

电辅助成形工艺对TC4钛合金微观组织及拉伸性能的影响

彭赫力¹, 祖清明², 刘乐³, 刘海建¹, 刘柏松³, 李萍³, 严思梁³, 薛克敏³

(1. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

(2. 上海航天技术研究院, 上海 201109)

(3. 合肥工业大学 材料科学与工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 通过对航空材料TC4钛合金在拉伸过程中通入不同频率的电流, 以此来增加材料的流动应力并降低拉伸过程中的最大屈服强度。采用SEM观察通电后材料组织的演变及断口形貌。结合拉伸实验结果来分析电辅助成形工艺在拉伸过程中的影响。结果表明, 随着脉冲电流密度的增加, α 相的含量大大降低, β 相含量大大增加, 其晶粒尺寸开始增大, 在冷却过程中存在少量的马氏体相变生成的细小的针状 α' 相; 随着电流密度的进一步增加, 初生 α 相完全消失, β 相进一步的长大, 转变生成的 α' 相尺寸有所增大。在拉伸过程中, 施加电流的瞬间试样的温度急剧上升, 随着拉伸过程的进行, 温度持续上升, 且上升的速度不断加快, 在断裂的瞬间达到峰值; 峰值温度随着电流密度和脉冲频率的增加而增加, 随着电流密度的升高, TC4钛合金的流动应力逐渐下降, 塑性有所提升。SEM及TEM结果表明, 随着电流密度的增加, TC4钛合金板材拉伸断口中的韧窝显著加深, 微观断口表面呈现出蜂窝状, 韧窝周围出现撕裂棱, 呈现出明显的韧性断裂的特征。与高温和常温拉伸对比, 电辅助拉伸后材料内部的位错密度显著下降, 位错较为平直且部分位错沿某一方向有序排列, 这表明了脉冲电流对位错运动的促进作用。

关键词: 电辅助拉伸; TC4钛合金; 微观组织; 拉伸性能

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2026)04-0994-09

1 引言

钛合金因其强度高、质量轻、耐高温、耐腐蚀性能好、室温和高温性能优良等优点, 已广泛应用于航空航天、汽车、船用^[1-3]、生物医学^[4-5]等领域。但其室温下塑性差、韧性低, 极大地限制了其成形性。热成形虽然可以降低钛合金的变形抗力, 提高其成形极限, 但仍存在热应力增大、表面光洁度不理想、能耗高、模具寿命短等缺点^[6-8]。新兴的电辅助成形(electrically assisted forming, EAF)技术通过将精确设计的高密度电脉冲引入传统成形工艺, 有效利用电塑性效应和焦耳热效应, 显著提升了板材毛坯的成形效率。这一技术不仅展现出作为板材热成形替代方案的巨大潜力, 还在实际操作中表现出显著优势。与传统的热成形工艺相比, 电脉冲成形工艺能够直接作用于金属板材, 避免了与模具的过度接触, 从而大幅延长了模具的使用寿命, 并显著提高了材料的成形极限。这些特点使得电辅助成形技术在工业应用中具有广阔的前景。

揭示电脉冲对金属材料宏观塑性流动规律和微观组

织演变的影响及其机制是理解、设计和控制电脉冲成形过程的关键问题。在过去的几十年里, 人们对电塑性效应(即电脉冲引起的金属材料流动应力降低和塑性增强)进行了大量的研究。人们普遍认为脉冲电流带来的电塑性效应包括非热效应和热效应。Troitskii等^[9]于1963年首先提出了电塑性概念, 然后研究了电流对许多金属的流动应力、蠕变和位错运动的影响。Okazaki等^[10-12]研究了电流对不同晶体结构金属的影响以及电子与位错的相互作用。研究发现, 焦耳热效应和电塑性效应分别占应力下降的50%和70%。Ross等^[13]研究了Ti-6Al-4V合金的电辅助拉伸和压缩变形过程。结果表明, 电流可以显著降低材料变形过程中的流动应力, 同时显著提高材料的成形极限。Bao等^[14]对Ti-6Al-4V合金进行了电辅助微压缩(EAMC)试验, 发现在相同的变形温度下, EAMC试样比等温压缩试样具有更高的应力降。Kim等^[15]发现电脉冲具有明显的流动应力软化效应, 在电辅助拉伸中可以大大提高铝合金的延伸率。Zhao等^[16]对Ti-6Al-4V合金进行了EAU型弯曲试验, 发现其回弹比

收稿日期: 2025-04-03

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U23B20100); 国家自然科学基金面上项目(52475342); 上海航天科技创新基金(SAST2021-071)

作者简介: 彭赫力, 男, 1986年生, 博士, 研究员, 上海航天精密机械研究所, 上海 201600, E-mail: phl12616040811@126.com

室温下降低 50% 以上。因此,电脉冲对金属材料的宏观变形行为有显著的影响,如降低变形抗力、提高均匀伸长率、抑制回弹等。

此外,电脉冲对动态再结晶和相变都有额外的影响,这不能简单地用焦耳热效应来解释。Xu 等^[17]研究了电脉冲对镁合金动态再结晶的影响机制,认为电脉冲诱导的动态再结晶(DRX)可以描述为位错积累与湮灭之间的竞争。Zhang 等^[18]对 Ti-6Al-4V 合金进行了电脉冲处理实验,结果表明 α -Ti 可以转化为一种新型纳米级片层状 β -Ti。作者将这种 β -Ti 相的形成归因于快速加热引起的无扩散马氏体相变。

为了深入探究电处理对 Ti-6Al-4V 合金微观组织演变及拉伸性能的影响机制,本研究系统对比了不同电流密度和温度条件下材料的抗拉强度与延伸率变化规律,以此分析脉冲电流对材料流动应力的影响特性。同时,结合 SEM 和 TEM 等表征手段,对不同工艺参数下试样的微观组织演变进行了深入分析。本研究结果旨在为相关领域的研究人员提供有价值的实验数据和理论参考。

