

工业纯钛板激光冲击形变的特征微结构

罗新民¹ 赵广志¹ 杨 坤¹ 陈康敏^{1,3} 张晓柠¹ 张永康² 罗开玉² 任旭东²

¹ 江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013
² 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013
³ 江苏大学分析测试中心, 江苏 镇江 212013

摘要 用输出波长为 1064 nm、脉冲宽度为 20 ns 的调 Q 钕玻璃激光器对 TA2 工业纯钛板料进行了激光连续冲击无模弯曲形变试验,用扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)分析了激光冲击形变全断面的特征微结构。根据变形区的应力状态,观察到 3 种主要的特征微结构。一是位于压缩应变区域的近纳米级微孪晶栅,认为是由接近同一方向的高密度层错聚集的产物;同时由于新生微结构之间的交互作用而诱发的第三类微观内应力,在基体间形成高密度的位错网络和位错胞。二是同在压缩应变区域,在超高应变率和强大的冲击能量作用下局部切变诱发的 $\alpha \rightarrow \alpha'$ 的逆相变。三是在激光冲击超高速形变条件下,受高度约束的 HCP 晶系材料塑性变形阻力增大,在拉伸变形区域诱发沿解理方向的局部层状集群滑移现象。上述 3 种现象源于激光冲击形变时材料微观约束条件和形变方式,造成形变区域微结构和硬度的不均匀性,在重复冲击条件下,不利于钛板的均匀变形。

关键词 激光技术;激光冲击形变;超高应变率;钛;微孪晶栅;逆相变;集群滑移

中图分类号 TN249; TG146.2⁺3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0603001

Deformation Microstructure Characteristics of Commercial Pure Titanium Sheet Induced by Laser Shock Forming

Luo Xinmin¹ Zhao Guangzhi¹ Yang Kun¹ Chen Kangmin^{1,3} Zhang Xiaoning¹
Zhang Yongkang² Luo Kaiyu² Ren Xudong²

¹ School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China
² School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China
³ Analysis and Test Center, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

Abstract The commercial pure titanium sheet TA2 is continually mould-free laser shock deformed by means of a Nd:glass Q-switched laser setup with 1064 nm wavelength and 20 ns short pulse. The microstructure characteristics of the deformed sheet on whole section are analyzed with the thermo-field emission scanning electron microscope (SEM) and transmission electronic microscope (TEM) respectively. Three main microstructure characteristics are observed based on the stress state in deformed zone. The first is the near nanometer micro-twin gate in the compression strain region, which is thought to be a product composed of high density of stacking faults in the same direction. Due to the inter-actions between neonatal microstructures and the induced third type of internal stress, high density of dislocation networks and/or dislocation cells formed in laser shocked substrate. The second is the inverse-transformed martensite, which is induced by partial shear deformation in the compression zone of laser shock deformed sheet. The third is the local stratified cluster slips along the cleavage direction, induced by the ultra high energy and ultra-high strain rate of laser shock, in the tensile deformed region owing to the increasing of deformation resistance of highly constrained hcp crystalline material. The above-mentioned phenomena can be attributed to the confinement conditions and deformation mode of micro-zone upon laser shock forming, and will result in microscopically inhomogeneous of microstructures and hardness in the deformed section. Therefore, repeated shocking is not conducive to the uniformity of deformation of titanium sheet.

收稿日期: 2011-12-28; **收到修改稿日期**: 2012-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(50735001,50905080,51105179)资助课题。

作者简介: 罗新民(1951—),男,教授,主要从事金属材料表面工程及微结构与性能等方面的研究。

E-mail: luoxm@ujs.edu.cn

Key words laser technique; laser shock deformation; super-high strain ratio; titanium; micro-twin gate; reverse transformation; stratified cluster slipping

OCIS codes 140.3530; 140.3538; 160.3900; 350.3450; 350.3850

1 引 言

具有高压、高能、超快、超高应变率等显著特点的激光冲击正在成为一种新的成形制造技术,它综合了激光冲击强化和塑性成形技术的优点,在微制造领域具有显著的技术优势,开展具有高精密度、高可靠性要求的微器件制造理论和技术研究正在成为现代非传统制造领域的热点^[1~4]。

