# 高性能钛合金先进成形技术研究现状

李军兆[1], 孙清洁[1,2], 于 航[1]

(1. 湖南湘投金天新材料有限公司, 湖南 益阳 413057; 2. 哈尔滨工业大学 (威海), 山东 威海 264209)

**摘 要:** 主要介绍先进热成形技术、脉冲电流辅助成形技术和电磁辅助成形技术的特点, 及其在钛合金薄壁板材成形中应用的研究进展。热成形是钛合金塑性加工应用最为普遍的成形工艺, 利用高温下钛合金塑性变形软化的特征, 能够实现复杂钛合金零件的成形。脉冲电流和电磁辅助成形技术目前尚未开展大规模的产业应用, 其在高强度难成形材料的成形加工方面具有潜在应用前景。

**关键词:** 钛合金; 热成形; 脉冲电流成形; 电磁成形
**中图分类号:** TF823,TG306 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004−7638(2021)06−0017−11
**DOI:** 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.06.002 **开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):**



# Current research status of advanced forming technology for high-performance titanium alloys

Li Junzhao[1], Sun Qingjie[1,2], Yu Hang[1]

(1. Hunan Xiangtou Goldsky New Materials Co., Ltd., Yiyang 413057, Hunan, China; 2. Harbin Institute of Technology, Weihai, Weihai 264209, Shandong, China)

**Abstract:** In this paper, characteristics of advanced hot forming technology, pulse current assisted forming technology and electromagnetic assisted forming technology, and progress of these technologies application in titanium alloy thin-wall sheet forming had been reviewed. Hot forming is the most widely used forming process in the plastic processing of titanium alloy. The forming of complex titanium alloy parts can be realized by taking advantage of plastic deformation softening of titanium alloy at high temperature. Pulse current and electromagnetic assisted forming technology have not been widely used in industry, but they present potential application prospects in the forming of high strength and hard-deformation materials.

**Key words:** titanium alloys, hot forming technology, pulse current assisted forming technology, electromagnetic assisted forming technology

## 0 引言

目前, 我国航空、航天、核电、化工、军工武器、海洋装备等高端领域结构正向高强化、轻量化、高可靠性和耐久性等极端服役性能发展。钛合金由于其优异的耐蚀性、高比强度、无磁、高低温性能等特点, 一直是优选的结构材料[1−4]。而高端装备是由若干形状、尺寸各异的零部件构成, 这些零部件的机械性能直接影响装备整体的可靠性、安全性和服役寿命, 这就要求各个零部件均具有严格的尺寸精

**收稿日期:** 2021−10−15
**基金项目:** 湖南省科技创新计划项目 (S2021 GXKJCX0287)。
**作者简介:** 李军兆 (1993—), 男, 山东青岛人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事钛及钛合金焊接技术研究, E-mail: 031@goldskycn.com。

度和优异的服役性能。因此，大型结构钛合金薄壁板材精密成形技术，已成为高端装备制造过程中面临的瓶颈难题。

双相钛合金是目前应用最广泛的钛金属材料，典型组织为 α 相和少量 β 相，其中 α 相和 β 相的晶体结构分别为密排六方（HCP）和体心立方（BCC），密排六方结构具有更大的致密度和配位数，晶胞中原子的排列程度更为紧密[5−6]。因此 α 相密排六方结构的滑移系更少，在滑移时可提供的空间位向少，位错更容易缠结，使位错运动的阻力增大，塑性差、强度和屈弹比高，导致钛合金在塑性成形过程中产生高的成形抗力，使其在室温下的成形难度增加、成形精度和质量十分有限；同时，钛合金板材轧制工艺使其组织和力学性能具有显著的各向异性，在室温下成形极限较小，极易出现破裂、起皱、回弹和畸变等冷变形缺陷。

在升高温度下，钛合金的延展性增加、强度降低，使其成形极限和精度显著增加[7−8]。利用钛合金高温条件下增塑特性，热成形技术是目前研究和应用最为广泛的高强难成形金属成形技术。此外，利用材料自身的电塑性效应，衍生出了脉冲电流、电磁辅助成形等高精度、高速率的先进成形技术，能够克服钛合金室温成形性能差的不足，同时保证钛合金的成形精度和服役性能，满足高端装备对高性能材料和结构的需求。基于上述对钛合金薄壁结构件的应用、成形方法和特征的分析，笔者重点介绍钛合金热成形、脉冲电流辅助成形和电磁辅助成形三种成形工艺的技术优势和研究进展，并对未来的发展趋势进行展望。

## 1 钛合金热成形技术

目前，按材料发生塑性变形时的工作温度，可将金属塑性变形分为冷成形（再结晶温度以下且不发生回复过程）、热变形（再结晶温度以上）和温变形（介于上述两者之间）。在钛合金板材的成形工艺中，热成形是研究最为成熟、应用最为广泛的成形技术，主要包括电炉加热、电阻加热和感应加热方法。钛合金热成形技术是将钛合金板材加热到合适的成形温度，利用钛合金在高温下塑性变形软化的特性（屈服强度下降、延伸率增加）[7, 9]，来实现复杂钛合金零件的成形。目前对于钛合金热成形研究主要集中于成形设备、成形工艺、微观组织、成形性能及成形极限等方面。

相关学者首先采用稳态试验方法对钛合金在不同变形温度和速率下的成形行为和增塑机制进行了研究，基本取得一致性结论：室温拉伸时，钛合金板材延伸率较小，断裂处没有明显颈缩现象；而高温拉伸时，强度会显著降低，真应力-真应变曲线无明显屈服阶段，拉伸时真应力快速达到最大值后，会很快降低，无强化阶段的出现。随着变形温度增大和应变速率降低，钛合金材料的峰值应力降低、延伸率增大。说明在钛合金材料变形时，较高的温度有利于提高塑性、降低变形抗力和卸载后回弹[10−11]，如图 1 所示。同时研究发现当成形温度达到 750 ℃时，钛合金呈现良好的超塑性，屈服强度随温度升高而降低，延伸率增加，板材的成形抗力大幅降低；当温度达到 800 ℃时，加工硬化现象基本消失[12]。Aksenov 等人[13] 构建了钛合金材料的加工图谱，当变形温度较低，变形速率较快时，出现成形不稳定的可能性更大。最佳应变速率区域位于 700 ℃、$10^{-5}$ $s^{-1}$ 和 950 ℃、$10^{-3}$ $s^{-1}$ 之间，即随着温度的升高，最佳应变速率逐渐增大，如图 2 所示。

钛合金在高温下的塑性显著增加，Wang 等人[14] 认为高温下 TC4 合金板材塑性的差异与两相含量有关。高温低应变率有利于 β 相析出，断口处韧窝数量和深度增加，断裂类型由混合断裂转变为韧性断裂，表明 TC4 合金的塑性增强。而 Ozturk 等人[12] 进行电阻加热法成形 TA2 和 TC4 片板材，随着温度的升高，屈服应力和拉应力均显著降低，而总延伸率分别在 400 ℃和 500 ℃以上显著增加，且电阻加热过程不改变材料的晶粒尺寸。