2 实验

实验采用材料是西部钛业有限责任公司生产的热轧制 TC4 钛合金板材,厚度为 1 mm,其合金成分如表 1 所示。如图 1 所示初始材料为等轴组织,相较于钛合金其他典型组织(如网篮组织和魏氏组织),等轴组织应力集中效应更弱能量吸收能力强,因此具有更为优异的塑性韧性,姚升朝^[19]在相关研究中发现,室温情况下等轴组织在抗拉强度较为接近的情况下,表现出优异的塑性。图 1a 是初始组织的 OM 照片,其中白色代表 α 相,黑色代表的是 β 相,图 1b 是初始组织的 SEM 照片,与 OM 照片相反,其中黑色代表的是 α 相,白色代表 β 相。初始组织包

含等轴 α 相、被拉长的 α 相以及晶间 β 相, α 相平均晶粒尺寸约为 10 μm 。

为了方便在拉伸过程施加电流,设置电辅助拉伸试样形状如图 2 所示,试样标距段尺寸为 32 mm \times 6 mm,为了接入电极,在试样的两头设计了 1 个 15 mm \times 15 mm 的凸出部分,所有试样均是使用电火花线切割机沿着板材的轧制方向切取,切割后的试样使用砂纸打磨,除去表面的线切割痕迹,在脉冲电流处理及等温处理之前,在试样表面涂上一层防氧化涂料,避免材料过度氧化,最后,为保证红外测温的准确性,实验前需在试样表面均匀的涂上一层黑漆,确保其表面的发射率一致。

电辅助拉伸实验由楔形夹具和电子万能试验机组成。为了将电流限制在电极夹头和试样部分,另外,在拉伸试验机和夹具中间设计了绝缘的云母块,以保证拉伸过程中的绝缘性。等温拉伸是在日本岛津生产的 AGS-X 系列的电子万能试验机,实验所用的脉冲电源设备是宁波跃阳电源设备有限公司生产的 10 kA/150 V 单脉冲电源发生器。其有 2 种控制模式,一种是恒流模式,另一种是恒压模式,即分别保证实验过程的电流/电压恒定,本实验均是在恒流模式下进行的,电流密度范围为 10~28 A/mm²,固定频率为 500 Hz,脉宽为 100 μs 。脉冲电流处理装置示意图如图 3 所示。实验过程中采用 Fluke TiX660 红外热成像仪对温度进行实时监测,其测量温度范围在 -20~1200 $^{\circ}\text{C}$,热分辨率为 2 $^{\circ}\text{C}$ 。试样在实验前表面被均匀涂上一层黑漆,因此,在实验过程中设置热成像仪的发射率为 0.95。

为了更清晰地观察电脉冲处理后及电辅助拉伸后试样的晶粒尺寸、微观形貌,采用放大倍数更高的 Zeiss SIGMA-300 场发射扫描电子显微镜对不同状态下试样进行分析测试。采用型号为 JEOLJEM-F200 的仪器进行 TEM 测试,将减薄后的试样放入用丙酮中进行超声清洗后用吹风机加热分离试样。然后用冲孔仪从试样上冲出直径 3 mm 的圆片,最后在 -25 $^{\circ}\text{C}$,25 V 的条件下进行电解双喷对试样进一步减薄,制备用于最终观察的试样,电解液的配比为 10% HClO₄+90% CH₃COOH,测试电压为 200 kV。

表 1 TC4 钛合金化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 alloy (wt%)

Al	V	Fe	C	H	O	Ti
5.994	4.102	0.129	0.005	0.008	0.038	Bal.

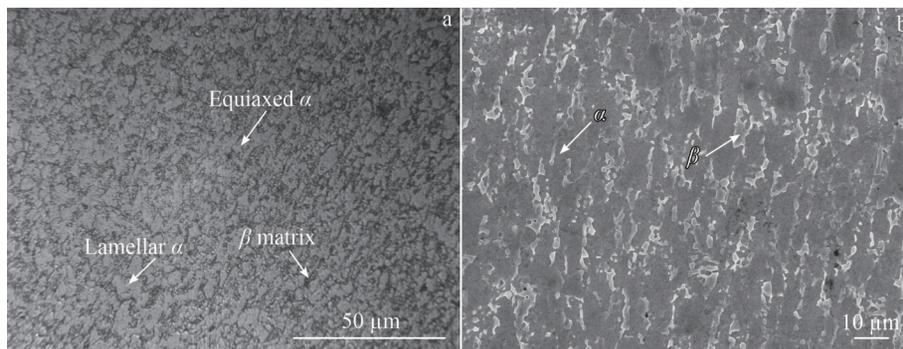


图 1 TC4 钛合金初始组织

Fig.1 Initial microstructures of TC4 titanium alloy: (a) OM image and (b) SEM image

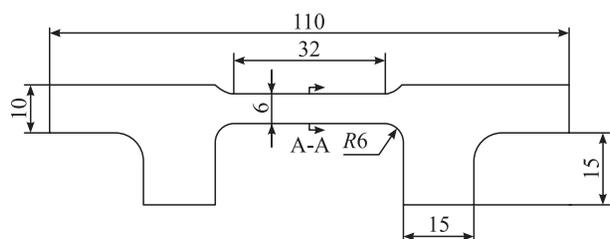


图2 实验使用的试样尺寸

Fig.2 Dimensions of the specimens used for experiments

3 结果与分析

3.1 显微组织分析

图4是不同电流密度下TC4钛合金处理5 min后的显微组织,初始组织是由大部分等轴 α 相、少量被拉长的条状 α 相、以及晶间 β 相组成。图4a是在电流密度 16 A/mm^2 处理后的组织,此时温度位于两相区低温段($800\text{ }^\circ\text{C}$)。经脉冲电流处理后,其显微组织发生了一定程度的改变,显微组织中并未发现条状的 α 相,均是等轴 α 且其平均晶

