第32卷第9期 中国有色金属学报 2022年 9月
Volume 32 Number 9 The Chinese Journal of Nonferrous Metals September 2022
DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42571

CMT电弧增材制造TC4钛合金的显微组织与力学性能

李长富[1]，郑鉴深[1]，周思雨[1]，杨　光[1]，王向明[2]

(1. 沈阳航空航天大学 航空制造工艺数字化国防重点学科实验室，沈阳 110136；
2. 沈阳飞机设计研究所，沈阳 110035)

摘　要：采用冷金属过渡(CMT)电弧增材制造技术制备了TC4钛合金样品，测试了沉积态试样的拉伸性能、冲击性能和疲劳性能，讨论电弧增材制造钛合金成形件的疲劳断裂机理。结果表明：经历CMT工艺条件下的快速熔凝过程后，钛合金成形件内宏观组织由外延生长的粗大β柱状晶组成，显微组织为细长α片层和网篮组织。成形件拉伸强度较高，达到锻件拉伸强度水平，但是塑性较低，略低于锻件塑性，且存在一定的各向异性，拉伸断口呈现半解理断裂与半韧性断裂特征。沉积态钛合金成形件具有良好的冲击性能，但冲击性能的各向异性并不显著。钛合金成形件的高周疲劳极限为460 MPa，疲劳源均形核于条状未熔合缺陷及气孔缺陷处。缺陷直径越大，距离表面越近，应力集中现象就越明显，导致样品具有较低的疲劳强度和疲劳寿命。

关键词：CMT电弧增材制造；TC4钛合金；显微组织；拉伸性能；疲劳性能
文章编号：1004-0609(2022)-09-2609-11　　**中图分类号：**TG441　　**文献标志码：**A

引文格式：李长富, 郑鉴深, 周思雨, 等. CMT电弧增材制造TC4钛合金的显微组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(9): 2609−2619. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42571
LI Chang-fu, ZHENG Jian-shen, ZHOU Si-yu, et al. Microstructure and mechanical properties of CMT wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(9): 2609−2619. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42571

电弧增材制造(Wire arc additive manufacturing, WAAM)以电弧为热源，将金属丝材熔化根据三维数字模型由点到面再到体实现零件的制造。与激光和电子束增材制造相比，制造效率高制造周期短，成形速度快，焊丝利用率高，零件尺寸限制少，有能力制造大型零件[1−3]。冷金属过渡技术(Cold metal transfer, CMT)是基于短路过渡技术的一种新型的焊接工艺，通过短路状态的控制，确保短路电流小，同时焊机的机械运动将焊丝抽回以确保液滴的正常滴落。CMT技术避免了常规的短路过渡模式下容易引起飞溅的现象，整个工艺过程在交替的冷热条件下进行，热输入远小于一般的MIG/MAG技术[4−5]。TC4钛合金属于α+β型钛合金，其密度小，具有较高的硬度、耐腐蚀性和抗拉强度，广泛应用在飞机机体、各种重要的承力构件、发动机叶片中[6−7]。因此，将CMT电弧增材制造技术应用于大型钛合金构件具有广阔前景。

目前，国内外学者针对CMT制备TC4合金的工艺参数、合金组织、力学性能等方面开展了一定的研究。陈伟[8]研究了CMT电弧增材制造TC4钛

基金项目：国家重点研发计划资助项目(2018YFB1105805)；国家自然科学基金资助项目(52005351)；沈阳航空航天大学国防重点实验室开放基金资助项目(SHSYS201902)
收稿日期：2021-10-24；**修订日期：**2021-12-09
通信作者：杨　光，教授，博士；电话：18040037100；E-mail：yangguang@sau.edu.cn

合金宏观晶粒演化规律、微观组织调控的方法，优化了CMT制造的TC4钛合金的力学性能。BERMINGHAM等[9]研究了包括热处理和热等静压在内的不同后处理方法对电弧增材制造TC4部件的显微组织和拉伸性能的影响，其中热等静压能够有效减少成形件孔隙度，但对强度和韧性的改善并不显著。李雷等[10]采用CMT电弧增材制造技术制造了TC4钛合金薄壁墙，并研究电弧增材过程的热输入、热循环和冷却速度对其显微组织特征的影响。马振书等[11]通过改变脉冲频率和热输入实现了对电弧增材试样组织和性能的调控，发现提高脉冲频率可使原始β晶粒细化，降低热输入可使α片层细化。上述研究多强调了CMT制备TC4样品的某种单一力学性能与工艺和组织的相关性，并未对样品的更多性能进行评价，尤其是缺乏对疲劳性能的论述。