上海工程技术大学 Wei 等人[15] 发现提高加热温度使钛合金发生回复和动态再结晶，位错运动更加容易，板材的塑性加工性能得到大幅度提高。如图 3 所示，当变形温度为 300 ℃时，原子动能增加使得 β 相附近位错堆积程度减弱，晶粒粗化；在 600 ℃下，β 相溶解，位错堆积的程度进一步减弱，动态回复过程增加；当变形温度达到 700 ℃时发生动态再结晶，β 相明显减少，晶粒细化；当温度为 850 ℃时，β 相大量溶解在 α 相中，再结晶程度较高，晶粒变得细小而均匀，在此温度下，随着扩散蠕变和晶界滑移的发生，位错更容易移动。钛合金合适的塑性加工温度应控制在 700 ~ 850 ℃范围内，而在较低温度下，钛合金塑性较差，温度超过 850 ℃，钛合金严重氧化，同时晶粒严重粗化，工艺性能下降。哈尔滨工业大学 Zhao 等人[16] 分析了 TA15 钛合金板材在

750 ℃ 下的热拉伸变形不均匀性和滑移模式, 只要溶解剪应力大于临界溶解剪应力, 就会激活多个滑移系统。柱状滑移系统是主要滑移模式, 对沿轧制方向的拉伸变形具有递增作用, 拉伸力降低、延伸率增加。同时, 基底滑移系统的激活会导致基底施密特因子明显降低。Xiao 等人[17] 发现 TC4 板材高温拉伸能够降低板材强度的各向异性, 但在塑性变形中具有较强的应变率敏感性。

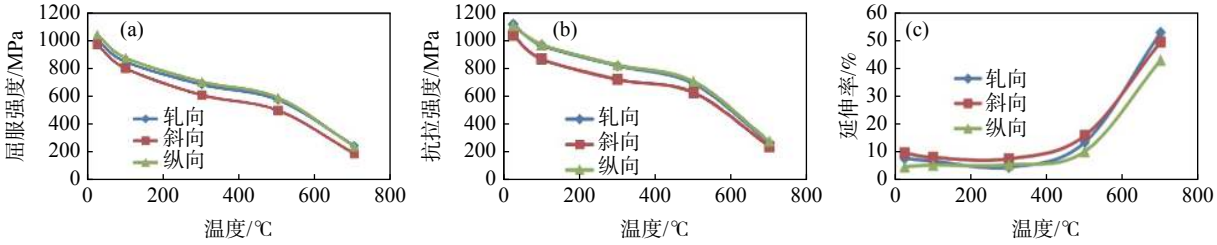



**图 1　TC4 钛合金屈服强度 (a)、抗拉强度 (b) 和延伸率 (c) 随温度的变化曲线[11]**

**Fig. 1　The yield strength (a), tensile strength (b) and elongation (c) of TC4 titanium alloy with forming temperature**

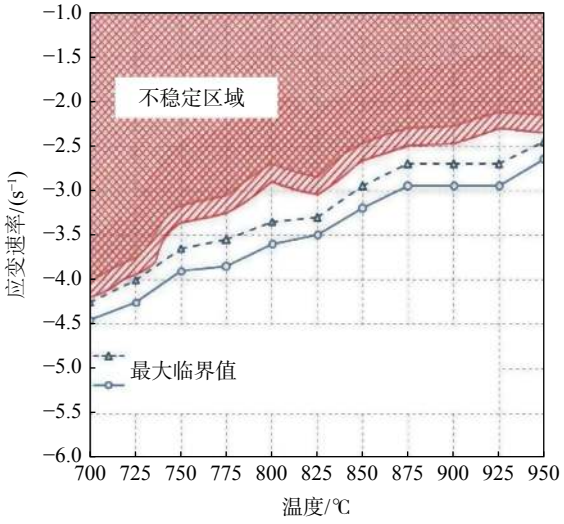
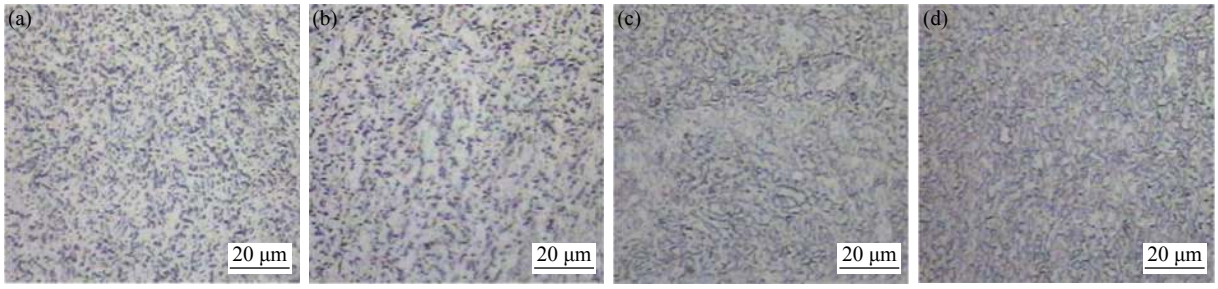



**图 2　不同温度和应变率下钛合金加工极限图谱[13]**

**Fig. 2　Processing map of titanium alloy at different temperatures and strain rates**

为解决 TC2 钛合金异型件翻边开裂的问题, 采用的热成形温度在 710 ~ 750 ℃, 无开裂现象, 且弯曲侧壁减薄不明显。同时发现, 高温成形是 TA32 高温钛合金复杂飞机蒙皮零件成形最为关键的因素, 在高温下的成形极限增加、成形抗力降低, 能够减少复杂零件成形过程中破裂及起皱缺陷现象[18−19]。Tm 等人[20] 开发了钛合金薄板局部接触加热冲压工艺, 进行圆柱形拉伸加工。随着加热温度的升高, 拉伸强度降低, 伸长率增加, 特别是当温度达到 800 ℃ 以上时, 延伸率增加非常大。并且局部加热时, 由于温度梯度的存在使得流动应力不同, 能够避免拐角处的变形集中, 成形效果比整体加热时的要更优异。王安阳[21] 采用变温热拉深成形的 TC4 钛合金锥形件, 能够有效提高变形均匀性。底部与边缘部分厚度偏差在 10% 以内, 底部减薄现象得以改善, 有效地控制了底部中心附近的厚度, 如图 4 所示。前苏联在生产 TC1 和 TC2 无缝管时, 确定管坯最佳加热温度范围为 300 ~ 400 ℃, 能够提高无缝管的成材率。发现在相同变形率 50% 的情况下, 温轧 TC2 的极限强度下降 400 ~ 500 MPa, 而延伸率提高 50%[8]。