粒尺寸显著降低。随着电流密度增加到 18 A/mm^2 ,温度位于两相区中部($850\text{ }^\circ\text{C}$),其组织如图4b所示,可以发现其组织还是以等轴 α 为主,但随着温度的增加其晶粒发生了一定程度的长大,尺寸较 16 A/mm^2 处理后的组织有所增大,此外,组织中还存在少量的片层 α 和针状 α' ,其中片层组织的形成的主要是:脉冲电流的引入,会产生瞬时的温度梯度,从而在试样的内外两侧产生较大的热压应力,同时局部焦耳热也会在试样内部产生较大的热压应力。此外由于处理的温度较高,材料变软可能会在夹头的作用下发生轻微的塑性变形,在内部的热压应力和塑性变形的共同作用下导致出现了片层 α 相。针状 α' 的形成是由于,温度升高以及脉冲电流非热效应促进 α 相向 β 相的转变,使得 β 相的含量增多,然后在随后的水冷过程中, β 相来不及发生向 α 的转变,通过非扩散型的马氏体相变形成针状 α' 相。试样经 20 A/mm^2 电流处理后温度上升到 $900\text{ }^\circ\text{C}$,温度位于两相区中上部,此时显微组织中的初生 α 相含量很少,产生的针状 α' 较细小,长宽比

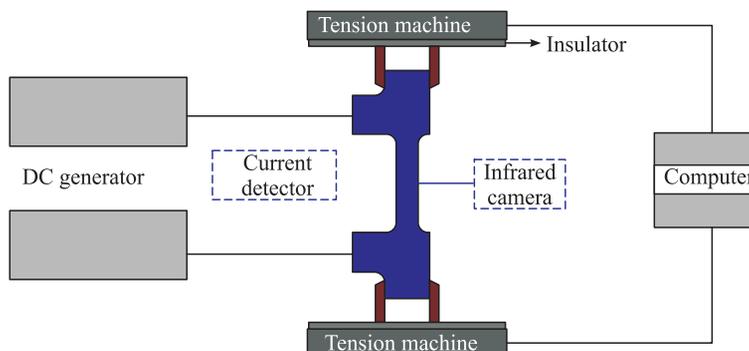


图3 脉冲电流处理装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of the pulse current treatment device

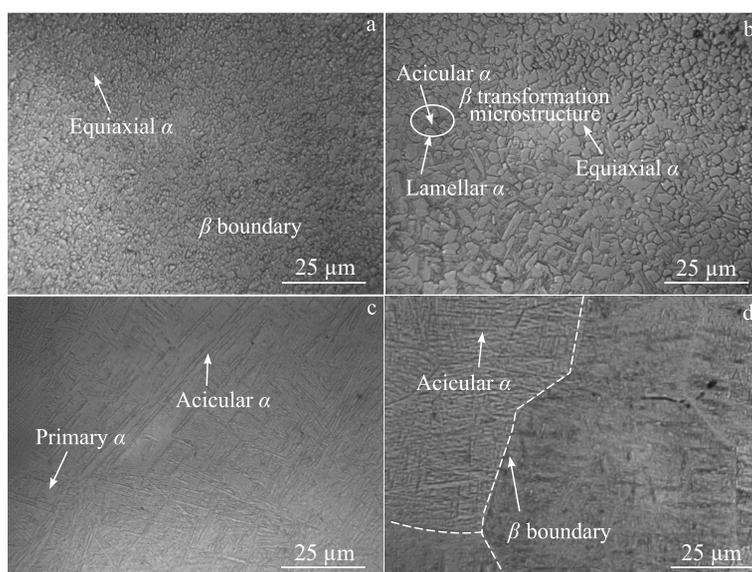


图4 不同电流密度下TC4钛合金的显微组织

Fig.4 Effect of different current density treatments on the microstructure of TC4 titanium alloy: (a) 16 A/mm^2 , (b) 18 A/mm^2 , (c) 20 A/mm^2 , and (d) 22 A/mm^2

较大。当电流密度达到 22 A/mm² 时,此时温度为 950 ℃,位于两相区上部,此时,显微组织完全发生改变,初生等轴 α 已经全部消失,组织全是交错排列的马氏体 α' ,与 20 A/mm² 中的马氏体相比,其针状马氏体 α' 明显变粗,这是因为温度较高再加上非热效应的作用,降低了相变的温度,使得 α 相全部转变为 β 相,组织中只存在 β 晶粒,没有了 α 晶粒的阻碍作用, β 晶粒开始迅速长大并粗化,进而导致由其转变的针状马氏体 α' 较为粗大。

为了探究脉冲电流对相分布的影响,在高温环境下进行拉伸实验,通过 XRD 对相含量进行计。XRD 测试结果以及不同条件下的相体积分数的变化如图 5 所示, α 相的峰多于 β 相的峰,表明 α 相的体积分数大于 β 相,其次在相同温度下,电拉伸(EAT)与高温拉伸(TAT)试样相比, α 相的衍射峰减弱, β 相的延伸峰增强,从一定角度上反映出脉冲电流的电致塑性效应会促使 $\alpha \rightarrow \beta$ 的转变。通过软件统计出来的 β 相体积分数的变化如图 5b 所示,初始 β 相的体积分数为 23.02%。在高温拉伸的 3 个温度中, β 相体积分数与初始含量并未有显著变化,在不同电流密度下, β 相的体积分数略有提升,当电流密度达到 20 A/mm²,

β 相体积分数由 23.02% 上升到了 31.42%,再一次证实了脉冲电流促进了 α 相向 β 相的转变。

图 6 是不同脉冲处理时间后 TC4 合金的 SEM 组织,其中深色且下凹的为初生等轴 α 相,浅色且外凸的为 β 转变组织。经 20 A/mm² 处理 1、2、3、4 min 后的显微组织均呈现明显的双态组织特征,即 β 转变组织上分布一定体积分数的初生 α ,脉冲电流处理 5 min 后,其组织中的初生 α 几乎消失不见,组织为明显的魏氏组织。

