钛合金电流辅助成形工艺研究进展

江双双，汤泽军，杜浩，陈剑，章锦涛
（南京航空航天大学 机电学院，南京 210016）

摘要：轻质高强材料钛合金因其室温难变形的特性，在一定程度上影响了其应用，电流辅助作用对材料变形具有增塑效应，故采用电流辅助作用成形钛合金有一定的研究意义。对电流辅助难变形钛合金成形进行了综合评述，梳理了钛合金变形电流辅助机理的研究现状，对电流辅助在钛合金塑性成形工艺的运用进行了归纳，最后对电流辅助钛合金成形进行了展望，为电流辅助在钛合金成形工艺中的进一步应用提供参考。

关键词：钛合金；电塑性效应；电流辅助成形；塑性成形
DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2017.02.002
中图分类号：TG306 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-6457(2017)02-0007-07

Research Progress of the Forming Process of Titanium Alloy assisted by Current

JIANG Shuang-shuang, *TANG Ze-jun*, *DU Hao*, *CHEN Jian*, *ZHANG Jin-tao*
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

ABSTRACT: The application of titanium alloy with light strength and high strength material is affected to some extent due to its difficult deformation characteristics at room temperature, while the current auxiliary can improve materials' plasticity. Therefore, it is important to study the titanium alloy forming assisted by current. In this paper, a comprehensive review of the titanium alloy forming assisted by electricity is carried out. The research status of the deformation mechanism of titanium alloy assisted by electricity is summarized. Moreover, the application of the plastic forming process of titanium alloy assisted by current is reviewed. Finally, the current-assisted titanium alloy forming is prospected. The overview will be the reference for the further application of the current assistance in the titanium alloy forming process.

KEY WORDS: titanium alloy; electroplastic effect; current-assisted forming process; plastic forming

电流辅助成形是利用金属及其合金材料，在通入电流时产生的电塑性效应来成形工件的一种新的加工方法[1]，相比于其他成形方式，电辅助成形可以提高制件的生产率、效率和质量[2—8]。电塑性效应的提出可以追溯到 1963 年 TROITSKII 等[9]对表面涂汞薄膜锌单晶体的拉伸实验，此后研究人员 CONRAD[10—12]、ANDRAWES[13—15]、ROTH[16—24]针对不同材料进行了电塑性效应的大量探究，ROSS 等[25]研究直流电对铝、铜、铁和钛及其合金的力学性能的影响发现，不同材料对通入电流的响应并不一致，RC-130B 钛合金在电流密度低于 6.0 A/mm^2 时，流动应力降低明显，并且塑性也有一定提高。

钛合金因其优良的综合力学性能，一直都是宇航业必不可少的结构材料，但其较高的屈强比和较低的弹性模量，导致材料变形区间很窄且回弹很大，给实际生产加工带来了挑战[26]，而利用电塑性效应对钛合金难成形材料进行加工，显现出其独特的优越性，因此，文中对钛合金电流辅助变形的作用机理以及电流辅助作用在钛合金不同成形工艺中的应用情况进行了综述，为电流辅助在钛合金中的广泛应用提供参考。

收稿日期：2017-02-28
基金项目：中央高校基本科研业务费专项（NS2015051）；国家自然科学基金（51105203）
作者简介：江双双（1990—），男，硕士研究生，主要研究方向为钛合金板材电流辅助成形规律。
通讯作者：汤泽军（1981—），男，博士，副教授，硕士生导师，主要研究方向为难变形材料电流辅助成形。

1 钛合金电流辅助变形机理

从发现电塑性效应至今，人们针对不同材料进行了电塑性效应探究，也取得了一系列进展。目前，研究人员普遍认同电塑性效应主要包括焦耳热效应、磁压缩效应、集肤效应以及纯电塑性效应[27—29]，即热、电、力的复合作用，也有学者补充，电塑性效应主要受感应磁场[30]和热激活应变速率[31]的影响，所以电塑性效应是多种物理场综合作用的结果，这些研究理论同样适用于钛合金材料。现从钛合金电流辅助实验的力学性能及微观组织影响 2 方面进行归纳。

