

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.014

铝合金通电拉深成形规律研究

姚雨

(南京邮电大学 工程实验教学部,江苏 南京 211106)

摘 要:将脉冲电流辅助与传统拉深实验结合,通过凸模—凹模通电拉深、压边圈—凹模通电拉深实验,研究脉冲电流辅助下对 2024 铝合金拉深性能的影响以及不同通电方式下的失效和破裂形式。结果表明:压边圈—凹模通电拉深较室温下提高 134%,零件破裂形式主要是沿凸模圆角处破裂;凸模—凹模通电拉深由于法兰区域温度较低,材料不易流动而难以成形,且零件大多在凹模圆角处破裂。

关键词:脉冲电流;拉深;铝合金;电致塑性

中图分类号:TG35 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)01-0073-04

Research of Current Deep Drawing Forming Law of Aluminum Alloy

YAO Yu

(Engineering Experimental Teaching Center, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 211106, China)

Abstract: This article, by combining pulse current assistance with traditional deep drawing experiments, studies the effect of pulse current assistance on the properties of 2024 aluminium alloy deep drawing and the different modes of failure and fracture through the experiments of punch-die-electricity way deep drawing and blank-die-electricity way deep drawing. The results show that the blank-die-enlectricity deep drawing increases by 134%, higher than the room temperature one, with parts fracture occurring mainly around the punch-nose angle, while the punch-die-electricity way deep drawing fails in material forming due to difficulty in current distribution caused by the low temperature in flange region, with parts fracturing mainly around the blank-nose angle.

Keywords: pulse current; deep drawing; aluminum alloy; electroplastic

0 引言

工业上常采用高温成型的方式来加工铝镁等低塑性合金,但由于高温成型能耗大、效率低,不符合节能减排的需求,故开发一种新的低耗高效的成形工艺具有重大意义^[1]。然而近年来电致塑性加工作为一种新工艺越来越被人们重视。SÁNCHEZ 等^[2]对不同牌号的特种钢材料进行了通电切削试验,结果显示电脉冲辅助下提高了材料的切削性能,减少了 105.4 W 的能量消耗,相较传统加工平均表面粗糙度减小 6%~40%,这一现象可能与脉冲电流引发的电子风力促进位错运动有关^[3-5];ZHOU 等^[6]在对 Ti-6Al-4V 合金进行通电冷拉拔研究时发现,电脉冲可以提高具有不良取向晶粒的变形能力,从而使得晶粒间的变形兼容性更好,类似效应在铝合金中表现为电脉冲诱导织构改性^[7]。BAO 等^[8]在对 AZ31B 热轧板进行电脉冲辅助渐进成形的研究中发现,电脉冲辅助下的 AZ31B 材料在较低温度(180 ℃)下

就发生了动态再结晶,而传统 AZ31B 的动态再结晶温度为 200 ℃~300 ℃,这种温度降幅在 2024 铝合金中可达 50 ℃以上,且成形零件相较于室温下破裂深度以及成形角度分别提高 479%、81.8%,其性能提升与电脉冲促进动态析出相均匀分布密切相关^[9-11]。

以上文献对电流影响材料力学性能的研究中,接入电流形式单一(如仅对比直流与脉冲模式^[12-13]),对于电流参数(频率、密度、脉宽)与成形性能的定量关系尚未建立,所以本文以 AL-(3.8-4.9)Cu-(1.2-1.8)Mg 铝合金为材料,结合实时电流控制策略,研究脉冲电流对于 2024 铝合金的成形性能的影响。

1 实验材料及方案

本文所采用的是 T4 状态下的 2 mm 厚的 2024 铝合金板材,将板材用线切割切成 $\phi 40$ 的圆板,用砂纸将切割面打磨光滑后进行实验,其具体质量分数如表 1 所示。

