

引文格式: 李细锋, 曹旭东, 王斌, 等. 钛合金电辅助塑性成形技术研究进展 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(17): 22-30.

LI Xifeng, CAO Xudong, WANG Bin, et al. Research progress on electrically-assisted plastic forming technology of titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(17): 22-30.

钛合金电辅助塑性成形技术研究进展*

李细锋¹, 曹旭东¹, 王斌², 孔得力³, 兰晓宸⁴

(1. 上海交通大学, 上海 200030;

2. 北京星航机电装备有限公司, 北京 100074;

3. 火箭军装备部驻北京地区第六军事代表室, 北京 100074;

4. 空军驻北京地区第二军代室, 北京 100074)

[摘要] 对钛合金电辅助塑性成形工艺研究进展进行了综述, 包括电辅助弯曲、电辅助镦粗和电辅助拉拔等。介绍了近期开发的 TC4 钛合金环段电辅助拉深成形工艺, 在 1500A 大电流(电流密度 5.5A/mm²) 和 1.5V 低电压作用下, 在 1min 内即可达到所需的 600℃ 左右的成形温度。脉冲电流对 TC4 钛合金微观组织的影响比较复杂, 在一定情况下促进钛合金内的 β 相向 α 相的转变, 降低其热力学激活能, 也可以显著降低 TA15 钛合金和 TA1 钛合金的各向异性。适当频率和密度的脉冲电流可修复细小裂纹、韧窝、孔洞等。钛合金的电致塑性主要包括焦耳热效应和纯电塑性效应, 现有的研究结果对纯电塑性效应还没有形成一致的结论, 对今后的研究方向也进行了阐述。

关键词: 钛合金; 电致塑性; 塑性变形; 微观组织; 焦耳热; 纯电塑性效应

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.17.022



李细锋

研究员, 博士, 研究方向为轻质高强板材塑性成形工艺及工程应用。

钛合金因比强度高、耐高温和耐腐蚀等综合性能优异, 常被应用于轻量化、高温和强腐蚀环境, 在航空航天、医疗和化工等领域得到了广泛运用。在实际使用中, 通常需要将钛合金坯料加工成各种特殊的形状, 但钛合金室温塑性低、成形性差, 当塑性变形量大时会产生裂纹、严重回弹等缺陷, 室温塑性成形效果不佳, 难以满足航空航天领域复杂构件控形控性的要求^[1-2], 因此, 经常采用高温成形方法进行钛合金零件的制造。但是高温成形周期长、工况复杂、能耗高, 成形件晶粒粗大、表面氧化严重;

另外, 模具材料需满足耐高温和抗氧化等要求, 显著增加了制造成本, 因此寻求更为节能环保、低成本的钛合金成形方法一直是研究的热点, 电致塑性成形技术自然进入了研究者的视野, 近年来得到了快速发展和广泛关注。

Troitskii 于 1963 年研究表面活性剂时发现电致塑性效应, 之后苏联和美国学者进行了部分理论和工程应用研究。1978 年, 以 Conrad 为代表的学者研究了包括钛合金在内的多种金属的电塑性。近 60 年的研究表明, 在金属成形过程中通电

* 基金项目: NSFC-辽宁联合基金项目(U1908229)。

流,一定程度上可修复缺陷,促进再结晶,推动位错和晶界运动,增强金属塑性。电致塑性效应的研究主要集中于4种机制:焦耳热效应、纯电塑性效应、磁压缩效应和集肤效应。目前,有些研究只能解释具体的试验现象,电致塑性效应物理机制的各种假说普遍性不足,同时缺乏足够的电致塑性成形工艺参数数据指导工业实践。

本文介绍了钛合金电致塑性成形的不同技术和钛合金电辅助塑性成形工艺的最新进展;基于微观组织和力学性能两个方面,分析了钛合金在脉冲电流作用下微观机理和宏观性能之间的联系;最后,从焦耳热效应和纯电塑性效应等物理机制,概述了国内外电致塑性理论研究的进展和成果。

钛合金电辅助成形技术

电辅助成形技术是在通电状态下使钛合金坯料发生塑性变形并得到所需成形件。根据目的不同,钛合金电辅助成形与传统的塑性成形技术相似,通常在冷成形工艺基础上加入电流的作用,利用脉冲电流的电致塑性效应,提升钛合金的成形性能。在不同的冷成形工艺基础上,通过调节电流的大小、频率、通电时间、波形等,发展出一系列不同的电辅助成形

工艺。

1 电辅助弯曲

在工件弯曲成形过程中通入电流,利用电流提高钛合金弯曲成形性能的方法即为电辅助弯曲,图1为脉冲电流辅助弯曲示意图^[3]。周强^[4]研究了TC4钛合金电辅助弯曲变形行为,分析了不同电流密度下成形力与位移的关系,随着有效电流密度的提升,稳定变形所需的成形力显著降低,控制脉冲电流的频率为200Hz,当有效电流密度为 $38.67\text{A}/\text{mm}^2$ 时,电辅助弯曲成形力较无电条件下下降了49.01%(图2)^[4]。另外,脉冲电流不仅降低成形力,还有效提高材料延伸率,降低屈服强度,从而有效避免弯曲过程产生裂纹,提升弯曲成形的质量。当有效电流密度达到 $14.00\text{A}/\text{mm}^2$ 时,弯曲后试样表面光滑、无裂纹,如图3所示^[4]。脉冲电流对弯曲回弹角也存在影响, $14.00\text{A}/\text{mm}^2$ 电流作用下,弯曲后回弹相对明显,回弹角为 14.1° ,随着有效电流密度的不断增大,回弹角相应减小,当电流密度为 $38.67\text{A}/\text{mm}^2$ 时,回弹角为 7.4° ,和电流密度为 $14.00\text{A}/\text{mm}^2$ 时的试样相比,回弹角减小了47.5%。