1.1 钛合金电流辅助力学性能

ROSS 等[32]研究了 Ti-6Al-4V 钛合金引入直流电源的拉伸和压缩实验，通过装置的优化设计，分离了焦耳热效应的影响。结果表明，无论是拉伸还是压缩实验，通入电流都明显提高了 Ti-6Al-4V 钛合金的成形能力，甚至优于焦耳热效应对材料性能的改善作用，Ti-6Al-4V 钛合金在拉伸和压缩过程中引入不同电流密度的应力应变曲线分别见图 1 和图 2[32]。在电流密度为 12.6 A/mm^2 拉伸时，材料应力已接近 0 变化；同时发现电流对压缩的塑性具有更明显地促进作用，当电流密度接近 30 A/mm^2 时，此时的应变量已很高，但材料并未发生开裂；随后 Perkins 等[33]补充了材料在直流电下的压缩实验，钛合金由于较高的电阻率，在提高电流效率上优于其他材料，即较低的电流密度就可得到明显的应力软化效果。作为常用的钛合金，SONG 等[34]也对 Ti-6Al-4V 进行了通电研究，通入的电流密度为 5.09~5.26 A/mm^2、通电时间为 110 μs 的衰减振荡波。经过未通电、预通电处理和拉伸过程中通电的 3 组实验，对比结果显示：引入电脉冲后，材料的延伸率提高了 35%，屈服强度降低了 19.8%，屈强比降低 17.6%；拉伸过程中，通电一组屈服强度降低 168 MPa，屈强比更降至 0.79，所以对 Ti-6Al-4V 钛合金而言，在一定的条件下，引入电流是一种改善材料成形性能的有效手段。

在研究通电对钛合金的本构模型方面，MAGARGEE 等[35]对商业纯钛进行了拉伸实验，为便于研究通电对钛合金的电塑性效应的规律，采用了厚度较薄的小尺寸试样，并引入较低的电流密度（0~16 A/mm^2）。结果表明，相同电流密度下，高温下的电流辅助拉伸较未通电拉伸的流动应力最大可降低近 50%左右，然而强迫风冷到室温的纯钛试样的应力-应变曲线基本与室温拉伸相同，并未出现纯电塑性效应；此外，依赖于温度为变化因子的修正 Hollomon 模型和 Johnson-Cook 模型都较好地拟合了应力应变的变化规律（见图 3[35]），其中 Johnson-Cook 模型在描述应力软化过程更为接近。根据所得模型，通电产生的温升为主要因素，即电流密度越大，温升越高，材料的应力降低增大，塑性也有所提高，说明电流的纯电塑性效应在应力降方面作用不大，这与 KINSEY 等[36]用霍普金斯杆进行实验得到的结果一致，当应变率达到 10^3 s^{-1} 时，材料的温度还没来得及变化，Ti-6Al-4V 钛合金并未表现出明显的纯电塑性效应，因此应变率在电塑性效应中也是重要的影响因素之一。

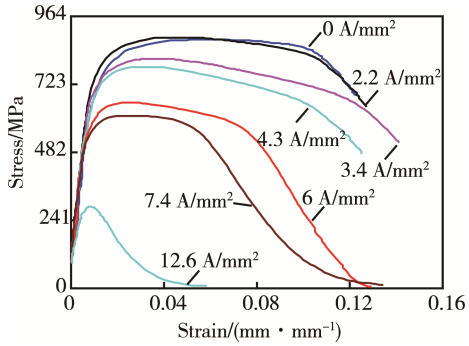


图 1 Ti-6Al-4V 钛合金在拉伸过程中引入不同电流密度的应力应变曲线

Fig.1 The stress-strain curves of Ti-6Al-4V alloy introduces the different current densities in the process of tensile

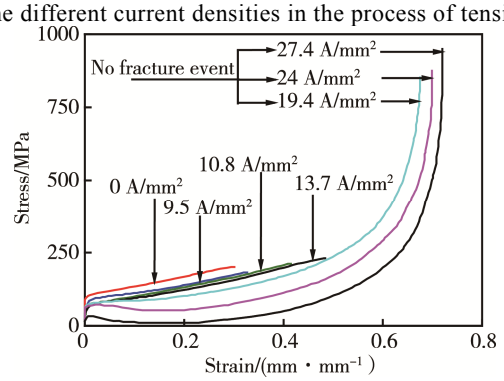


图 2 Ti-6Al-4V 钛合金在压缩过程中引入不同电流密度的应力应变曲线

Fig.2 The stress-strain curves of Ti-6Al-4V alloy introduces the different current densities in the process of compression

