

TB6 药型罩锻造过程的织构模拟及与铜和钽锻造的对比

刘国玉, 顾新福, 王 通

(北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 模拟了药型罩用 TB6 钛合金在不同锻造工艺下的织构形成规律, 并与铜和钽的模拟结果对比。首先通过实验与模拟进行对比, 验证模拟的可行性, 其次通过有限元方法模拟分析了 TB6 钛合金四方拔长过程中不同部位温度、等效应力和等效应变的差异, 之后利用 VPSC (粘塑性自洽模型) 模拟不同材料锻造工艺下的织构演变规律并进行对比分析。结果表明, 体心立方 β 相和钽中心织构与边部存在较大的不均匀性, 面心立方铜织构类型波动较小; 多边拔长有利于弱化四方拔长过程中产生的平行于轴向的 $\{110\}$ 强织构; 压缩型织构在以后的拔长过程中依旧可以保留。

关键词: TB6 钛合金; 药型罩; 锻造; 织构模拟; VPSC

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)08-2909-10

药型罩作为侵彻装甲射流形成和装甲毁伤的主要来源, 是爆炸成型侵彻体的主要工作单元。药型罩的结构、材料成分以及加工方法等对金属射流的形态和性能产生直接的影响, 进而影响到破甲效应^[1]。常用的高密度材料有紫铜、钽等, 其能获得较高的侵彻深度, 但开孔性较差; 低密度金属包括铝、镁等, 侵彻和开孔性能则相反^[2-3]。因此为了兼具良好的侵彻深度和开孔能力, 密度介于二者之间的钛及钛合金理论上成为满足要求的药型罩材料。TB6 钛合金具有高比强度、高断裂韧性且相对于其他高强钛合金又具有优异的锻造变形能力^[4-5], 是可以用来制备药型罩的优良材料。

TB6 是一种典型的近 β 型钛合金, 普遍的加工工艺为先进行开坯、棒材的热锻, 然后经过热处理后再锻成满足形状要求的锻件。而药型罩的锻造成型是传统的加工成型方案之一。佟健博^[6]等人利用 β 单相区等温锻造的方式制备了 TB6 钛合金锻件, 研究发现锻造温度和变形速率成为影响晶粒尺寸的最主要因素, 晶粒尺寸会随着锻造温度的升高和变形速率的降低而显著增大。另外由于锻件体积较大或者形状复杂的影响, 锻造过程中必然会出现心部与边部的温度和应力状态的不均匀性, 进而导致组织的不均匀性, 如该等温锻件出现了中心 ($<100>$ 织构) 和边部 ($<100>$ 和 $<111>$ 织构) 织构的不均匀性, 这种不均匀性受 β 相织构、一次 α 相形貌和相对含量、基体晶粒尺寸和加工硬化等因素影响^[7]。一般

来说, 为了满足材料的使用要求, 稳定材料的性能, 需要减小锻造过程中的晶粒尺寸、织构不均匀性, 使材料尽可能具有各向同性, 保证锻材各个方向的力学性能包括抗拉强度、延伸率等控制在较小的波动范围之内, 例如提高材料的各向同性可显著提高钛合金药型罩的爆轰稳定性。实际锻造过程中, 有长达 10 多个火次的锻造, 锻造相区 (钛合金有 β 相区和 $\alpha+\beta$ 两相区锻造)、锻造温度、变形速率等不尽相同, 既有锻粗也有拔长, 目的就是为了提高锻件各部位组织与力学性能的均匀性。药型罩破甲关键在于爆轰后形成稳定而绵长的金属射流, 一旦射流断裂成颗粒状会严重降低侵彻性能^[8], 而得到均匀的弱织构能够形成延性更好的金属射流^[9]。Bourne^[10]等人研究了织构和晶粒尺寸对药型罩性能的影响, 并且指出织构与晶粒尺寸息息相关, 织构成分和强度会随着晶粒尺寸变化, 且弱织构与细晶粒紧密联系。张全孝^[11]分别对细晶弱织构和强织构 2 种铜药型罩进行爆轰试验, 靶试结果表明, 具有细晶粒, 弱织构, 各向同性好的药型罩破甲效果更好。张榕峻^[12]等研究了 TB6 钛合金爆轰载荷下两相组织不均匀可能导致 TB6 钛合金在爆轰条件下失效。可见, 强织构或不均匀组织的存在会给药型罩破甲性能带来不利影响。鉴于药型罩对于弱织构的需求, 本研究着重考察药型罩用 TB6 钛合金各锻造工艺过程中的织构演化规律, 同时也模拟了常用于药型罩制造的钽和铜的织构演化, 并与 TB6 钛合金进行

收稿日期: 2022-11-29

基金项目: 国家自然科学基金 (51871131); 中央高校基本科研业务费 (FRF-TP-20-007A3)

作者简介: 刘国玉, 男, 1998 年生, 硕士, 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083, E-mail: M202120418@xs.ustb.edu.cn

对比,为优化钛合金等药型罩的锻造工艺提供数据参考。

本研究主要采用模拟手段进行,由于钛合金造价昂贵,因此锻造用于满足实验不同参数要求的钛合金锻棒成本很高,而模拟手段则恰恰弥补了此缺陷。通过计算机模拟可以很好预测不同锻造工艺下钛合金的织构取向和形成规律,进而为钛合金的实际锻造工艺提供引导方向。钛合金锻造过程中,除了形变外,相变和再结晶都有可能发生,因此除了形变织构产生,还可能存在着再结晶织构。TB6 钛合金 β 相区锻造时,在较高的应变速率下主要发生的是动态回复^[13],当变形速率小于一定值时才会出现再结晶;纯铜的锻造温度一般在 900 ℃ 以上,且随着变形速率的增加,再结晶分数明显降低^[14];纯钽的锻造不同于其他的金属,常采用室温或者接近室温的温度进行锻造,以防止表面生成氧化物,之后进行真空再结晶热处理,且其再结晶温度超过 1000 ℃^[15]。模拟中采用大变形速率和特定温度,因此暂时不考虑再结晶的影响,只考虑热变形织构。模拟中主要采用了四方锻造和六方锻造互作对比,考察不同锻造方式对织构的影响。