疲劳性能是工程结构件最为关注的性能之一，航空构件更是如此。研究电弧增材制造TC4钛合金的疲劳性能具有重要意义。WANG等[12−13]研究了TIG焊接模式的电弧增材制造的TC4钛合金的高周疲劳性能进行评价与分析，结果表明，除了过早失效的缺陷试样外，其疲劳性能优于锻件水平。ZHANG等[14−15]研究了电弧增材制造TC4钛合金的微观组织和残余应力影响裂纹扩展的机理，发现在电弧增材制备的TC4钛合金沉积层中片层组织具有更高的抗裂纹性能。XIE等[16]研究了显微组织和裂纹扩展方向对电弧增材TC4试样疲劳裂纹扩展的影响，研究发现由于显微组织特征和疲劳裂纹扩展方向不同导致水平和垂直试样的疲劳裂纹扩展速率存在差异。综上所述，目前对于电弧增材制造TC4钛合金的疲劳研究较少，且CMT焊接模式的下电弧增材制造TC4成形件的疲劳研究未见报道。

本文以CMT电弧增材制造技术制备的TC4钛合金试件作为研究对象，研究其沉积态显微组织演化规律，评价其拉伸及冲击性能，着重分析高周疲劳性能及其与组织及缺陷之间的内在联系，为进一步探索电弧增材制造TC4钛合金组织调控及力学性能优化提供理论与数据支持。

1 实验

1.1 实验设备与材料

CMT电弧增材制造TC4钛合金实验试样由沈阳航空航天大学的电弧增材制造系统完成，电弧增材制造系统包括KUKA机器人、CMT4000 advanced冷金属过渡焊机、氧分析仪和局部惰性气体保护装置等设备所组成。保护方式采用有效防护体积为1000 mm×500 mm×500 mm刚性箱体+柔性高温塑料相结合的保护装置(见图1)。该装置可以有效避免全柔性保护装置由于打印温度过高或飞溅严重而造成的塑料破坏，并具有较强的灵活性。封罩后需要通过氧含量分析仪对封罩内的氧含量进行测量，使得氧含量＜1×10^{-4}后方可成形，氧含量分析仪位于检测位于箱体的顶部，由于惰性气体选用氩气，其密度高于空气，所以测量顶部氧含量以保证箱体内部整体氧含量达标。钛合金丝材选用标准TC4丝材，钛合金丝材成分如表1所示。

图1 CMT电弧增材制造系统照片

Fig. 1 Photo of CMT WAAM system

表1 TC4钛合金丝材成分列表

Table 1 TC4 titanium alloy-wire composition (mass fraction, %)

Al	V	Fe	O	N	H	Ti
6.3	4.34	0.18	0.15	0.004	0.007	Bal.

1.2 试样制备及观察

为保证其成形采用一元化当量为送丝速度特征曲线，钛合金矩形摆动焊接优化的参数为：扫描速度v为20 mm/s、扫描间距d为2.2 mm、送丝速度参考值v_f为8 m/min。首先使用电火花线切割机床对CMT电弧增材制造TC4钛合金试样进行切割取

样，选取试样放入镶嵌机中进行镶嵌，使用不同型号砂纸在试样表面进行打磨，然后使用抛光机对其进行抛光。利用 Kroll 腐蚀剂(HF、HNO_3、H_2O 的混合液，体积比为1∶6∶7)对试样进行腐蚀，腐蚀时间约为10 s。拉伸实验根据 GB/T 228.1—2010 标准进行，拉伸时采用位移控制，加载速率 2 mm/min；冲击试样执行标准为 GB/T 229—2007，缺口深度为 2 mm；采用 GX51OLYMPUS 光学成像系统(OM)观察显微组织；通过 ZEISSΣIGMA 扫描电子显微分析技术(SEM)分析断口形貌特征。拉伸冲击疲劳试样取样图如图2所示。