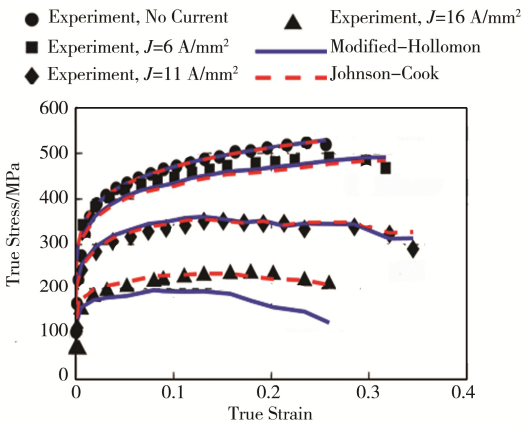


图 3 修正 Hollomon 模型和 Johnson-Cook 模型对纯钛电流辅助拉伸下流动行为预测

Fig.3 Modified-Hollomon and Johnson-Cook model predictions of flow stress behavior in electrically assisted tension tests

电辅助成形钛合金过程中，除了通电的电参数和成形速率对制件有影响外，材料本身属性也同样起着重要作用，Wang 等[37]在研究 TA15 钛合金的轧制方向对电流的响应规律时发现，在某一电流密度(4800~5400 A/mm^2)条件下，沿轧制方向为 0°, 45°, 90°通电，材料的延伸率分别提高了 122%, 116.7%, 60.5%。此处，材料对通电的响应差异来源于材料轧制后产生的各向异性，说明电塑性效应对材料是有选择性响应的。同时，为了研究改变材料位错密度和残余应力的分布对电塑性的响应，SALANDRO 等[38]通过对钛合金进行预变形后引入直流电流，结果发现预变形件升温不高，其归结于预变形产生的大量位错和残余应力在通电的过程中得到了推动和缓解所致，并且无论是否通过预变形的试件引入电流后，其流动应力都降低，增加了材料的成形性。

1.2　钛合金电流辅助微观组织

钛合金电辅助加工过程中，常常通入的都是瞬时高能脉冲电流，因为其加热速度快、节能且作用时间短、可以提高加工效率的特点，而得到广泛应用。电脉冲处理是一个快速升温的过程，由于高密度电流脉冲与金属材料原子交互作用产生的电子风、电迁移、电磁效应等物理因素，显著影响金属组织中的再结晶和相变行为，往往得到优于传统工艺的改善组织。

1.2.1　钛合金电流辅助动态再结晶

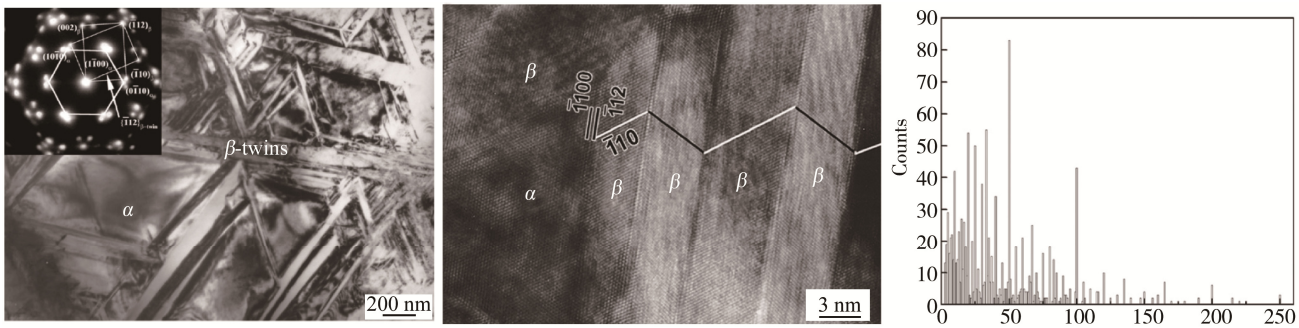
相比于传统的热处理，瞬时高能脉冲电流可以使材料在极短时间获得足够能量，通过加速原子扩散，促进位错的移动来提高再结晶速率和再结晶的形核率，使材料在低于理论再结晶的温度下发生再结晶，并且在随后的长大过程中，由于冷却速度过快，晶粒来不及长大，材料能获得更细的再结晶组织。

1988 年，XU 等[39]研究发现通入电流可以增加晶界的迁移速率，导致粗晶的温度高于再结晶温度，增加 α-Ti 的动态再结晶速率，从而达到细化晶粒的目的。WANG 等[37]分析 TA15 钛合金的轧制方向对电流响应的微观组织也发现，通电可以有效消除材料冷轧产生的各向异性，片条状的 α 晶粒向等轴 α 晶粒再结晶转变，并且增大电流密度，再结晶程度增加；当电流密度达 5400 A/mm^2 时，沿轧制方向为 0°, 45°, 90°的性能已经没有差别。