利用脉冲激光冲击诱导的等离子体爆轰使板材发生塑性变形是一种非热成形技术^[5~7],而且可以实现无模成形,避免了微成形制造中微凸模制造、间隙保证和行程控制等技术难题,可使板材产生仿形、弯曲、拉深等变形,适合于特殊条件下的材料成形加工^[8,9]。但由于激光冲击成形具有微尺度累积加工的特点,且脉冲激光冲击成形属超高应变率超快塑性变形,在惯性效应和材料的应变行为共同作用下,激光冲击累积成形过程中的微结构变化与激光单次冲击成形和常规低应变速率下的整体变形行为有很大不同,材料局部受到的多次冲击冷塑性变形在微观尺度上引发的微结构演变将更加复杂,这些现象的观察与分析是深入理解金属材料塑性形变和强化行为、塑性变形机制和宏观力学性能关系的重要部分^[10~12]。此外,重复塑性形变还带来微结构之间强烈的交互作用,从而导致形变区域内的不均匀分布状态及状态的失稳、分化、新的组态形成等一系列远离平衡状态的自组织现象。

一般认为钛合金屈服应力高和弹性模量较低,这些因素的组合导致成形难度大,且会造成变形后的“回弹”,难以实现设计轮廓或形状,通常需要借助温度和时间的作用通过松弛和蠕变使其就范成形,大大增加成本^[13,14]。所以,金属钛板料的激光冲击微区累积成形成为一种更为复杂的过程,尚存许多不了解的因素。在这种情形下,了解激波加载与板材变形之间的组织演变规律是使激光冲击成形新技术付诸实用的关键之一^[15,16],同时,也有利于更清楚地掌握激光冲击成形过程中微观机制对钛板成形质量的影响规律。本文针对钛板形变特点和激光冲击超高应变率对材料成形质量的影响,选取工业纯钛板 TA2 开展了激光冲击形变试验,研究了连续激光冲击形变对钛板特征微结构演变和对成形质量的影响。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验材料为工业纯钛板 TA2,表 1 为试验材料的化学成分。

表 1 工业纯钛板 TA2 的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Nominal composition of the commercial pure titanium sheet TA2 (mass fraction, %)

Fe	Si	C	H	O	N	Ti
≤0.30	≤0.15	≤0.10	≤0.05	≤0.15	≤0.05	Bal.

2.2 试验过程

激光冲击试验使用波长为 1064 nm,脉冲能量 ≥ 35 J,脉冲宽度 ≤ 20 ns 的高重复频率钕玻璃 YAG 激光器,光斑直径和冲击功率可调,图 1 为激光冲击示意图。试验用冷轧态钛板,厚度为 0.7 mm,表面涂覆树脂黑漆。装夹到试验台后,用自来水作为约束层^[17]。脉冲强激光使涂覆层等离子化,诱导的冲击波轰击样品实施变形。图 2 为激光冲击材料表面的光斑形貌和扫描电子显微镜(SEM)观察断面及透射电子显微镜(TEM)薄膜晶体样品取样位置示意图。

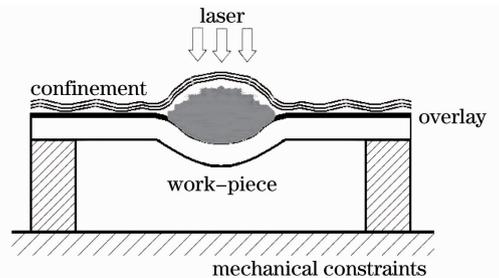


图 1 激光冲击形变试验示意图

Fig. 1 Illustration of the laser shock forming experimental set

用于微结构观察的透射电镜薄膜试样采用线切割后,从基体一侧预减薄、再经凹坑减薄,最后用离子减薄的方法制备而成。用 JEM-2100 高分辨透射电子显微镜观察样品中的微结构;用 JSM-7001F 热场发射扫描电镜观察断面组织;用 HVS-1000 型数字显微硬度仪测试试样强化部位沿厚度方向的硬度分布。

3 试验结果与分析

3.1 钛板激光冲击成形的宏观形貌

图 3 为按照预设激光冲击路线冲击后的形变区

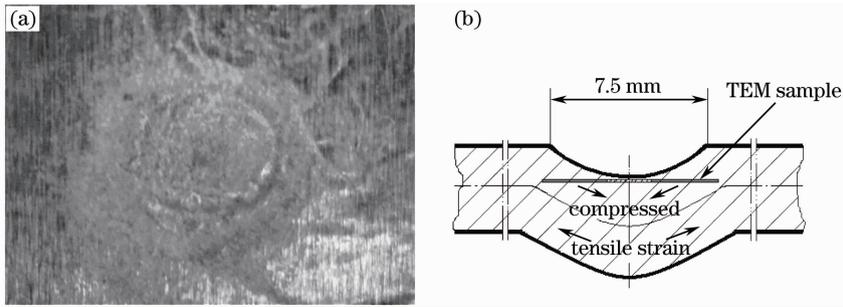


图 2 TA2 钛板的激光冲击斑点形貌(a)及 SEM 观察断面和 TEM 薄膜取样位置示意图(b)