(a) 300 ℃　(b) 600 ℃　(c) 700 ℃　(d) 850 ℃

**图 3　不同变形温度下 TC4 的显微组织结构[15]**

**Fig. 3　The microstructure of TC4 alloy obtained under various forming temperatures**

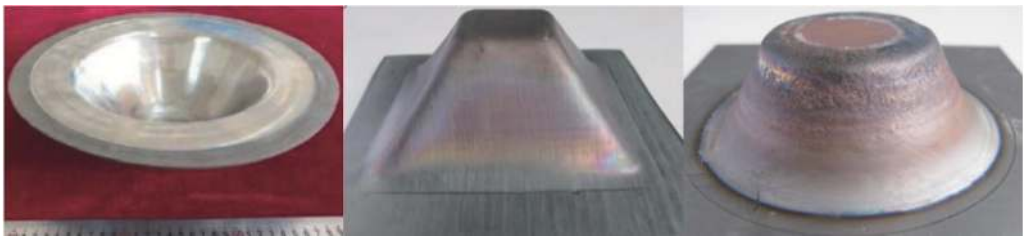


图 4 钛合金热成形结构件[21-23]

Fig. 4 The hot forming structural parts of titanium alloy

此外，激光作为高能束热源形式，依靠激光束局部加热和外部作用力，使材料发生塑性变形，能够促使组织发生变化，改善了金属的成形性，降低了钛合金在大角度弯曲时的破裂风险，与传统弯曲工艺相比，回弹幅度降低 10 倍[24−28]。与此同时，利用钛合金电阻系数大的特点，相关学者对钛合金板材进行了电流自阻加热拉弯成形[9, 29]，自阻加热的方式对板材的加热速度很快，能够有效提升成形效率，同时由于加热时间短可以有效避免加热时板材表面的氧化，仅考虑了电流焦耳热的软化作用，并未对电流作用下的其他作用效果进行研究。

热成形技术由于设备简单、操作性强且成形效果优良、成形机理清晰，在工业生产中得到较为广泛的应用，然而其零件加热温度高、能源利用率低、成形速度相对较慢，影响零件的成形精度、质量和效率。特别对于精密部件，如何精确控制加热温度、加热位置，如何提高能量利用率、提高成形精度和稳定性等问题仍是后续有待研究的地方。

## 2 钛合金脉冲电流辅助成形技术

20 世纪 90 年代至今，各国学者对 Al、Ti、Ni、Cu 等材料的电致塑性进行了大量试验和理论研究，并提出了一些列相关的电致塑性效应理论。相比于传统的热辅助成形的焦耳热效应，电流辅助成形技术还存在纯电塑性效应、集肤效应、磁压缩效应等，即电-热-力的多场耦合效果，对材料的微观组织和力学性均产生影响。同时，电流辅助成形工艺具有设备复杂程度低、升温速率快、电-热转换率高、加热均匀性高等优点，对室温难成形金属的塑性加工领域具有广阔的发展前景，有望在弯曲、拉拔、轧制、胀形、渐进成形等成形工艺中得到应用，图 5 为电辅助轧制和渐进成形设备成形过程示意[6, 30−36]。

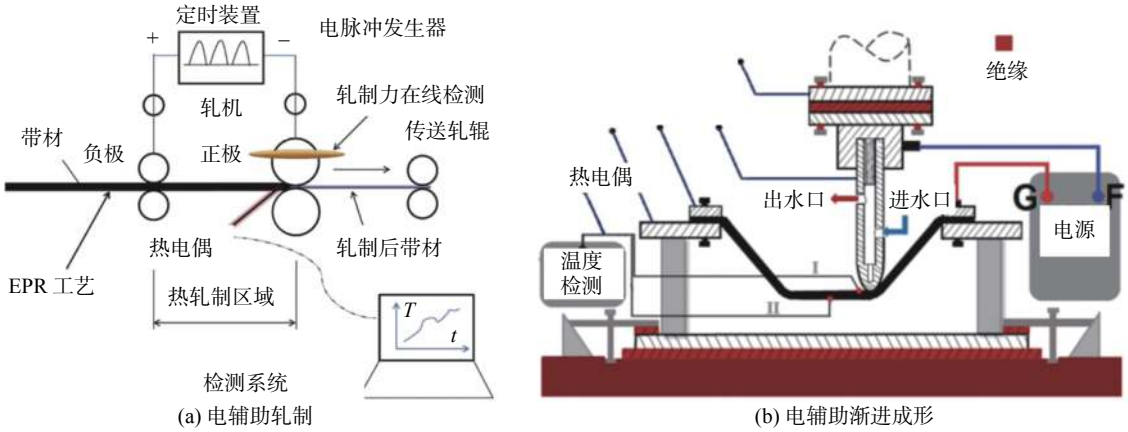



图 5 电辅助轧制和渐进成形示意[23, 37]

Fig. 5 Schematic diagram of electric assisted rolling and incremental forming process

为研究钛合金在电流辅助作用下的成形行为，学者进行了大量电流辅助拉伸、弯曲等基础试验和理论研究。发现高频脉冲电流可有效降低 TC4 钛合金材料的流动应力，并且随着电脉冲频率增加，抗拉强度呈现降低趋势，而延伸率增加。当电脉冲频率为 300 Hz 时，延伸率增加约一倍[38−40]，如图 6 所示。相比于室温弯曲试验，成形时的弹性变形阶段变短，稳定变形阶段的成形力明显降低[41]。

脉冲电流还具有止裂性能，如图 7 所示。当脉冲电流通过缺陷位置时，电流将在裂纹处产生绕流，裂纹尖端位置电流密度增大，产生的瞬间热压应力能够抑制裂纹扩展，因此使其变形极限增加、变形

抗力降低。与此同时, 在脉冲电流作用下的, 板材内外层的孪晶体积分数减少, 拉压不对称性消失, 板材几乎不发生回弹量, 有利于增加成形精度[39]。中国科学院金属研究所沈以赴等人[42]采用高密度脉冲处理金属钛时, 发现能够增强位错运动, 降低疲劳初期的软化速率, 消除硬化峰。脉冲电流对裂纹尖端扩展有阻滞作用, 脉冲电流与在裂纹前方产生的位错发生交互作用, 使位错“屏蔽”远场力对裂纹尖端的作用得到加强。哈尔滨工业大学 Song 等人[43]发现电脉冲处理后 TC4 预变形板发生了局部再结晶和裂纹愈合, 在 8% 预塑性变形条件下, TC4 板的塑性能得到恢复。电脉冲预变形后 TC4 板的总延伸率接近于冷成形 Ti-15-3、TA1 和 TA2 钛合金板。并且由于电脉冲处理时间很短(约 800 s), 能够避免热成形在钛板表面形成较厚的氧化层。

