Ti-6Al-4V 钛合金激光弯曲成形微观组织研究

燕 翔 李 虎 段 澎 谢慧娟
（中国三江航天集团红阳机械厂，孝感 432100）

摘要：以 1mm 厚 Ti-6Al-4V 合金薄板为对象，运用光学金相显微镜、电子探针、扫描电子显微镜、氮氢氧联合分析仪、显微维氏硬度计，研究了特定累积线能量下 90°弯曲角弯折区显微组织。结果表明，弯折区组织与累积线能量输入有关，当累积线能量在适当范围时，材料堆积增厚，极表层出现轻微复熔铸态组织，上层为板条马氏体 α′，中层为针状马氏体 α′，底层为长大粗化的（α+β）组织；距表层约 0.2mm 范围吸收间隙元素强烈致使硬度急剧提高并呈明显梯度；累积线能量输入过大，弯折区出现大面积复熔铸态组织并伴有裂纹产生。

关键词：钛合金；激光弯曲；累积线能量；显微组织；间隙元素

Laser Bending Microstructures of Ti-6Al-4V Titanium Alloy

Yan Xiang Li Hu Duan Peng Xie Huijuan
（China Sanjiang Aerospace Group Hongyang Machinery Plant, Xiaogan 432100）

Abstract：The structures and properties of laser bending at the angle of 90°with accumulative line energy (ALE) in Ti-6Al-4V sheets for thickness of 1mm were investigated by the means of metallurgical microscope, EPMA, scanning electron microscope (SEM), apparatus for determination of oxygen hydrogen and nitrogen, micro hardness tester. The results show that the structures of the heated area are related to the input of ALE as such: with an appropriate reach of ALE, material accumulation appears in heated area, slight remelting foundry structure in the skin layer, lath martensite α′ in the upper layer, plate martensite in the middle layer, and open grain structure (α+β) in the base layer. Obvious hardness profile appears at 0.2mm below the skin layer, while remelting foundry structure and crack appear all over with too much ALE.

Key words：titanium alloy；laser bending；accumulate line energy (ALE)；microstructure；clearance element

1 引言

Ti-6Al-4V 合金是一种典型的 α+β 型两相钛合金，它含有 6%α 稳定元素铝和 4%β 稳定元素钒。该合金综合性能优良，塑性和冲击韧性高，常被用于航空、航天等领域的重要零部件。但钛合金的高强度和高屈服强比使得常温下机械成形困难，成形精度低，极大限制了钛合金材料在航空航天工业中的推广应用。近年来，在金属塑性加工领域，激光弯曲成形技术正受到工程界的关注。激光弯曲成形技术是利用激光束加热金属板材表面，在热作用区域产生非均热应力，使板材产生塑性变形的工艺方法。

自此项技术问世以来，英、美、德、日等国就进行了研究，目前国外将其应用于各种板材和管材的成形，以及硅酸盐玻璃的弯曲成形，并通过数值模拟研究成形过程中的温度场及应力应变等方面。激光成形的优越性将在航空航天、汽车、造船和微电子等领域具有广阔的应用前景。

作者简介：燕翔（1977-），工程师，机械工程材料专业；研究方向：材料检测试验与失效分析。
收稿日期：2010-09-10

激光成形技术完全依靠热应力，完成一个工件的变形，在多次扫描加热过程中，关于弯折区组织和性能的研究报道很少。钛合金特殊的热物理性能与力学性能决定了其激光成形技术的特点，有必要对弯折区组织特征和性能进行研究。本文以 Ti-6Al-4V 板材为对象，研究了热输入下材料微观组织，为优化钛合金激光成形工艺，进一步研究激光扫描下的钛合金弯曲变形机理提供了依据。

2 实验条件

选用 Ti-6Al-4V 钛合金板材，规格尺寸 130mm×55mm×1mm，产品标准 GB3621—88，退火（M）状态供应，运用电感耦合等离子发射光谱仪（ICP）和氮氢氧综合测定仪测得化学成分见表 1。

表 1 Ti-6Al-4V 钛合金主要化学成分 %

元素	Al	V	Fe	N	H	O
	6.1	3.9	0.12	0.008	0.008	0.12
标准值	5.5～6.8	3.5～4.5	≤0.30	≤0.05	≤0.015	≤0.20