Fig. 2 (a) Morphology of laser shocked spot on specimen and (b) SEM observation cross-section and TEM sample location in the laser shock deformed specimen of the titanium sheet TA2

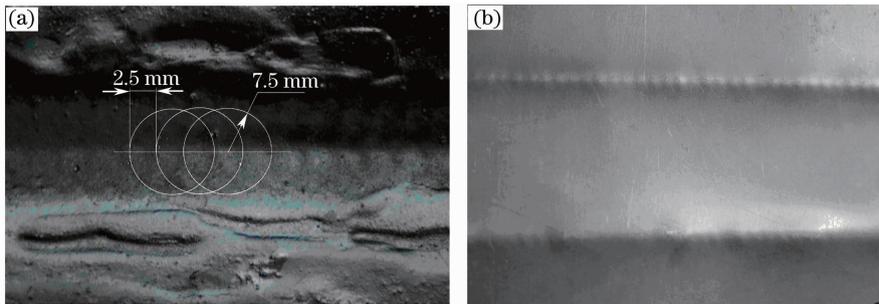


图 3 TA2 钛板的激光冲击连续变形区域。(a)激光冲击面；(b)形变面

Fig. 3 Continual laser shock deformed area of titanium sheet TA2. (a) Laser shock face; (b) deformation face

正反两面的宏观形貌。由图可知，表面涂层很好地保护了受冲击面免受烧蚀，同时达到了预期的形变效果。

3.2 特征微结构之一——微孪晶栅

在激光冲击压缩变形区域的晶粒内，观察到激光冲击超高应变率作用下明显的特征微结构——平行的孪晶栅，如图 4 所示。图 4(a)为窄条状孪晶组合而成的栅栏布及整个视域，孪晶栅栏把基体 α -晶粒割成小条块。在同一个晶粒内，观察到相向形成

的微孪晶，表现出明显的自组织行为，其尖端相互错开，避免了相互撞击而萌生微裂纹，如图 4(b)所示。同时还观察到，在冲击力作用下，微孪晶形成诱发的晶内第三类内应力使 α -钛基体中产生高密度的位错。工业纯钛板在激光冲击塑性变形过程中萌生的大量微孪晶和位错，一方面使金属产生应变强化，另一方面也可以有效地平衡金属内部的应力集中程度，使塑性变形以孪晶和位错增殖的方式顺利进行。

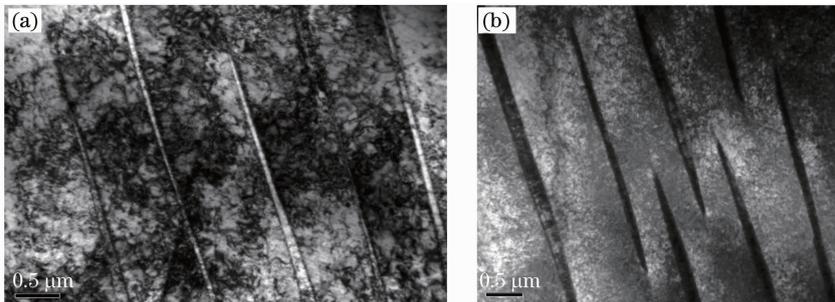


图 4 工业纯钛板压缩变形区中晶粒内的形变孪晶栅。(a)激光冲击形成的微孪晶栅；(b)同位向晶粒内不同方向的微孪晶栅

Fig. 4 Twin gratings in a grain induced by laser shocking in the compressed area of TA2 titanium sheet. (a) Micro-twin grid induced by laser shock; (b) micro-twin grid with opposite directions in a grain with the same orientation