大连理工大学 Zhou 等人[44]研究发现, 高密度电脉冲可以降低材料的流动应力, 促进 TC4 钛合金晶粒变形能力, 电辅助冷拔后的变形组织更加均匀, 小角度晶界含量低于常规冷拉试样。此外, 在常规变形材料中观察到位错胞和孪晶, 位错胞的出现意味着变形过程中剧烈的晶格摩擦, 交叉滑移被激活, 冷拔过程中产生较强的应变硬化; 相比之下, 高能量脉冲电流能够提高位错移动的动力、消弱位错纠缠, 使其迅速滑移、攀移、重排及消减, 降低冷加工后钛合金中的位错密度, 这也解释了常规拉拔线材强度高、塑性低的原因[45], 如图 8 和图 9 所示。

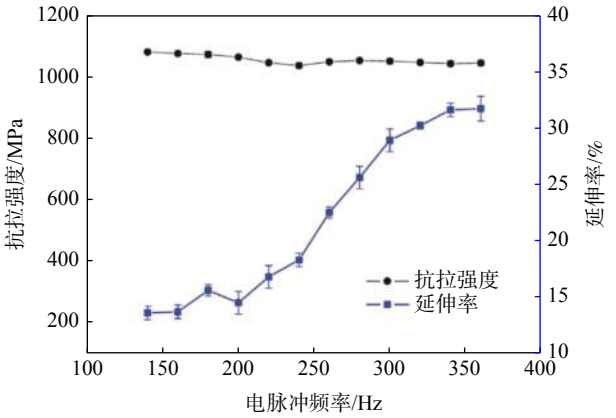
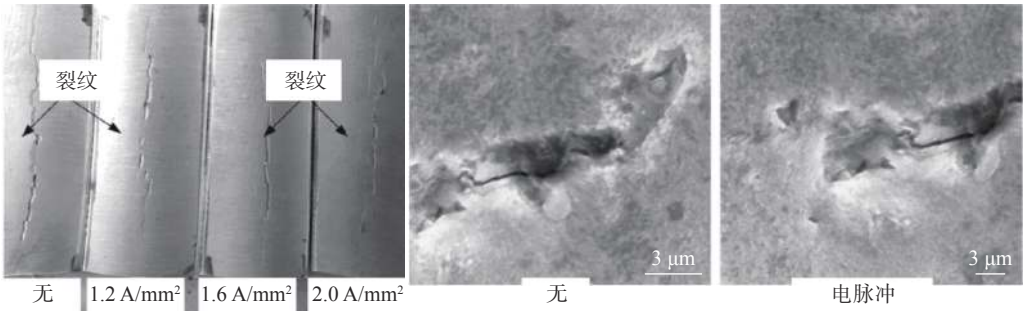



**图 6　高能脉冲电流频率对 TC4 钛合金抗拉强度和延伸率的影响[40]**

**Fig. 6　The effect of electropulsing frequency on tensile strength and elongation of TC4 alloy**




(a) 裂纹宏观形貌　　(b) 裂纹微观形貌

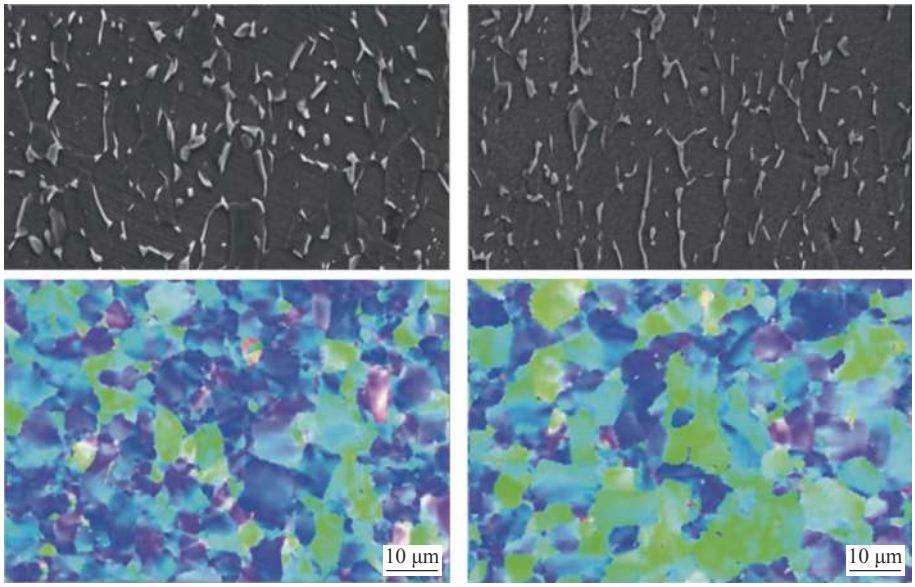
**图 7　脉冲电流对 TC4 钛合金裂纹扩展行为的影响[39, 43]**

**Fig. 7　The effect of electropulsing on crack propagation behavior of TC4 alloy**

南京航空航天大学江双双[46]将电脉冲的软化效应和短期应力松弛效应应用到钛合金滚弯工艺中, 不但可以提高材料的塑性变形能力, 减小零件回弹; 同时, 瞬间高能脉冲电流能够加快原子扩散, 促进材料发生动态再结晶, 改善变形段的微观组织, 使其向韧性断裂方式转变。基于此提出电热渐进成形技术, 是一种集塑性硬化和退火于一体的成形工艺。当接触侧温度达到 β-转变温度, α 相消失, 快速风冷形成网篮结构。通过单侧电热渐进成形, 可以获得由拉长 α 相晶粒和篮状组织组成的性能优良的复合组织, 与冷态成形相比, 电热成形的最大成形深度没有变化, 但在较高温度下成形件的厚度分布更加均匀[22−23, 47]。

清华大学 Ye 等人[37]研究发现, 电塑轧制成形质量优于冷轧, 无明显的变形缺陷, 变形抗力降低 31.25%。电塑轧制产品获得了较好的综合力学性能, 塑性最大提高 248.5%, 而强度损失不大。电流辅助作用下 TC4 合金带材的快速动态再结晶行为是由于热效应和非热效应的耦合提高了形核速率和原子扩散。另一方面, 由轧制变形引起的变形中内能和储能的增加对加速动态再结晶过程的贡献也相对较大。TC4 钛合金脉冲电流轧制时, 在较低温度下发生了 β-Ti 向 α-Ti 的转变, 电流密度为 240 A/mm$^2$, 温度为 374 ~ 546 ℃ 时, 高能电脉冲处理能降低成核热力学势垒和增强原子扩散, 加速相变的发生; 同