表 1 AL-Cu-Mg 铝合金板质量分数表 单位: %

元素	质量分数	元素	质量分数
Si	0.50	Cr	0.10
Fe	0.05	Zn	0.25
Cu	3.80~4.90	Ti	0.15
Mn	0.30~0.90	Al	余量
Mg	1.20~1.80	—	—

本文脉冲电流辅助下的拉深实验的创新点在于电极的接入点与以往的研究有所不同^[14-15],如图 1 所示。图 1(a)是常用的脉冲电流拉深的电极接入方式,其电流是从右到左流经整块坯料,因此该种通电方式下整个坯料都受到脉冲电流的作

用,而无法在板料上实现通电区域的控制。

本实验的电极接入方式如图 1(b)、图 1(c)所示,其中图 1(b)为在压边圈以及凹模上分别布置 4 个铜电极,压边圈 4 个电极并联接入电源正极,凹模 4 个电极并联接入电源负极,这样电流由上向下走,且集中在法兰区域。该设计可提升电流密度利用率。由于法兰区域是筒形件拉深过程中的主要变形区域,电流集中于该区域,使得法兰区域的材料温度高,有助于提高成形性,且相较于电流流经整块坯料而言电流利用率更高。图 1(c)为凸模—凹模进行通电,该种方式下电流密度以及温度主要集中在凸模与坯料接触的区域,其电流聚焦效应可使接触区产生瞬时高温^[16-17]。

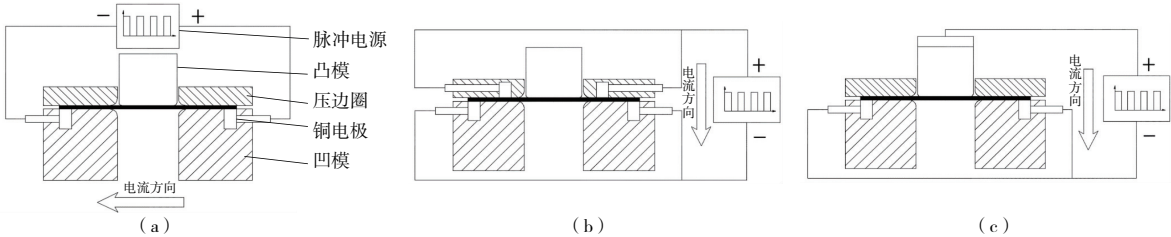


图 1 脉冲电流辅助拉深电极布置

2 实验结果及分析

2.1 室温下筒形件拉深

首先进行室温下的拉深实验,在室温下将筒形件拉深模具装在液压机上进行筒形件的拉深实验,该试验过程中采用固定压边间隙的方式,拉深过程中没有任何润滑措施。

图 2 所示为室温下拉深得到的筒形件。图上

从左至右拉深高度依次为 2.24 mm、3.27 mm、3.47 mm。可见拉深深度较浅的 a 件,已有微小裂纹。拉深件 b 随着拉深高度的增加裂纹长大,在筒底一周出现明显裂纹。随着拉深高度再次增加,拉深件 c 的筒底已经破裂,且以一种近乎冲孔的形式破裂。这与 2024-T4 铝合金低层错能导致的位错运动受限直接相关^[18],其断裂机制符合高强铝合金室温成形失效预测模型^[19]。

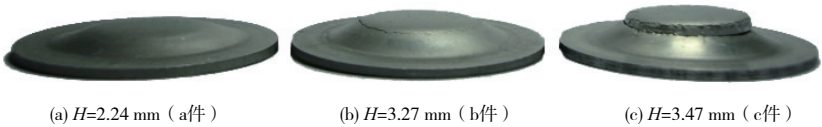


图 2 室温下拉深筒形件

2.2 压边圈—凹模通电拉深

以压边圈—凹模通电的方式(原理如图 1(b)所示)进行筒形件拉深实验,实验具体电参数如表 2 所示,图 3 为通电拉深所得零件图。实验中电流从压边圈流向凹模,用热电偶测温,测试点为拉深件凸缘区的外边缘。在拉深开始前先通电 30 s 预热再开始拉深,拉深过程中保持通电状态直至拉深结束。