图 5 进一步揭示了这种微孪晶的成因。如图 5(a)所示，在形变微孪晶尖端侧面可见这种孪晶主要是由层错堆叠而成，图 5(b)为一孪晶的正侧

面，清晰地表示出这种孪晶在厚度方向由层错构成。纯钛的层错能较低(0.145 J/m^2)^[18]，有利于全位错分解为不全位错。又由于孪晶本身的位向和层错完

全一致,只要层错在变形过程中大量增殖,当相邻层错面接合时,一定厚度的孪晶即宣告而成,如图 5(c)所示,如果在某些地点尚有个别面层没有完全接合时,则层错的衬度就会在孪晶侧面出现。由

此可以认为微孪晶是由接近同一方向的位错线和层错高度聚集的产物。当缺陷密度达到一定程度时,整体的超高速应变导致了孪晶栅的形成。

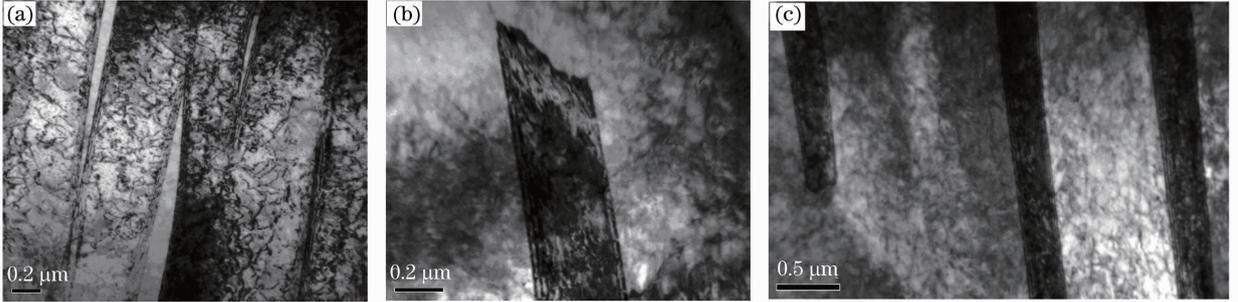


图 5 孪晶尖端和侧面的 TEM 图像。(a)孪晶尖端;(b)单个孪晶端部的侧面;(c)微孪晶的厚度方向
Fig. 5 TEM images of twins. (a) At the tip; (b) the side-view of a twin's ending; (c) the thickness direction of micro-twins

微孪晶不仅构成格栅状,而且其空间构造尺度在亚微米级,接近纳米级。可见激光冲击使原本均质的材料变成犹如纤维强化的复合材料,故使其进一步变形变得困难。而且,在晶界等微观组织情况复杂的地方,微结构相互之间的交互作用和机会明显增加。图 6 为晶界处的微孪晶形貌,其方向性与晶界处的复杂应力状态和不同次的激光冲击有关。冲击应力导致这些部位形成密度更大的位错网络和

位错胞等,如图 6(a)所示;此外,由于重叠的激光冲击,不同次形成的微孪晶将造成相互冲击和挤压,在其先端形成由孪晶相互冲击而产生的位错胞,如图 6(b)所示;同时激光冲击形成的微孪晶不越过晶界,表明晶界强度依然是形变的主要障碍;而且,微孪晶冲击晶界时造成局部应力集中,在其与晶界结合处也能诱发大量位错,形成位错胞,如图 6(c)所示。



图 6 激光冲击在晶界处诱发的微孪晶形貌。(a)晶界处的微孪晶;(b)微孪晶的冲撞;(c)微孪晶冲击晶界诱发的位错胞
Fig. 6 Morphology of micro-twins induced by laser shocking. (a) At grain boundary; (b) the collision of two micro-twins; (c) the dislocation cell induced by the impact of micro-twin

3.3 特征微结构之二——“逆相变马氏体”

在激光冲击的压缩形变一侧,除了微孪晶特征微结构外,还观察到少量独立的条状组织,经衍射分析确定其为激光冲击诱发的马氏体组织。一般认为钛合金中有 4 种马氏体:惯习面为 $\{334\}_\beta$ 、无孪晶亚结构的单晶六方马氏体;惯习面同为 $\{344\}_\beta$ 、有孪晶亚结构的孪晶六方马氏体;由六方结构衍生的斜方马氏体以及面心立方或面心正方马氏体^[19]。图 7 所示为激光冲击的压缩形变区内,观察到的激光冲击应力诱发的马氏体。图 7(a)为激光冲击工业纯钛板中的针状马氏体的 TEM 图像,从图 7(b)其衍