图 7a 是不同处理时间后的初生 α 相体积分数的变化情况,处理 1 min 后初生 α 相的体积分数为 42.3%,当处理时间延长到 2 min 后,初生 α 相体积分数变化不大 (39.6%)。当时间增加到 3、4 min 后,其体积分数分别为 15.7%、2.1%,脉冲处理时间 5 min 后初生 α 相几乎消失不见,其显微组织全部为针状 α' ,初生 α 相体积分数降为 0。邹海贝^[20]研究表明,在常规的热处理过程中,温度一定的前提下,初生 α 相的含量并不会随着保温时间的延长而逐渐降低,而是呈现先增大后保持稳定的趋势。这说明脉冲电流能够加速 α 相向 β 相的转变,增加脉冲电流密度或者延长脉冲处理时间都会促进 α 相向 β 相的转变^[21-22]。

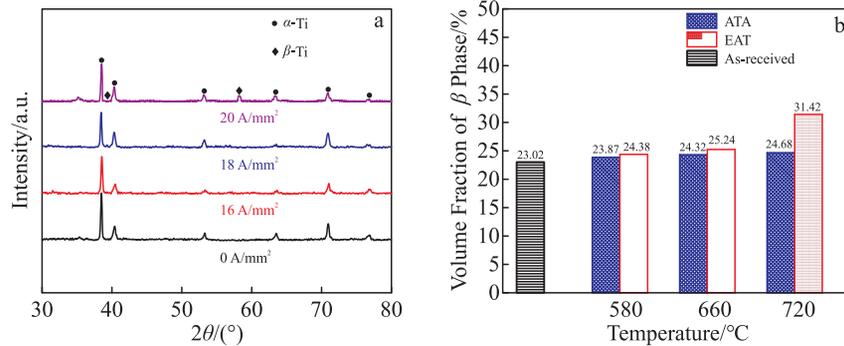


图 5 不同电流密度下 TC4 合金的 XRD 图谱及 β 相体积分数

Fig.5 XRD patterns (a) and volume fraction of β phase (b) of TC4 titanium alloy under different current densities

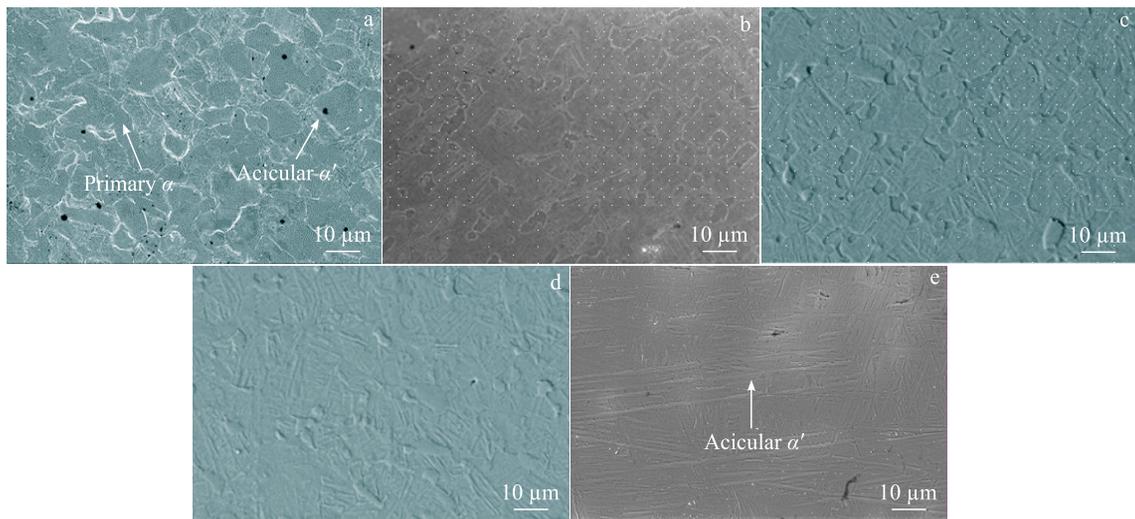


图 6 TC4 钛合金不同脉冲处理时间后的 SEM 照片

Fig.6 SEM images of TC4 titanium alloy after pulse treatment for different time: (a) 1 min, (b) 2 min, (c) 3 min, (d) 4 min, and (e) 5 min

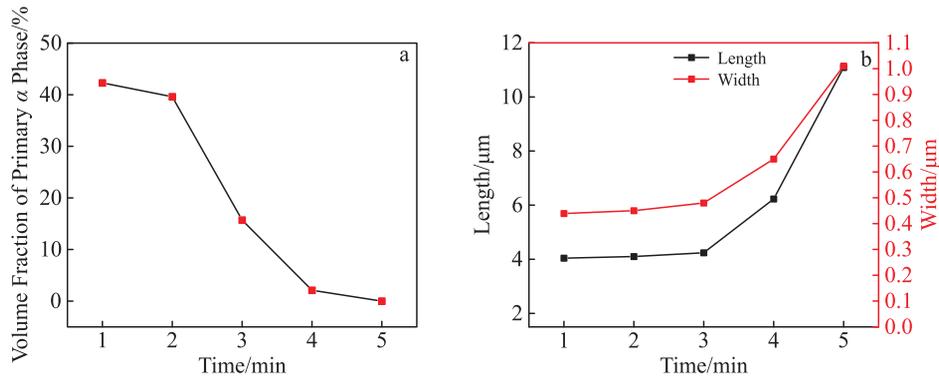


图7 不同处理时间下的初生 α 相体积分数及针状 α' 相尺寸变化情况

Fig.7 Volume fraction of primary α phase at different treatment time (a); variations of the length and width of the acicular α' phase with time (b)