杨文兵^[5]对Ti-55钛合金电辅助弯折研究同样表明,无电流作用弯折中Ti-55钛合金易弯曲开裂^[3],弯曲内角达到 147.4° 。在200Hz占空

比25%的脉冲电流作用下,无开裂弯曲角可显著降低,有效电流密度越大,弯曲性能越好,弯曲内角越小,弯曲回弹得到有效抑制(表1^[6])。

解焕阳^[6]对金属板材脉冲电流辅助弯曲回弹情况进行了理论分析,根据平面应变的适度模型简化和Mises屈服准则,得到了电辅助弯曲回弹角理论计算公式,对AZ31B镁合金板和QP980钢板的电辅助弯曲回弹角预测值与试验值进行了比较,模型预测曲线在试验误差线内,模型预测值与试验结果吻合较好。

2 电辅助镦粗

钛合金镦粗过程中样品在达到变形极限后如继续压缩,则往往会开裂。Ross等^[7]进行了室温镦粗、加热镦粗和直流电辅助镦粗的对比研究(图4从左至右分别为室温镦粗、加热镦粗、直流电辅助镦粗^[7]),发现室温和加热镦粗都出现了裂纹,而电辅助镦粗效果良好,这表明电致塑性效应不是单纯的焦耳热效应,还有非热效应,不同于传统的加热成形工艺,试验还表明,在直流电辅助压缩试验中, $13.7\text{A}/\text{mm}^2$ 的电流密度下,应变达到0.45时失效;当电流密度达到 $19.4\text{A}/\text{mm}^2$ 以上时,达到试验的量程仍未出现失效。

叶苏苏等^[8]进行了TC4钛合金单向压缩试验,试图从微观组织和性

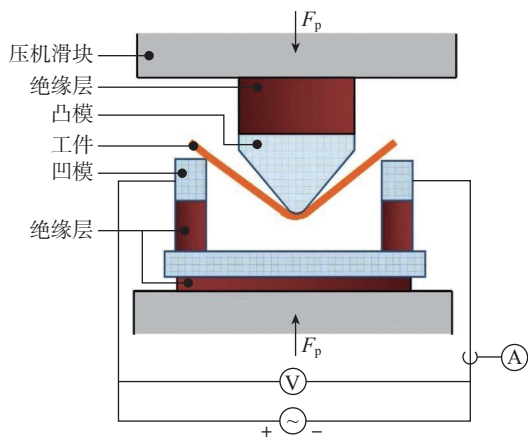


图1 脉冲电流辅助弯曲示意图

Fig.1 Schematic diagram of pulse current assisted bending

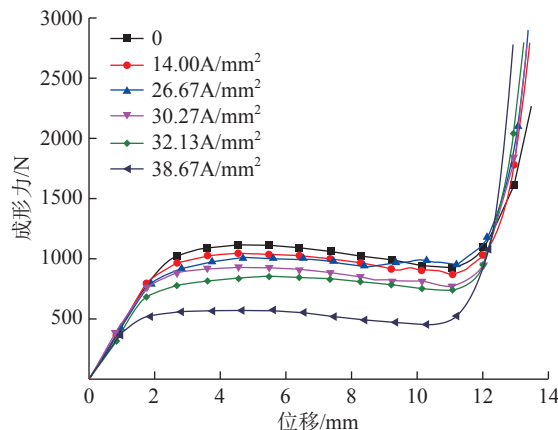


图2 有效电流密度对工件弯曲成形力的影响

Fig.2 Effect of effective current density on bending force of parts

能方面对电辅助压缩行为做出解释,试验发现无电流时 TC4 钛合金流变应力超过 1000MPa,而电流作用下流变应力可以降低至 600MPa 以下;而在温升速度为 10℃/s 的小电流作用下,流变应力随应变先快速增大,之后再逐渐降低至稳态,为典型

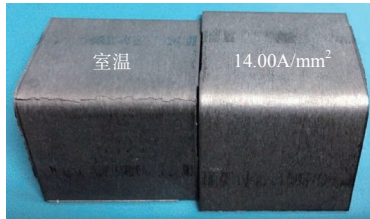


图3 电流密度对弯曲工件成形质量影响
Fig.3 Effect of current density on forming quality of bent parts

的动态再结晶曲线;温升速度达到 30℃/s 以上的试验条件下,应力峰值低于 400MPa,达峰值后下降不明显,符合动态回复的特征。相同试验条件下,电流越大,流变应力越小。Perkins 等^[9]对钛合金的电辅助镦粗研究也发现,当电流密度达到 19A/mm²时,镦粗直至压缩极限都不会出现裂纹;电辅助压缩过程中,出现了塑性和应变增加,应力反而下降的情况。钛合金电辅助镦粗过程中结束温度仅为 88℃,在此温度条件下钛合金受影响相当小,而高温拉伸研究表明钛合金在 200℃下基本不会表现出显著的塑性差别,故而否定了焦耳热效应为全部电塑性效应的观点(图 5^[7])。

表 1 不同电流密度作用下 Ti-55 钛合金最小弯曲内角

Table 1 Minimum bending angles of Ti-55 titanium alloy at different current densities

电流密度 / (A · mm ⁻²)	温度 / °C	弯曲内角 / (°)
0	20	147.4
4.0	556	85.3
5.0	670	83.9
5.5	710	83.4
6.0	794	77.6



图4 钛合金不同镦粗试样
Fig.4 Titanium alloy specimens produced by different upsetting processes

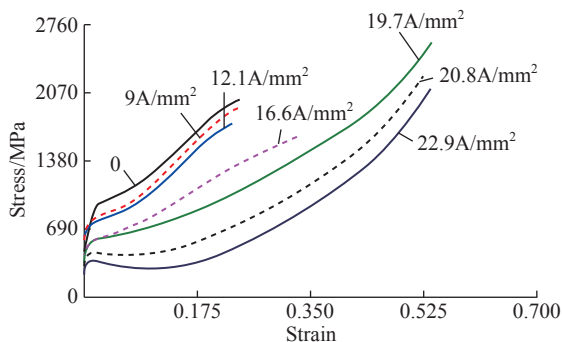


图5 钛合金镦粗应力-应变曲线
Fig.5 Upsetting stress-strain curves of titanium alloy

3 电辅助拉拔

电辅助拉拔是应用最为广泛的一种电致增塑加工方式,这是由于原有拉拔设备结构简单,便于进行通电改造。电致塑性效应发现后不久,就开始了电辅助成形技术的应用研究,在金属拔丝工艺中首先引入电流。电辅助拔丝是在拔丝模前后即金属丝变形区中通入脉冲电流^[10],原理如图 6 所示,拔丝速度和单次拔粗率比普通拔丝工艺有显著提升。