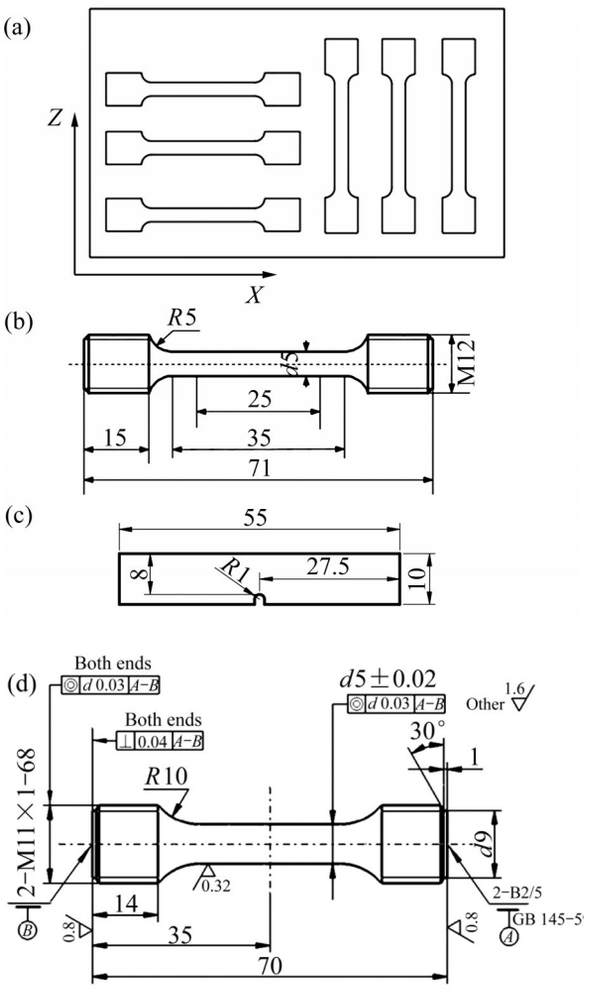

图2　拉伸疲劳试样取样图

Fig. 2　Tensile and fatigue specimen sampling diagram (unit: mm): (a) Sampling diagram; (b) Tensile specimen size; (c) Impact specimen size; (d) Fatigue specimen size

2　结果与讨论

2.1　无损检测

采用水浸式超声波探测仪对 CMT 电弧增材 TC4 钛合金成形件内缺陷进行探伤，不同深度的无损检测结果如图3所示。由图3可知，采用 CMT 电弧增材制造 TC4 钛合金构件通过超声波探伤能够在层间发现一定的气孔缺陷，但缺陷尺寸在微米或者亚微米量级，且不存在显著的连续性缺陷，内部缺陷为气孔缺陷。在电弧增材过程中气孔通常认为是由氢气引起的[17]。金属表面的氧化膜、表层油污，以及保护气中均可能存少量水分，增材过程中水分在电弧的作用下发生电离分解产生氢气。在高温状态下钛对氢的溶解度较高，与其他焊接模式相比，由于 CMT 焊接模式下的电流呈断续接通状态，导致单位时间内热输入少，因此熔池存在时间较短，

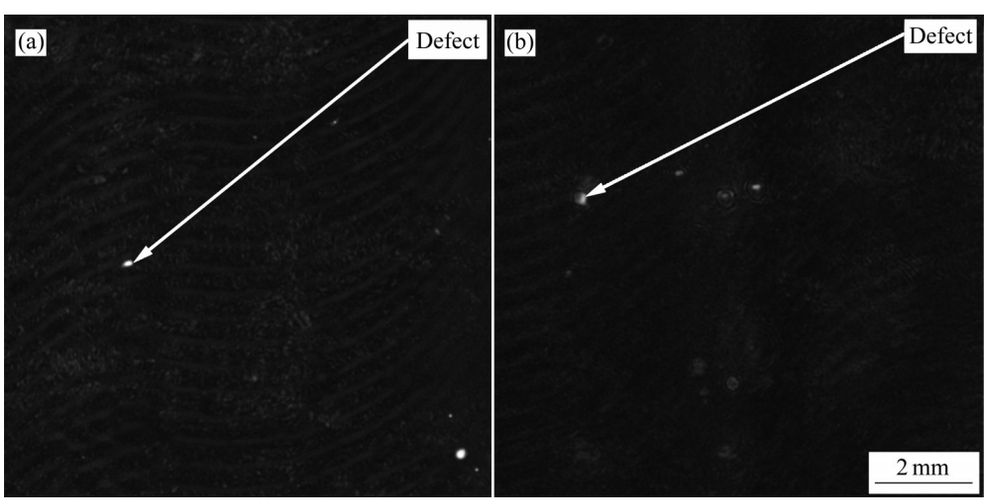

图 3　CMT 电弧增材试样超声探伤结果

Fig. 3　Ultrasonic inspection result of CMT WAAM sample: (a) 2 mm depth from surface; (b) 5 mm depth from surface