此外,利用 Image-Pro Plus 对不同时间处理后组织中的针状 α' 的尺寸进行了统计,结果如图7b所示,处理1 min后的针状 α' 的长度和宽度分别为4.04、0.44 μm ,且脉冲电流处理的前3 min内,针状 α' 的长度和宽度都变化不大,当时间延长到4.5 min时,其长度和宽度发生了明显的增大,尤其是第5 min后的组织,其长度和宽度分别达到了11.14、1.02 μm ,且宽度方向的增长速率大于长度方向的增长速率,说明随着时间的延长,在冷却过程中,针状 α 宽度方向的长大速度要大于长度方向的长大速度。

TC4钛合金中的 $\alpha \rightarrow \beta$ 相变属于扩散型相变,扩散系数主要受温度和活化能的影响;而在冷却过程中出现的 $\beta \rightarrow \alpha'$ 转变属于非扩散型的马氏体相变,是晶体通过切变

方式由一种结构转变成另外一种结构,是由界面迁移控制的固态相变。根据上述的实验分析,可以得出TC4钛合金在脉冲电流处理过程的相变过程主要包括: $\alpha \rightarrow \beta$ 转变、 β 长大、 α' 的长大。根据微观组织的变化绘制出TC4钛合金电处理过程中的相变模型如图8所示,初始组织为大量的等轴 α 相以及少量的晶间 β 组成,在 $\alpha \rightarrow \beta$ 转变阶段,由于脉冲电流加速了V、Fe等 β 稳定元素的扩散,从而促进了 β 稳定元素富集区的形成,这为 β 相提供大量的形核位点,此外脉冲电流还可以降低新相的形核能垒,进而加速了 β 相的形成;随着脉冲电流密度的增加, α 相的含量大大降低, β 相含量大大增加其晶粒尺寸开始增大,在冷却过程中存在少量的马氏体相变生成的细小的

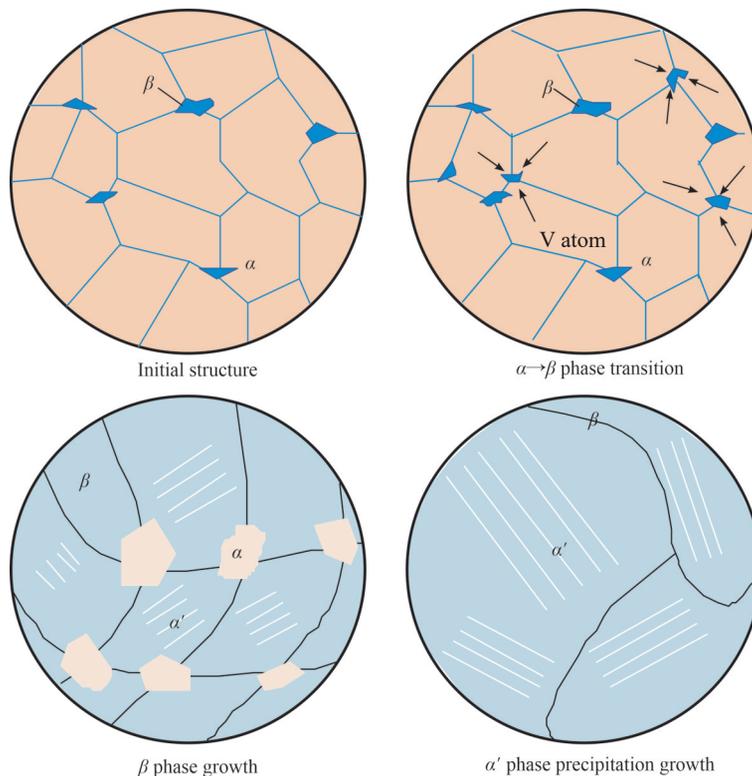


图8 脉冲电流处理TC4钛合金相变过程示意图

Fig.8 Schematic diagrams of the phase transformation process of TC4 titanium alloy treated by pulsed current

针状 α' 相;随着电流密度的进一步增加,初生 α 相完全消失, β 相进一步的长大,转变成成的 α' 相尺寸有所增大。

3.2 拉伸性能分析

为了探究脉冲电流密度对 TC4 钛合金拉伸变形行为的影响,实验采用固定的拉伸应变速率 0.005 s^{-1} 拉伸至试样断裂、固定脉冲频率为 500 Hz、脉宽 $100 \mu\text{s}$,进行了电流密度为 0、14(490 °C)、16(577 °C)、18(651 °C)、20(716 °C)、22(800 °C) A/mm^2 的电辅助拉伸实验,拉伸真应力-真应变曲线如图 9a 所示,可以发现随着脉冲电流密度的增加,材料的流动应力显著降低,流动应力的降低一方面是由于温度升高导致的;另一方面脉冲电流的电致塑性效应也会降低拉伸过程中的流动应力。通常来说,在其他变形条件下,随着变形温度升高,材料的延伸率普遍会升高,但在电辅助拉伸变形过程中,材料的延伸率随电流密度的增大呈现出先增大后减小的变化趋势,在电流密度为 $18 \text{ A}/\text{mm}^2$ 时,材料的延伸率最大。延伸率增大主要是因为此时的变形量不大,材料并没有出现明显的缩颈,当温度足够高时,材料的变形量增大,缩颈严重,局部电流密度过大,材料提前失效,从而导致延伸率下降。

在电流辅助拉伸变形过程中,材料在热-电-变形的综合作用下,既会出现明显的硬化现象(即随着塑性变形的累积,材料的强度硬度提高,而韧性塑性降低),又有焦耳热效应带来的软化。硬化主要是因为塑性变形过程中,其内部组织沿着拉伸方向被拉长,晶格发生了扭曲,位错不断增值,大量位错塞积,从而提高了材料的强度。材料软化一方面电能转化的焦耳热提高了试样温度,降低了材料的流动应力并引发动态回复和再结晶,与常规加热所产生的热扩散现象不同,脉冲电流会与微观组织中的缺陷(如空位、位错等)发生剧烈震动从而产热,因此焦耳热效应会极大地减少组织中的缺陷数量,促进位错的湮灭、降低位错缠结。此外,非热效应产生的电子风力也会在变形中推动位错移动,促进位错重排。因此在电辅助工艺产生的焦耳热效应与非热效应共同作用下,大大降低了材料变形过程中的流动应力。