1 模拟与实验方法

本模拟过程采用宏观与介观相结合的模拟手段,宏观有限元模拟采用 DEFORM 有限元软件,介观织构模拟采用 VPSC(粘塑性自洽模型)软件包^[16-17]。首先进行宏观尺度模拟时,预先利用 Pro/E 进行锻造坯料、上砧板、下砧板的 3D 模型构建,导入到 DEFORM 软件当中,进而开始对坯料镦粗和拔长的模拟操作。采用拉格朗日递增模型,选定坯料几何尺寸为 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,砧板尺寸为 $120\text{ mm}\times 120\text{ mm}\times 30\text{ mm}$;之后采用软件默认的相对网格划分方式将锻件有限元模型划

分为 32000 单元格,单元类型为四面体,设置体积补偿、材料属性、锻造温度与基本物理参数(密度、泊松比、弹性模量、膨胀系数、导热率、导热等),TB6、纯铜、纯钽的本构方程以及物理参数取自于 DEFORM 内置的材料数据库以及对应材料具体实验拟合数据^[5,14,18],经两者模拟对比发现具有极高的相似性;然后对锻件选定对称面,设置压力边界条件以及热力学环境变量,再对整个模型设置接触条件,添加摩擦系数以及导热系数;最后设置砧板的运动条件包括起始位置以及运动速度,步数和步长。针对不同材料设置不同的锻造工艺手段,TB6(850 ℃)和纯铜(900 ℃)采用高温锻造,终锻温度在 700 ℃ 以上,钽采用室温锻造,均为四方及六方锻,TB6 钛合金化学成分及 3 种材料具体锻造工艺参数如表 1 和表 2 所示。后处理则通过点轨迹追踪工具输出锻件特定位置的应变速率和时间增量,方便与后续的 VPSC 的结合。通过控制不同材料的变形温度、变形速率和变形量,从而可以模拟出各个材料的温度、应力、应变的分布云图。

VPSC 软件分析作为介观尺度模型仿真模拟手段,与宏观尺度模型不同的是其从单个晶粒出发,首先构建单个晶粒的本构方程,然后通过一定的方式将单晶互相耦合,从而建立多晶体在外加载荷下的力学响应。VPSC 能较好地处理晶粒之间的应力与应变的关系,且能考虑滑移和孪生两种变形机制。总共设定 500 个晶粒,可以随机赋予每个晶粒一个取向或者设置一个初始取向,然后将 DEFORM 有限元的输出值应变速率和时间增量导入到 VPSC 相应晶体结构计算单元,针对变形计算的同时,每个晶粒的取向发生变化,最后分析所有晶粒取向变化获得多晶体塑性变形过程中的织构演变情况。

实验阶段选取了钽与 TB6 作为模拟对照,将 2 种金

表 1 TB6 钛合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of TB6 titanium alloy (wt%)

Al	V	Fe	C	N	H	Y	O	Ti
2.6-3.4	9.0-11.0	1.6-2.2	≤0.05	≤0.05	≤0.015	≤0.005	≤0.13	Bal.

表 2 3 种材料锻造模拟基本参数

Table 2 Basic parameters of forging simulation for three kinds of materials

Material	Billet temperature/℃	Die temperature/℃	Friction coefficient	Die movement speed/mm·s ⁻¹	Number of simulation step
TB6	850	300	0.3	10	100
Ta	25	25	0.25	10	100
Cu	900	300	0.3	10	100

属加工成 $\Phi 10\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 的圆柱试样, 然后在 Gleeble 热模拟试验机上分别以室温和 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行压缩变形, 变形量为 50%, 变形速率为 1 mm/s 。之后将压缩后的试样沿中部切开, 制备可用于电子背散射衍射 EBSD 检测的截面, 检测位置为轴向截面心部。为制备良好的试样, 采用机械抛光对钽进行表面处理, 待表面无明显深划痕, 使用体积分数比为浓硫酸:浓硝酸:氢氟酸=5:2:2 的混合酸溶液进行侵蚀, 时间为 15 s; 利用体积分数为 5% 的高氯酸乙醇溶液对 TB6 进行电解抛光, 电压为 27.8 V, 抛光时间为 50 s。之后在 SEM 电镜上利用 EBSD 系统对金属表面进行检测。

2 结果与分析

2.1 实验结果分析

利用 EBSD 检测 Ta 和 TB6 的心部实际组织如图 1a 和 1b 所示, Ta 和 TB6 在不同温度经过 50% 压缩变形后, 其心部均表现出较强的 $\{100\}$ 和 $\{111\}$ 型结构, 属于体心立方常见的压缩结构类型; 利用 VPSC 模拟

出的相同工艺参数下对应的组织类型如图 1c 和 1d 所示, 同样为 $\{100\}$ 和 $\{111\}$ 型结构, 可见两者相符程度较高, 采用 DEFORM 与 VPSC 相结合的方式预测材料组织取向具有一定的可行性。图 1e 和 1f 分别为 Ta 和 TB6 的晶粒分布。

2.2 TB6 锻后均匀性分析

图 2 为 3 种材料四方拔长工艺外形变化图。初始采用圆柱坯, 为随机组织取向。首先沿 z 轴方向进行镦粗, 变形量为 40%; 之后进行第 1 次四方拔长, 先后沿 y 轴与 x 轴各压缩 30%, 拔长为 20%; 最后进行第 2 次四方拔长, 先后沿 x 轴与 y 轴各压缩 30%, 总拔长为 63%。

图 3 和图 4 分别为 TB6 钛合金经最终四方拔长过程后的纵、横截面的温度、应变和应力分布云图。图中可以看出无论温度、应变还是应力, 棒材心部和边部都存在着较大差异, 体现一定的分布不均匀性。心部温度最高, 可达 $506\text{ }^{\circ}\text{C}$, 与边部最大差值为 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其主要是由于锻件心部和边部的热扩散能力差异化导

