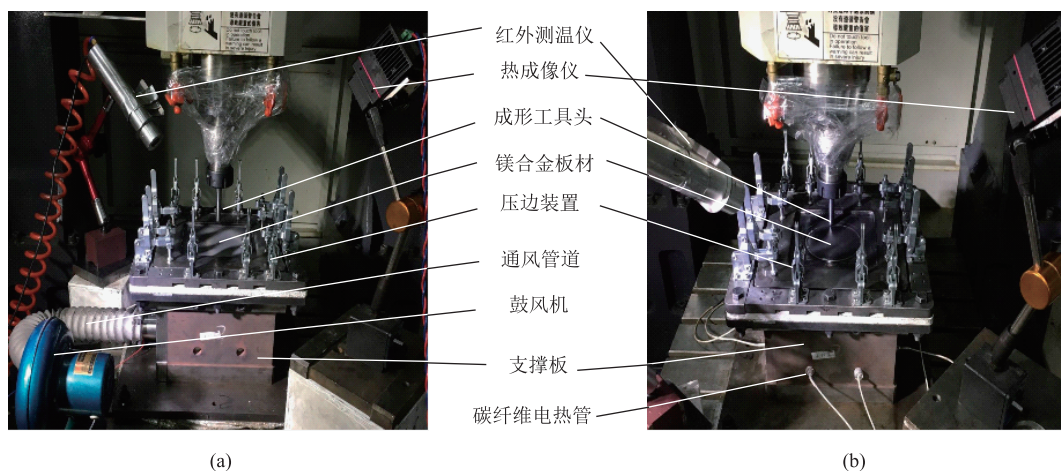


图 1 渐进成形加热装置

(a) 热空气加热 (b) 碳纤维电热管加热

Fig. 1 Heating devices of incremental forming

(a) HA-heating (b) CFEP-heating

1.2 实验材料及成形工具头

本文实验所用材料为 AZ31B 镁合金冷轧板,尺寸规格为 200 mm×200 mm×1 mm,其化学成分如表

1 所示。实验所用的成形工具头是由钨钢(YG3X)制成的刚性半球头工具,直径为 $\Phi 10$ mm。在成形过程中,为了减小成形工具头与镁合金板材之间的

表 1 AZ31B 镁合金化学成分（%，质量分数）
Table 1 Chemical compositions of AZ31B magnesium alloy
(%, mass fraction)

Al	Zn	Mn	Fe	Cu	Ni	Si	Mg
2.85	0.75	0.62	0.0029	0.00045	0.00052	0.025	余量

摩擦，采用耐高温石墨润滑脂 GX-501 作为润滑剂。

2 实验及测量方法

2.1 材料的成形性能实验

在本研究中，以成形极限角 θ_{\max} 作为评估镁合金温渐进成形性能的指标^[22]。通过成形开口直径为 $\Phi 120$ mm、深度为 50 mm、圆母线半径 R 为 90 mm、成形角范围为 $20.00^\circ \sim 67.41^\circ$ 的变角度圆锥件来研究材料的成形性能，其中成形角定义为变角度圆锥件侧壁上任意一点的切线与水平方向的锐角。目标成形零件的截面形状及几何尺寸如图 2 所示。在零件成形过程中密切关注零件的成形情况，当零件出现破裂时立即停止机床运行。从渐进成形工作台取出零件后，采用高度尺测量变角度圆锥件破裂处的成形高度 h ，并根据计算公式式（1）换算得到破裂点处的成形角大小。与成形恒定成形角的圆锥件相比^[23]，该方法可以有效地减少实验次数来确定材料的成形性能。

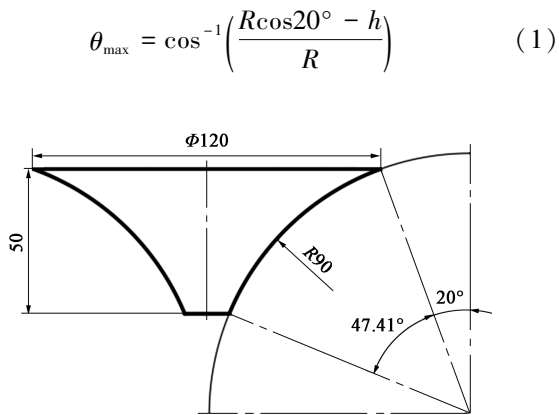


图 2 变角度圆锥件模型尺寸
Fig. 2 Dimensions of model for variable-angle cone part

镁合金温渐进成形的成形性能研究实验按前述的 2 种加热方式分为两组，每组分别设 4 种成形温度为 150、200、250 和 275 ℃。在各组实验中，恒定加工参数为成形工具头进给速率，为 $1000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，成形轨迹为等高线成形轨迹，成形轨迹的层间距为 0.25 mm。