TC4 钛合金 600~900 °C 下的高温拉伸真应力-真应变曲线如图 9b 所示,TC4 钛合金的屈服强度、抗拉强度均随着温度的升高而降低,这与电辅助拉伸过程的规律相似;但在高温拉伸过程,材料的延伸率随着温度的升高而升高,并不像电辅助拉伸过程中出现延伸率降低的反常现象。在高温拉伸过程中,加工硬化和流动软化现象同时作用。低温下流动应力较高主要是因为低温条件下原子扩散困难,导致流动软化作用被限制,同时塑性变形会产生大量的位错塞积,并产生应力集中,从而导致低温下流动应力增加。当温度升高时,使得材料的热激活能大大增加,加速了原子的运动,同时促进了位错之间的相互作用,从而降低了拉伸变形过程中变形抗力。当温度达到再结晶的临界温度后,动态回复和再结晶导致的流动软化占主导地位,材料流动应力进一步下降,延伸率显著提升。

为了进一步探究试样表面沿轴向以及宽度方向的温度分布情况,利用 VarioAnalyze PRO 红外处理软件对电流密度 $18 \text{ A}/\text{mm}^2$ 在整个拉伸过程试样表面各个位置的温度进行提取,沿 X 轴每个 1 mm 取 1 个温度点(记为 A1、B1、C1、D1、E1)、沿 Y 轴每隔 5 mm 取 1 个温度点(记为 A、B、C、D、E),绘制出的温度分布曲线如图 10 所示。可以发现试样达到稳定温度后,沿 X 轴方向(宽度方向)的温度分布近似均匀,并不存在明显的温度梯度,而沿着 Y 轴方向(长度方向)温度分布存在一定的温度梯度,试样两侧由于热传导(与电极)、热对流、热辐射的影响导致两侧的温度偏低。温度稳定时,中心与两侧的最大温度差不超过 $30 \text{ }^\circ\text{C}$,且试样两侧的温度近似呈对称分布,温度分布呈“哑铃状”。

TC4 钛合金室温下的断口形貌如图 11 所示,可以看出 TC4 钛合金室温拉伸下的断口形貌的特征主要是大量等轴较浅的韧窝和少量的撕裂棱,呈现出混合断裂的特征。等轴韧窝是在拉伸正应力的作用下形成的,应力在整个断口表面上是均匀的,韧窝的大小和深浅,决定于材料断裂时微孔的核心数量和材料本身的相对塑性,如果

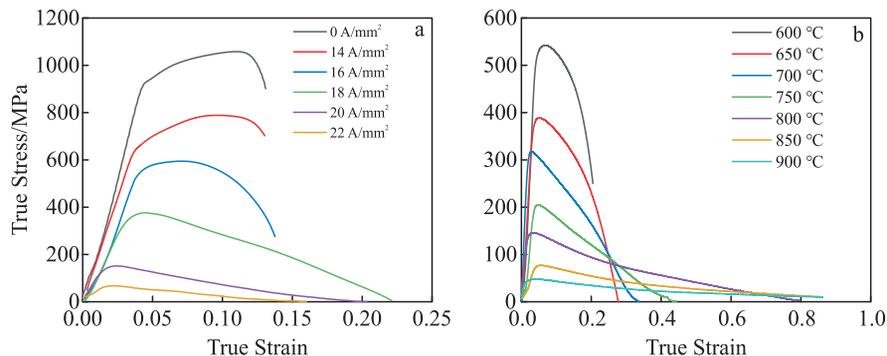


图9 不同电流密度下电辅助拉伸真应力-真应变曲线及 TC4 钛合金高温拉伸真应力-真应变曲线

Fig.9 True stress-true strain curves of TC4 titanium alloy after electrically assisted tension at different current densities (a); true stress-true strain curves of TC4 titanium alloy stretched at different high temperatures (b)

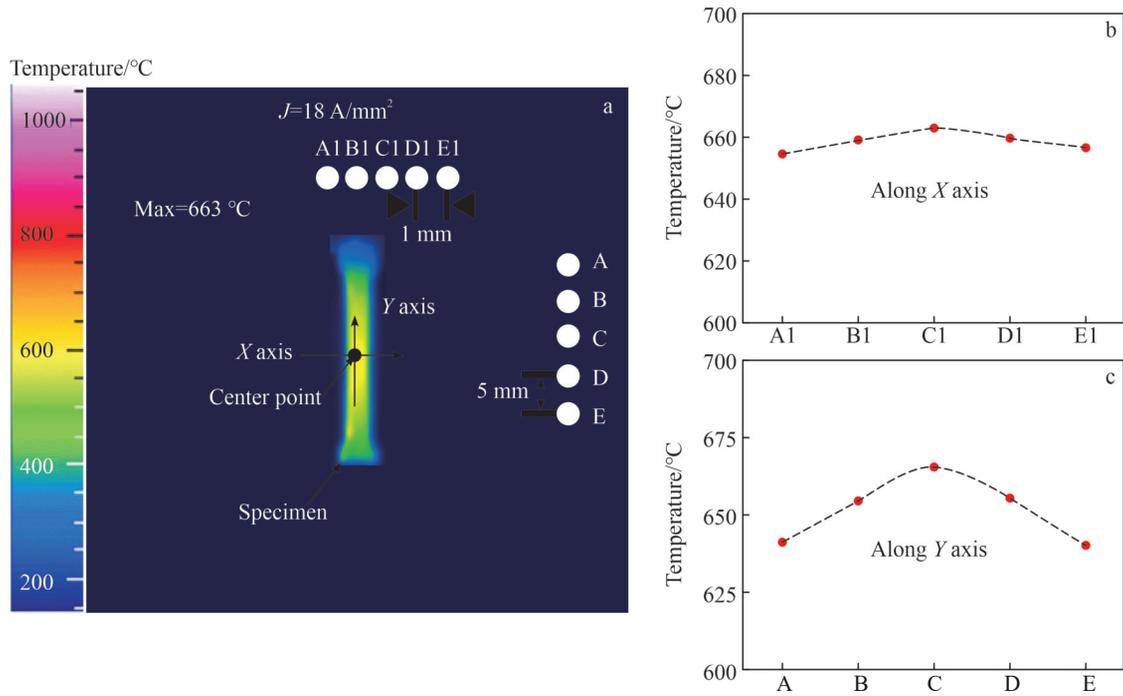


图 10 TC 4 钛合金在电流密度 18 A/mm^2 时试样沿 X 轴和 Y 轴温度分布

Fig.10 Temperature distributions of TC 4 titanium alloy specimen at current density of 18 A/mm^2 :(a) 3D distribution; (b) along X axis; (c) along Y axis