射图初步可以判断为 $\{334\}$ 型单晶六方马氏体片。

$\{334\}$ 型单晶六方马氏体片与基体 β 相之间大致遵循柏格斯位向关系,即 $(0001)_\alpha // \{110\}_\beta$; $\langle 112-0 \rangle_\alpha // \langle 111 \rangle_\beta$ 。转变发生的特定惯习面限制在与 $\{110\}_\beta$ 呈接近于 90° 的那些晶体中。这类马氏体最为常见,主要发现在纯钛中,可视为含少量 β 相稳定元素的 α -Ti 过饱和固溶体。

由于工业纯钛不可避免地含有微量的其他元素,它们将影响钛合金的固态相变。在钛合金的富钛一角的 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变过程中, β 相往往不能直接转变成 α 相,而要经过某个过渡阶段,一般是经过典型的

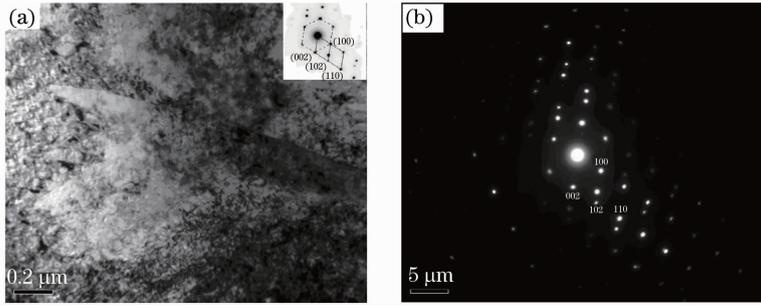


图7 激光冲击工业纯钛板中的 α' 相(a)及其衍射图(b)

Fig.7 (a) α' -phase and its (b) X-ray diffraction diagram of the laser shocked titanium sheet

马氏体型转变,形成六方马氏体 α' 相或者斜方马氏体 α'' 相甚或 ω_a 相等,有时这将随着合金成分的种类与含量以及外界条件(应力状态,温度等)的改变而异。在钛合金中,六方马氏体 α' 相的组织形态与 α'' 相相近,为细针状结构,只是针较为细小,因此有时也被认为是片状;由于 α' 相与 α 相一样具有HCP晶体结构,因此衍射谱线与 α 相相同;此外, α' 相、 α'' 相或 α 相和 β 相之间的差别只是晶格中原子的极小位移。当 β 相中的合金元素含量较少时,晶格切变容易,常形成六方 α' 相。由此可知,在材料制备过程中已完成 $\beta \rightarrow \alpha' \rightarrow \alpha$ 转变的钛合金中,在激光冲击

的超高应变率和弹性应变能作用下,有可能在局部存在由于强大的超高应变率和冲击能量作用而通过局部切变诱发 $\alpha \rightarrow \alpha'$ 的逆相变^[20],这符合现代关于马氏体转变的基本特征,即不需要扩散、点阵畸变式转变和弹性应变能控制作用等三个特点。

3.4 特征微结构之三——“层状滑移”

机械弯曲变形和激光冲击形变试样的拉伸变形区域的SEM观察结果表明,前者的塑性变形表现出良好的协同作用,六方晶系的纯钛中出现集群态的层状滑移,在板的外缘弯曲部分, α 相中出现与弯曲方向一致的球葱片样的层状滑移结构,如图8所示。

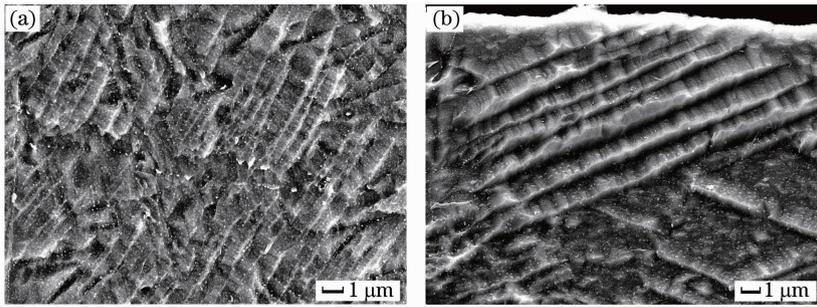


图8 钛板拉伸变形区域外缘晶粒内的变形形貌。(a)机械形变条件下晶粒内协同弯曲的球葱片层状滑移群,沿形变方向弯曲;(b)激光冲击拉伸形变区晶粒内的层状滑移群

Fig.8 Deformation morphology in grains of the titanium sheet at the outer deformed margin by mechanically bending and laser shock forming respectively. (a) Curved onion-layer-like slip groups in a grain by mechanically bending; (b) layer slipping clusters in a grain by laser shock forming