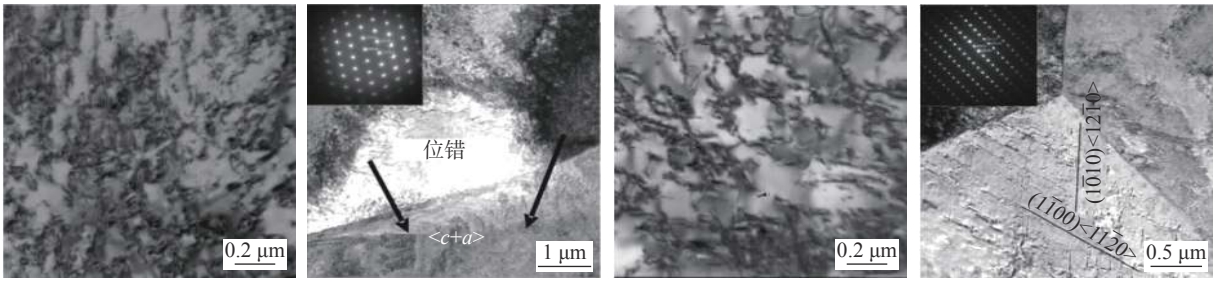
时增大电脉冲频率促使层状组织向等轴晶组织演变，显著降低冷轧 TC4 钛合金板材力学性能的各向异性。在球状化过程中，有效滑移长度增大，晶粒旋转增加变形模式。此外，随着 β 相的减少，变形的调节程度大大增加，集中应力明显减轻，避免了微孔洞和微裂纹的形成，提高材料的塑性[40, 48]，如图 10 所示。




(a) 冷拔试样微观组织　　(b) 电流辅助拉拔试样微观组织

**图 8　常规冷拔和电流辅助冷拔 TC4 微观组织[44]**

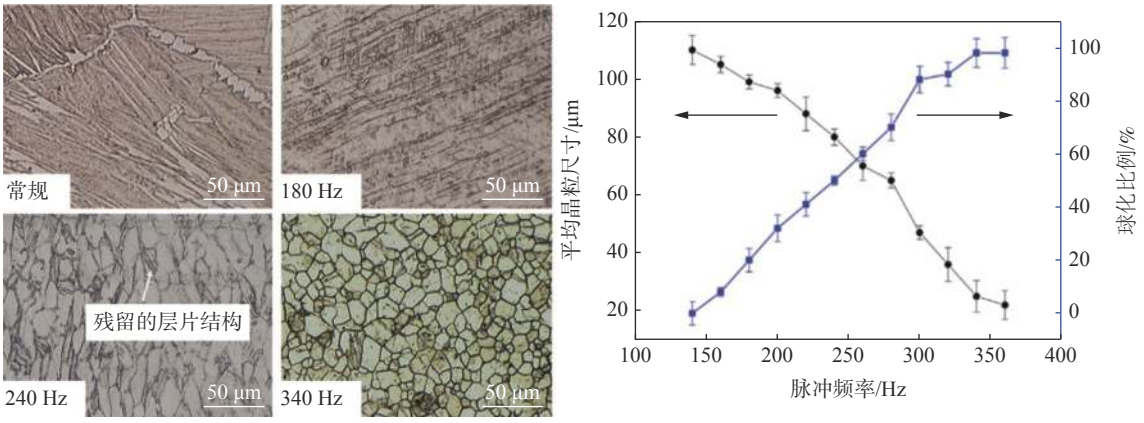
**Fig. 8　Microstructure of TC4 obtained from cold drawing and electric assisted drawing**




(a) 冷拔试样微观组织　　(b) 电流辅助拉拔试样微观组织

**图 9　冷变形和脉冲电流辅助作用下的位错行为[44, 45]**

**Fig. 9　The dislocation behavior of TC4 obtained from cold drawing and electropulsing processing**




(a) 脉冲频率下的微观组织　　(b) 平均晶粒尺寸和球化比例

**图 10　高能脉冲频率下的拉拔组织形态和平均晶粒尺寸[40]**

**Fig. 10　The microstructure and average grain size of TC4 alloy obtained from cold drawing process with electropulsing processing**

为对高频脉冲电流的非热效应进行定量研究, Ross 等人[49] 设计试验隔离电阻焦耳热的影响, 仅表征电流对 TC4 钛合金在拉伸和压缩载荷下的变形行为。研究结果表明在材料变形过程中, 电流的存在显著降低了钛金属试样均匀变形所需的载荷, 显示出超塑性行为; 同时还提高钛材料在不破裂的情况下使用寿命。这表明, 脉冲电流可以用来改善 TC4 钛合金的成形性, 这些改善远远超过了电阻加热的焦耳热效应, 如图 11 所示。

Magargee 等人[50] 建立了热-力学本构模型预测钛材在电辅助变形过程中的力学行为, 如图 12 所示, 随着电流密度增加, 材料的流动应力逐渐减低, 表现出更大的热软化程度。在 10.57 A/mm$^2$ 电流密度下, 型材温度在 28 ~ 30 s 即可达到 650 ℃, 钛合金拉弯性能突出。拉弯过程结束后, 进行一定时间的保形处理可降低流动应力、产生应力松弛, 有效降低弯曲件的回弹量[51]。哈尔滨工业大学陈鹏宇等人[52] 发现脉冲电流在达到一定阈值时, 流动应力显著降低, 断裂应变明显提高; 脉冲电流辅助滚压成形时, 曲面微结构高度分散性, 抑制翘曲失稳, 成形件一致性更好, 微结构尺寸精度更高。

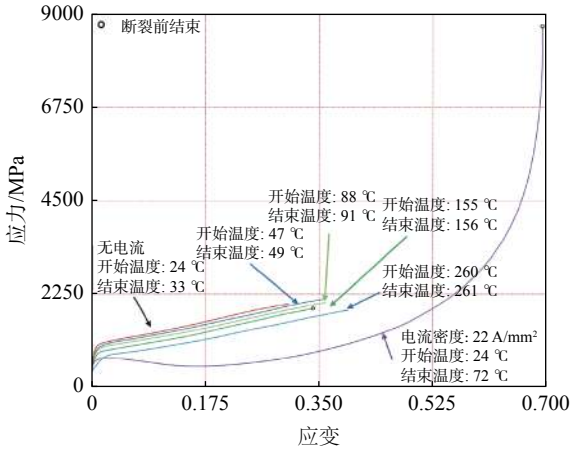
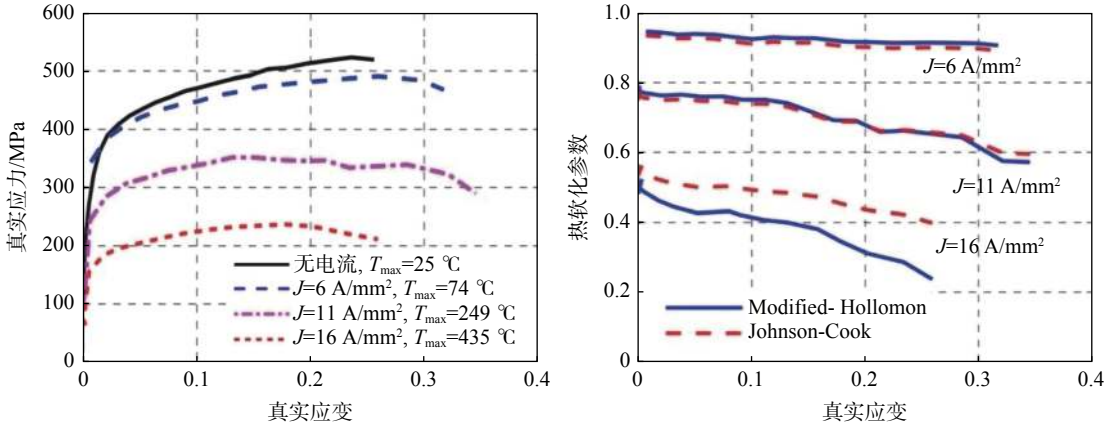