当熔池的凝结速度高于气泡从熔池内部逸出时的速度，致使气泡来不及逸出，气泡就会留在熔池中成为增材沉积层内气孔。在增材制造前对焊丝进行烘干，对基板进行打磨并使用酒精进行擦拭吹干以避免其中的油污与水分在增材过程中产生气孔。

2.2 沉积态形貌与组织特征

CMT 电弧增材制造 TC4 钛合金宏观及显微组织如图 4 所示。由图 4 可见，宏观组织均为外延生长，且贯穿多个沉积层的粗大 β 柱状晶(见图 4(a))。在进行增材制造的加工过程中，由于电弧的热输入较高，熔池内热量主要通过热传导的方式经由基体沿垂直向下的方式散失，温度梯度方向与沉积方向相反，晶体生长方向与温度梯度相反，从而形成贯穿沉积层的粗大 β 柱状晶。由于每个晶粒之间的晶体学取向存在差异，致使柱状晶呈现出明暗不同交替生长现象。电弧增材样品 β 柱状晶尺寸较大，其平均尺寸宽度和高度约为 8 mm 和 1.3 mm，并且近垂直于基板的表面。成形件上部显微形貌示如图 4(b)所示，为典型的网篮组织加片层组织。网篮组织是由大量细长条状 α 相相交错排列，由于试样最顶部沉积层无后续的热积累，沉积后冷速快，晶界 α 无法形成，片层状 α 以晶界为基点迅速向晶内生长。在成形件中部和底部由于多个热循环过程产生的热累积效应，其保温时间较长，所以当冷却速度较慢时，将使得原来在原始 β 晶界的相区上形核长大的晶界初生 α 相向晶内生长，形成位相相同、相互平行的长条状 α 片层组织，即魏氏体组织，如图 4(c)所示。

CMT 电弧增材制造钛合金 EBSD 取向图如图 5 所示。图 5(a)所示的 β 柱状晶内部主要由细长状 α 相和 β 相组成，α 板条厚度约为 3.00 μm，电弧热输入量较大，导致试样冷却速度较快，α 相生长时间较长，造成电弧试样 α 相长宽比较大。图 5(c)所示为 CMT 电弧增材制造钛合金 β 相晶界处，晶内 α 相比例明显多于 β 相，图 5(d)所示为带衬度图，其中蓝色线代表大角晶界，红色线条代表小角晶界，小角晶界比例明显小于大角晶界，造成这一现象是因