在激光冲击变形条件下,在拉伸形变区域的晶粒范围内也观察到层状滑移群,如图8(b)所示。与图8(a)相比较,可知在低应变速率条件下,对钛板进行 90° 或更大角度整体弯折时,材料内不同位向晶粒仍处于相对较“软”的约束状态,在形变时位向调适的自由度较大,说明钛板在大范围形变时各个晶粒具有足够的位移变形三维空间,故可在变形区域的一些晶粒内观察到材料的协同择优滑移,即滑移群能够沿确定的形变受力方向弯曲;而在具有超高应变率的激光冲击条件下,形变被局限在每次冲击造成的很小区域内,材料内不同位向晶粒处在相

对较“硬”的约束状态,晶粒之间位向调整十分困难,材料内各晶粒形变的自由度极小,不易产生较大范围的位移或转动,所以即使有,其滑移群落也较小,而且滑移群没有确定的形变方向,是在微观范围内随机的,故滑移层片不发生弯曲。这应是多晶材料和激光冲击超高应变率共同作用的结果,这种现象也可以看成是材料在超高应变率作用下能量与结构相适应的表现。

上述极有规律性的层状滑移结构还可能与材料在高速加载条件下的解理现象有关。解理是在外力作用下,晶体沿着一定的结晶学平面破裂的固有特

性。解理面平行于晶体结构中键力最强的方向,一般也是在原子排列最密的晶面发生,并服从晶体的对称性,晶体的解理严格受其内部结构的控制,所以解理是晶体异向性的表现之一。 α 钛在 25 ℃ 时的晶格参数 $a=2.95 \times 10^{-4} \mu\text{m}$, $c=4.686 \times 10^{-4} \mu\text{m}$, 轴比 $c/a=1.588$, 具有层状结构^[21]。在六方晶系中解理面即为 $\{0001\}$ 面, 晶体如果是沿着解理面发生开裂, 则称为解理断裂。而且在六方晶系的钛合金中, 其滑移系中最主要的滑移面也是 $\{0001\}$ 面, 这显然不属由位错诱导的沿 $\{0001\}$ 面的滑移。在激光冲击过程中, 很明显晶内尚没有发生开裂, 只是在某些特定的晶粒位向、约束条件和应力状态下, 局部沿解理面发生了滑移, 因为这种滑移机制与塑性变形的位错滑移机制有本质区别, 尤其是在上述滑移结构的尺度方面, 图 8(b) 所示滑移层间距或层的厚度达到微米级, 故将这种现象称为“层状滑移”。

金属断裂时的解理现象属于一种穿晶脆性断裂, 上述沿解理晶面的层状群集滑移现象说明六方晶系材料在受高度约束的超高速形变条件下不易发生塑性变形, 且表现出脆性倾向, 在晶粒内某些过度形变的微区, 已临近断裂。“层状滑移”现象除了与六方晶系金属滑移系少这个本质特性有关外, 也与六方晶系金属不同晶面之间的结合力不同和激光冲击的微尺度累积形变均匀性不一致有关, 这可以从激光连续冲击钛板的形变轨迹看出, 仔细观察其形变区, 可见其连续性和均匀性均较差, 如图 3(b) 所示。但试验表明, 工业纯钛板在常规的大范围形变条件下, 却也能表现出较好的塑性。所以“层状滑移”现象可能成为激光冲击超高应变率对材料塑性成形的一种不利影响, 特别是在累积式的冲击情况下。

表 2 为激光冲击形变带中微孪晶和逆转变马氏体区域及层状滑移群区域的硬度平均值, 可见由于变形机制的差别, 硬度亦有所区别。由于该两层的约束状态差异和滑移运动引起的应力松弛, 使拉伸形变区域的硬度略低于压缩形变区域。激光冲击能量主要消耗在变形上, 加工硬化是次要的。

表 2 激光冲击截面沿厚度方向的平均硬度

Table 2 Average hardness along the thickness of the section laser shocked

Position	Compression side	Center	Tensile side
HV _{0.98N}	141	133	139

3.5 约束条件对激光冲击形变的影响

激光冲击单相工业纯钛板在约束击穿的情况

下, 材料经历了超快速的塑性变形, 其微观组织与常规形变条件下, 试件整体塑性变形的微结构有很大不同, 主要是由于激光冲击的微区加载特点和超高应变率的影响, 产生了新的微结构演变特征^[22]。