1.2.2　钛合金电流辅助相变

通入的高能脉冲电流有较快的加热速度，可以促进原子扩散，为新相的形核提供了极大的动能，进而增加相变的驱动力，促进新相的生成。Wang 等[40]研究 Ti-6Al-4V-4Zr-Mo 钛合金通入脉冲电流实验即属于此类，通入脉冲电流后在组织中得到了纳米尺寸的板条状 Al_3Ti 产物，其认为脉冲电流促进 Al 原子的运动频率，沿着 α 基相方向迁移，最终在 α 基体上聚集大量 Al_3Ti 析出物。

另一方面，当脉冲电流的频率过高，加热过程过快，原子的扩散作用不明显，相变的发生则主要依赖电塑性效应产生的切应力来辅助完成。ZHANG 等[41]研究 Ti-6Al-4V 通入电脉冲时，在电脉冲快速加热过程中，原子的扩散作用很小，合金的 α-Ti 相通过切变的形式转变为新的 β-Ti 马氏体，Ti-6Al-4V 钛合金电脉冲热处理晶体学分析图像见图 4[41]，其中图 4a 中的插图是对应的电子衍射图，由图 4a 和 4b 可发现，在粗晶 α 内部有大量片层的 β 相生成，满足 Burgers 位向关系，图 4c 中观察片层尺寸很薄，大部分都低于 100 nm；其后进行的相元素成分分析，证明了新生成的薄片 β-Ti 与原始 α-Ti 有相同的元素成分，但不同于晶间 β-Ti，只是通过切变完成的，改善了传统的热处理形式，为生产马氏体提供了新方法。



a 晶格类型 bcc 薄片 β-Ti 的 TEM 图像　　b 晶格类型 bcc 薄片 β-Ti 的 HRTEM 图像　　c β-Ti 薄片的宽度分布

图 4　Ti-6Al-4V 钛合金电脉冲热处理晶体学分析图像

Fig. 4 The crystallography analysis image of Ti-6Al-4V titanium alloy by electrical pulse treatment

2　钛合金电流辅助工艺应用

在钛合金电流辅助力学性能和微观组织机理研究的同时，电流辅助成形工艺也有一定程度的研究进展。利用电流辅助降低材料变形抗力、提高塑性的特性，不仅能降低生产成本，还能改善制件的组织性能，

所以对于难变形的钛合金材料而言，钛合金电流辅助成形具有很好的应用前景。

2.1 钛合金电流辅助轧制

YE 等[42]对 Ti-6Al-4V 钛合金进行了通电轧制研究，轧制过程见图 5，其中在轧制过程中的温度和轧制力都通过实时在线监控系统进行记录，可以精确地分析和控制电流频率和工艺参数之间的关系，研究发现，电流辅助轧制得到板料的形状精度优于冷轧，还没有成形缺陷，仅以牺牲少量的强度却将材料的塑性提高到 248.5%；并且在低频轧制时，发生了动态回复和动态再结晶现象。

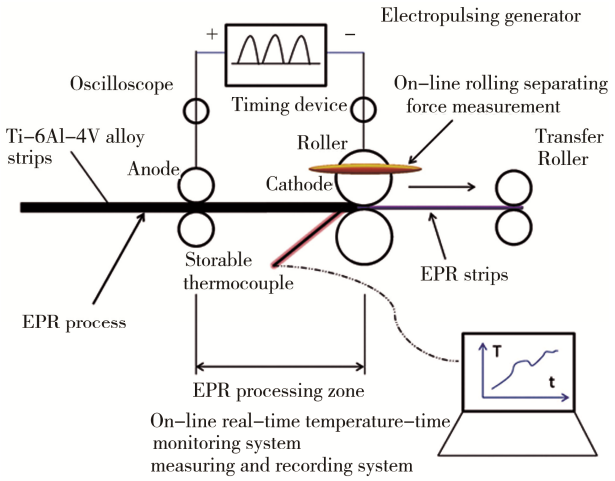


图 5 电塑性轧制示意图及对应的测量系统

Fig.5 Schematic diagram of EPR process and relative measuring system

Stolyarov 等[43—44]对粗晶和超细晶 TiNi 形状记忆合金进行了电流辅助轧制，结果表明，通电能够提高材料轧制时的成形性，降低轧制力；此外，电流辅助轧制的效率依赖于材料的晶粒尺寸，对于超细晶 TiNi 合金，电流辅助轧制时其极限应变由 0.59 提高到 1.91，并且在 400~500 ℃退火后，2 种晶粒的合金均出现了纳米结构[44]，其合作者 POTAPOVA[45]也对不同组分的 TiNi 基形状记忆合金的电塑效应进行了研究，结果表明，原始组织为马氏体的 $Ti_{50.0}Ni_{50.0}$ 通电成形能力优于原始组织为 B2 奥氏体的 $Ti_{49.2}Ni_{50.8}$，通过微观组织分析发现，$Ti_{49.2}Ni_{50.8}$ 电流辅助轧制并退火处理后得到奥氏体组织，$Ti_{50.0}Ni_{50.0}$ 电流辅助轧制并退火处理后得到的却为奥氏体和马氏体混合组织。