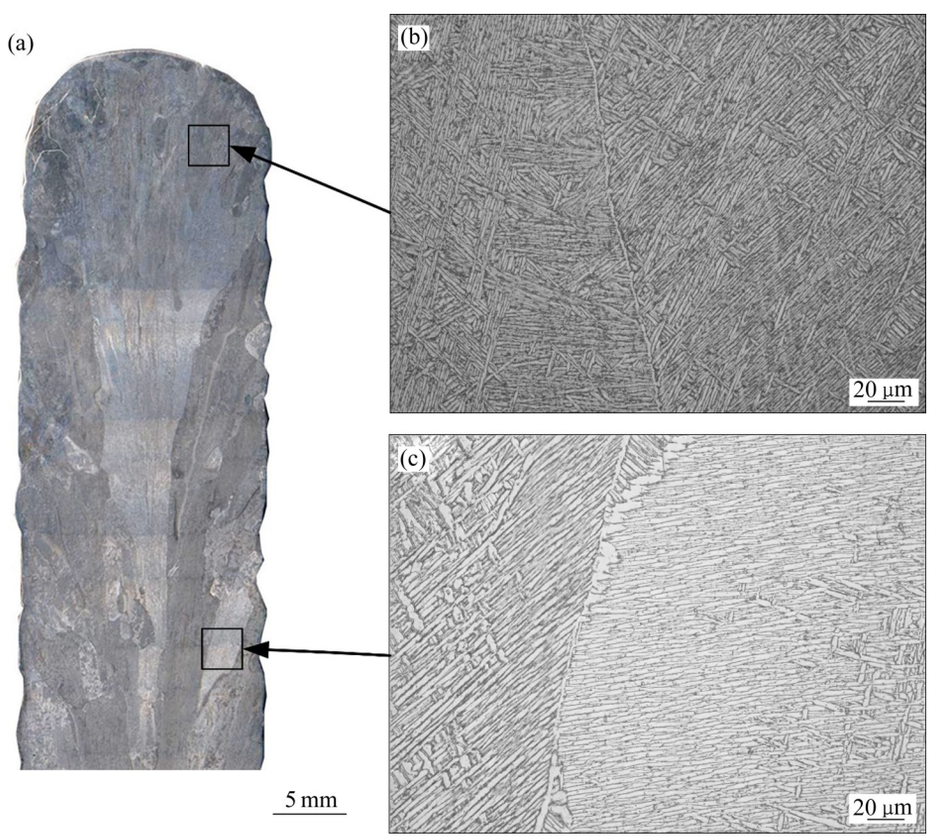

图 4 CMT 电弧增材制造 TC4 钛合金组织结构

Fig. 4 Microstructures of as-built CMT WAAM TC4 titanium alloy: (a) Whole components; (b) Upper microstructure; (c) Lower microstructure

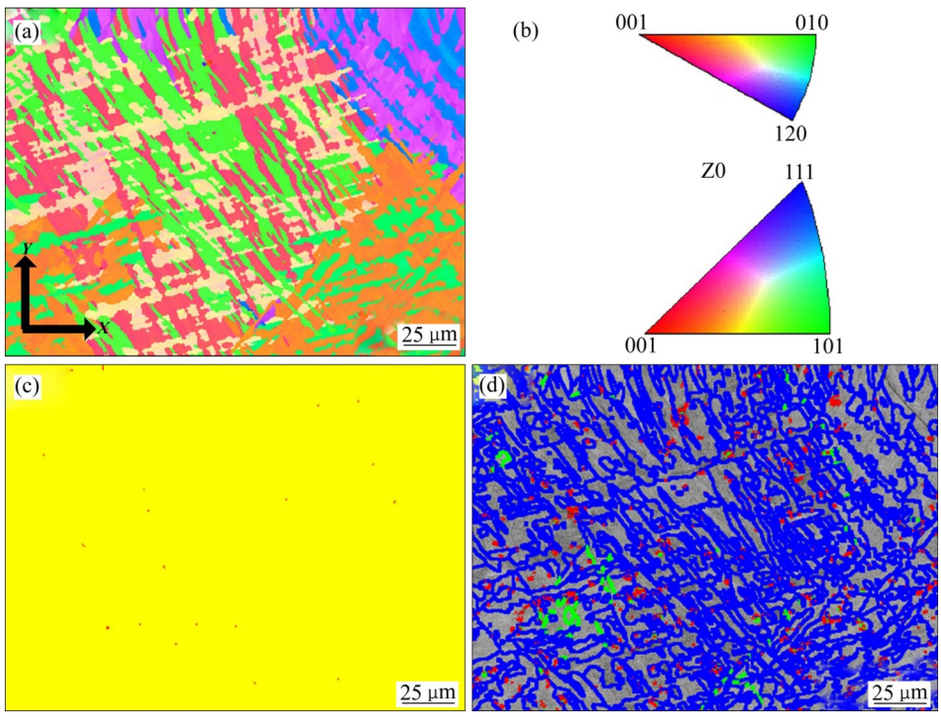

图5　CMT 电弧增材制造 TC4 钛合金 EBSD 取向图

Fig. 5　EBSD orientation map of TC4 titanium alloy prepared by CMT-WAAM: (a) α orientation map; (b) α orientation indication; (c) β distribution map; (d) Contrast map

为原始β晶粒在冷却过程中，α相以多种不同取向方式从β晶内析出，交汇后形成了明显的大角晶界。

2.3　拉伸性能

电弧增材制造TC4钛合金沉积态试样的温室拉伸性能如图6所示。由图6可知，X方向的抗拉强度均值为993 MPa，伸长率均值为8.3%；Z方向抗拉强度均值为967 MPa，伸长率为均值为10.1%，其强度高于锻件标准，但伸长率X方向略低于锻件的。这是由于锻件主要以双态组织和等轴组织为主，而电弧增材制造试样中主要为α片层组织和网篮组织，当合金中含有片层组织时其强度较高，但是塑性较差[18]。