2.2 成形零件的力学性能测试

通过成形上端开口为 $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 、成形角为 40° 、成形深度为 40 mm 的方锥件来研究成形零件的力学性能。采用电火花线切割在方锥件侧壁上切取出拉伸试样，单向拉伸试样尺寸参考 GB/T 228.1—2010 标准^[24]，试样标距为 20 mm。图 3a 显示了拉伸试样在零件侧壁上的切割位置，试样的纵向方向平行于成形工具头的成形轨迹，也平行于镁合金板材的轧制方向，并在距离底部 32 mm 处切割。试样的具体形状尺寸如图 3b 所示。采用岛津 AG-Xplus 系列台式电子万能实验机，以 $1.2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度均匀拉伸，应变速率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，每组实验重复 3~4 次。

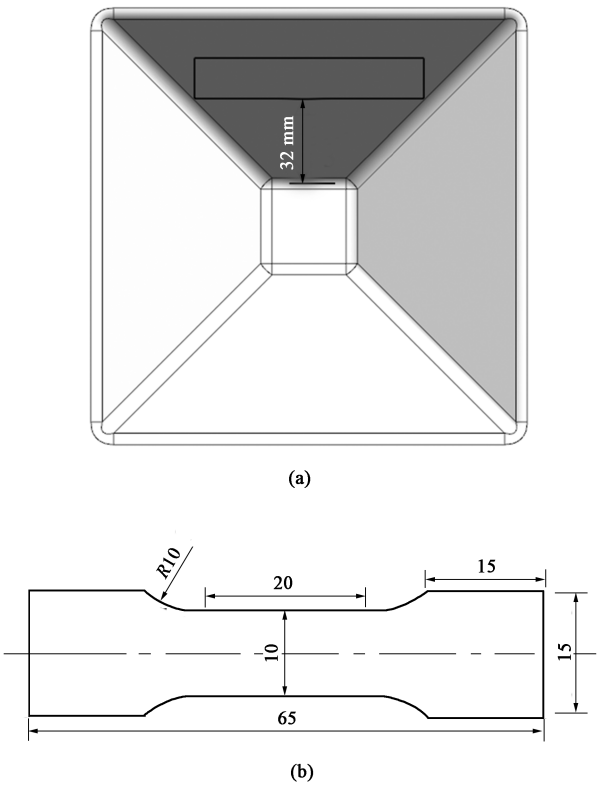


图 3 拉伸试样
(a) 拉伸试样切取位置 (b) 拉伸试样形状尺寸
Fig. 3 Tensile specimen
(a) Cutting position of tensile specimen (b) Shape and dimensions of tensile specimen

由于成形温度过低（如 150 ℃）时，镁合金板材无法完整成形出成形角为 40° 的方锥件。因此，成形方锥件时采用 3 种成形温度分别为：200、250 和 275 ℃。并且，在 2 种加热方式和各成形温度下，方锥件的恒定加工参数与变角度圆锥件的恒定加工参数相同。

3 结果与讨论

3.1 温度分布规律

镁合金板材成形后的温度分布情况是采用 Guide IPT384 热成像仪监测获得的,并结合配套软件查询得到特定位置点的温度值。零件成形后,从热成像仪监测的温度分布图中标记取点,如图 4 所示。其中, P_1 点为变角度圆锥件底部几何中心位置, P_2 点为变角度圆锥件底部边缘位置, $P_3 \sim P_6$ 点为变角度圆锥件侧壁从中心到边缘顺序等间距标记取点。根据 $P_1 \sim P_6$ 各点记录的温度值,绘制出在不同加热方式和成形温度下镁合金板材在成形过程中的温度变化趋势图,如图 5 所示。由图 5 可知,在各成形温度下采用热空气加热成形时,成形零件的最高温度区域位于零件底部平面区域(图 4 中 P_1