激光器为光纤激光器，钛板置于材料为 Q235 号钢的垫板上，通过带有气道的压板压紧。成形过程中采用镭射头光斑调试选取激光光斑大小与激光头位置，实时测量板材的弯曲角，激光以双边环形循环扫描。钛合金化学性质活泼，在较低的温度下即易与空气中的氢、氧和氮发生反应，成形过程中必须在较长一段的高温区实行保护，为此，设计了保护气鼓吹装置，并以氩气为保护气对激光弯折区实施保护，Ti-6Al-4V 钛板激光成形件见图 1。

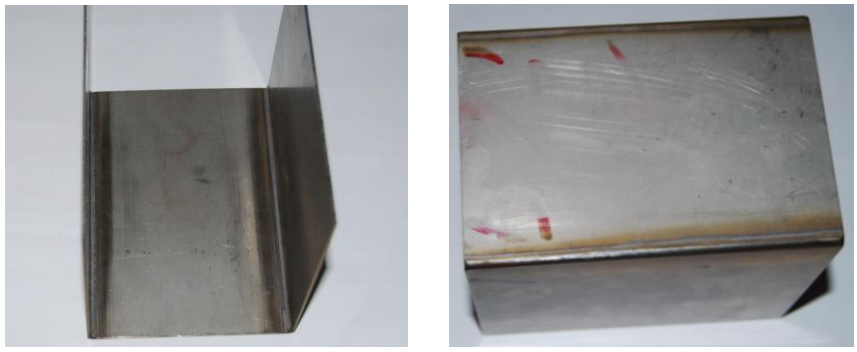

图 1 Ti-6Al-4V 钛板激光弯曲件形貌

3 试验过程及结果

3.1 激光弯折区组织特征

影响激光成形的因素主要来源于三个方面，即能量、材料的热物理性能及力学性能、板材的几何参数。在激光成形中，常用累积线能量这一综合指标来反映激光热输入。线能量为单位长度材料上的热输入，累积线能量定义为多次扫描的线能量累加，由 ALE=$N \cdot P/v$ 表示。它综合反映了扫描次数 N、激光功率 P 和扫描速度 v 的影响。

3.1.1 小累积线能量输入条件下的组织特征

在激光弯曲变形的过程中，不同的能量输入在扫描区横剖面形成不同形状的形貌特征。当激光器连续激光输出功率为 800W，循环 30 次，扫描速度 3m/min，弯折区呈“月牙”状，在材料厚度方向可见明显的堆积墩厚现象，堆积高度尺寸约 0.2mm，组织已发生明显变化，经金相腐蚀后呈亮白色，见图 2，组织中出现单相马氏体 α′组织，见图 3。