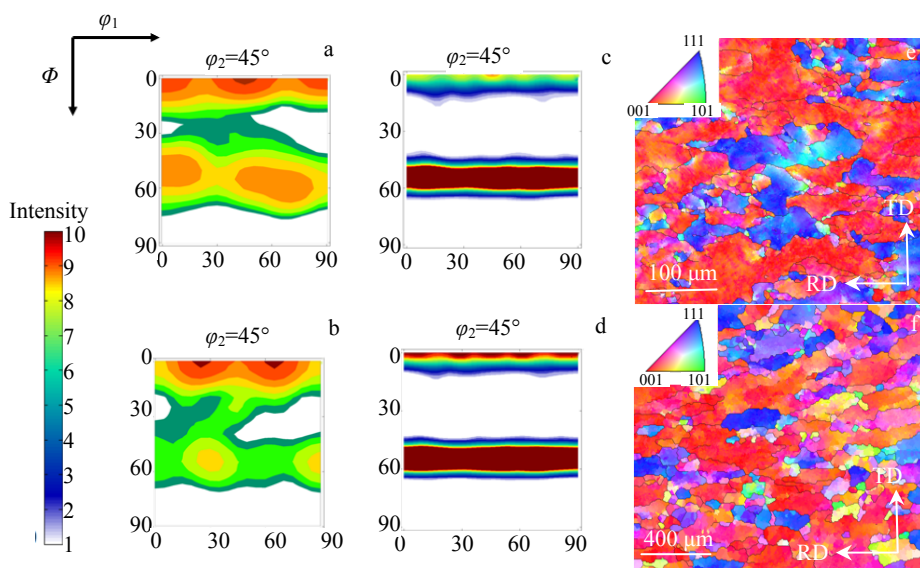


图1 压缩工艺下实测组织与模拟对比

Fig.1 Comparison of measured texture and simulated texture under compression: (a) Ta, center; (b) TB6, center; (c) Ta (simulation), center; (d) TB6 (simulation), center; the grain distribution of Ta (e) and TB6 (f) ($\phi_2=45^\circ$)

致; 心部的等效应变最高, 最大差值为 2.2, 因为无论是拔长还是镦粗, 心部一直处于大变形区; 心部的等效应力最低, 最大差值为 110 MPa, 主要是由于边部相对于心部温度要低得多, 变形抗力更大。另外, 锻件外表面的温度、应变和应力存在较小的波动, 主要与变形过程中的摩擦和压缩拔长过程中的有效接触面积有关。

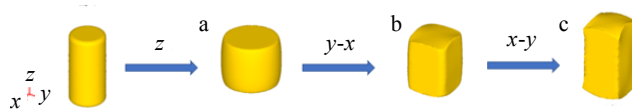


图2 四方拔长工艺几何变化示意图

Fig.2 Change of the geometry during the square stretching process: (a) upsetting, (b) the first drawing, and (c) the second drawing

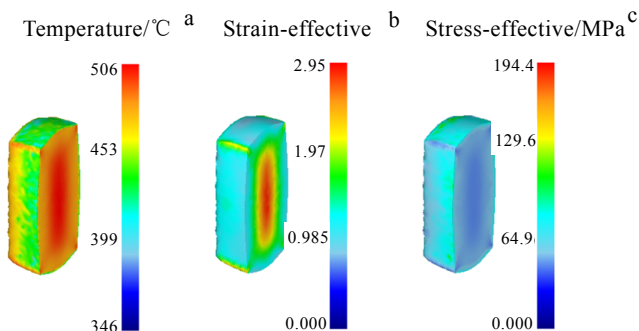


图3 TB6 钛合金纵截面温度、等效应变和等效应力分布云图
Fig.3 Distribution of temperature (a), equivalent strain (b) and equivalent stress (c) of longitudinal section for TB6 titanium alloy

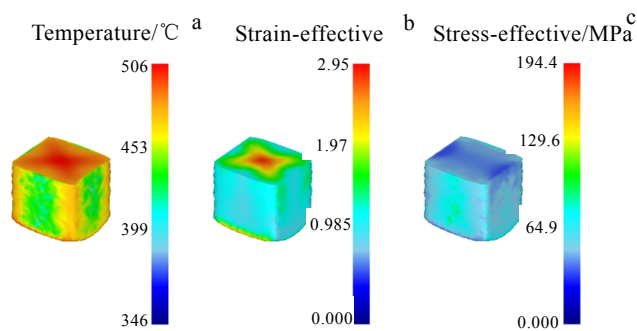


图4 TB6 钛合金横截面温度、等效应变和等效应力分布云图
Fig.4 Distribution of temperature (a), equivalent strain (b) and equivalent stress (c) of cross section for TB6 titanium alloy

经过一定量的镦粗与拔长, 选取中心点与边部点导出数据, 利用 VPSC 软件计算各部位取向信息。图 5 为 TB6 钛合金四方拔长过程中织构模拟结果, 可见经过一次镦粗之后, 织构成分保持不变, 但边部的织构强度有所降低。在之后的 2 次拔长过程中, 心部与边部的织构成分和织构强度出现了明显的不均匀性,

心部织构成分较多且强度较高, 且最终阶段心部出现了强的拔长型织构 $\{110\}$, 边部为其弱化后的织构。图 6 为 TB6 钛合金四方拔长后纵向 β 相织构模拟结果, P1 到 P3 都处于心部大变形区域, 织构总体变化程度不大, 为较强的 $\{100\}<001>$ 织构和 $\{110\}<112>$ 织构以及较弱的近 $\{112\}<110>$ 织构和近 $\{112\}<111>$ 织构。P4