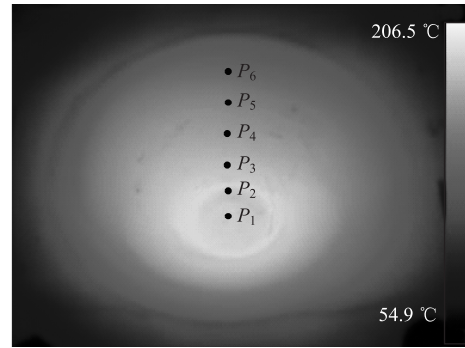


图 4 成形零件取点位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of point locations on forming part

点),且由零件底部中心至侧壁温度逐渐降低,这是由于热空气加热装备的出风口是与外界环境直接相通的,距离出风口越近带走的热量越多,温度也就越低。采用碳纤维电热管加热成形时,随着成形的进行,最高温度区域由底部平面转移至侧壁(图

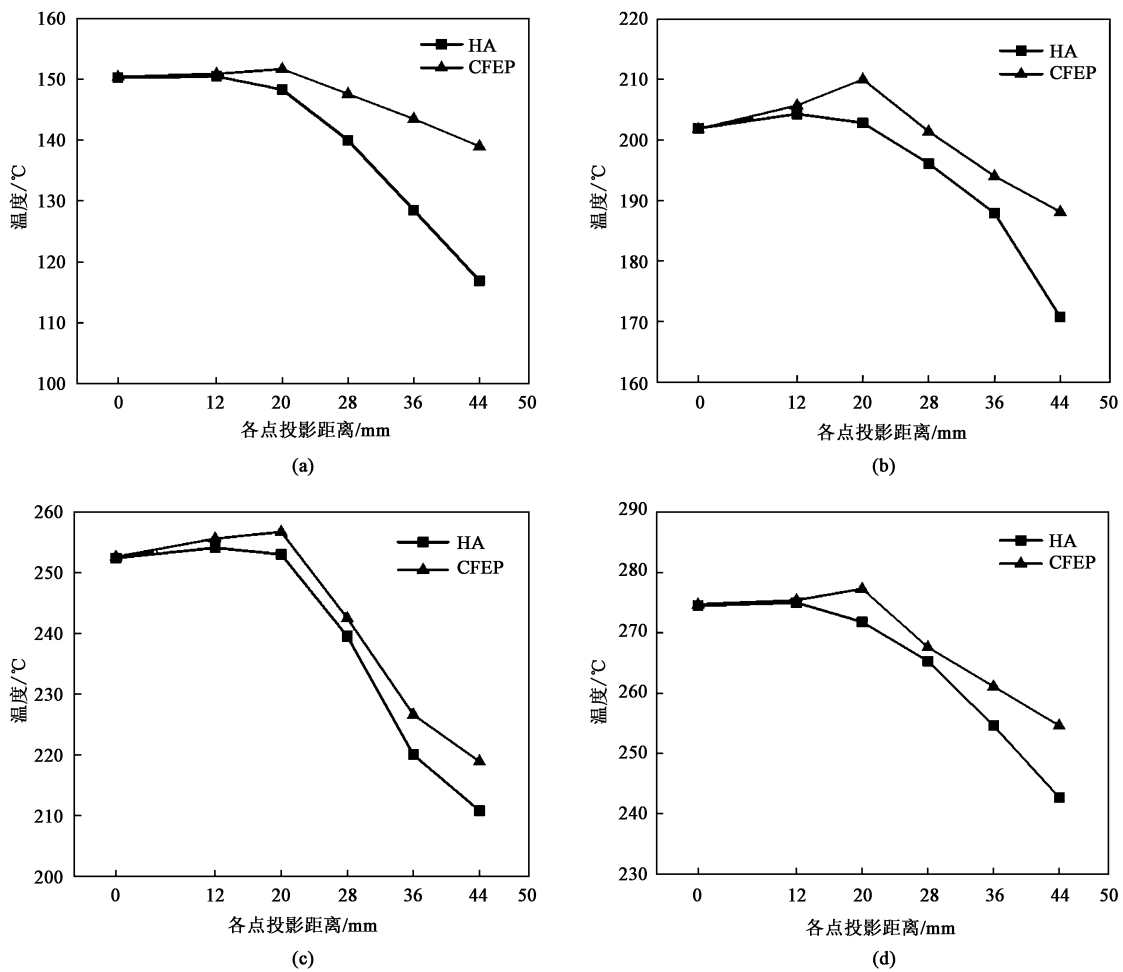


图 5 不同加热方式和成形温度下成形零件的温度分布对比

(a) 150 °C (b) 200 °C (c) 250 °C (d) 275 °C

Fig. 5 Comparison of temperature distribution for formed parts under different heating methods and forming temperatures

4 中 P_3 点), 这主要是由于在零件逐步成形过程中, 零件侧壁与碳纤维电热管的距离减小, 受到的辐射增强, 侧壁温度增大。同时, 由图 5 可知, 尽管温度反馈控制系统相同, 采用碳纤维电热管加热时, 镁合金板材的整体温度要比采用热空气加热时高。

3.2 成形性能分析

为了保证实验的准确度, 每个成形温度下的实验重复 3 次, 然后取其均值作为最终的实验结果。2 种加热方式、4 种成形温度, 共计 24 次实验, 每次实验结果及其均值如表 2 所示。根据表 2 中的实验结果, 以成形温度为横坐标, 成形极限角为纵坐标绘制出柱状图, 如图 6 所示。

表 2 成形性能实验结果
Table 2 Experimental results of formability

加热方式	成形温度/℃	破裂高度 h/mm , 成形极限角 $\theta_{\text{max}}/(^{\circ})$			