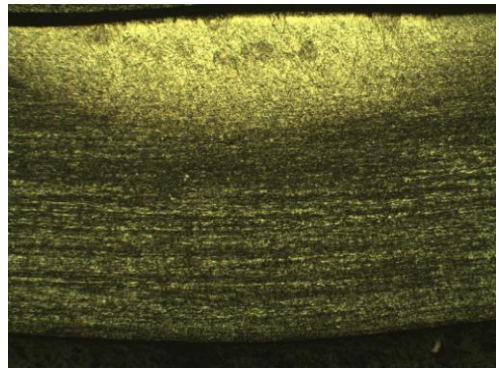

图 2 弯折区特征 50×

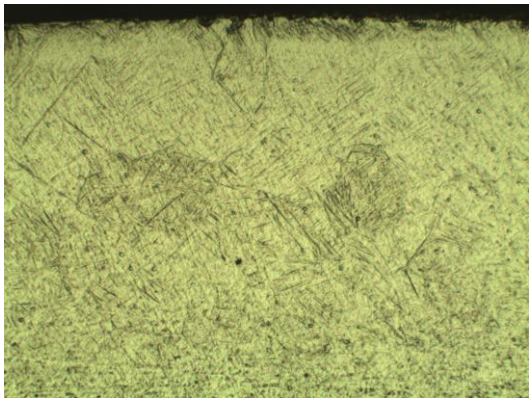

图 3　板条状马氏体 α′组织　250×

激光弯曲成形后，弯折区出现了明显的材料堆积增厚现象，组织中出现马氏体 α′。对加厚墩粗区域进行尺寸测量，发现厚度增加约 20%。关于墩粗现象，可以墩粗机理解释，即当激光束扫描直径很小，激光束的能量密度和扫描速度都较小时，板材在弯折区域的厚度方向温度梯度很小，材料在光斑周围的温度主要表现在平面方向，这样可使板材在弯折区的整个厚度方向上几乎均匀热透，温度梯度很小，不会产生反向弯曲。此时，由于弯折区材料的热膨胀受到周围冷态材料的阻碍而形成较高的内部压应力，致使材料产生堆积。冷却过程中，材料堆积不能完全复原，从而产生板厚方向的正应变，被加热件缩短，发生墩粗。墩粗的大小取决于材料的热膨胀系数和激光参数。

金相观察到弯折区出现单相马氏体 α′组织，表明材料加热温度较高，发生（α+β）/β 相变并进入 β 单相区，激光加热特点是热量集中，升温速度极快，（α+β）/β 转变时间极短，转变过热度较大，转变所需的温度远高于正常热处理组织转变温度。

3.1.2　适中累积线能量输入条件下的组织特征

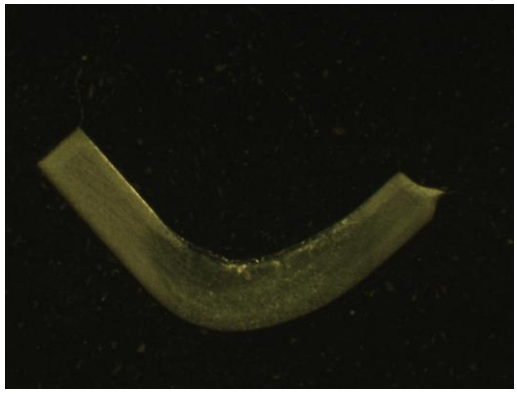

图 4　90°弯曲角激光扫描弯折区宏观形貌　10×

在弯曲成形角为 90°条件下，激光器连续激光输出功率 900W，当循环次数增加至 50 次时，扫描速度 3m/min，弯折收现面积扩大，扩展到整个厚度方向，见图 4，宏观可见明显粗晶特征，弯折区上层组织见图 5，可见原始的 β 相晶界，组织为马氏体 α′，α′相呈板条状。中层组织见图 6，组织亦为淬火马氏体 α′，α′相形态呈针状特征。底层组织见图 7，为长大粗化的（α+β）粗晶组织。