2.2 钛合金电流辅助拉拔

由于拉拔变形设备简单，在拉拔变形设备上加入电源装置比较容易，因此电流辅助拉拔是应用最早且最广泛的电流辅助加工方式之一。ZHOU 等[46]研究了高能脉冲电流（最大峰值电流密度为 241 A/mm^2）对 Ti-6Al-4V 钛合金的拉拔实验，进行引入电流和不进行电流处理的 2 组拉拔实验，比较高能脉冲电流对 Ti-6Al-4V 钛合金的微观组织和织构的影响，研究发现，脉冲电流促进了非有利取向的晶粒发生变形，使晶粒之间变形更为协调，晶界附近的应力集中得到缓解，从而抑制了 Ti-6Al-4V 钛合金组织中的孪生变形；并且脉冲电流可以促进 Ti-6Al-4V 钛合金柱面<*a*>滑移，同时抑制了内部锥面<*c*+*a*>滑移的启动，变形过程中通过促进晶界滑移来协调 *c* 方向应变；脉冲电流抑制了材料内部伴生位错晶界(IDBs)及几何必须晶界(GNBs)的形成，电流辅助拉拔后 Ti-6Al-4V 丝材内部的小角度晶界含量更低。

2.3 钛合金电流辅助弯曲

钛合金材料的屈服强度很高，导致弯曲抗力较大；又由于弹性模量较低（为钢的 1/2），所以屈弹比很大，板料弯曲后回弹严重，是弯曲制件中的一种较大缺陷，而脉冲电流的引入则可以解决上述 2 种不足。王玉庭[47]对 TA7 钛合金型材直接通电，拉弯成形出了 Φ1260 mm 的半圆框形件，加热时间较短，原材料利用率较高，是一种很理想的成形方式。Li 等[48]研究 TC4 钛合金弯曲时，试样结果见图 6[48]，发现电流可有效避免弯曲裂纹的产生，并且电流对流动应力的降低远远大于对失效应变的影响。周强等[49]对 TC4 钛合金电致塑性 V 型弯曲进行了研究，实验结果表明，电流可有效降低材料的回弹角和弯曲成形力，电流密度越大，弯曲成形效果越好，当有效电流密度达到 38.67 A/mm^2，回弹角减小 47.5%；增大电流频率具有同样的变化趋势，即增大频率，弯曲性能提高，其归结于脉冲电流的纯电塑性效应对位错运动的促进作用和焦耳热效应对材料的软化作用。

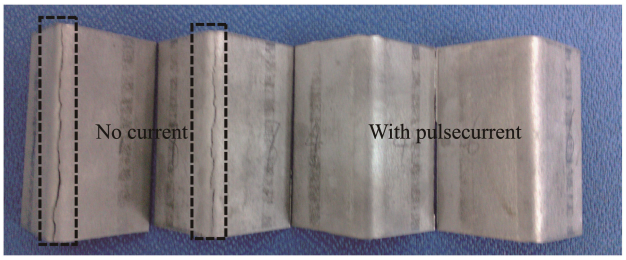


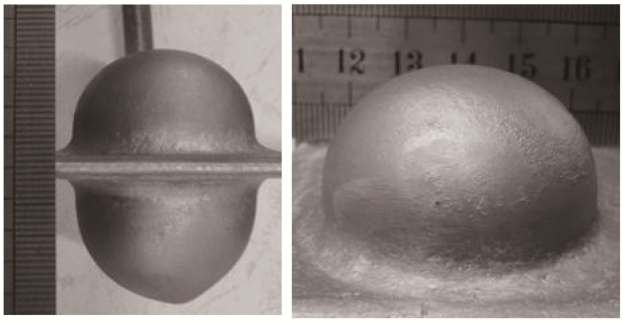
图 6 通入电流辅助和未通入电流的弯曲试样

Fig.6 Bent specimens with no current and pulse current

2.4 钛合金电流辅助超塑成形

李超等[50]研究了脉冲电流对细晶 Ti-6Al-4V 钛合金超塑成形规律，采用脉冲电流辅助超塑成形工艺成形 Ti-6Al-4V 合金，将设备的功率损耗从 1.5 kW 降到 800 W，能耗降低 80%左右，可使整个工艺效率提高 2 倍，脉冲电流辅助超塑成形的 Ti-6Al-4V 钛合金双半球结构见图 7[50]，由图 7 可知，成形后的双半球结构的高径比达到 1 以上。进一步研究成形机理，发