		实验 1	实验 2	实验 3	均值
HA	150	15.5, 39.9	14.7, 39.1	14.8, 39.2	15.0, 39.4
	200	25.1, 48.6	24.1, 47.8	25.3, 48.8	24.8, 48.4
	250	36.9, 58.0	36.8, 57.9	36.5, 57.7	36.7, 57.9
	275	43.2, 62.6	44.8, 63.8	43.9, 63.1	44.0, 63.2
CFEP	150	16.6, 40.9	17.1, 41.4	16.4, 40.8	16.7, 41.1
	200	27.0, 50.2	25.4, 48.9	25.1, 48.7	25.8, 49.2
	250	38.9, 59.5	38.4, 59.1	40.5, 60.7	39.3, 59.8
	275	46.8, 65.2	45.7, 64.4	46.4, 64.9	46.3, 64.8

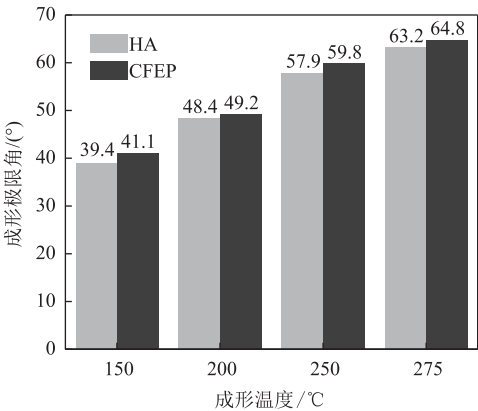


图 6 不同成形温度和加热方式下成形零件的成形极限角
Fig. 6 Forming limit angles of formed parts under different forming temperatures and heating methods

由图 6 可知, 在 2 种加热方式下, 镁合金板材的成形极限角均随成形温度的升高而增大。同时, 可以发现在各成形温度下, 采用碳纤维电热管加热时, 成形零件的成形极限角均大于采用热空气加热时成形零件的成形极限角, 表明采用碳纤维电热管

加热时, 镁合金板材具有更好的成形性能。这可能是由于在 150~275 ℃ 区间内镁合金板材的成形性能随温度的升高而呈增强趋势。并且由图 5 可知, 在成形过程中, 采用碳纤维电热管加热时镁合金板材的整体温度要比采用热空气加热时高, 也更均匀, 从而可能造成在各成形温度下采用碳纤维电热管加热时成形零件的成形极限角更大。