首先是压缩形变一侧, 该区所受到的约束甚于拉伸形变一侧, 使多晶粒间的变形困难, 金属宏观塑性降低; 钛板的单独压缩试验结果表明, 在 300 K ~ 723 K 范围内的多晶纯钛孪晶仅在压缩时出现, 而且压缩流动应力要明显高于拉伸流动应力; 孪晶变形还与应变率有明显的相关性, 孪晶密度随着应变率的增加而增大。在激光冲击的超短作用时间内, 能量损失小, 有利于外部能量转变为晶粒内部的储能, 微观应变强化作用加强; 并且压缩应力能抑制变形体内存在的杂质、孔隙或组织缺陷等对塑性形变的不利作用, 而表现为主体金属微观组织的结构起伏起主导作用, 所以形变微结构除位错和少量的马氏体外, 以栅状分布的孪晶为主。

其次是在拉伸形变一侧, 形变的不均匀性主要是由于激光冲击为局部高速加载和微区应变, 这将促使真实应力升高, 使塑性变形不易充分扩展, 晶粒内局部微区有可能较早地临近断裂阶段, 或者晶粒内部局部强烈的塑性形变强化导致塑性下降; 此外, 激光冲击加载应变速率高, 可视为无温升的冷变形, 无足够时间和温度使材料发生回复或再结晶, 从而使软化作用消失而促使变形区塑性下降; 在约束击穿的情况下, 晶粒局部发生不均匀变形, 由此引起的微观附加拉应力也会使塑性下降; 塑性变形不同于表面强化, 多晶体的变形抗力比单晶体大, 其中, 取向差效应是多晶体加工硬化更主要的原因; 激光冲击的微区加工特点使成形过程必须重复冲击, 在第一次激光冲击塑性变形产生的加工硬化基础上进行的重复冲击对进一步塑变是十分不利的, 所以冲击形变表面显得不够平整。

4 结 论

1) 在激光冲击的超高应变率作用下, 在具有 HCP 晶格类型的钛板压缩应变区域一侧, 观察到大量由堆垛层错形成的平行形变微孪晶, 以孪晶格栅的形式强化基体, 并且诱发大量位错; 同时由于局部的超高应变率和强大的冲击应力作用而诱发少量 $\alpha \rightarrow \alpha'$ 的逆相变。

2) 在具有 HCP 晶格类型的钛板拉伸应变区域一侧, 激光冲击的超高应变率诱发特定微区的选择性集群层状滑移现象是多晶钛材料和激光冲击超高

应变率共同作用的结果, 可以看成是材料在超高应变率作用下能量与结构相适应的表现。

3) 由于激光冲击变形区两侧的约束条件和变形机制不同, 造成两侧不同程度的加工硬化, 以致激光冲击变形层截面内复杂的微结构和硬度分布不均匀而影响激光冲击变形表面的质量。