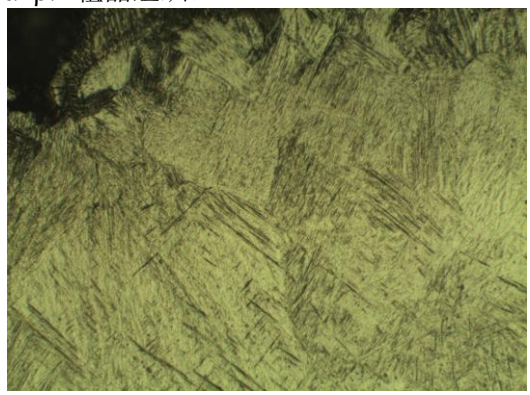

图 5　激光扫描弯折区上层板条马氏体组织　250×

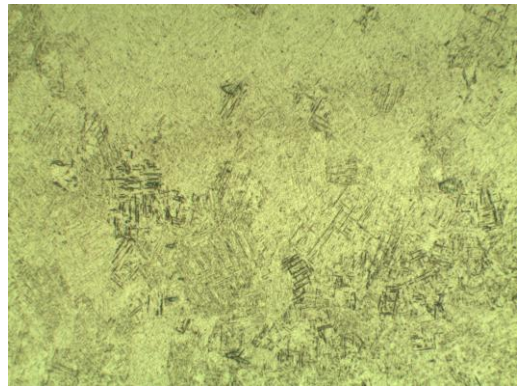

图 6　激光扫描弯折区中层针状马氏体组织　250×

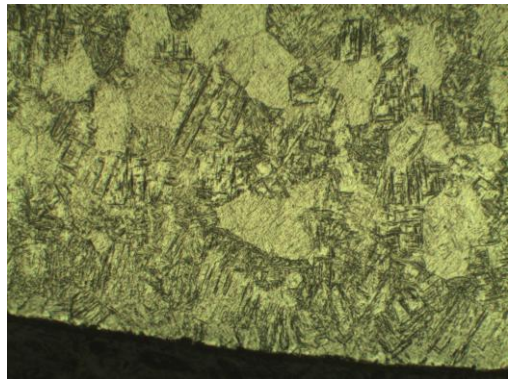

图 7　激光扫描弯折区底层粗晶特征　250×

弯折区与母材热影响区组织见图 8 和图 9，在影响区一侧，可见边界清晰，组织转变梯度大，由长大粗化的（α+β）组织急剧过渡到等轴状（α+β）母材组织。另一侧弯折区与母材存在明显的过渡组织，组织转变梯度相对较小，由长大粗化的（α+β）组织在逐

渐缓慢过渡到等轴状（α+β）母材组织，上层有 β 相出，板材原始组织见图 10，在初生的 α 相上分布着 β 转变组织，呈等轴状。

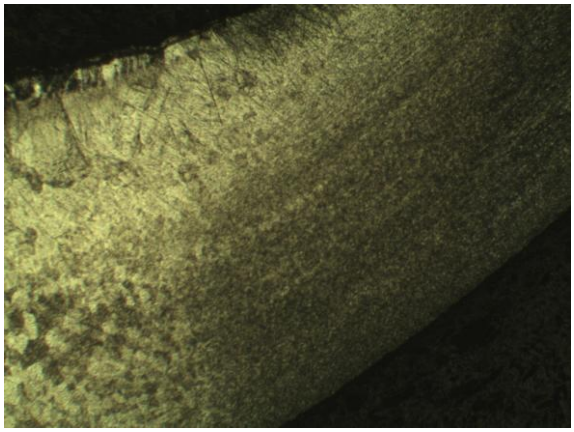

图 8　另一侧热影响区组织特征　50×

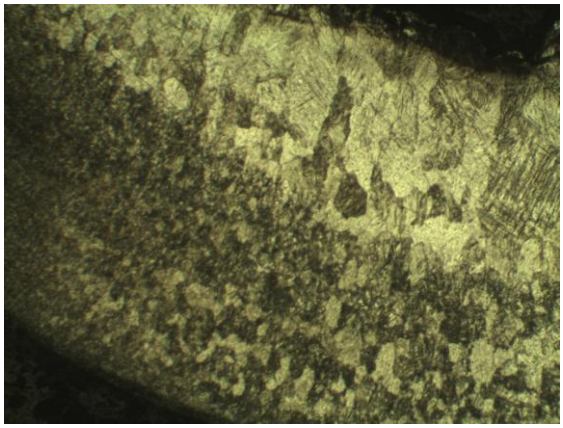

图 9　热影响区组织特征　50×

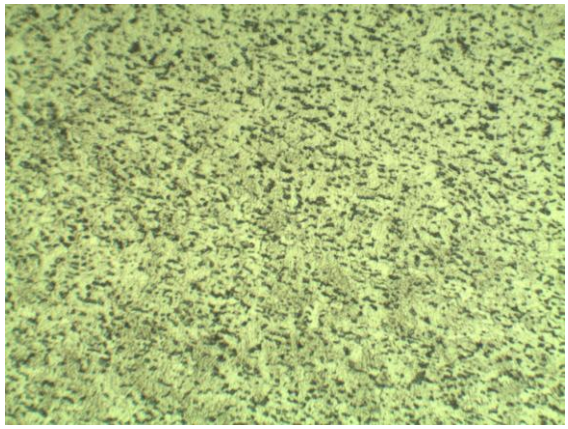

图 10　Ti-6Al-4V 钛板母材组织　500×

由以上试验可知，当累积线能量输入较合理的范围时，弯折区增大并扩大到整个厚度截面，金相组织在不同层面出现不同组织，上层为板条状马氏体 α′ 组织，中层为针状马氏体组织，底层为长大的（α+β）晶粒。在对弯折区过渡区观察发现，热影响区两侧均以粗晶组织过渡至母材，并呈不“对称”特征，一侧过渡区窄，另一侧较宽。母材呈现较好的组织，β 组织呈弥散状分布于 α 基体。