周岩^[11]对 TC4 钛合金电辅助拉拔变形的行为和机理进行了研究,结果表明高能脉冲电流可以促进位错滑移,降低丝材拉拔变形过程中的拉拔力;TC4 钛合金变形抗力随电流密度的升高而下降,当施加频率 200Hz、峰值电流密度 240A/mm² 的脉冲电流时,拉拔力降低 24%。电辅助拉拔后的丝材具有良好的宏观与微观组织均匀性,丝材表面与芯部变形一致,芯部残余应力较小,抑制了丝材笔尖状断口的形成。研究表明,电流方向与拉拔方向一致时,拉拔力受电流影响下降更大,这可能是由于电子漂移方向和位错滑移方向一致导致的;脉冲电流频率对电辅助拉拔的效果没有显著影响。

4 钛合金环段电辅助拉深成形

使用冷成形方式制造 TC4 钛合金环段截面不光顺,起皱严重,无法满足使用要求。作者团队通过数值模拟、模具设计和工艺验证的方

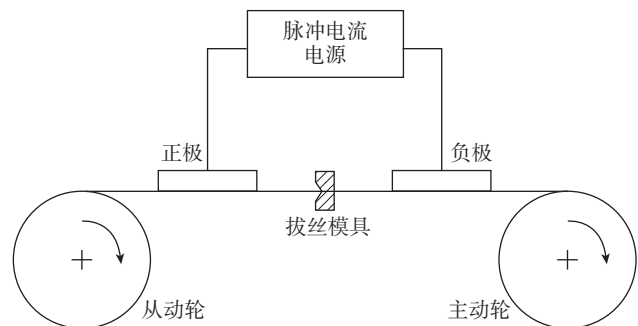


图6 电辅助拔丝示意图
Fig.6 Schematic diagram of electrically assisted drawing

式,提出钛合金环段脉冲电流辅助拉深成形工艺(图7)。对450mm×275mm×1mm的TC4钛合金坯料使用12V/20000A的低压大电流脉冲设备加以1500A的脉冲电流和1.5V电压,在1min中内升温到所需的600℃左右,6min内完成钛合金环段电辅助成形工序。对比TC4钛合金环段冷成形和电辅助拉深成形结果,冷成形环段截面有小的起伏、不光顺,起皱明显;而电辅助成形环段截面光顺,没有明显起皱,成形效率高。通过钛合金环段尺寸精度的测量,可以看出电辅助成形的精度明显提高,避免了起皱和回弹大等缺陷(图8)。

钛合金电致塑性成形的组织性能特征

1 脉冲电流对力学性能的影响与微观组织分析

电致塑性效应在不同工艺下存

在变形方式的差别,但其微观机理有共性。Li等^[12]利用ImageJ软件分析TC4钛合金室温与通电拉伸的相成分,对于原始晶粒尺寸为9.2μm的TC4钛合金,当有效电流密度为9.03A/mm²时,通电拉伸较室温拉伸α相体积分高4.17%;同样电流密度下,27.4μm晶粒尺寸α相体积分数差距为3.7%。因此,可以推断,脉冲电流能够促进β→α相变。相变推动力是脉冲电流减少了相变过程所需的热力学激活能,增大了α相的形核速率。从脉冲电流的作用机制可解释细晶钛合金相变率更高,即细晶的TC4钛合金晶界面积大,一方面,同样的电流密度下,电流对细晶钛合金晶界作用更大,焦耳热效应更明显;另一方面,晶界面积大提供了更多α相的形核位置。用X射线衍射仪XRD进行定量判断脉冲电流对位错密度的影响,对于9.2μm晶粒尺

寸的TC4钛合金,当脉冲电流的有效电流密度为6.36A/mm²、9.03A/mm²和10.48A/mm²时,和室温拉伸相比,TC4钛合金样品中位错密度分别降低了19.37%、26.25%和62.07%。结果表明,随着有效电流密度的增大,位错密度不断降低,导致材料的延伸率提高和流动应力降低。

Wang等^[13]对TA15钛合金轧制板通电处理研究发现,不仅在拉伸过程中通脉冲电流可以提高延展性,对于已经过常温轧制的TA15钛合金薄板进行通电处理,延展性也会提高,而且在通电处理后拉伸方向与延展性之间的关系被削弱。原始的TA15钛合金冷轧板表现出了明显的各向异性,不同方向的拉伸强度之差最高可达75MPa,但经过最大电流密度为5400A/mm²的作用后,各向异性显著降低,不同方向之间的拉伸强度之差最高只有5MPa,总伸长率也从1.4%的差距降低到0.1%,如图9所示^[13]。在断裂前的脉冲电流处理样品上发现了少量的微裂纹,而微裂纹的传播行为取决于其滑移长度。对于90°的样品,由于晶粒与拉伸方向垂直,微裂纹受板条状初生α相阻挡,因此在晶间发生了断裂。随着电流密度的增加,TA15再结晶增加,初生板条状α相转变为等轴晶粒,对于0°和45°的样品,裂纹扩展通过等轴晶所需的能量减少,更容易因裂纹扩展而断裂,故总伸长率具有单峰性,