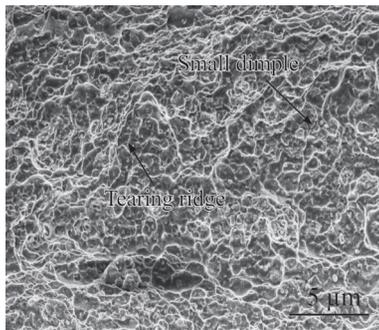


图 11 TC4 钛合金室温拉伸断口形貌

Fig.11 Room temperature fracture morphology of TC4 titanium alloy

微孔的核心数量很多或材料的相对塑性较低,则韧窝的尺寸较小或较浅;反之韧窝的尺寸较大较深。室温拉伸下的韧窝尺寸和深度都较小,说明材料并未经过大程度的塑性成形。这是因为 TC4 钛合金在低温下的变形主要由 α 相主导,而 α 相属于密排六方结构,室温下很难发生

塑性变形且变形时可开动的滑移系数目较少,因此室温下的塑性较低,这与前文中的拉伸曲线结果相吻合。

不同电流密度下高频脉冲电流辅助拉伸断口的微观形貌如图 12 所示,随着脉冲电流的引入,材料的拉伸断口形貌并未发生显著变化,主要还是以韧窝和撕裂棱所构成,电流密度为 16 A/mm^2 时,其断口形貌中的主要由韧窝构成,韧窝尺寸较室温下的尺寸有所增大,其塑性略有提升;当电流密度增加到 18 A/mm^2 时,韧窝形状呈抛物线状,韧窝尺寸及深度进一步增大;当电流密度提升到 $20、22 \text{ A/mm}^2$ 时,TC4 钛合金板材拉伸断口中的韧窝显著加深,微观断口表面呈现出蜂窝状,韧窝周围出现撕裂棱,呈现出明显的韧性断裂的特征,因此材料的塑性得到提升。脉冲频率对断口形貌的影响规律与电流密度是一致的,这里就不做详细的讨论。此外,在其他条件相同的情况,应变速率越高,试样断口形貌中的韧窝数量减少且

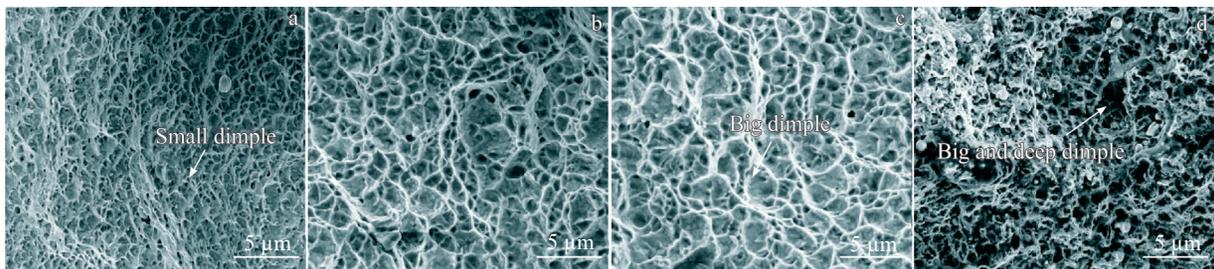


图 12 不同电流密度下 TC4 钛合金拉伸断口形貌

Fig.12 Tensile fracture morphologies of TC4 titanium alloy along under different current densities: (a) 16 A/mm^2 , (b) 18 A/mm^2 , (c) 20 A/mm^2 , and (d) 22 A/mm^2

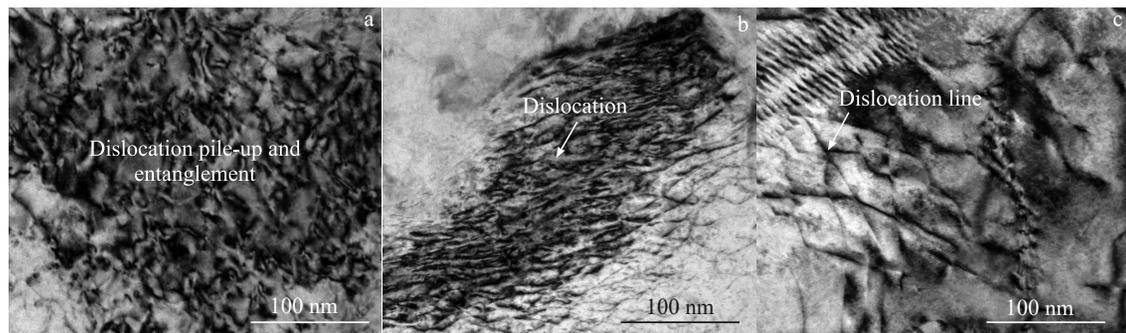


图13 不同变形条件下TC4钛合金位错形貌

Fig.13 Morphologies of dislocation of TC4 titanium alloy under different deformation conditions: (a) room temperature deformation; (b) high temperature deformation; (c) electrically assisted deformation