在弯折区与母材过渡区组织呈“不对称”状态，这主要与冷却条件有关。成形件一端固定在 Q235 钢的垫板上，另一端呈自由状态，在激光扫描的弯折区，不受约束的一端热量通过空气交换和垫板传导散失而冷却，另一受约束端热量几乎完全通过与垫板的热传导散失而冷却，由于钢垫板导热系数远大于空气，因此固定端冷却速度快，热影响区域小，组织过渡梯度明显，另一端冷却速度相对较慢，组织变化梯度小，热影响区域大，由此造成了组织转变的不对称特征。

3.1.3　大累积线能量输入条件下的组织特征

在激光扫描的过程中，如果热输入进一步加大，激光器连续激光输出功率 1200W，循环次数在 50 次以上时，扫描速度 3m/min，弯折区组织将发生明显变化，出现熔蚀特征，见图 11，熔蚀层约为厚度的四分之一，内侧可见熔蚀形成的凹坑。微观观察，可见复熔形成的铸态枝晶组织，并伴有裂纹产生，裂纹呈辐射状，多沿圆角内侧向外侧扩展，见图 12。

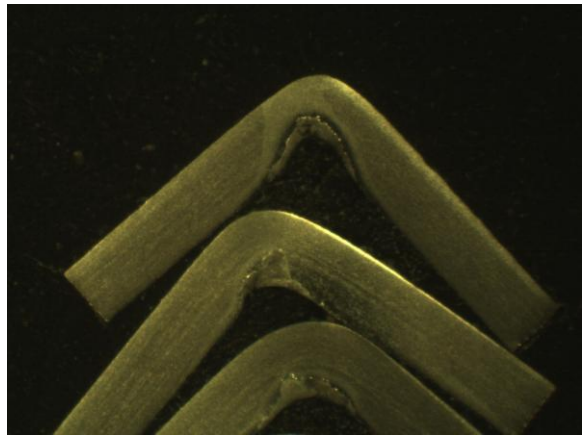

图 11　90°弯曲角激光扫描弯折区熔蚀宏观特征　10×

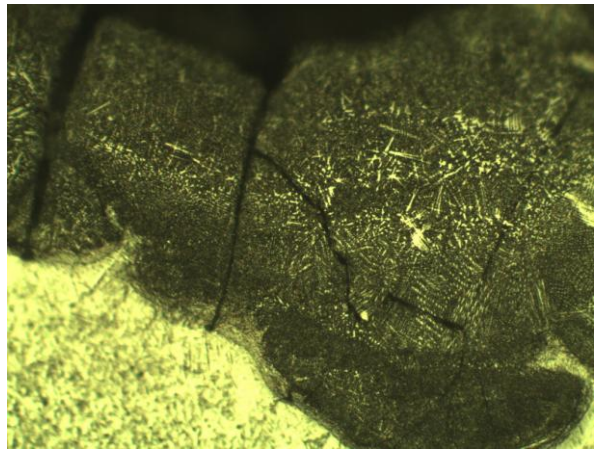

图 12　复熔及裂纹特征　250×

以上试验可知，当累积线能量进一步增大，弯折区出现类似焊接的复熔铸态组织，并形成辐射状热裂纹。

3.2 硬度测定及电子探针分析

对弯折区横剖面进行显微硬度测定，测定由外侧向内侧进行，测得硬度梯度曲线见图13。运用电子探针测定弯折区氧、氮间隙元素含量及线分布、面分布情况，结果在表层约0.2mm范围氮、氧含量出现明显浓度梯度，氧含量最高达2.7%，氮含量达到0.8%，氮、氧浓度分布见图14。