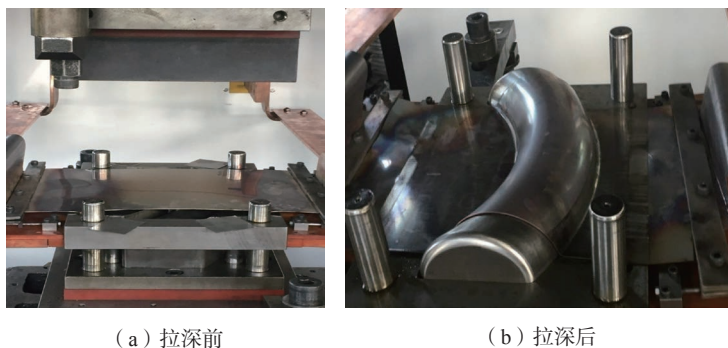


图7 TC4钛合金环段电辅助拉深成形过程

Fig.7 Electrically-assisted drawing process of TC4 titanium alloy ring segment

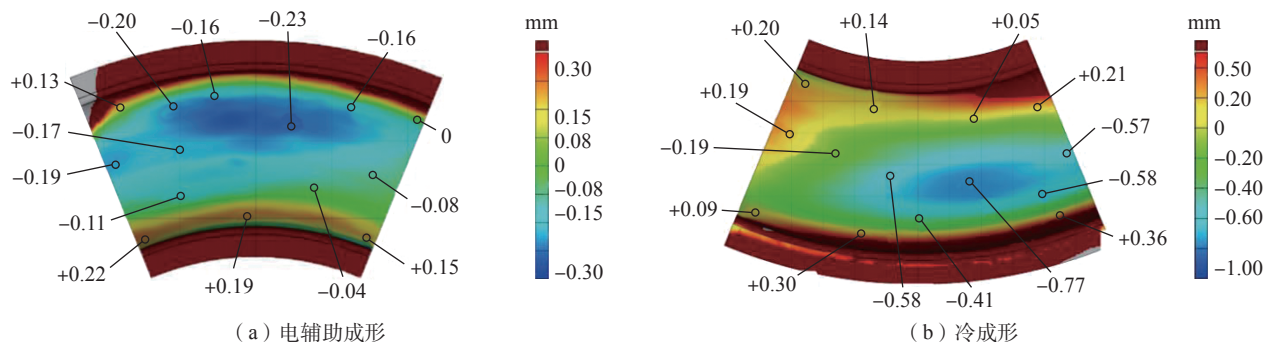


图8 钛合金环段件成形精度测量

Fig.8 Forming precision measurement of TC4 titanium alloy ring segment

随着最大电流密度的提高先增加后降低。对于 90° 的样品,板条状 α 相向等轴 α 相转变的过程中,断裂机制从晶间断裂变为穿晶断裂,会产生裂纹扩展和二次裂纹,所需能量增加,因此随着最大电流密度的提高,总延伸率变得更高。

Stolyarov^[14] 研究了 $\text{Ti}_{49.4}\text{Ni}_{50.6}$ 形状记忆合金通电轧制过程中的组织性能变化,证实了脉冲电流可提升此种含钛合金的延展性^[13]。对于 8 道次 ECAP (等径弯曲通道变形) 方法制备此形状记忆合金,轧制过程中通脉冲电流可将断裂应变从 0.59 提升至 1.91,提高了 223.7%。利用透射电子显微镜 (TEM) 观察了电塑性轧制后的微观组织 (图 10), 发现当电辅助轧制效应较为明显时,微观组织得到细化,此合金中初始相组成也会发生变化,在电辅助轧制后进行 X 射线分析,发现 β 相的占比从 10%~15% 减少至 1%~2%。

宋辉^[15] 进行的研究表明,脉冲电流对微观组织的影响与普通退火完全不同,冷作硬化经脉冲电流处理后,呈现单应变硬化系数 (n) 值或双 n 值,不会出现退火后的 3 阶段冷作硬化行为。TA1 钛合金随着电流密度的增大,板条组织分数逐渐增加,当电流密度提高到 $7.96 \times 10^3 \text{ A/mm}^2$ 时,平均温升可以达到 764°C , 形成魏氏体组织,但与普通热处理形成的粗大魏氏体不同,脉冲电流作用形成的魏氏体组织较为细小^[14]。脉冲电流处理时间非常短,可看作是绝热过程。由于塑性变形时金属电阻的分布并不完全均匀,局部电阻值较高,会导致温升不均匀;同时电流在缺陷处也会发生绕流,因此局部区域的温度将远高于平均值,容易超过 TA1 钛合金的 $\alpha \rightarrow \beta$ 相转变温度 (882°C), 且脉冲电流带来的升温速度可达 10^6°C/s 的数量级。因为形核率与过热度之间存在正相关性,此时 $\alpha \rightarrow \beta$

转变迅速发生,而高温时间较短,相变扩散不充分,形成的 β 相不均匀。当脉冲电流处理结束后,温度降低时,沿 β 相晶界发生反向的 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变,此种相变速度较快,形成了马氏体相变, α 相以板条状在 β 相晶粒内产生,故而能观察到片层组织。而当电流密度稍低,例如电流密度为 $7.22 \times 10^3 \text{ A/mm}^2$ 时,平均升温值远未能达到相变点,在温度较低的区域发生再结晶现象较多,形成细小的等轴晶组织,片层组织含量低,如图 11 所示^[15]。

2 脉冲电流对钛合金预制缺陷和耐腐蚀性能的影响

李细锋等^[16] 研究了不同频率脉冲电流作用下钛合金预制缺陷的变化情况。TC4 薄板在常温下预变形拉伸 10% 后,内部存在均匀分布的亚微米级孔洞,孔洞所占体积分数约为 2.21%。控制脉冲电压 40V 和通电时间 30s 对预变形试样分别进行

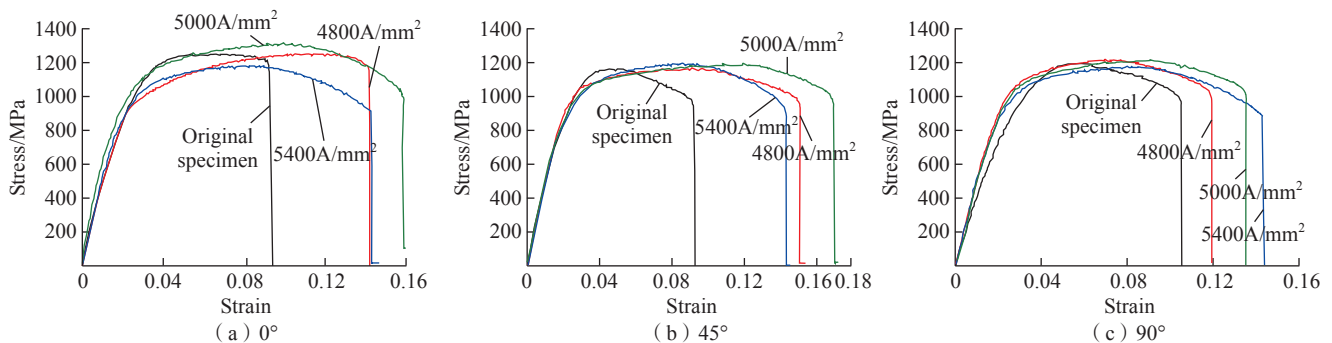


图 9 TA15 钛合金试样通电处理后不同方向的应力-应变曲线

Fig.9 Stress-strain curves of TA15 after energization treatment at different directions