镁合金板材温渐进成形后的部分零件照片如图 7 所示。对比图 7a 和图 7b 可以明显发现, 当成形温度为 250 ℃ 时, 零件的成形高度比成形温度为 150 ℃ 时更高, 结合表 2 中的实验结果, 当成形温度为 250 ℃ 时, 镁合金板材的成形性能得到了显著提高。

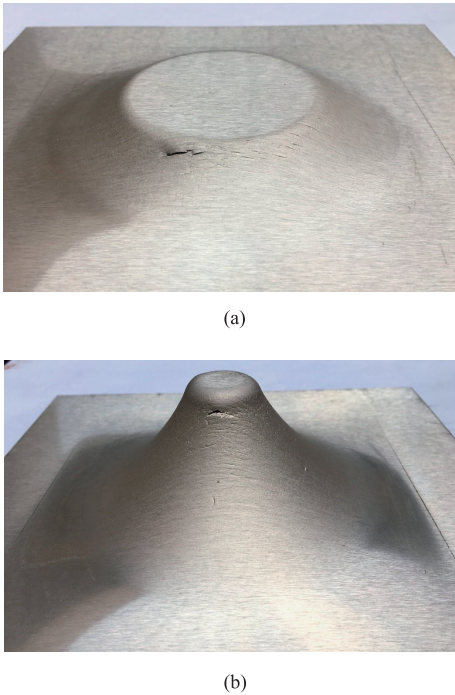


图 7 不同成形温度下成形的实际零件
(a) 150 ℃ (b) 250 ℃

Fig. 7 Actual parts formed at different forming temperatures

3.3 力学性能分析

从成形零件侧壁切取拉伸试样做单轴拉伸实验, 其真实应力-真实应变曲线如图 8 所示。由图 8 可知, 在不同加热方式下, 成形零件单轴拉伸实验的真实应力-真实应变曲线表现出相同的趋势。在 3 种成形温度下, 成形零件的抗拉强度和伸长率均小于母材。张青来等^[25]指出了镁合金温渐进成形是一个包含加工硬化、静态再结晶、动态回复和动态再结晶的复杂过程。成形零件的抗拉强度小于母材, 说明了镁合金温渐进成形过程中动态再结晶的软化作用比加工硬化作用更明显。镁合金板材经过加工

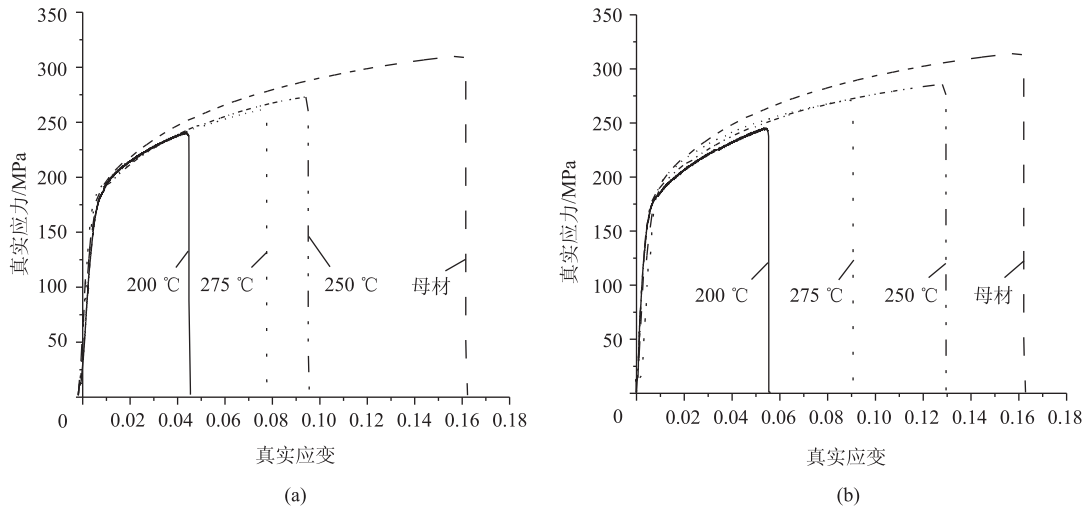


图 8 不同加热方式下成形零件单轴拉伸实验的真实应力-真实应变曲线

(a) 热空气加热 (b) 碳纤维电热管加热

Fig. 8 Curves of true stress-true strain for formed parts under uniaxial tensile tests with different heating methods