现在脉冲电流辅助细晶 Ti-6A1-4V 钛合金超塑变形的机制中，主要是位错运动协调的晶界和相界滑动，以及在此过程中 β 相的大变形，变形的 β 相挤入 α 相与 α 相晶界之间，并沿着 α 相晶界重新排列；而脉冲电流的引入，降低了扩散所需的激活能，增强了扩散和晶界滑动过程，进一步强化了这种机制的效果，从而大大提高了细晶 Ti-6Al-4V 合金的超塑变形能力。



a 双半球结构　　b 上半球

图 7　脉冲电流辅助超塑成形的 Ti-6Al-4V 钛合金双半球结构

Fig.7 Double hemisphere structure of Ti-6A1-4V alloy formed by the method of pulse current auxiliary superplastic forming

除了上述几种钛合金电流辅助成形工艺外，电流辅助在渐进成形和微成形工艺也有研究。Asghar 等[51]研究借助于脉冲电流下的渐进成形，在 47 ℃下成功完成了 TC4 钛合金的成形，与传统的加工方式相比，成形力得到了很大降低，并且通过合理布置刀具路径，可以减少电阻热而增加纯电塑性效应在提高材料成形能力的比例。刘勇达[52]研究 TA2 纯钛箔板微拉伸和棒材微压缩实验，结果显示，脉冲电流对晶粒大小的激励作用不一致，变形后小角晶界含量迅速下降，并且当电流密度和应变量达到一定值时，导致电流辅助拉伸和压缩时材料的尺寸效应都出现了弱化现象。

3　钛合金电流辅助应用展望

目前，研究人员对钛合金电流辅助的工艺探究都表明，通入电流可以改善钛合金的成形性能，不仅可以提高实际生产率，降低成本，还可以改进设备，改善工人的生产环境，是一条绿色环保的生产工艺，所以还将展现广阔的运用前景。

从如今的研究成果来看，钛合金电流辅助成形的过程中都伴随着组织的演变，这也为加工过程中复合热处理工艺提供了可能，将传统的单工序成形工艺改进为“成形+热处理”工艺，大大提高生产率，减少生产成本。另一方面，则应从成形工艺的过程出发，电流辅助钛合金成形时，都存在一个电流密度阀值，超越这一参数，钛合金的电塑性才能表现明显；同理，钛合金电流辅助也应该存在一个最优电参数，在此最优电参数下加工，材料表现出较低的变形抗力和良好的塑性匹配，拥有最佳的成形性能，将大幅度节省成本，因此，研究每一种型号钛合金在不同电参数下的本构模型，找到最优电参数也是一个重要的研究方向。

4　结语

在钛合金电流辅助成形的研究成果上，梳理了电流辅助钛合金的机理，并介绍了电流辅助钛合金成形工艺的应用。

1）钛合金电流辅助的机理探究表明，无论在力学性能还是在微观组织研究上通入电流可以达到改善钛合金性能、促进组织转变的效果。

2）钛合金电流辅助成形可以运用到轧制、拉拔、弯曲、超塑性成形等工艺，降低了材料的变形抗力，提高钛合金成形的力学性能。

3）钛合金电流辅助成形作为一个绿色加工工艺，未来可以继续从电流辅助冶炼金属的材料源头和寻找钛合金成形过程中的最佳电参数 2 个方向来研究，为更好地应用钛合金提供经验参考。

参考文献：

[1] NGUYEN-TRAN H D, OH H S, HONG S T, et al. A Review of Electrically-assisted Manufacturing[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2015, 2(4): 365—376.

[2] ZHU Z, DHOKIA V G, NASSEHI A, et al. A Review of Hybrid Manufacturing Processes-state of the Art and Future Perspectives[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2013, 26(7): 596—615.

[3] CHU W S, KIM C S, LEE H T, et al. Hybrid Manufacturing in Micro/nano Scale: a Review[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2014, 1(1): 75—92.

[4] SIM M S, LEE C M. A Study on the Laser Preheating Effect of Inconel 718 Specimen with Rotated Angle with Respect to 2-axis[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(1): 189—192.