变浅即随着应变速率的增大,TC4钛合金的塑性成形性能变差。

对不同变形条件下TC4钛合金位错进行TEM观察结果如图13所示,在室温拉伸变形过程中,组织中存在大量位错缠结和塞积,团聚现象非常明显。高温拉伸后的组织,团聚现象得到一定程度的缓解,位错密度有所降低,但仍存在部分的位错缠结塞积。如图13c所示,脉冲电流作用下的拉伸试样中位错密度显著下降,位错较为平直且部分位错沿某一方向有序排列,这表明了脉冲电流对位错运动的促进作用。

4 结论

1) 随着脉冲电流密度的增加, α 相的含量大大降低, β 相含量大大增加,其晶粒尺寸开始增大,在冷却过程中存在少量的马氏体相变生成的细小的针状 α' 相;随着电流密度的进一步增加,初生 α 相完全消失, β 相进一步的长大,转变生成的 α' 相尺寸有所增大。

2) 相较于常规拉伸,脉冲电流产生的焦耳热效应对材料产生的软化效果明显,材料流动性增强,断口呈现尺寸较大的韧窝状。并且电致塑性效应推动位错进一步移动,减弱组织中位错缠结现象,使位错在重排过程中发生湮灭,因此大大降低了材料变形过程中的流动应力。

参考文献 References

- [1] Odenberger E L, Hertzman J, Thilderkvist P *et al.* *International Journal of Materials Research*[J], 2013, 6: 391
- [2] Odenberger E L, Schill M, Oldenburg M. *International Journal of Materials Research*[J], 2013, 6: 403
- [3] Yamaguchi T, Morishita H, Iwase S *et al.* *SAE Transactions*[J], 2000(5): 416
- [4] Snizhkon O, Ryabtsev A, Troyanskyy A *et al.* *Materials Sciences and Applications*[J], 2016, 7:139
- [5] Li L X, Rao K P, Lou Y *et al.* *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2002, 44: 2414
- [6] Jones J J, Mears L, Roth J T. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*[J], 2012, 135: 021011
- [7] Kronenberger T J, Johnson D H, Roth J T. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*[J], 2009, 131: 031003
- [8] Wang G F, Li X, Liu S *et al.* *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2018, 99: 773
- [9] Troitskii O A, Likhtman V I. *Soviet Physics Doklady*[J], 1963, 8: 223
- [10] Okazaki K, Kagawa M, Conrad H. *Scripta Materialia*[J], 1978, 12: 1063
- [11] Okazaki K, Kagawa M, Conrad H. *Materials Science and Engineering*[J], 1980, 45(2): 109
- [12] Okazaki K, Kagawa M, Conrad H. *Materials Science and Engineering*[J], 1980, 1: 763
- [13] Ross C D, Kronenberger T, Roth J T. *Journal of Engineering Materials and Technology*[J], 2009, 131: 031004
- [14] Bao J X, Chen W J, Bai J N *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2022, 831: 142262
- [15] Kim M J, Lee K, Oh K H *et al.* *Scripta Materialia*[J], 2014, 75: 58
- [16] Zhao Y X, Peng L F, Lai X M. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2018, 261: 12
- [17] Xu Q, Tang G Y, Jiang Y B *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528: 3249
- [18] Zhang W, Wu B, Zhao W S *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2006, 438: 320
- [19] Yao Shengchao(姚升朝). *Correlation Study on Microstructure and Microbial Corrosion Resistance of TC4-Cu Alloy*(TC4-Cu合金的微结构与耐微生物腐蚀性能的相关性研究)[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2024
- [20] Zou Haibei(邹海贝). *Research on Heat Treatment Strengthening Process and Phase Transformation Behavior of TC4 Titanium Alloy*(TC4钛合金热处理强化工艺及相变行为研究)[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019
- [21] Zhang Lei(张磊), Guo Ping(郭萍), Wang Huan(王欢) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2024, 53(12): 3422
- [22] Liu Tao(刘涛), Shao Bo(邵博), Lei Jingfa(雷经发) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(12): 4133

Influence of Electric-Assisted Forming Process on Microstructure and Tensile Properties of TC4 Titanium Alloy

Peng Heli¹, Zu Qingming², Liu Le³, Liu Haijian¹, Liu Baisong³, Li Ping³, Yan Siliang³, Xue Kemin³

(1. Shanghai Institute of Spaceflight Precision Machinery, Shanghai 201600, China)

(2. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

(3. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: By applying different current frequencies during the tensile process of the aerospace TC4 titanium alloy, the flow stress of the material is increased and its maximum yield strength is reduced. The microstructural evolution of the material after electrification and the fracture morphology of the samples were observed. The influence of the electric-assisted forming process on the tensile process was analyzed in combination with the tensile test results. The experimental results show that with the increase in pulse current density, the content of the α phase decreases significantly, while the β phase content increases substantially, and the grain size begins to increase. A small amount of martensitic phase suffers transformation during cooling, resulting in fine acicular α' phase. As the current density further increases, the primary α phase disappears completely, the β phase grows further, and the size of the transformed α' phase increases. During tensile deformation, the sample temperature rises sharply at the moment when current is applied. It continues to increase during the tensile process, with rising increment until it reaches a peak value at the moment of fracture. The peak temperature increases with the rise in current density and pulse frequency. As the current density increases, the flow stress of TC4 titanium alloy gradually decreases, and its ductility improves. SEM and TEM results show that with the increase in current density, the dimples in the tensile fracture surface of TC4 titanium alloy sheets become significantly deeper, presenting a honeycomb-like appearance, with tear ridges around the dimples, indicating a typical ductile fracture feature. Compared with that after high-temperature and room-temperature tensile tests, the dislocation density inside the material after electric-assisted tensile tests is significantly reduced, with dislocations appearing more straight and some dislocations orderly aligned in a certain direction, indicating that pulse current promotes dislocation motion.

Key words: electric-assisted tension; TC4 titanium alloy; microstructure; tensile properties

Corresponding author: Li Ping, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, P. R. China, E-mail: li_ping@hfut.edu.cn