(a) HA-heating (b) CFEP-heating

后, 内部位错密度较母材大, 且在室温下拉伸过程中镁合金可动滑移系少, 因此, 表现出伸长率低于母材。张三等^[26]的研究显示: 当成形温度为 200 °C 时, 镁合金板材在成形过程中发生了部分动态再结晶; 当成形温度为 250 °C 时, 镁合金板材在成形过程中发生了完全动态再结晶。因此, 由于在 200 °C 时动态再结晶不充分, 位错累积较大, 成形零件的伸长率和抗拉强度最低; 在 250 °C 时动态再结晶完全发生, 成形零件的伸长率和抗拉强度最高; 275 °C 时温度较高, 动态再结晶后晶粒再生长, 晶粒较大, 成形零件的伸长率和抗拉强度较 250 °C 时有所降低。

不同加热方式对成形零件的抗拉强度和伸长率的影响如图 9 所示。由图 9 可知, 在各成形温度下, 采用碳纤维电热管加热时成形零件的抗拉强度及伸长率均比采用热空气加热时高。这可能是由于采用碳纤维电热管加热时镁合金板材的整体温度比采用热空气加热时高, 也更均匀, 造成了镁合金板材在成形过程中发生的动态再结晶较采用热空气加热时充分, 位错密度降低, 使得采用碳纤维电热管加热时成形零件的抗拉强度和伸长率均比采用热空气加热时高。因此, 采用碳纤维电热管加热时镁合金板材的成形零件具有更好的力学性能。

4 结论

(1) 通过变角度圆锥件成形实验研究了加热方

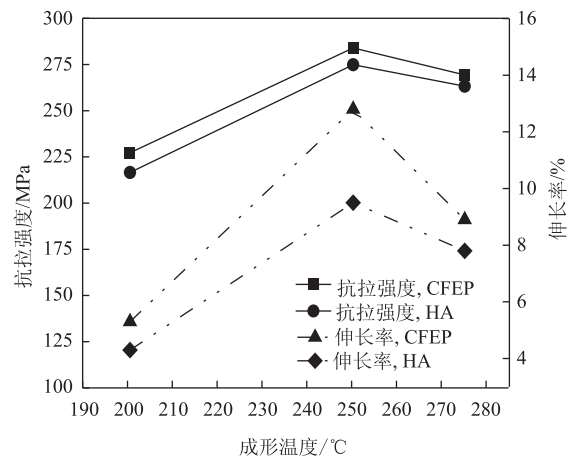


图 9 加热方式对抗拉强度和伸长率的影响

Fig. 9 Influences of heating method on ultimate tensile strength and elongation

式对镁合金板材成形性能的影响。结果表明, 在相同成形温度下, 采用碳纤维电热管加热时镁合金板材具有更好的成形性能。

(2) 通过恒定成形角的方锥件成形实验研究了加热方式对成形零件力学性能的影响。结果表明, 在相同成形温度下, 采用碳纤维电热管加热时镁合金板材的成形零件具有更好的力学性能。

(3) 当成形温度为 150~275 °C 时, 镁合金板材的成形性能随温度的升高而增强。

(4) 当成形温度为 250 °C 时, 镁合金板材具有较好的成形性能, 且其成形零件也具有最优的力学性能。

参考文献:

- [1] Kleiner M, Geiger M, Klaus A. Manufacturing of lightweight components by metal forming [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2003, 52 (2): 521-542.
- [2] Billur E, Altan T. Challenges in forming advanced high strength steels [A]. New Developments in Sheet Metal Forming [C]. Stuttgart, 2010.
- [3] Wong T W, Hadadzadeh A, Wells M A. High temperature deformation behavior of extruded AZ31B magnesium alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 251 (36): 360-368.
- [4] Pollock M T. Weight loss with magnesium alloys [J]. Science, 2010, 328 (5981): 986-987.
- [5] Kulekci M K. Magnesium and its alloys applications in automotive industry [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39 (9-10): 851-865.
- [6] Mordike B L, Ebert T. Magnesium; Properties-applications-potential [J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 302 (1): 37-45.
- [7] Agnew S R, Mehrotra P, Lillo T M, et al. Texture evolution of five wrought magnesium alloys during route a equal channel angular extrusion: experiments and simulations [J]. Acta Materialia, 2005, 53 (11): 3135-3146.
- [8] Ambrogio G, Filice L, Manco G L. Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31 [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57 (1): 257-260.
- [9] Neugebauer R, Altan T, Geiger M, et al. Sheet metal forming at elevated temperatures [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2006, 55 (2): 793-816.
- [10] Emmens W C, Sebastiani G, Boogaard A H V D. The technology of incremental sheet forming-A brief review of the history [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210 (8): 981-997.
- [11] Malhotra R, Xue L, Belytschko T, et al. Mechanics of fracture in single point incremental forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212 (7): 1573-1590.
- [12] 史鹏涛, 李言, 杨明顺, 等. 液体介质加热的镁合金板料热渐进成形极限研究 [J]. 机械强度, 2018, 40 (2): 412-417.
- [12] Shi P T, Li Y, Yang M S, et al. Research on the forming limit of incremental thermal forming of magnesium alloy sheet heated by liquid medium [J]. Journal of Mechanical Strength, 2018, 40 (2): 412-417.
- [13] 张三, 唐桂华, 李克杰, 等. 基于响应曲面法的 AZ31B 镁合金油浴加热渐进成形性能研究 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (5): 87-94.
- [13] Zhang S, Tang G H, Li K J, et al. Study on formability of incremental forming by oil bath heating for AZ31B magnesium alloy based on response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (5): 87-94.
- [14] Ji Y H, Park J J. Formability of magnesium AZ31 sheet in the incremental forming at warm temperature [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201 (1-3): 354-358.
- [15] André L, Kurz G, José V H, et al. Experimental study on incremental sheet forming of magnesium alloy AZ31 with hot air heating [J]. Procedia Manufacturing, 2018, 15: 1192-1199.
- [16] Dufflou J R, Callebaut B, Verbert J, et al. Laser assisted incremental forming: Formability and accuracy improvement [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2007, 56 (1): 273-276.
- [17] Dufflou J R, Callebaut B, Verbert J, et al. Improved SPIF performance through dynamic local heating [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48 (5): 543-549.
- [18] Wang Z H, Cai S, Chen J. Experimental investigations on friction stir assisted single point incremental forming of low-ductility aluminum alloy sheet for higher formability with reasonable surface quality [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 277: 116488.
- [19] Xu D K, Wu W C, Malhotra R, et al. Mechanism investigation for the influence of tool rotation and laser surface texturing (LST) on formability in single point incremental forming [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2013, 73 (10): 37-46.
- [20] Fan G Q, Gao L, Hussain G, et al. Electric hot incremental forming: A novel technique [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48 (15): 1688-1692.
- [21] Ambrogio G, Filice L, Gagliardi F. Formability of lightweight alloys by hot incremental sheet forming [J]. Materials & design, 2012, 34 (2): 501-508.
- [22] Hussain G, Gao L, Dar N U. An experimental study on some formability evaluation methods in negative incremental forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 186 (1-3): 45-53.
- [23] Hussain G, Gao L. A novel method to test the thinning limits of sheet metals in negative incremental forming [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47 (3-4): 419-435.
- [24] GB/T 228.1—2010, 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法 [S].
- [24] GB/T 228.1—2010, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [25] 张青来, 肖富贵, 郭海玲, 等. 各向异性对镁合金板材渐进成形的影响及微观组织演变 [J]. 中国有色金属学报, 2009, 19 (5): 800-807.
- [25] Zhang Q L, Xiao F G, Guo H L, et al. Effect of anisotropy on incremental forming of magnesium alloy sheet and its microstructure evolution [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19 (5): 800-807.
- [26] 张三, 唐桂华, 沈建冬, 等. 成形温度对镁合金温热渐进成形微观组织及断口形貌的影响 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (3): 90-97.
- [26] Zhang S, Tang G H, Shen J D, et al. Influence of forming temperature on microstructure and fracture morphology of magnesium alloy during warm incremental sheet forming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (3): 90-97.