[5] LIN Y C, CHUANG F P, WANG A C, et al. Machining Characteristics of Hybrid EDM with Ultrasonic Vibration and Assisted Magnetic Force[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(6): 1143—1149.

[6] PARK C, SHIN B S, KANG M S, et al. Experimental Study on Micro-porous Patterning Using UV Pulse Laser Hybrid Process with Chemical Foaming Agent[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16(7): 1385—1390.

[7] LEE S J, KIM J D, SUH J. Microstructural Variations and Machining Characteristics of Silicon Nitride Ceramics from Increasing the Temperature in Laser Assisted Machining[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(7): 1269—1274.

[8] CHO Y T, NA S J. Numerical Analysis of Plasma in CO_2 Laser and Arc Hybrid Welding[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16(4): 787—795.

[9] TROITSKII O A, LIKHTMAN V I. Anisotropy of the Effect of Electron and γ-Irradiation on the Process of Deformation of Zinc Single Crystals in the Brittle State[J]. Akademiya Nauk SSSR, 1963, 148(2): 332—334.

[10] CONRAD H. Electroplasticity in Metals and Ceramics[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 287(2): 276—287.

[11] CONRAD H. Thermally Activated Plastic Flow of Metals and Ceramics with an Electric Field or Current[J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 322(1): 100—107.

[12] CONRAD H. Effects of Electric Current on Solid State Phase Transformations in Metals[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 287(2): 227—237.

[13] ANDRAWES J S, KRONENBERGER T J, PERKINS T A, et al. Effects of DC Current on the Mechanical Behavior of AlMg1SiCu[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2007, 22(1): 91—101.

[14] HEIGEL J C, ANDRAWES J S, ROTH J T, et al. Viability of Electrically Treating 6061 T6511 Aluminum for Use in Manufacturing Processes[J]. Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of Sme, 2005, 33: 145—152.

[15] ANDRAWES J S, HEIGEL J C, ROTH J T, et al. Effects of DC Current on the Stress-Strain Curve and Hardness of 6061 T6511 Aluminum[C]// ASME 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2004: 169—178.

[16] ROSS C, ROTH J T. The Effects of DC Current on the Tensile Properties of Metals[C]// ASME 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2005: 363—372.

[17] PERKINS T A, ROTH J T. The Reduction of Deformation Energy and Increase in Workability of Metals Through an Applied Electric Current[C]// ASME 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, American Society of Mechanical Engineers, 2005: 313—322.

[18] KHALILOLLAHI A, JOHNSON D H, ROTH J. Multi-Field FE Modeling of Resistive Heating in a 6061-T6511 Aluminum Specimen[C]// ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, American Society of Mechanical Engineers, 2006: 263—269.

[19] WARLEY R L, ROTH J T. Axial Temperature Profile in a Cylindrical Tensile Bar Carrying a Large Electric Current during a Tensile Test[C]// ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2006: 615—623.

[20] KRONENBERGER T J, WARNER M K, ROTH J T. Compressive Superplastic Behavior of 6Al-4V Titanium Caused by an Applied DC Current[C]// ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2006: 13—20.

[21] PITSCHMAN M, DOLECKI J W, JOHNS G W, et al. Application of Electric Current in Friction Stir Welding[C]// ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2010: 185—189.

[22] SALANDRO W A, JONES J J, MCNEAL T A, et al. Formability of Al 5xxx Sheet Metals Using Pulsed Current for Various Heat Treatments[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2010, 132(5): 051016.

[23] MCNEAL T A, BEERS J A, ROTH J T. The Microstructural Effects on Magnesium Alloy AZ31B-O While Undergoing an Electrically-assisted Manufacturing Process[C]// ASME 2009 International Manufacturing Science and Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers, 2009: 641—650.

[24] NIEBAUER J, GRIMM T, SHAFFER D, et al. Effect of Applied Electricity on Springback during Bending and Flattening of 304/316 Stainless Steel, Titanium AMS-T-9046 and Magnesium AZ31B[C]// ASME 2016 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers, 2016: V001T02A021—V001T02A021.

[25] ROSS C D, IRVIN D B, ROTH J T. Manufacturing Aspects Relating to the Effects of Direct Current on the Tensile Properties Of Metals[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2007, 129(2): 342—347.

[26] C 莱茵斯, M 皮特尔斯. 钛与钛合金[M]. 陈振华, 译. 化学工业出版社, 2005.
LEYENS C, PETERS M. Titanium and Titanium Alloys[M]. CHEN Zhen-hua, Translate. Chemical Industry Press, 2005.