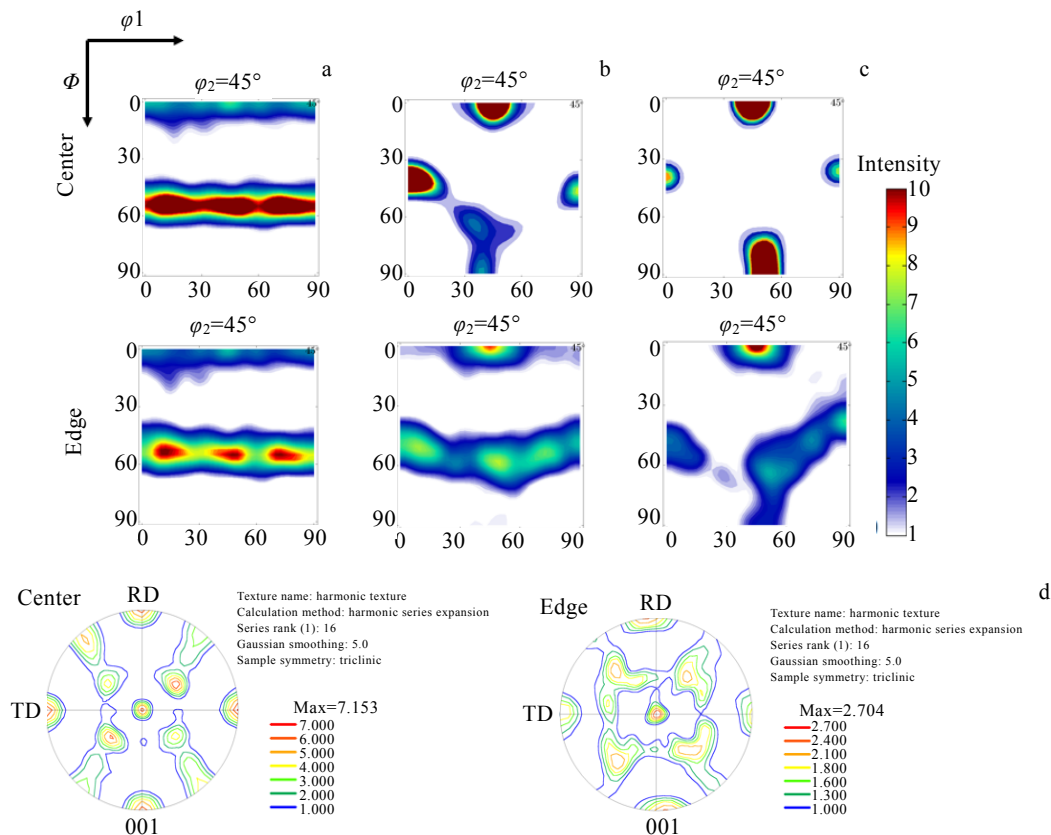


图5 TB6 钛合金拔长过程中不同部位织构模拟结果

Fig.5 Simulation results of texture at different parts of TB6 titanium alloy during drawing ($\phi_2=45^\circ$): (a) upsetting, (b) the first drawing, (c) the second drawing, and (d) PF

处于变形过渡区, 组织强度略微降低。P5 和 P6 处于周向流动区, 组织已经出现了明显的弱化, 但组织类型依然和心部保持相近而且仍然保留着一部分 $\{100\}$ 压缩型组织。图 7 为横向 β 相组织模拟结果, 结果与图 6 相近, 从 P1 到 P4 组织强度不断减弱, 组织类型变化不大。综上, TB6 钛合金镦粗与四方拔长的过程中, 心部与边部存在着不均匀性, 此不均匀性主要是由于变形量差异而导致的组织强度的不均匀性, 而组织的类型能够保持在较小波动范围内。

2.3 TB6、铜、钽组织模拟结果对比

图 8 为四方拔长工艺不同锻造处理后取样位置示意图 (50%剖面, 以 TB6 为例), 后续将针对图中不同位置 P1-P2 进行分析。图 9 为 TB6、铜、钽不同锻造工艺下组织模拟对比。TB6 (β 相) 和钽均为体心立方结构, 整个工艺流程下其组织演变情况相近: 在一次镦粗之后, 心部与边部都呈现出 $\{100\}$ 组织 + $\{111\}$ 组织, 属于典型的体心立方压缩型组织, 由于心部处于大变形区, 边部为周向流动区, 因此心部组织强度要明显大于边部, 且由于变形过程单一只涉及压缩, 所以心部与边部的组织类型差异不大, 不均匀性较小; 经过一次四方拔长之后, 组织发生了某个方向的聚集, 心部与边部组织类型都发生了变化, 但由于心部依旧处于大变形区, 所以变化程度更大, 心部与边部的不均匀性增大。心部

的 $\{100\}$ 组织聚集成 $\{100\}\langle 001 \rangle$ 组织, $\{111\}$ 组织聚集成近 $\{112\}\langle 110 \rangle$ 组织和近 $\{112\}\langle 111 \rangle$ 组织, 同时产生了 $\{110\}\langle 112 \rangle$ 弱组织。边部的 $\{111\}$ 组织得以保留, $\{100\}$ 组织聚集成 $\{100\}\langle 001 \rangle$ 组织, 强度均降低; 又经历一次四方拔长之后, 心部的 $\{110\}\langle 112 \rangle$ 组织得到强化, 反而近 $\{112\}\langle 110 \rangle$ 组织发生弱化, 近 $\{112\}\langle 111 \rangle$ 组织近乎消失。边部的 $\{110\}\langle 112 \rangle$ 组织同样得到强化, 且 $\{111\}$ 组织出现了拆解与弱化。以上过程说明体心立方金属拔长过程中极易出现 $\{110\}\langle 112 \rangle$ 组织, 而这种强组织也是在以后的加工过程中需要进一步弱化的。与体心立方的 TB6 (β 相) 与钽相比, 作为面心立方的铜在整个加工流程中心部与边部组织类型差异化小, 不均匀程度低, 相同的是边部的组织强度要低于心部。第 1 次镦粗之后, 铜主要呈现 $\{110\}$ 压缩型组织, 一次拔长之后, $\{110\}$ 组织聚集成 $\{110\}\langle 110 \rangle$ 组织和 $\{110\}\langle 001 \rangle$ 组织, 同时又产生了拔长类组织 $\{100\}\langle 110 \rangle$, 进一步拔长之后此组织得到强化。说明面心立方铜拔长过程中极易产生 $\{100\}\langle 110 \rangle$ 组织, 同样需要控制与弱化。综上, 在第 1 次镦粗之后都会形成一定取向的压缩组织, 而且在随后的拔长过程中发生某一取向的偏聚, 而且对于体心立方金属, 拔长过程中心部组织变化很大, 边部变化较小, 而面心立方金属能时刻保持心部与边部的组织类型的一致性。