**图 11　电辅助电致塑性和非电致塑性效应定量研究[49]**

**Fig. 11　Quantitative study of electroplastic and non-electroplastic effect**




(a) 应力-应变曲线　　(b) 热软化系数

**图 12　脉冲电流辅助条件下的应力应变曲线和热软化系数[50]**

**Fig. 12　Stress-strain curve and thermal softening coefficient of TC4 alloying from electropulsing processing**

高能脉冲电流辅助成形工艺涉及到热-电-力-磁多场耦合作用, 电致塑性效应和非电致塑性效应的作用机制尚未能精确的定量分析, 各作用机理尚未能解释清楚。目前, 主要对规则零部件在稳态成形下进行基础性试验; 而在复杂构件塑性变形过程中, 如何进行专用设备优化、实现电流有效、精确加载控制是急需解决的关键和难点问题, 有待进一步深入研究以促进该技术的推广应用。

## 3　钛合金电磁辅助成形技术

电磁成形技术是利用金属在强脉冲磁场中受磁力作用而发生塑性变形的一种高速率成形方法[53−55]。为了分析 TC4 钛合金板不同变形速度下的结构响应, Li 等[56] 对高速变形下的微观结构进行研究并与准静态下变形的微观结构进行对比分析, 发现动态加载下, TC4 钛合金板材的晶粒尺寸变化不明显, 但晶粒被拉长。由于材料流动及冲击作用, 试样硬度分布不均, 但织构没有明显变化。TC4 钛合金高速变形过程, 当变形量较小时, 塑性变形以位错滑移机制为主; 当变形量增大, 除了位错滑移机制外, 孪生机制也被激活, 且孪生面为 (1011), 有利于塑性变形, 但数量较少。

哈尔滨工业大学林遵东等人[57] 发现电磁辅助能够有效地提升 TA32 钛合金高应变速率下的强度

和塑性变形能力，提高弯曲件的成形精度和成形极限。他们认为钛合金在高应变速率下表现出的应变速率增塑效应是由绝热温升和孪生变形机制引起的。由于在高应变速率下材料变形时间短，塑形变形产生的热量使材料温度升高并发生软化，并且密排六方结构的钛合金在变形中出现孪晶，使晶格取向变化，降低位错滑移的阻力，从而使材料塑形增强。厦门理工学院李奋强等人[58−59]认为电磁成形技术在高强度难成形材料的成形加工具有良好的前景，其中线圈技术、高效驱动方式是制约电磁成形技术发展的瓶颈。

熊奇等[60]认为随着电源能量提高、驱动线圈的发展、控制精度的优化，使得电磁成形技术得到快速发展。与此同时也应意识到电磁成形技术目前存在的不足，目前仍然集中于实验室基础研究，现有的电磁成形设备和技术难以满足工业大规模生产对装备可靠性和成熟度、控制精度、成形性能稳定性的需求。

## 4 总结与展望

围绕高强钛合金成形，介绍了热成形技术、脉冲电流辅助成形技术、电磁辅助成形技术三种先进成形技术特点及应用：

1）热成形技术设备成熟、机理明晰、效果显著，是目前钛合金塑性加工应用最为普遍的成形工艺。并且，随着电炉加热设备和电磁感应加热设备的快速发展，基本能够精确控制成形温度和加热位置，既能满足大型钛合金构件的整体成形，又能适应小批量零件的快速成形。

2）脉冲电流和电磁辅助成形技术具有高能量利用率、节能高效、绿色环保等优势，但是目前对于两种工艺的成形机理尚缺乏定量研究，成形装备的研制尚不具有普适性，一定程度上限制了其推广应用；然而随着研究的深入，其在高强度难成形材料的成形加工方面具有潜在应用前景。

3）随着装备对极端服役性能的需求，要求各零部件具有高精度、高性能和高稳定性，这就对高性能钛合金紧密成形技术的发展提出迫切需求。针对于上述的精密成形技术，一方面需要开发适应于大型、小型、精密零部件的成形设备，实现热源位置、成形温度等的精确控制；另一方面对高性能钛合金的成形工艺、成形性能、成形机理进一步开发研究，建立数字化、智能化成形数据库，实现成形工艺自动配置，满足产业化的高效生产需求。

## 参考文献


[1] Zhao Yongqing. Current situation and development trend of titanium alloys[J]. Materials China, 2010, 29(5): 1−8.
（赵永庆. 国内外钛合金研究的发展现状及趋势[J]. 中国材料进展, 2010, 29(5): 1−8.）

[2] Jin Hexi, Wei Kexiang, Li Jianming, *et al*. Research development of titanium alloy in aerospace industry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(2): 280−292.
（金和喜, 魏克湘, 李建明, 等. 航空用钛合金研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 280−292.）

[3] Li Liang, Sun Jianke, Meng Xiangjun. Application state and prospects for titanium alloys[J]. Titanium Industry Process, 2004, 21(5): 19−24.
（李梁, 孙健科, 孟祥军. 钛合金的应用现状及发展前景[J]. 钛工业进展, 2004, 21(5): 19−24.）

[4] Liu Xin, Yang Jingchao, Li Heng, *et al*. A critical review on tube joining by plastic deformation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42: 1−23.
（刘欣, 杨景超, 李恒, 等. 管路构件塑性变形连接技术研究进展及挑战[J]. 航空学报, 2021, 42: 1−23.）

[5] Zhang Zhu, Wang Qunjiao, Mo Wei. Metalology and heat treatment of titanium[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
（张翥, 王群骄, 莫畏. 钛的金属学和热处理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.）

[6] Sprecher A F, Mannan S L, Conrad H. On the temperature rise associated with the electroplastic effect in titanium[J]. Scripta Metallurgica, 1983, 17(6): 769−772.

[7] Compilation Group. Manual for processing rare metal materials[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1984.
（《稀有金属材料加工手册》编写组. 稀有金属材料加工手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984.）

[8] Zhang Zhu, Xie Shuisheng, Zhao Yunhao. Plastic processing technology of titanium[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.
（张翥, 谢水生, 赵云豪. 钛材塑性加工技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.）

[ 9 ] Mori K, Maki S, Tanaka Y. Warm and hot stamping of ultra high tensile strength steel sheets using resistance heating[J]. CIRP Annals, 2005, 54(1): 209−212.