[27] 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 and Engineering, 1980, 45(2): 109—116.

[28] 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.

[29] ROSCHUPKIN A M, BATARONOV I L. Physical Basis of the Electroplastic Deformation of Metals[J]. Russian Physics Journal, 1996, 39(3): 230—236.

[30] MOLOTSKII M I. Theoretical Basis for Electro and Magnetoplasticity[J]. Materials Science and Engineering

A, 2000, 287(2): 248—258.

[31] CONRAD H. Electroplasticity in Metals and Ceramics[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 287(2): 276—287.

[32] ROSS C D, KRONENBERGER T J, ROTH J T. Effect of DC Current on the Formability of 6AL 4V Titanium[C]// ASME 2006 International Manufacturing Science and Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers, 2006: 237—247.

[33] PERKINS T A, KRONENBERGER T J, ROTH J T. Metallic Forging Using Electrical Flow as an Alternative to Warm/Hot Working[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129(1): 84—94.

[34] SONG Hui, WANG Zhong-jin, GAO Tie-jun. Effect of High Density Electropulsing Treatment on Formability of TC4 Titanium Alloy Sheet[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(1): 87—92.

[35] MAGARGEE J, MORESTIN F, CAO J. Characterization of Flow Stress for Commercially Pure Titanium Subjected to Electrically Assisted Deformation[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2013, 135(4): 041003.

[36] KINSEY B, CULLEN G, JORDAN A, et al. Investigation of Electroplastic Effect at High Deformation Rates for 304SS and Ti-6Al-4V[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2013, 62(1): 279—282.

[37] WANG Z, SONG H. Effect of High-density Electropulsing on Microstructure and Mechanical Properties of Cold-rolled TA15 Titanium Alloy Sheet[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 470(1): 522—530.

[38] SALANDRO W A, BUNGET C J, MEARS L. Several Factors Affecting the Electroplastic Effect during an Electrically-assisted Forming Process[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2011, 133(6): 064503.

[39] XU Z S, CHEN Y X. Effect of Electric Current on the Recrystallization Behavior of Cold Worked α-Ti[J]. Scripta Metallurgica, 1988, 22(2): 187—190.

[40] WANG F, HUO D, LI S, et al. Inducing TiAl3 in Titanium Alloys by Electric Pulse Heat Treatment Improves Mechanical Properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 550: 133—136.

[41] ZHANG W, WU B, ZHAO W S, et al. Formation of Novel β-Ti Martensites in Ti-6Al-4V under an Electric-current-pulse Heat Treatment[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 438: 320—323.

[42] YE X, ZION T H, TANG G, 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.

[43] STOLYAROV V V. Deformability and Nanostructuring of TiNi Shape-memory Alloys during Electroplastic Rolling[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 503(1): 18—20.

[44] STOLYAROV V V. Influence of Pulse Current on Deformation Behavior during Rolling and Tension of Ti-Ni Alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 577: S274—S276.

[45] POTAPOVA A A, STOLYAROV V V. Deformability and Structural Features of Shape Memory TiNi Alloys Processed by Rolling with Current[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 579: 114—117.

[46] YAN Z, CHEN G, FU X, 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.

[47] 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.
WANG Yu-ting. Research in Resistance Heating Stretch Bending Forming of Titanium Alloy[J]. Aerospace Material & Technology, 1986(2): 4—7.

[48] LI X, ZHOU Q, ZHAO S, et al. Effect of Pulse Current on Bending Behavior of Ti6Al4V Alloy[J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 1799—1804.

[49] 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.
ZHOU Qiang, LI Xi-feng, CHEN Jun, et al. The Experimental Research on Electrically Induced Plasticity V-shaped Bending of TC4 Titanium Alloy[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22(5): 52—56.

[50] 李超, 张凯锋, 蒋少松. Ti-6Al-4V 合金双半球结构脉冲电流辅助超塑成形[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(8): 1400—1404.
LI Chao, ZHANG Kai-feng, JIANG Shao-song. Pulse Current Assisted Superplastic Forming of Ti-6Al-4V Alloy Double Hemisphere Structure[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(8): 1400—1404.

[51] ASGHAR J, REDDY N. Importance of Tool Configuration in Incremental Sheet Metal Forming of Difficult to Form Materials Using Electro-plasticity[C]//Proceeding of the World Congress on Engineering, 2013.

[52] 刘勇达. 电流辅助 TA2 纯钛微塑性变形行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
LIU Yong-da. Research in Microplastic Deformation Behavior of TA2 Pure Titanium by Current Assisted[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.