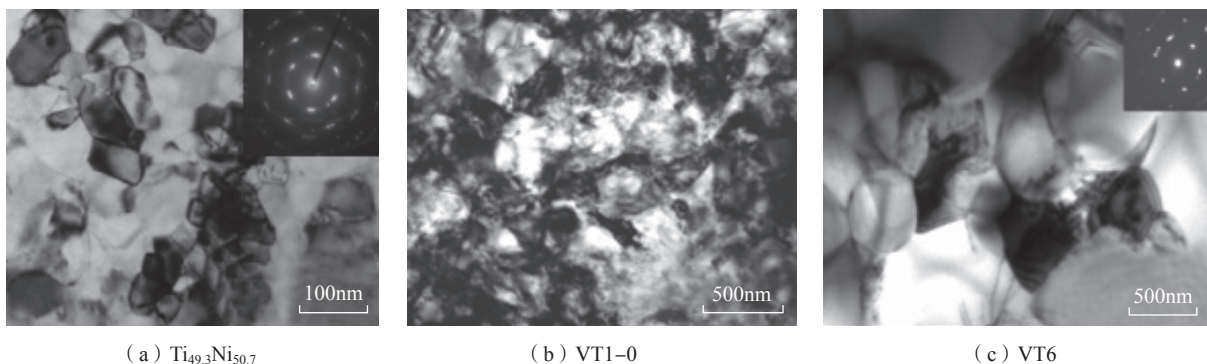


图 10 钛合金电辅助轧制微观组织

Fig.10 Microstructure of titanium alloy after electrically-assisted rolling and annealing

不同频率的通电处理,频率为 120Hz 时,孔洞数量开始减小,单个孔洞尺寸也有减小;频率为 140Hz 时,孔洞变化趋势延续,并且程度显著加剧,形状趋于球形;当频率继续升高为 160Hz 时,孔洞所占体积分数反而减少,且局部区域出现大尺寸孔洞,如图 12 所示^[16]。

孔洞弥合机制一般认为有两种,一种是原子的扩散填充,脉冲电流促进原子填入孔洞中,孔洞尖端处电流环路作用集中,焦耳热效应明显,孔

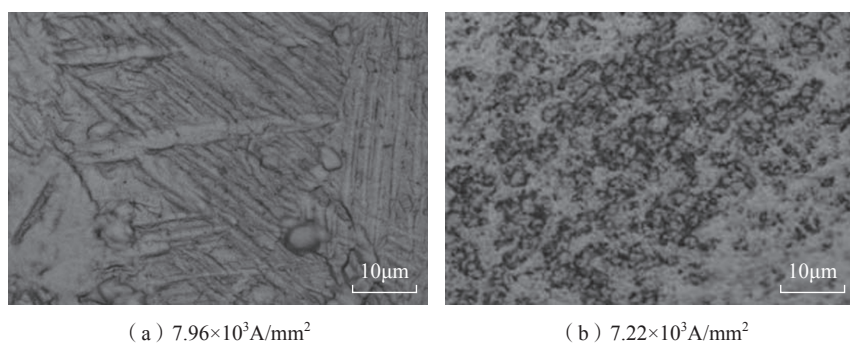
洞尖端在脉冲电流下具有更高的弥合,因此孔洞有球化趋势;另一种是热压合机制,孔洞区域电阻较大,焦耳热较高,膨胀趋势更明显,焦耳热导致材料内部发生膨胀,而孔洞外侧基体限制了孔洞向外的膨胀,故而孔洞向内膨胀,处于热压缩状态。对于孔洞在 160Hz 电流下反而体积扩大、占比增加的现象,研究者解释为原子在到达孔洞表面前,就被更高频率的电流轰击导致离开,因此,为了弥合和减少孔洞,应当选取最佳的脉冲电

流频率,并非频率越高越好。

脉冲电流频率对退火态 TC4 钛合金耐腐蚀性能的影响体现出与对孔洞影响类似的单峰性,在 200Hz 电流下,耐腐蚀性能最佳,不同频率电流作用的样品中 α 相和 β 相占比有显著不同。究其原因,姜军等^[17]分析认为是温度不同引起的。200Hz 时,最高温度为 457℃,退火态 TC4 中的少量亚稳相 α' 和 α'' 开始转变为 $\alpha+\beta$ 相, β 相数量增加,体积分数从 29.36% 增加到 35%,此过程相当于短时的稳定化处理,使 TC4 的组织更加稳定。频率增加到 300Hz 时,温度达到 728℃, TC4 开始发生静态再结晶,由于温度相对较低,结晶不充分,产生大量处于结晶预备期的亚晶粒和胞状亚结构,这些亚稳态结构活性较高,更容易被腐蚀,而由于 Al 对扩大 α 相区有显著作用且扩散较快,所以 α 相的再结晶形核和长大速率高于 β 相,此时 β 相的体积分数只有 20.69%,显著低于未经电流作用下的 β 相含量。频率继续增加到 400Hz,温度升高至 792℃时,观察到镶块式的再结晶晶粒,从 α 相向 β 相的转变开始发生, β 相体积分数达到 23.18%,受腐蚀更为严重。当频率继续升高到 500Hz 时,温度达到 851℃,接近 β 相变点, TC4 中含有 V 元素, V 含量高的区域 β 相含量快速提升,通电处理结束后冷却则会形成过冷 β 相和大量的亚稳相 α' 和 α'' ,无扩散相变还会导致 ω 相的形成, β 相体积分数达到了 38.27%,这些亚稳态组织更容易作为形核基体发生点蚀,因此 TC4 的耐腐蚀性能已经急剧下降。

钛合金电致塑性效应机理

目前从物理机制上,电致塑性通常被认为由焦耳热效应、磁压缩效应、集肤效应和纯电塑性效应 4 个方面构成,其中集肤效应和磁压缩效应占比很小,且相关研究不多。Okazaki