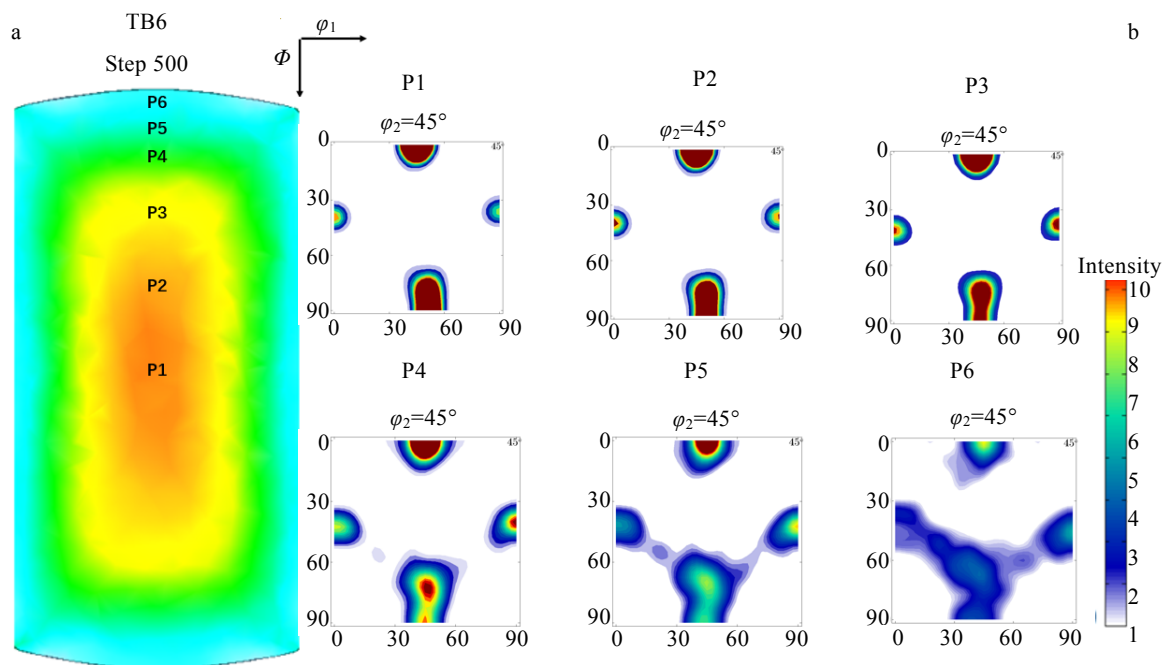


图 6 TB6 钛合金拔长后纵向不同部位组织模拟结果

Fig.6 Simulation results of texture at different parts in the longitudinal direction of TB6 titanium alloy after drawing: (a) geometric diagram (strain-effective); (b) simulation results (P1-P6, $\phi_2=45^\circ$)

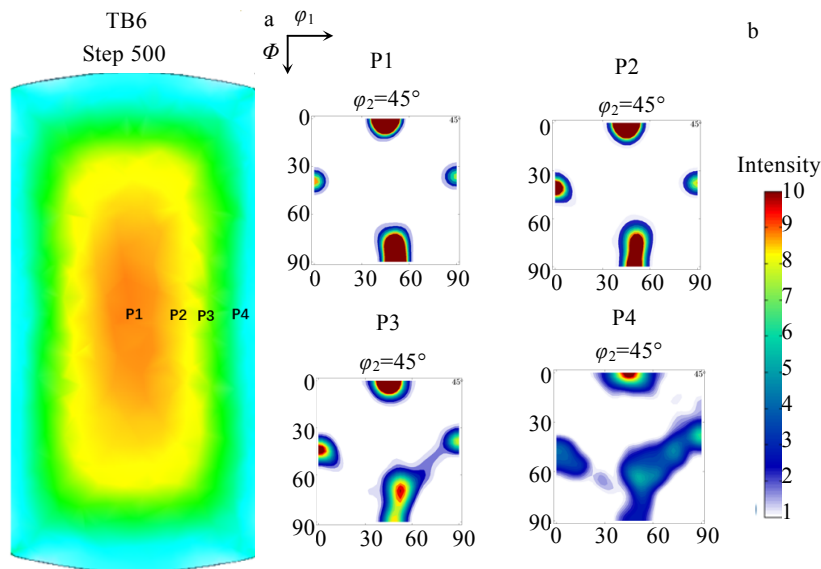


图 7 TB6 钛合金拔长后横向不同部位织构模拟结果

Fig.7 Simulation results of texture at different parts in the transverse direction of TB6 titanium alloy after drawing: (a) geometric diagram (Strain-Effective); (b) simulation result (P1-P4, $\varphi_2=45^\circ$)

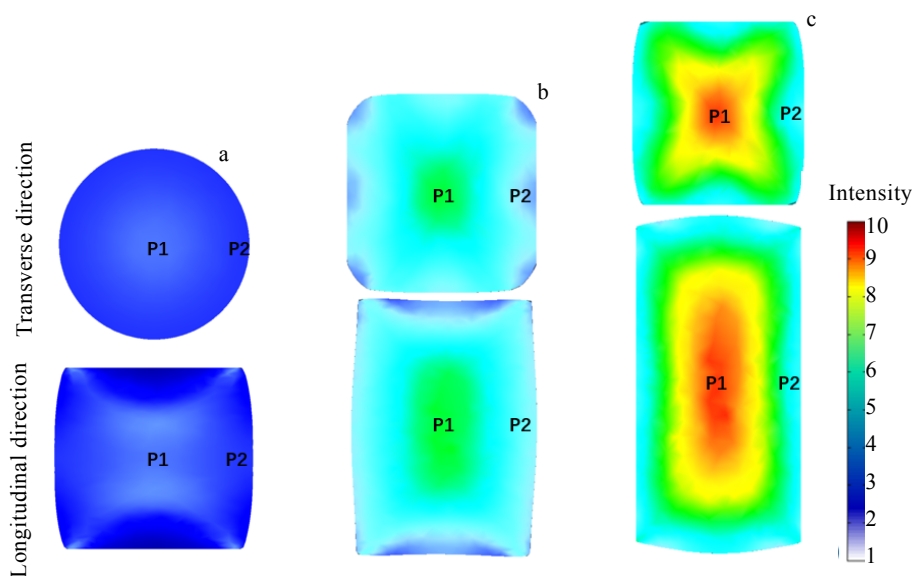


图 8 镦粗、一次拔长、二次拔长等效应变几何示意图

Fig.8 Geometric diagram of strain-effective: (a) upsetting, (b) the first drawing, and (c) the second drawing (P1: center; P2: edge)