表 2 压边圈—凹模通电拉深实验电参数表

电流/A	脉宽/s	频率/Hz	预通电时间/s	测试点温度/℃	拉深深度/mm
1 000	0.5	0.5	30	63	3.59
2 000	0.5	0.5	30	110	5.07
3 000	0.5	0.5	30	150	6.16
5 000	0.5	0.5	30	185	7.65



图3 压边圈—凹模通电拉深筒形件

结合表2以及图3发现,随着电流密度的增加,材料成形温度提高,且拉深高度也逐渐提高。当电流达到5 000 A时,材料温度达到185 ℃,拉深高度最高达到7.65 mm;较室温下拉深3.27 mm提高了近134%,且成形温度远低于该材料热成形温度。这说明随着电流的增加,材料塑性提高,且在脉冲电流辅助下可以使材料在较低温度条件下成形,这与近期研究,电脉冲的电子风力效应促进位错滑移系激活^[20-22]结论相吻合。

将图3(d)零件采用线切割的方式从中间切开,经砂纸抛光后,使用游标卡尺测量试筒形件的壁厚,具体测量点以及壁厚分布情况如图4所示。

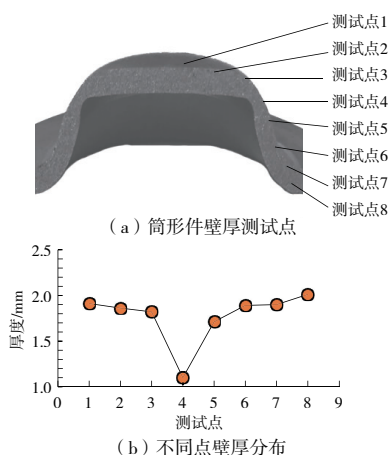


图4 测试点及壁厚分布

在拉深过程中,坯料各个部位的应力应变状态不同^[23],其中凸模圆角区受到径向和切向拉应力的作用,且在厚度方向受到凹模圆角的压力和弯曲作用,此处材料减薄最严重,正如图4(b)所示,测试点4减薄最严重;而筒底区域(测试点1)变形最小,厚度基本不变,所以从测试点1到测试点4,筒形件厚度逐渐减小;凸缘区域由于受到切

向压应力的作用,因此会有增厚的趋势,所以测试点8的厚度较原来稍有增加。

2.3 凸模—凹模通电拉深

以凸模—凹模通电的方式(图1(c))来进行筒形件拉深实验,出于可比性的考虑,电参数选取表2中3 000 A、5 000 A两组的电参数进行实验,实验方案如表3所示。实验中为了使凸模和坯料接触电阻尽可能小,在坯料上凸模与坯料接触区域垫上铜箔或石墨纸;拉深开始前液压机下行至凸模与坯料正好接触位置,通电30 s预热,再开始拉深,拉深过程中保持通电状态直至拉深结束。

表3 凸模—凹模通电拉深实验电参数表

电流/A	垫片材料	脉宽/s	频率/Hz	预通电时间/s
3 000	铜箔	0.5	0.5	30
	石墨纸	0.5	0.5	30
5 000	铜箔	0.5	0.5	30
	石墨纸	0.5	0.5	30

按照表3实验方案所得结果,可见该种通电方式材料很难拉深成形,如图5所示。在凸模—凹模通电方式下,凸模与坯料接触区域坯料上的温度较高,而法兰区域温度较低,导致法兰区域材料不易流入,使得材料难以成形。从图5中拉深式样的破裂形式与室温下破裂形式(图2(c))存在较大差异。从图5(e)、图5(f)可见,凸模—凹模通电方式下破裂主要发生在凹模圆角区域,这主要是由于在该种通电方式下电流集中于凸模与坯料接触区域,而凹模圆角区域与法兰区域电流密度以及温度都很低,所以凹模圆角区域塑性差易破裂。图5(a)、图5(c)凸模圆角处已经断裂,且并未完全脱落,这主要是由于垫铜箔后,凸模与坯料接触位置摩擦增大导致材料在凸模圆角处破裂。