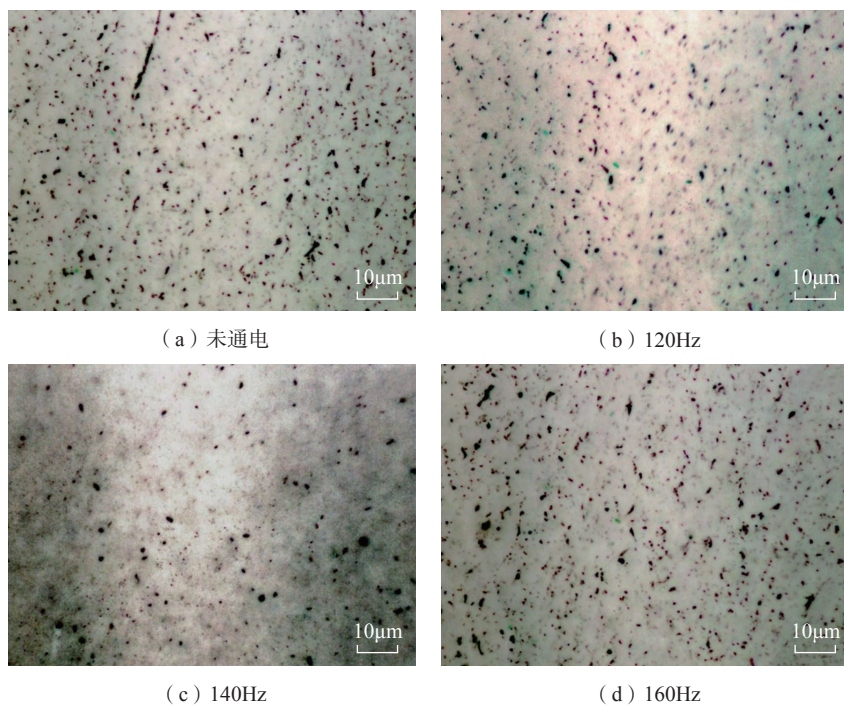


(a) $7.96 \times 10^3 \text{ A/mm}^2$

(b) $7.22 \times 10^3 \text{ A/mm}^2$

图 11 TA1 钛合金在不同脉冲电流密度作用下的微观组织

Fig.11 Microstructure of TA1 titanium alloy under different pulse current densities



(a) 未通电

(b) 120Hz

(c) 140Hz

(d) 160Hz

图 12 试样预拉伸后经脉冲电流处理后的内部显微孔洞分布(脉冲电压 40V,通电时间 30s)

Fig.12 Void distribution in pre-stretch specimens after pulse current treatment (pulse voltage of 40V, charging time of 30s)

等^[18]给出了高频电流作用下集肤效应深度 δ 的计算公式:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \quad (1)$$

式中, f 为电流频率; ρ 为电阻; μ 为磁导率。焦耳热效应和纯电塑性效应是电致塑性效应的主要构成部分。

集肤效应和磁压缩效应占比相对较低,电致塑性的宏观效果主要由焦耳热效应和纯电塑性效应组成。虽然对纯电塑性效应有待进一步研究,但电辅助成形方法已经得到实际应用,计算电致塑性效应的综合作用效果很有必要,可以直接优化电辅助成形工艺参数,提高生产效率。

Li等^[19]从能量角度进行了电致塑性效应的推导,建立了电流作用下的塑性应变率表达式:

$$\dot{\epsilon}_c = \dot{\epsilon}_{0c} \exp\left(\frac{-\Delta G}{k_b T} + \frac{x3N_c k_b T}{4nE_0} \Delta E \frac{t}{\tau}\right) \quad (2)$$

式中, $\dot{\epsilon}_{0c}$ 为指前因子; ΔG 为吉布斯自由能; k_b 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度; x 为平均位错量; N_c 为自由电子的数量; n 为金属离子量; E_0 为绝对零度时的费米能量; ΔE 为金属中自由电子能量增加值; t 为电流作用时间; τ 为电子的平均弛豫时间。

1 焦耳热效应

电流通过金属时会产生热效应,而温升导致塑性提高,其原理与热成形相近。脉冲电流加热阶段遵循如下的温升规律^[20]:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{R}{C\rho} \left(\frac{I_p D}{S}\right)^2 s \quad (3)$$

式中, T 为坯料温度; t 为通电时间; R 为电阻率; C 为比热容; ρ 为密度; I_p 为峰值电流; D 为脉冲电流的占空比; S 为横截面积,单位均采用国际单位制。容易判断,通过提高电流密度(即提高 I_p/S),温升速率将以二次函数的形式迅速上升,脉冲电流加热开始阶段升温曲线证实了这一点,如图13所示^[20]。

Ng等^[21]相似的焦耳热计算公式:

$$\Delta T = \frac{\rho J^2 t_p}{cd} \quad (4)$$

式中, ρ 、 c 、 d 、 J 、 t_p 分别为材料的电阻率、比热、密度、电流密度和电流持续接触时间。

焦耳热效应是电致塑性效应的组成部分,能产生与加热钛合金相似的效果,但电流加热钛合金坯料更高效快速,有利于钛合金电辅助成形技术的应用。

2 纯电塑性效应

虽然有研究者认为金属的电致塑性效应主要为焦耳热,但从钛合金研究的结果看,纯电塑性效应不仅存

在,而且相当显著。Molotskii^[22]提出了自旋电子理论,而Conrad等^[23]早在1989年就给出位错对电子的散射过程中,通过电子对位错的反作用力来计算电流对位错产生的作用力(电子风)的理论计算结果:

$$F_{ew} = \left(\frac{\rho_d}{N_d}\right) en_e J \quad (5)$$

式中, ρ_d/N_d 为单位长度位错的电阻率; e 为电子电荷; n_e 为电子密度。从量子力学的角度Conrad也给出相应的计算方式:

$$F_{ew} = \alpha b p_f n_e (v_e - v_d) = \alpha b p_f \left(\frac{J}{e} - n_e v_d\right) \quad (6)$$