拔长可以起到打碎粗晶，锻合内部疏松与缩孔，细化组织，提升材料致密度的作用，在坯料的最终成型之前其拔长过程一般要经过四方或六方等多次锻造。之前讨论过四方拔长对锻件的组织影响，之后则引用六方拔长与之形成对比探讨多边拔长对组织的影响以及织构演变规律。图 10 为不同材料六方拔长工艺几何示意图，首先沿 z 轴进行镦粗，变形量为 40%，

之后进行三向六边拔长，每向压缩 30%，总拔长量为 43%。

图 11 为对应材料最终状态下心部与边部织构模拟结果，并在图 12 总结对比了图 11 中四方与六方心部典型织构。TB6 和钽的模拟织构类型相近，均保留了 $\{100\}<110>$ 压缩型织构，相比于四方拔长过程，六方拔长后织构发生了较大的变化，心部 $\{110\}$

型组织近乎消失而形成了 $\{111\}<110>$ 组织, 边部则完全形成了 $\{111\}$ 组织并向近 $\{112\}<111>$ 组织方向发生偏移, 并且边部组织强度降低。由此可见, 对于体心立方金属而言, 经过多边拔长之后, $\{110\}$ 方向强组织(即 $<110>$ //拔长轴)类型得到改善, 但是心部与边部依旧存在较大不均匀性, 李志尚^[19]等对 TC18 钛合金进行六边、八边到滚圆的过程中同样出现了随着拔长遍数提升, 平行于中心的强组织减弱

的情况。对于面心立方金属铜而言, 经过六方拔长后, 心部和边部同样由于小变形保留了压缩型组织 $\{110\}$, 而拔长型组织 $\{100\}$ ($<100>$ //拔长轴)没有形成, 且出现了微弱的 $\{112\}<110>$ 组织, 可见面心立方金属经过多边拔长之后也能很好的改善平行于拔长轴的强组织类型。与此同时, 相对于四方拔长, 六方拔长后铜的心部与边部出现了组织成分的不均匀性。

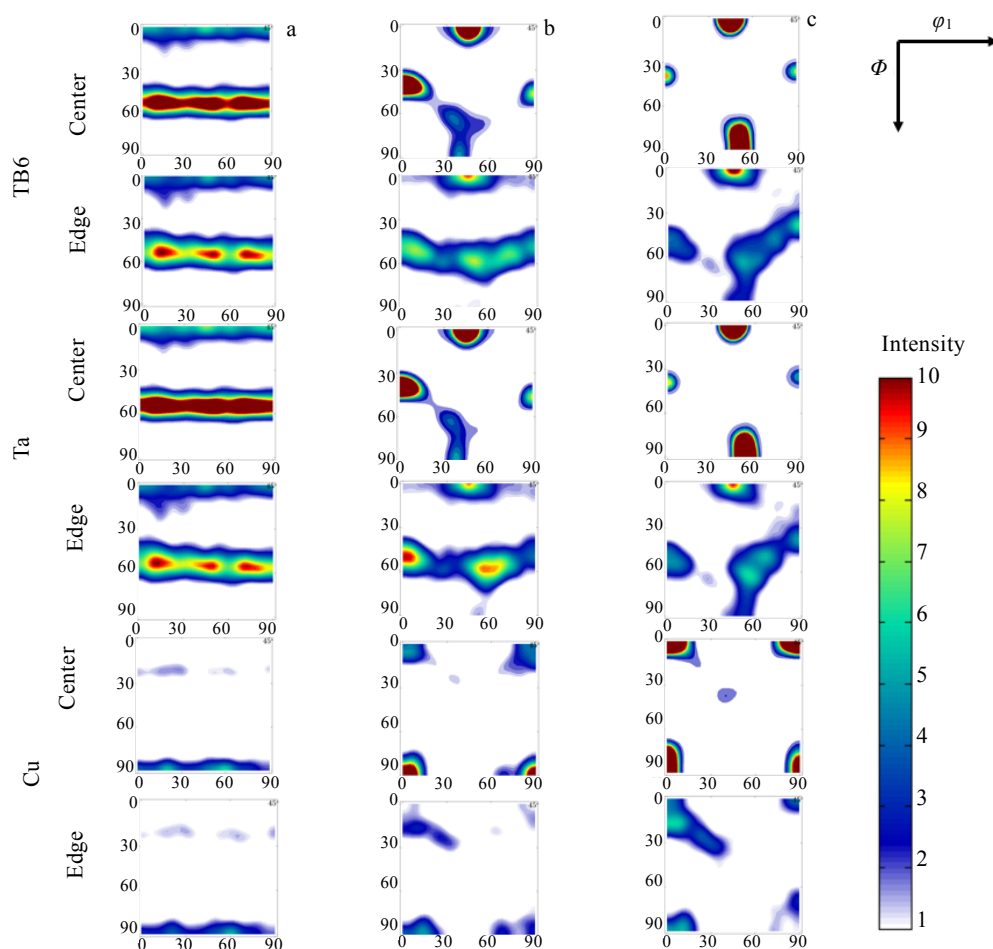


图 9 不同材料锻件拔长后组织模拟结果

Fig.9 Simulation results of the texture of forged materials after drawing ($\phi_2=45^\circ$): (a) upsetting (b), the first drawing, and (c) the second drawing