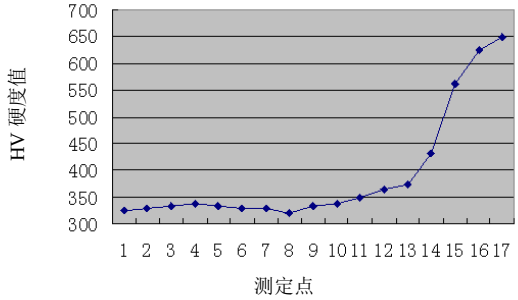

图13 加热中心区硬度梯度曲线

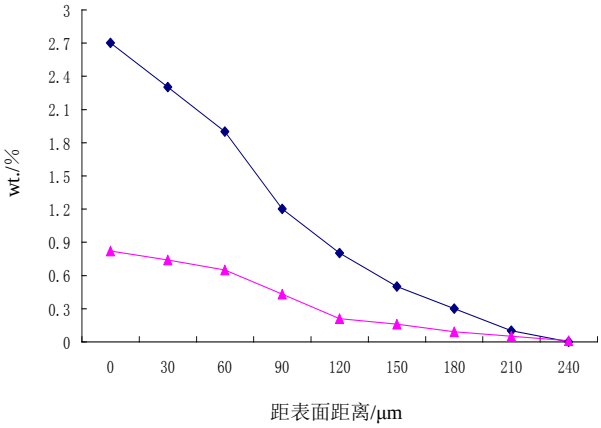

图14 高硬度区域氮、氧浓度分布图

弯折区硬度从底层往上层约0.8mm的范围，硬度梯度平缓，HV硬度值在330左右，高于母材约30，在弯折区距上表层约0.2mm范围，硬度值随着距上层距离的减小而急剧升高，在极表层达到650，表层氧、氮元素含量远高于基体。

钛合金硬度对间隙型杂质元素极为敏感，按经验公式，氧当量与硬度关系为：$HV=65+310\cdot O_{当}^{0.5}$，而 $O_{当}=O\%+2N\%+0.67\%$，将电子探针测定的含量代入公式计算硬度，算得HV硬度610，可见计算硬度与测定结果非常接近。

激光加热速度快，在进入β相区后，热量随后通过空气热交换和垫板热传导很快丧失，特别是垫板热传导，冷却速度极快，β相在Ms点（受较大过冷度影响，实际温度应低于正常转变的900℃）发生无扩散性转变，形成马氏体α′组织，α′相形态多呈板条状或针状。钛合金马氏体α′并不像钢那样能强烈提高硬度。钢中马氏体为碳在α相形成的过饱和间隙固溶体，碳在晶格中造成的畸变很大，而对于Ti-6Al-4V合金而言，马氏体α′由α稳定元素Al和β稳定元素V形成的金属元素过饱和置换固溶体，所引起的晶格畸变较小，所以强化作用小，故在对相变区组织进行硬度测定时，HV硬度值仅比母材提高约30。

在对相变区表层进行硬度测定时，硬度值发生突变并呈递增趋势，在表层最高达到650左右，远高于母材。通常情况下，单纯的热处理强化并不能将硬度大幅提高，HV硬度峰值也均在400以下。对于钛合金而言，间隙杂质元素含量对性能极为敏感，在众多杂质元素中，其中以氮、氢、氧元素对性能影响尤为显著，这些元素在钛合金中多形成间隙固溶体并引起晶格畸变。随着元素含量的升高，材料强度提高明显，塑性和韧性降低。钛合金化学性质活泼，在较低的温度下就易与空气中的氢、氧和氮发生反应，200℃时开始吸氢，400℃时开始吸氧，600℃时开始吸氮。激光光束扫描板材表面的温度在1000℃以上，弯折区吸气倾向强烈，由空气吸附氢、氧和氮元素引起的晶格畸变加剧，从而引起表层的硬度急剧提高，因高温停留时间短，热量散失速度快，间隙元素未充分向内层扩散，因此，高硬度区仅出现在表层一段较窄的范围内。

3.3 弯折区扫描电镜观察

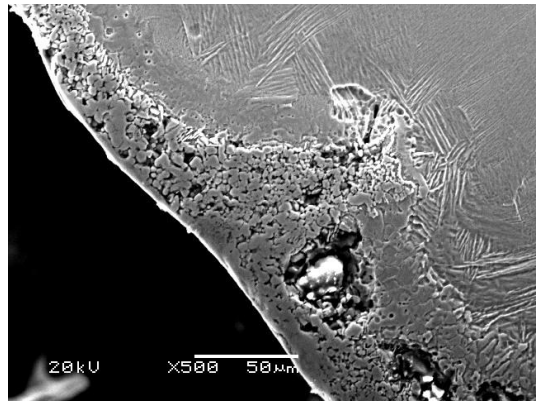

图15 极表层复熔形貌（SEM观察）

将弯折区横剖面清洁后放入扫描电子显微镜下观察，如图15所示，可见在表层约0.05mm范围发现

有复熔铸态组织出现。在对弯曲件弯折区内侧进行观察时发现，有剥落状的氧化膜出现，氧化膜呈灰黑色，表明表层加热温度极高，电镜观察更证实表层温度已达合金熔点，在此温度下，氧化膜已失去钝化作用，氧很快穿透膜层进入基体晶格，并引起晶格的畸变并导致脆化。