式中, α 为常数,在0.25~1.0之间; b 为柏氏矢量; p_f 为费米动量; v_e 为电子源移速度; v_d 为位错运动速度。

Ti-7Al (Al原子分数为7%)合金分别在室温, $0.5 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ 、间隔100ms的方波脉冲电流和 $0.5 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ 连续电流作用下拉伸,尽管与其他研究相似,脉冲电流作用下的延伸率最高(图14)^[23],但拉伸时室温的样品强度和延展性比连续电流作用下的样品更高,考虑到连续电流焦耳热效应更明显,而电子风力只有2.8Pa,影响微弱,试验现象的产生原因仍有待分

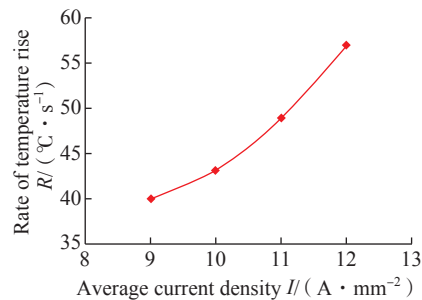


图13 不同电流密度下TC4钛合金的加热开始阶段升温速率

Fig.13 Temperature increase rate of TC4 titanium alloy during the beginning stage of heating under different current densities

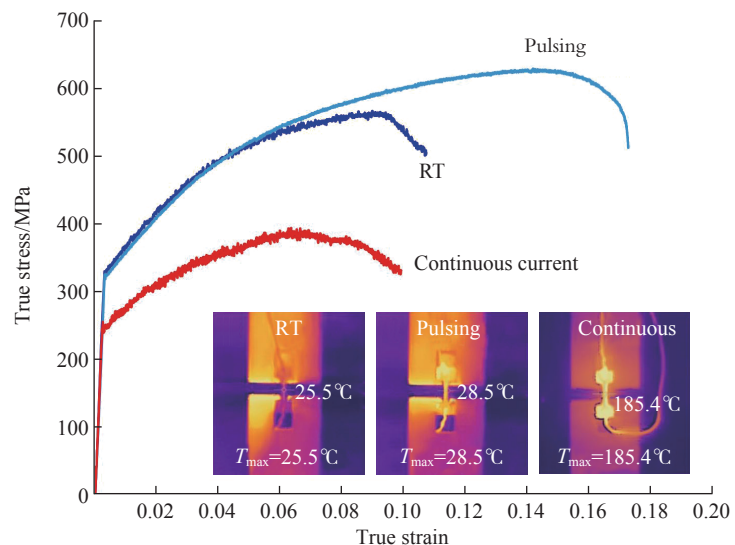


图14 Ti-7Al合金在不同条件下的力学和热测量

Fig.14 Mechanical and thermal measurements of Ti-7Al alloy at different conditions

析。该研究还表明脉冲电流并不改变位错的类型,却会显著改变其形态和分布。对室温和脉冲电流作用下工程应变 5% 的两种样品进行 TEM 分析,发现室温作用下的样品具有显著的平面滑移特征;脉冲电流作用下的样品则具有多向位错网络,且在钉扎或位错交叉处显现出交滑移至其他平面,增强了交滑移,产生波状位错形态。另一方面,孪晶产生被认为是三维加工硬化模式的结果而非产生的原因,脉冲电流增强了孪晶。通过分析 Ti-7Al 合金的电塑性行为,证明了脉冲电流极大地改变了缺陷的结构,从局部平面滑移到均匀波滑移^[24]。

Magargee 等^[25]对商业纯钛的研究得出了不同结论,强制风冷到 40℃ 后,商业纯钛在电辅助单向拉伸中的力学行为与无电流下的室温拉伸差别很小,说明商业纯钛的纯电塑性效应非常小,这与 Ti-7Al 合金的研究结果明显不同(图 15)。

结论与展望

(1) 电辅助成形由于可以直接快速加热坯料,因此在工业应用上有较好的应用前景,目前已经在电辅助弯曲、拔丝和轧制工艺中得到应用,可以进一步推广到其他成形工艺中。电辅助成形技术是将传统成形工艺与脉冲电流外能场相复合,是对现有

成形方法的补充与改善。众多研究表明,电辅助成形不同于传统的热成形工艺,在降低成形力、提高成形极限与精度等方面比传统热成形具有更佳效果。

(2) 电致塑性效应主要包括焦耳热效应和纯电塑性效应。由于纯电塑性效应的存在,钛合金的电致塑性效应可以优化其组织性能,修复变形带来的损伤和缺陷,可以应用于组织性能修复领域。目前对于纯电塑性效应的机理与定量计算还没有形成统一的观点和测试方法,这也是电致塑性成形技术的研究方向。

(3) 电辅助成形技术是单一外加能场,随着成形技术的发展,将多个能场耦合在一起,开展多能场制造技术的研究也是今后的研究方向。例如将电场与电磁场复合,开展铝合金材料的板管快速高效成形;将超声场与电场复合,开展铝合金或镁合金的扩散连接成形,突破铝合金或镁合金氧化膜问题阻碍其扩散连接技术发展的瓶颈。将多能场耦合制造,实现 1+1 大于 2 的作用效果,从而将多能场制造推广到更多的领域,解决目前难变形材料制造领域的技术难题。

参考文献

[1] LI X F, JIANG J, WANG S, et al.

Effect of hydrogen on the microstructure and superplasticity of Ti-55 alloy[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(9): 6338-6349.

[2] LI X F, LYU X, WU H, et al. Effect of grain size on the superplastic deformation behavior of Ti-55 alloy[J]. Procedia Engineering, 2017, 207: 1880-1885.

[3] SALANDRO W A, BUNGET C, MEARS L. Modeling and quantification of the electroplastic effect when bending stainless steel sheet metal[C]//ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference, Erie, 2010.

[4] 周强. TC4 钛合金板材电致塑性成形特性的实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.

ZHOU Qiang. Experimental research on the electrically-assisted forming properties of TC4 titanium alloys[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.

[5] 杨文兵. Ti-55 钛合金电流辅助变形特性实验及数值模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2021.

YANG Wenbing. Experimental and Numerical Simulation Study on Electroplastic Deformation Characteristics of Ti-55 Titanium Alloy[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2021.

[6] 解焕阳. 镁合金及先进高强钢电脉冲辅助塑性成形性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.

XIE Huanyang. Study on the performance of the electrically-assisted plastic forming for magnesium alloy and advanced high strength steel[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.