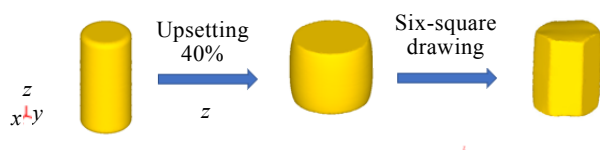


图 10 六方拔长工艺几何变化示意图

Fig.10 Change of the geometry during the six-square drawing

通过模拟的手段探讨了药型罩用 TB6、纯铜、纯钽锻造过程中的组织演变规律, 为其实际加工提供一定参考: 多道次的加工, 反复的镦粗与拔长可提高组织结构的均匀性, 如图 6 和图 7 所示, 由心部到边部组织成分能保持较好的均匀性, 但组织强度心部与边部差异较大, 主要受变形量和加工温度影响, 因此在实际加工过程中要控制变形量大小和缩小心部与边部的温度差异, 另外, 由于爆炸冲击波作用在药型罩时存在

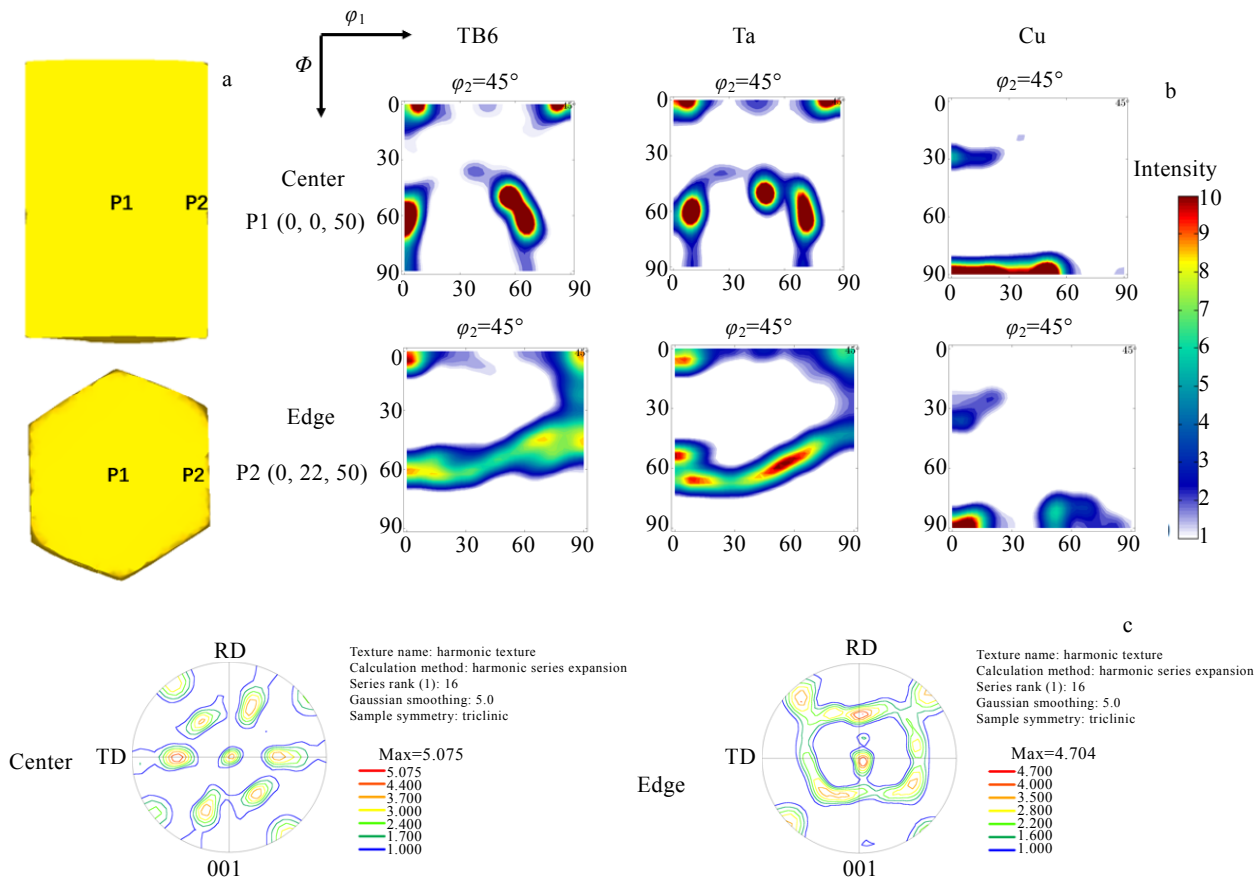


图 11 六方拔长织构模拟结果

Fig.11 Simulation results of six-square drawing texture: (a) geometric diagram; (b) simulation results; (c) PF, TB6 (center P1, $\phi_2=45^\circ$; edge P2, $\phi_2=45^\circ$)

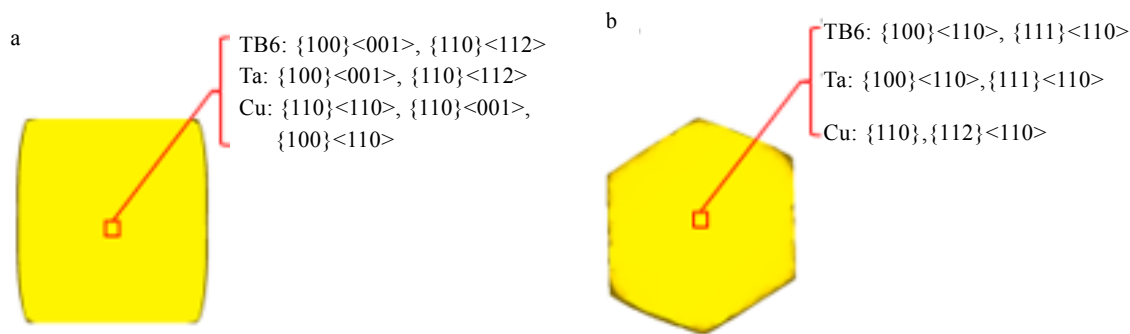


图 12 四方和六方心部典型织构对比

Fig.12 Contrast of central typical texture: (a) square and (b) hexagonal

时间差异, 导致内部产生梯度应变, 因此合理调节爆裂部分的应变有助于提高爆裂后金属射流的微观结构均匀性, 提高破甲效率^[20]; 六方拔长过程中, 平行于拔长轴的强织构类型 (体心为 $\{110\}$, 面心为 $\{100\}$)