[ 10 ] Li Kejian. Coupled thermo-mechanicalfinite element analysis of hot stretch bending of TC4 titanium alloy sheet[D]. Qinhuangdao: Yanshan Univerty, 2015.
(李克俭. TC4钛合金板材热拉弯成形热力耦合数值模拟研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.)

[ 11 ] Xiao Ningbin. Research on hot formability of BTi-6431 S titanium alloy sheet[D]. Jiangsu: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
(肖宁斌. BTi-6431 S钛合金板材热成形性能评价研究[D]. 江苏: 南京航空航天大学, 2012.)

[ 12 ] Ozturk F, Remzi, Ece R E, *et al*. Mechanical and microstructural evaluations of hot formed titanium sheets by electrical resistance heating process[J]. Materials Science & Engineering:A, 2013, 578: 207−214.

[ 13 ] Aksenov S A, Chumachenko E N, Logashina I V. Tensile testing of Ti-6Al-4V alloy superplasticity[J]. Materials Science Forum, 2013, 762: 392−397.

[ 14 ] Wang H, Zhao K X, Chu X R, *et al*. Constitutive modelling and microscopic analysis of TC4 alloy sheet at elevated temperature[J]. Results in Physics, 2019, 13: 1−11.

[ 15 ] Wei S, Deng P R, Qiu J T, *et al*. Tensile deformation behavior of Ti-6Al-4V sheet at elevated temperature[J]. Materials Research Express, 2019, 6(11): 1−7.

[ 16 ] Zhao J, Lv L X, Liu G, *et al*. Analysis of deformation inhomogeneity and slip mode of TA15 titanium alloy sheets during the hot tensile process based on crystal plasticity model[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017.

[ 17 ] Xiao J, Li D S, Li X Q, *et al*. Constitutive modeling and microstructure change of Ti-6Al-4V during the hot tensile deformation[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2012, 541: 346−352.

[ 18 ] Zhang Tao, Li Qi, He Lu, *et al*. Research on hot forming of abnormity part of titanium alloy TC2[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 16: 57−59.
(张涛, 李琦, 何露, 等. TC2钛合金异型件热成形工艺研究[J]. 航空制造技术, 2011, 16: 57−59.)

[ 19 ] Chen Can. Research on thermoforming process of complex aircraft skin parts for TA32 titanium alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
(陈灿. TA32高温钛合金复杂飞机蒙皮零件热成形工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.)

[ 20 ] Tm A, Mt B, Kim B, *et al*. Hot stamping of titanium alloy sheets using partial contact heating[J]. Procedia Manufacturing, 2018, 15: 1149−1155.

[ 21 ] Wang Anyang, Lu Zhen, Jiang Shaosong, *et al*. Control of wall thickness uniformity in variable temperature hot drawing of titanium alloy conical components[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2012, 1: 36−39.
(王安阳, 卢振, 蒋少松, 等. 钛合金锥形构件变温热拉深成形壁厚均匀性控制[J]. 航天制造技术, 2012, 1: 36−39.)

[ 22 ] Fan G Q, Gao L. Numerical simulation and experimental investigation to improve the dimensional accuracy in electric hot incremental forming of Ti-6Al-4V titanium sheet[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72: 1133−1141.

[ 23 ] Vahdani M, Mirnia M J, Bakhshi-Jooybari M, *et al*. Electric hot incremental sheet forming of Ti-6Al-4V titanium, AA6061 aluminum, and DC01 steel sheets[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103: 1−11.

[ 24 ] Dong Wenbin, Zhang Yajing, Gou Ruibin, *et al*. Effect of external load on edge effect of laser bending[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(11): 47−51.
(董文彬, 张雅晶, 缑瑞宾, 等. 外载荷对激光弯曲成形边界效应的影响[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(11): 47−51.)

[ 25 ] Gisario A, Barletta M, Venettacci S. Improvements in springback control by external force laser-assisted sheet bending of titanium and aluminum alloys[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 86: 46−53.

[ 26 ] Gisario A, Mehrpouya M, Venettacci S, *et al*. Laser-assisted bending of titanium grade-2 sheets: Experimental analysis and numerical simulation[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2017, 92: 110−119.

[ 27 ] Hu Y, Luo M, Yao Z. Increasing the capability of laser peen forming to bend titanium alloy sheets with laser-assisted local heating[J]. Materials and Design, 2016, 90: 364−372.

[ 28 ] Shidid D P, Gollo M H, Brandt M, *et al*. Study of effect of process parameters on titanium sheet metal bending using Nd: YAG laser[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 47: 242−247.

[ 29 ] Wang Yuting. Study on tensile bending forming process of titanium alloy by resistance heating[J]. Aerospace Materials &

Technology, 1986, 2: 4−7.
(王玉庭. 钛合金电阻加热拉弯成形工艺研究[J]. 宇航材料工艺, 1986, 2: 4−7.)

[ 30 ] Jiang Shuangshuang, Tang Zejun, Du Hao, *et al*. Research progress of the forming process of titanium alloy assisted by current[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 2: 7−13.
(江双双, 汤泽军, 杜浩, 等. 钛合金电流辅助成形工艺研究进展[J]. 精密成形工程, 2017, 2: 7−13.)

[ 31 ] Shen Yifu, Guo Xiaonan, Zhang Kun, *et al*. Effect of electric current pulse on metal materials[J]. Materials Science & Engineering, 1998, 16(3): 4−7.
(沈以赴, 郭晓楠, 张坤, 等. 脉冲电流对金属材料的作用及其研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 1998, 16(3): 4−7.)

[ 32 ] Okazaki K, Kagawa M, Conrad H. An evaluation of the contributions of skin, pinch and heating effects to the electroplastic effect in titatnium[J]. Materials Science & Engineering, 1980, 45(2): 109−116.

[ 33 ] Rudolf C. Goswami R, Kang W, *et al*. Effects of electric current on the plastic deformation behavior of pure copper, iron, and titanium[J]. Acta Materialia, 2021, 209: 1−13.

[ 34 ] Ding Junhao, Li Heng, Bian Tianjun, *et al*. Electroplasticity and electrically-assisted forming: A critical review[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(1): 15−32.
(丁俊豪, 李恒, 边天军, 等. 电塑性及电流辅助成形研究动态及展望[J]. 航空学报, 2018, 39(1): 15−32.)

[ 35 ] Peng Shuhua, Yang Junjie, Li Yao. Analysis on mechanism of electro-plastic effect and its prospect[J]. Journal of Jianghan University (Nature Science Edition), 2013, 2: 63−67.
(彭书华, 杨俊杰, 李尧. 电致塑性效应机制研究及其展望[J]. 江汉大学学报(自然科学版), 2013, 2: 63−67.)