参 考 文 献

- Zhong Minlin, Fan Peixun. Applications of laser nano manufacturing technologies[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0601001
钟敏霖, 范培迅. 激光纳米制造技术的应用[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0601001
- Jitae Kim, S. J. Na. 3D laser-forming strategies for sheet metal by geometrical information[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2009, **41**(6): 843~852
- Masayuki Nunobiki, Koichi Okuda, Toshiyuki Takagawa *et al.*. Deformation behavior simulation in laser forming of titanium sheet-influence of free edge on deformation behavior in laser forming[J]. *Adv. Mater. Res.*, 2011, **325**: 725~730
- L. J. Yang, J. Tang, M. L. Wang *et al.*. Surface characteristic of stainless steel sheet after pulsed laser forming[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2010, **256**(23): 7018~7026
- Janez Grum, Uros Zupanc. Surface analysis after shot peening processing of ENAW 7075 aluminium [J]. *Materials Science Forum*, 2008, **589**: 385~390
- Zhang Lingfeng, Xiong Yi, Zhang Yi *et al.*. Microstructure of high manganese steel by laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603025
张凌峰, 熊毅, 张毅等. 高锰钢在激光冲击作用下的微观特征[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603025
- Huang Shu, Zhou Jianzhong, Jiang Suqin *et al.*. Study on strain hardening and fatigue fracture of AZ31B magnesium alloy after laser shot peening[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0803002
黄舒, 周建忠, 蒋素琴等. AZ31B 镁合金激光喷丸后的形变强化及疲劳断口分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0803002
- Zhang Yongkang, Gao Li, Yang Chaojun. Theoretical analysis and experiment on deformation of TA2 sheet under laser shock [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1282~1287
张永康, 高立, 杨超君. 激光冲击 TA2 板料变形的理论分析和实验研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1282~1287
- Zhou Jianzhong, Zhang Yongkang, Liu Huixia *et al.*. Experiments and FEM analysis of LD31 sheet deforming by pulsed laser shocking [J]. *Applied Laser*, 2004, **24**(6): 339~341
周建忠, 张永康, 刘会霞等. 脉冲激光冲击 LD31 薄板变形的实验和数值模拟[J]. *应用激光*, 2004, **24**(6): 339~341
- Guo Naiguo, Luo Xinmin, Hua Yingqun. The effects of laser shock processing on microstructure and properties of metal[J]. *Materials Review*, 2006, **20**(6): 10~13
郭乃国, 罗新民, 花银群. 激光冲击处理对金属微结构及其性能的影响[J]. *材料导报*, 2006, **20**(6): 10~13
- Wu Xiaoyu, Lin Xing, Lü Xiaowei *et al.*. Study on microstructure and mechanical properties of laser solid forming 17-4 PH stainless steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0203005
吴晓瑜, 林鑫, 吕晓卫等. 激光立体成形 17-4 PH 不锈钢组织性能研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0203005
- Zhou Liucheng, Li Yonghong, He Weifeng *et al.*. Computations of laser shock processing by smoothed particle hydrodynamics[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0803003
周留成, 李应红, 何卫锋等. 激光冲击强化数值计算中的光滑粒子法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0803003
- Gerd Lütjering, James C. Williams. Titanium[M]. 2nd edition. Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 97
- Zou Shikun, Gong Shuili, Guo Enming *et al.*. Laser peening of turbine engine integrally blade rotor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0601009
邹世坤, 巩水利, 郭恩明等. 发动机整体叶盘的激光冲击强化技术[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0601009
- Liu Huixia, Yang Kun, Wang Yun *et al.*. Research on micro-forming experiment of metal foil under laser driven flyer loading method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1292~1295
刘会霞, 杨昆, 王匀等. 激光驱动飞片加载金属箔板成形实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1292~1295
- Zhou Jianzhong, Xu Zengchuang, Huang Shu *et al.*. Effects of different stress ratios on fatigue crack growth in laser shot peened 6061-T6 aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0903006
周建忠, 徐增闯, 黄舒等. 基于不同应力比下激光喷丸强化 6061-T6 铝合金的疲劳裂纹扩展性能研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0903006
- Gu Yongyu, Zhang Yongkang, Zhang Xingquan *et al.*. Theoretical study on the influence of the overlay on the pressure of laser shock wave in photomechanics[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(11): 5885~5891
顾永玉, 张永康, 张兴权等. 约束层对激光驱动冲击波压力影响机理的理论研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(11): 5885~5891
- A. Akhtar, E. Teghtsoonian. Prismatic slip in α -titanium single crystals [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1975, **6**(12): 2201~2208
- Zhang Tingjie. Study of transformation of titanium alloys with electronic microscope (III) —— martensitic transformation [J]. *Rare Metallic Materials and Engineering*, 1989, **18**(4): 71~78
张廷杰. 钛合金相变的电子显微镜研究(III) —— 钛合金中的马氏体相变[J]. *稀有金属材料与工程*, 1989, **18**(4): 71~78
- Lu Fayun, Yang Ping, Meng Li *et al.*. Behavior of martensite reverse transformation in 18Mn TRIP steel during warm deformation [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, **46**(10): 1153~1160
鲁法云, 杨平, 孟利等. 18Mn TRIP 钢温变形过程中马氏体逆相变行为[J]. *金属学报*, 2010, **46**(10): 1153~1160
- C. Leyens, M. Peters. Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications [M]. Weinheim: Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003. 1~57
- Luo Xinmin, Ma Hui, Zhang Jingwen *et al.*. "Strain-screening" and "Constraint-breakdown" in laser shock processing [J]. *Materials Review*, 2010, **20**(3): 11~15
罗新民, 马辉, 张静文等. 激光冲击中的“应变屏蔽”和“约束击穿”[J]. *材料导报*, 2010, **20**(3): 11~15