得以消除, 在实际加工过程中多边拔长可能成为弱化织构的重要手段。

3 结 论

1) 利用有限元软件模拟了 TB6 钛合金棒材第二次四方拔长后不同部位温度、等效应力和等效应变的差别, 结果表明棒材经镦粗和拔长之后心部温度比边部高; 心部等效应变高于边部; 边部等效应力高于心部。

2) TB6、钼、铜经四方拔长后心部织构强度要明显高于边部。拔长过程中 TB6 和钼的心部与边部织构类型差异较大, 且心部织构变化程度大于边部, 具有织构强度和织构类型双重不均匀性; 铜的心部与边部织构类型能保持很好的相似性, 织构类型均匀化较高。经过镦粗之后, 在以后的拔长过程中, 3 种材料的压缩型织构都能得到保留。TB6 和钼的心部织构为 $\{100\}<001>$ 织构、 $\{112\}<110>$ 织构和 $\{110\}<112>$ 织构, 边部为其弱化后的织构; 铜的心部织构为 $\{110\}<110>$ 、 $\{110\}<001>$ 压缩型织构和 $\{100\}<110>$ 拔长型织构, 边部为其弱化后的织构。

3) 无论体心立方型 TB6 和钼还是面心立方型铜, 经多边拔长后, 平行于轴向的强织构类型都能得到良好改善, 且六方拔长后心部与边部织构类型和强度均有较大不均匀性。

参考文献 References

- [1] Jia Wanming(贾万明), Zhang Quanxiao(张全孝), Bai Zhiguo(白志国) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(9): 1511
- [2] E Zhijia(鄂智佳), Duan Zhuoping(段卓平), Zhang Xiaowei(张晓伟) *et al. Acta Armamentarii*(兵工学报)[J], 2014, 35(S2): 22
- [3] Xue Xinying(薛鑫莹). *Research on Hot Deformation Microstructure Evolution of Titanium Alloy TB6* (TB6 钛合金的热变形组织演变规律研究)[D]. Nanjing: University of Science Technology, 2012
- [4] Qiu Wei(邱伟). *Hot Deformation Behavior and Constitutive Relationship of As-cast TB6 Alloy*(铸态 TB6 钛合金热变形行为及本构关系)[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2010
- [5] Lei Liming(雷力明), Huang Xu(黄旭), Huang Lijun(黄利军) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(S1): 377
- [6] Tong Jianbo(佟健博), Li Xuefei(李雪飞), Li De(李德) *et al. Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2021, 50(23): 99
- [7] Chen Liquan(陈立全), Yang Ping(杨平), Li Zhishang(李志尚) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(10): 3600
- [8] Petit J, Jeanclaude V, Fressendeas C *et al. Journal of Applied Physics*[J], 2005, 98: 123 521
- [9] Lichtenkerger A. *16th Internatioanl Symposium on Ballistics*[C]. San Francisco, USA: ISB, 1996, WM-10: 450
- [10] Bourne B *et al. 14th International Symposium on Ballistics* [C]. Quebec Canada: ISB, 1993: 119
- [11] Zhang Quanxiao(张全孝), Zhang Xinming(张新明), Jia Wanming(贾万明) *et al. Ordnance Material Science and Engineering*(兵器材料科学与工程)[J], 2005(4): 4
- [12] Zhang Rongjun(张榕峻), Zhang Jin(张津), Ji Pengfei(计鹏飞) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(4): 1352
- [13] Peng Yiqun(彭益群), Pan Yaqin(潘雅琴). *Rare Metals*(稀有金属)[J], 1990(6): 424
- [14] Zhao Ruilong(赵瑞龙), Liu Yong(刘勇), Tian Baohong(田保红) *et al. Heat Treatment of Metals*(金属热处理) [J], 2011, 36(8): 17
- [15] Yang Shouchun(杨守春). *Information of Advanced Materials* (现代材料动态)[J], 2000(10): 1
- [16] Lebebsohn R A, Canovag R. *Acta Materialia*[J], 1997, 45(9): 3687
- [17] Tome C N, Lebebsohn R A. *Visco-Plastic Self-Consistent (VPSC)*[M]. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2007
- [18] Peng Jianxiang(彭建祥), Li Yinglei(李英雷), Li Dahong(李大红). *Explosion and Shock Waves*(爆炸与冲击)[J], 2003(2): 183
- [19] Li Zhishang(李志尚), Chen Liquan(陈立全), Yang Ping(杨平) *et al. Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2007(9): 1511
- [20] Fu H, Jiang J, Men J *et al. Materials*[J], 2022, 15(15): 5252

Texture Simulation of Forging Process of TB6 Liner and Its Comparison with Copper and Tantalum Forging

Liu Guoyu, Gu Xinfu, Wang Tong

(School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The texture formation of TB6 titanium alloy liner under different forging processes was investigated by simulation, and compared with the simulation results of tantalum and copper. Firstly, the feasibility of the simulation was verified by comparing the experiment with the simulation. Secondly, the difference of temperature, equivalent stress and equivalent strain in different parts of TB6 titanium alloy during square drawing was analyzed by finite element method; after that, visco-plastic self-consistent model (VPSC) was used to simulate the texture evolution of different materials in forging process and a comparative analysis was performed. The results show that the central textures of bcc β phase in titanium alloy and Ta are not uniform as well as in the edges, and the fcc copper textures have little fluctuation. The multi-side drawing is beneficial to weaken the {110} strong texture which is parallel to the axial direction during square drawing, and the compression texture can be retained in the drawing process.

Key words: TB6 titanium alloy; liner; forging; texture simulation; VPSC

Corresponding author: Gu Xinfu, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, Tel: 0086-10-82376968, E-mail: xinfugu@ustb.edu.cn