[ 36 ] Fan G Q, Sun F T, Meng X G, *et al*. Electric hot incremental forming of Ti-6Al-4V titanium sheet[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49: 941−947.

[ 37 ] Ye X X, Tse ZTH, Tang G Y, *et al*. Effect of electroplastic rolling on deformability, mechanical property and microstructure evolution of Ti-6Al-4V alloy strip[J]. Materials Characterization, 2014, 98: 147−161.

[ 38 ] Zhou Qiang, Li Xifeng, Chen Jun, *et al*. Experimental study on electroplastic V-bending properties of TC4 titanium alloys[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22(5): 52−56.
(周强, 李细锋, 陈军, 等. TC4钛合金电致塑性V型弯曲性能的实验研究[J]. 塑性工程学报, 2015, 22(5): 52−56.)

[ 39 ] Zhu Yan. Research on pulse current-assisted bending forming law of titanium and titanium alloy[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.
(朱岩. 脉冲电流辅助钛及钛合金弯曲成形规律研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.)

[ 40 ] Ye X X, Tse ZTZ, Tang G Y, *et al*. Influence of electropulsing globularization on the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy strip with lamellar microstructure[J]. Materials Science & Engineering:A, 2015, 622: 1−6.

[ 41 ] Li Ping, Xie Xiuming, Wang Huigan, *et al*. Electric-thermal-mechanical coupled simulation and springback prediction of Ti55 alloy electrical assisted V-bending[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(4): 847−857.
(李萍, 解修明, 汪会干, 等. Ti55合金电辅助V弯电热力耦合仿真及回弹预测[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(4): 847−857.)

[ 42 ] Shen Yifu, Guo Xiaonan, Yao Ge, *et al*. Exploration of a new approach to improve fatigue property of materials II—Crack growth resistance of Ti-6Al-4V alloys induced bu electric current pluse[J]. Chinese Journal of Materials Research, 1999, 4: 381−384.
(沈以赴, 郭晓楠, 姚戈, 等. 材料疲劳恢复新途径的探索II—脉冲电流对Ti-6Al-4V合金裂纹扩展的阻滞[J]. 材料研究学报, 1999, 4: 381−384.)

[ 43 ] Song H, Wang Z J. Microcrack healing and local recrystallization in pre-deformed sheet by high density electropulsing[J]. Materials Science & Engineering:A, 2008, 490: 1−6.

[ 44 ] 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 China, 2014, 24: 1012−1021.

[ 45 ] Song Hui. Study on the effects of electropulsing on microstructures and properties of titanium alloys sheet[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. )
(宋辉. 脉冲电流处理对钛合金板材组织和性能影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.)

[ 46 ] Jiang Shuangshuang. Investigation into the electrically-assisted roll bending process of a TC4 titanium alloy sheet[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
(江双双. 电脉冲辅助TC4钛合金板滚弯成形研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.)

[ 47 ] Fan G Q, Gao L. Mechanical property of Ti-6Al-4V sheet in one-sided electric hot incremental forming[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72: 989−994.

[ 48 ] Ye X X, Tse ZTH, Tang G Y. Mechanical properties and tensile fracture of Ti-Al-V alloy strip under electropulsing-induced phase change[J]. Journal of Materials Research, 2015, 30(2): 206−223.

[ 49 ] Ross C D, Kronenberger T J, Roth J T. Effect of DC current on the formability of 6Al4V titanium[C]//ASME 2006 International Manufacturing Science and Engineering Conference, 2006.

[ 50 ] Magargee J, Morestin F, Cao J. Characterization of flow stress for commercially pure titanium subjected to electrically assisted deformation[C]//Asme International Manufacturing Science & Engineering Conference Collocated with the North American Manufacturing Research Conference, 2013.

[ 51 ] Cao Fengchao, Zeng Yuansong, Liu Baosheng, *et al*. Study on electrically assisted stretch bending of L-section profile of titanium alloy[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(9): 1437−1442.
(曹凤超, 曾元松, 刘宝胜, 等. 电流辅助钛合金L型材拉弯工艺研究[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(9): 1437−1442.)

[ 52 ] Chen Pengyu, Cheng Lidong, Wang Chunju, *et al*. Electrically-assisted rolling process of curved thin foil micro-features[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(2): 79−84.
(陈鹏宇, 程利冬, 王春举, 等. 薄板曲面微结构电流辅助滚压成形工艺研究[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(2): 79−84.)

[ 53 ] Psyk V, Risch D, Kinsey B L, *et al*. Electromagnetic forming—A review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(5): 787−829.

[ 54 ] Nie Peng, Feng Zhichao, Wang Zhefeng. A study on electromagnetic sizing of large titanium alloy cylindrical parts with punching die[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019, 467(8): 46,88−92.
(聂鹏, 冯志超, 王哲峰. 大型钛合金筒形件电磁冲模校圆研究[J]. 现代制造工程, 2019, 467(8): 46,88−92.)

[ 55 ] Cui Xiaohui, Zhou Xianglong, Du Zhihao, *et al*. New development of electromagnetic pulse forming technology and its application in aircraft skin parts manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(3): 22−32.
(崔晓辉, 周向龙, 杜志浩, 等. 电磁脉冲成形技术新进展及其在飞机蒙皮件制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2020, 63(3): 22−32.)

[ 56 ] Li F Q, Zhao J, Mo J H, *et al*. Comparative study of the microstructure of Ti-6Al-4V titanium alloy sheets under quasi-static and high-velocity bulging[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(3): 1349−1356.

[ 57 ] Lin Zundong, Lv Feng, Han Yujie, *et al*. Experimental study on formability and electromagnetic-assisted bending for TA32 titanium alloy sheets[J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46(1): 104−109.
(林遵东, 吕枫, 韩玉杰, 等. TA32钛合金板成形性能与电磁辅助弯曲成形实验研究[J]. 锻压技术, 2021, 46(1): 104−109.)

[ 58 ] Li F Q, Mo J H, Li J J, *et al*. Formability of Ti-6Al-4V titanium alloy sheet in magnetic pulse bulging[J]. Materials and Design, 2013, 52: 337−344.

[ 59 ] Li Fenqiang, Chen Xinyu, Jiang Jishuai. Application of electromagnetic forming technology in the forming of titanium alloy sheets[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(5): 43−50.
(李奋强, 陈新宇, 蒋继帅. 电磁成形技术在钛合金板材成形中的应用[J]. 精密成形工程, 2021, 13(5): 43−50.)

[ 60 ] Xiong Qi, Tang Hongtao, Wang Muxue, *et al*. Research progress of electromagnetic forming technique since 2011[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(4): 1171−1181.
(熊奇, 唐红涛, 王沐雪, 等. 2011年以来电磁成形研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(4): 1171−1181.)

编辑　杨冬梅