从激光成形件弯折区可看出内侧表面污染较为严重，可见呈黑灰色剥落状氧化膜，仅外侧可见蓝色、黄色和棕色的氧化膜，情况相对较好。陈英高级工程师系统研究了 TC4、TC11 等一系列钛合金的温色变化。研究表明，一般钛合金，在 300℃以上，表面颜色就开始稍稍变黄。随着温度的升高，逐渐变为黄色，400℃时基本为均匀分布的金黄色，500℃时稍发灰黄色，550℃为黄褐色，并稍偏蓝色，600℃为蓝色，再由 650℃的灰蓝色变为 750℃时的棕色，800～1000℃时，氧化膜由红棕色变为黑灰色，氧化膜的厚度增加，此时会发生大块剥落。激光成形时虽采取了氩气鼓吹保护的方式，但受工艺特点影响，在弯折区内侧氛围保护受到一定限制，导致内侧表层受到较严重的氧污染。

3.4 间隙元素氮、氢、氧含量测定

采用氮氢氧综合测定仪对弯折区的氮、氢、氧元素含量进行测定，结果见表 2。

表 2 间隙元素测定结果 %

间隙元素	N	H	O
母 材	0.008	0.008	0.12
弯折区	0.016	0.012	0.19

激光弯折区的氮氢元素含量均高于母材，其中，氮元素含量两倍于母材，氢和氧含量均高于母材约 60%。氮、氧都是提高（α+β）/β 相变温度，扩大 α 相区，属于稳定 α 元素，氢的含量应严格控制，少量的氢极易引起氢脆的发生。为保证材料的塑性和韧性，目前工业钛合金的中氢氧氮含量通常控制在 0.015%，0.15%，0.05%以下。激光成形的过程中，采取了惰性气体——氩气鼓吹进行气氛保护，由测定结果可知，采用氩气保护对防止弯折区免受污染起到了较好的作用，氢和氮含量均在工业控制的要求之下，仅氧含量略高。

4 结束语

a. 激光弯曲成形时弯折区出现了材料堆积墩粗现象，弯折区域的大小和形状与累积线能量有关。

b. 在 90°度弯曲角工艺条件下，弯折区呈现多种组织形态，上层为板条状马氏体 α′组织，并可见原始的 β 晶界；中层为针状马氏体 α′组织，底层为长大粗化的（α+β）组织；弯折区两侧的热影响区呈不对称状态，与垫板接触的一侧热影响区小，另一侧相对较大；弯折区极表层有轻微的复熔现象。

c. 激光弯曲成形后，弯折区硬度较母材有所提高，HV 硬度值高于母材约 30，在底层距上表层约 0.8mm 范围内，硬度值较均匀，无明显的梯度，在距表层约 0.2mm 范围内，硬度值呈明显的梯度，随着距离的减小硬度急剧提高，最高达 650。

d. 累积线能量过大，弯折区将出现复熔现象，并伴有裂纹产生。

e. 激光弯曲成形过程中，氩气鼓吹保护对防止弯折区免受污染及保证合金的力学性能起到了一定作用。

参考文献

1 陶春虎，刘庆泉，陶春虎，等. 航空用钛合金的失效及其预防[M]. 北京：国防工业出版社，2002. 9

2 B C 柯瓦连科. 金相试剂手册[M]. 李春志，等译. 北京：冶金工业出版社，1973

3 上海交通大学《金相分析》编写组. 金相分析[M]. 上海：国防工业出版社，1982. 4

4 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 上海：中国标准出版社，1989，4

5 Cheng J G, Zhang J, Chu C C, et al. Experimental study and computer simulation of fracture toughness of sheet metal after laser forming[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 24(12)：830～836

6 王秀风，Janos Takacs，Gyorgy Krallics. 薄板激光弯曲机理的研究[J]. 锻压技术，2001(4)：29～30

7 刘韧，季忠，张鹏，等. 板材激光成形及其研究进展[J]. 锻压设备与制造技术，2004，17(3)：17～21