[7] ROSS C D, KRONENBERGER T J, ROTH J T. Effect of dc on the formability of Ti-6Al-4V[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2009, 131(3): 031004.

[8] 叶苏芬, 赵旦, 杨屹, 等. TC4 钛合金电塑性压缩流变应力分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(6): 1572-1577.

YE Susu, ZHAO Dan, YANG Yi, et al. Analysis of flow stress in electroplastic compression of TC4 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(6): 1572-1577.

[9] 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.

[10] 郑明新, 张人佶, 朱永华, 等. 电塑性效应及其应用[J]. 中国机械工程, 1997, 8(5): 91-94.

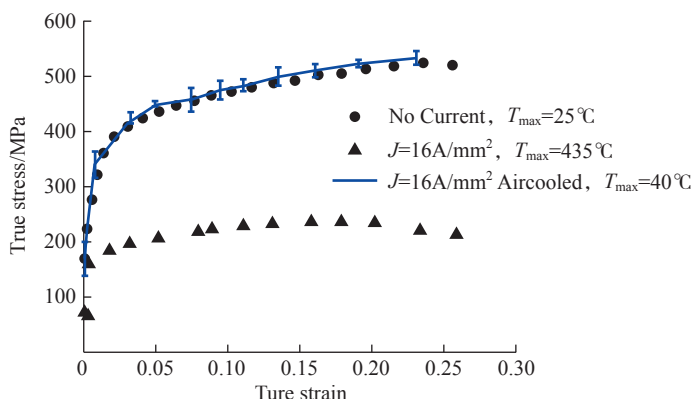


图 15 商业纯钛电辅助拉伸应力-应变曲线(有强制风冷和无风冷)

Fig.15 Electrically-assisted tension stress-strain curves of commercial pure titanium (with forced air cooling and without air cooling)

ZHENG Mingxin, ZHANG Renji, ZHU Yonghua, et al. Electroplasticity and its applications[J]. China Mechanical Engineering, 1997, 8(5): 91-94.

[11] 周岩. TC4 钛合金电塑性拉拔变形行为及机理 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.

ZHOU Yan. Deformation behaviour and its mechanism of TC4 during electroplastic drawing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.

[12] LI X F, JI B, ZHOU Q, et al. Influence of grain size on electrically-assisted tensile behavior of Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(10): 4514-4520.

[13] WANG Z J, 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(1-2): 522-530.

[14] STOLYAROV V V. Electroplastic effect in nanostructured titanium alloys[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2012, 31(2): 163-166.

[15] 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.

SONG Hui. Study on the effects of electropulsing on microstructures and properties

of titanium alloys sheet[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.

[16] 李细锋, 贾国朋, 姜军, 等. 脉冲电流频率对预制缺陷 TC4 钛合金性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(8): 2655-2660.

LI Xifeng, JIA Guopeng, JIANG Jun, et al. Effect of pulse current frequency on mechanical properties of TC4 titanium alloy with prefabricated defects[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(8): 2655-2660.

[17] 姜军, 李细锋, 陈军. 脉冲电流频率对退火态 TC4 钛合金耐腐蚀性能的影响 [J]. 模具技术, 2018(4): 1-7.

JIANG Jun, LI Xifeng, CHEN Jun. Effect of pulse current frequency on corrosion resistance of annealed TC4 titanium alloys[J]. Die and Mould Technology, 2018(4): 1-7.

[18] OKAZAKI K, KAGAWA M, CONRAD H. An evaluation of the contributions of skin, pinch and heating effects to the electroplastic effect in titanium[J]. Materials Science & Engineering, 1980, 45(2): 109-116.

[19] LI D, YU E, LIU Z. Microscopic mechanism and numerical calculation of electroplastic effect on metal's flow stress[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 580: 410-413.

[20] 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 Kaifeng, JIANG Shaosong. Pulse current assisted superplastic forming of Ti-6Al-4V alloy with double hemisphere structure[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(8): 1400-1404.

[21] NG M K, FAN Z, GAO R X, et al. Characterization of electrically-assisted microrolling for surface texturing using embedded sensor[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63(1): 269-272.

[22] MOLOTSKII M I. Theoretical basis for electro and magnetoplasticity[J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 287(2): 248-258.

[23] CONRAD H, SPRECHER A F. The electroplastic effect in metals[M]. Solids: Elsevier Science Publishers, 1989.

[24] ZHAO S, ZHANG R, CHONG Y, et al. Defect reconfiguration in a Ti-Al alloy via electroplasticity[J]. Nature Materials, 2020, 20(4): 468-472

[25] 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.

通讯作者: 王斌, 研究员, 博士, 研究方向为钛合金精密成形技术。

Research Progress on Electrically-Assisted Plastic Forming Technology of Titanium Alloy

LI Xifeng¹, CAO Xudong¹, WANG Bin², KONG Deli³, LAN Xiaochen⁴

(1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

2. Beijing Xinghang Electro-Mechanical Equipment Co., Ltd., Beijing 100074, China;

3. The Sixth Representative Office in Beijing of Rocket Force, Beijing 100074, China;

4. The Second Representative Office in Beijing of Air Force, Beijing 100074, China)

[ABSTRACT] The research progress of electrically-assisted plastic forming process of titanium alloys is summarized. Electrically-assisted bending, electrically-assisted upsetting and electrically-assisted drawing are included. The electrically-assisted forming process of TC4 titanium alloy ring segment has also been developed recently. Under high current of 1500A (current density of 5.5A/mm²) and low voltage of 1.5V, the required forming temperature of about 600°C can be obtained within 1min. The effect of pulse current on microstructure evolution of TC4 titanium alloy is very complicated. It can promote the transformation of β phase to α phase under certain circumstances and reduce its thermodynamic activation energy, which can also significantly reduce the anisotropy of TA15 and TA1 titanium alloy. The pulse current with appropriate frequency and density can repair some small cracks, dimples, voids, etc. The electroplasticity of titanium alloy mainly includes Joule heating effect and pure electroplastic effect. The existing research results draw inconsistent conclusions about pure electroplastic effect. Future research topics are also revealed.

Keywords: Titanium alloys; Electroplasticity; Plastic deformation; Microstructure; Joule heating; Pure electroplastic effect
(责编 大漠)