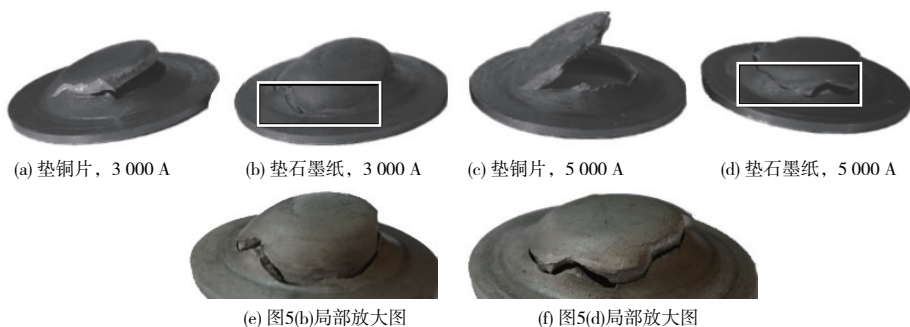


图5 凸模—凹模通电拉深筒形件

2.4 两种通电方式的失效形式对比

在进行上述两种通电方式的实验时,总会发生通电失效而引发打火甚至产生焊接现象。压边圈—凹模通电失效形式主要为法兰区域焊接,这主要是由于坯料与模具接触不均匀导致,同时压边力不均匀也会造成局部电流密度过大,从而产生焊接现象。凸模—凹模通电失效形式主要为筒底的焊接现象,这也是由于凸模与坯料接触不均匀而导致的。由此可见,接触以及受力不均的问题是导致局部电流集聚的主要失效诱因。

3 结语

本文以筒形件拉深为例,研究了 2024-T4 铝合金在室温和通电条件下的拉深成形性能,得出如下结论。

1) 2024-T4 铝合金在室温下的成形性很差,只能拉深出很浅的碟形件,且发生了脆性断裂。

2) 通过在压边圈—凹模处接入脉冲电流辅助的方式可以很好地提高 2024-T4 铝合金成形性能。随着电流密度的增加,拉深高度也得以增加。当电流达到 5 000 A 时,拉深高度较室温下提高了近 134%,这说明电流密度对拉深成形具有改善作用。而凸模—凹模通电方式,由于电流集中在凸模与坯料接触位置而使得材料不易成形。

3) 压边圈—凹模通电模式通过法兰区动态再结晶调控和位错密度降低协同提升了材料的成形性,而凸模—凹模模式因电流路径不合理导致应力集中加剧。

参考文献:

- [1] 秦嘉骏,王微. 关于车辆构件热金属气压成型工艺研究[J]. 中国科技期刊数据库 工业 a, 2021(10): 164-165.
- [2] SÁNCHEZ EGEA A J, GONZÁLEZ ROJAS H A, MONTILLA MONTAÑA C A, et al. Effect of electroplastic cutting on the manufacturing process and surface properties [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 222: 327-334.
- [3] LIU F, TU Y Y, WANG Q, et al. Microstructure evolution and mechanical behavior of 2024 aluminum alloy under electric pulse treatment [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1010: 177237.
- [4] 徐勋虎,康庆鑫,刘永康,等. 电流辅助成形技术研究进展及展望[J]. 塑性工程学报, 2023, 30(6): 58-66.
- [5] 张弘斌,房蕊蕊,邓娜娜,等. 脉冲电流处理对冷轧态 GH3030 合金再结晶组织性能的影响[J]. 精密成形工程, 2021, 13(1): 95-104.
- [6] ZHOU Y, CHEN G Q, FU X S, et al. Effect of electropulsing on deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy during cold drawing [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(4): 1012-1021.
- [7] JIANG H T, LIU J X, MI Z L, et al. Texture evolution of commercial pure Ti during cold rolling and recrystallization annealing [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2012, 19(6): 530-535.
- [8] BAO W K, CHU X R, LIN S X, et al. Experimental investigation on formability and microstructure of AZ31B alloy in electropulse-assisted incremental forming [J]. Materials & Design, 2015, 87: 632-639.
- [9] LI S S, CHEN L, CHU X R, et al. Improvement in mechanical properties of Al-Zn-Mg alloy by applying electric pulse during hot extrusion [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(2): 1210-1220.
- [10] HE P D, WEBSTER R F, YAKUBOV V, et al. Fatigue and dynamic aging behavior of a high strength Al-5024 alloy fabricated by laser powder bed fusion additive manufacturing [J]. Acta Materialia, 2021, 220: 117312.
- [11] ZHOU T, LI Y, GUO F, et al. Achieving high strength-ductility synergy in Mg-6Sn-3Zn-0.3Zr (wt.%) alloy via a combination of casting, pre-treatment and hot extrusion [J]. 2024, 12(11): 4622-4645.
- [12] 曹凤雷,毛亚宁,汪殿龙,等. 金属材料裂纹电脉冲修复研究进展[J]. 热加工工艺, 2023, 52(22): 1-5, 10.
- [13] 朱露,谭长生,范浩南,等. 电脉冲处理对 TC21 钛合金显微组织及硬度的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2025(1): 1-11.
- [14] 熊奇,邱爽,李彦昕,等. 组合式电磁成形技术研究进展[J]. 电工技术学报, 2024, 39(9): 2710-2729.
- [15] 霁振球. 纯电塑性效应及电脉冲辅助拉深成形研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [16] YU J, CAI C, XIE J, et al. Keyhole stability, arc behavior, and molten pool flow in narrow-gap oscillating laser-arc hybrid welding of titanium alloy [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 220: 124922.
- [17] LI Y, WANG F S, HUANG C G, et al. Impact damage reduction of woven composites subject to pulse current [J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 5046.
- [18] 王磊,李东侠,回丽,等. 2024-T4 铝合金 FSW 接头疲劳裂纹扩展行为及寿命预测[J]. 焊接学报, 2023, 44(4): 77-83, 133-134.
- [19] XIN Z H, YANG G L, HU J M, et al. 电池包用 5083 铝合金断裂失效研究[J]. 汽车实用技术, 2024, 49(19): 1-7.
- [20] CAO F R. Electron wind stress model and calculation examples under pulse current [J]. Advances in Condensed Matter Physics, 2017, 6(1): 1-5.

(下转第 99 页)

冷却效率和最小总压损失作为优化目标,以冲击孔直径 d_i 、扰流柱直径 d_p 、气膜孔直径 d_f 、气膜板壁厚 t_f 、冲击间距 H 、孔节距 S 这 6 个结构参数为待优化参数,建立径向基神经网络数学模型并耦合遗传优化算法在设计区间进行全局寻优,获得了双层壁冷却结构的最优参数;

2) 双层壁环腔中,不同冷却结构参数形成不同位置处的涡旋,涡旋的存在会使气流在两侧壁面间多次往返运动,增强对流换热强度,但是涡旋会增加流体的阻力和能量损失,会导致压降增大;

3) 利用 1stOpt 软件分别对综合冷却效率和总压损失进行经验公式拟合,选用决定系数最大,方均根误差最小的数学公式,获得经验关联式。

参考文献:

- [1] 曹玉璋,陶智. 航空发动机传热学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [2] HAN J C, DUTTA S, EKKAD S. Gas turbine heat transfer and cooling technology[M]. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [3] 赵云松,张迈,戴建伟,等. 航空发动机涡轮叶片热障涂层研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(6): 77-83.
- [4] 周益春,杨丽,刘志远,等. 涡轮叶片热障涂层隔热效果的研究进展[J]. 中国材料进展, 2020, 39(10): 707-722.
- [5] 倪萌,朱惠人,裘云,等. 航空发动机涡轮叶片冷却技术综述[J]. 燃气轮机技术, 2005, 18(4): 25-33, 38.
- [6] 范小军,杜长河,李亮,等. 4 种冷却结构对叶片前缘流动换热影响的比较研究[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(7): 37-43.
- [7] 韦宏,祖迎庆. 双层壁冷却结构中多排射流冲击冷却的换热和流阻特性[J]. 航空动力学报, 2021, 36(8): 1621-1632.
- [8] 叶秀. 薄壁双层壁叶片气膜孔结构优化研究[D]. 无锡:江南大学, 2021.
- [9] NAKAMATA C, OKITA Y, MATSUNO S, et al. Spatial arrangement dependance of cooling performance of an integrated impingement and pin fin cooling configuration[C]//ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air, Reno, Nevada, USA: ASME. 2008: 385-395.
- [10] 谢浩,张靖周. 致密孔阵气膜冷却绝热温比和对流换热系数的数值研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(6): 1229-1235.
- [11] 谭晓茗,李业芳,张靖周. 致密多孔层板冷却结构研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(12): 144-149.
- [12] 黄莺,张靖周,王春华. 涡轮叶片吸力面扇形孔气膜冷却效率优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(11): 2868-2876.
- [13] VERSTRAETE T, COLETTI F, BULLE J, et al. Optimization of a U-bend for minimal pressure loss in internal cooling channels: part I—numerical method[C]//ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, Vancouver, British Columbia, Canada: ASME. 2012: 1665-1676.
- [14] COLETTI F, VERSTRAETE T, VANDERWIELEN T, et al. Optimization of a U-bend for minimal pressure loss in internal cooling channels: part II—experimental validation [C]//ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, Vancouver, British Columbia, Canada: ASME. 2012: 1689-1699.
- [15] 许敏,胡丽丹. 径向基函数神经网络快速算法及其应用[J]. 统计与决策, 2021, 37(16): 52-56.
- [16] 李恒,李茂军. 基于状态空间模型序号编码进化算法的航班优化调度[J]. 计算技术与自动化, 2023, 42(4): 64-68.
- [17] 才洋,于功志,纪雅悦. 多目标遗传算法下焊接机器人焊接路径规划方法研究[J]. 焊接技术, 2023, 52(12): 112-116.
- [18] 丁宇恒,代玉姣,王留芳. 基于 BP 神经网络与遗传算法的航空薄壁件装夹位置选择[J]. 工业控制计算机, 2023, 36(12): 35-36, 39.
- [19] 丁锦,姜文刚. 基于拉丁超立方算法的永磁同步电机设计优化[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(8): 66-72.
- [20] 孙立珍,赵乐乐. 基于 MATLAB 和 1stOpt 的非线性曲线拟合比较[J]. 现代计算机, 2020, 26(31): 28-30, 37.
- [21] 孙富建,万上,肖罡,等. 电脉冲处理及其辅助金属加工技术研究现状[J]. 机械工程材料, 2021, 45(12): 1-6.
- [22] 敖冬威. Ti-6Al-4V 钛合金板材电脉冲辅助单点渐进成形研究[D]. 济南:山东大学, 2019.
- [23] 于彦东,李彩霞. 镁合金 AZ31B 板材热拉深成形工艺参数优化[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(5): 786-792.

收稿日期: 2023-12-07

(上接第 76 页)

- [21] 孙富建,万上,肖罡,等. 电脉冲处理及其辅助金属加工技术研究现状[J]. 机械工程材料, 2021, 45(12): 1-6.
- [22] 敖冬威. Ti-6Al-4V 钛合金板材电脉冲辅助单点渐进成形研究[D]. 济南:山东大学, 2019.

- [23] 于彦东,李彩霞. 镁合金 AZ31B 板材热拉深成形工艺参数优化[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(5): 786-792.

收稿日期: 2024-01-22