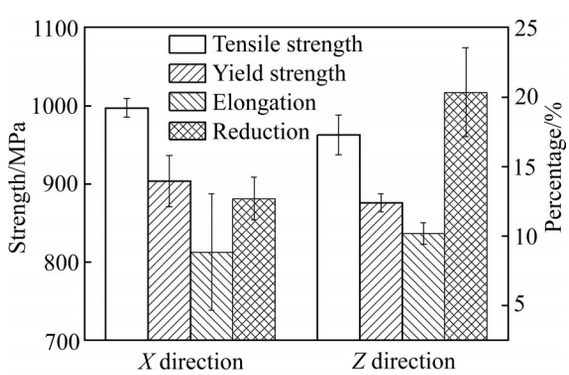

图6　CMT 电弧增材制造TC4钛合金的拉伸性能

Fig. 6　Tensile properties of TC4 titanium alloy prepared by CMT-WAAM

CMT 电弧增材试样的强度较高但塑性略低的主要原因如下：TC4的塑性变形主要是通过滑移进行的，滑移变形能力与α相的长宽比有关，α相的长宽比越高滑移变形能力越差，从而导致其塑性较低[19]。此外，CMT 电弧增材试样内的气孔也会降低其塑性，在拉伸试验过程中试样中的气孔缺陷会成为内部裂纹扩展的裂纹源，随着拉伸实验的进行在拉伸力的不断增大，内部裂纹逐渐扩大汇聚并沿着晶界进一步扩展，从而降低了试样的塑形[20]。

由于CMT 电弧增材制造TC4钛合金的初生β柱状晶晶界近似于平行于Z方向，当沿Z方向拉伸时，β柱状晶长轴受力，力的作用与晶界方向一致，易于滑行开动，塑性增强；当沿X方向拉伸时，β柱状晶短轴受力，力的作用方向与晶界方向近似呈90°，晶界阻碍滑移运动，强度增加塑性降低，所以在X方向上具有更高的强度，在Z方向上具有更好的塑性。

图7所示为电弧增材制造TC4钛合金不同方向的试样拉伸断口形貌。沿*Z*轴取样时(见图7(a))，断口中存在韧窝，其断裂机制存在韧性断裂，断口微观形貌中韧窝较浅且大，说明其塑性一般；沿*X*轴取样时(见图7(b))，断口中存在解理台，其断裂机制存在解理断裂，表明电弧增材试样的塑性较差，与图6中数据相符合。

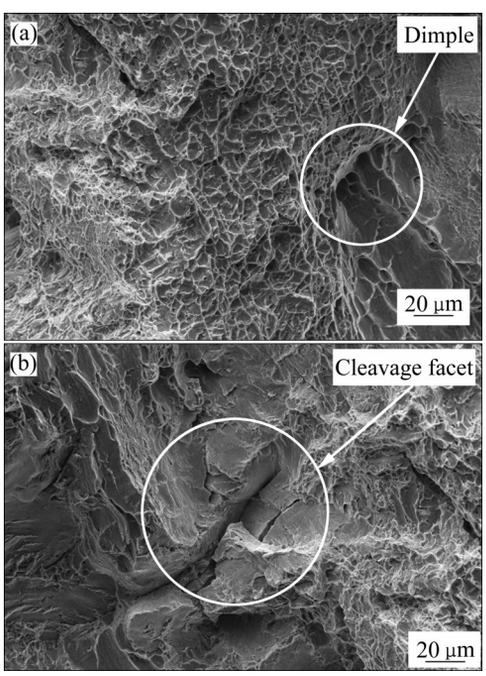

图7 不同取样方向的拉伸试样断口微观形貌

Fig. 7 Tensile fracture morphologies of tensile samples along different directions: (a) Ductile fracture sampled along *Z* axis; (b) Cleavage fracture sampled along *X* axis

2.4 冲击性能

沿CMT电弧增材制造TC4钛合金不同方向的进行U型缺口试样冲击样品制备，并测得冲击吸收能量值，*X*和*Z*向分别进行了3次测试。其中，沿着*X*方向的平均值为31.2 J，沿着*Z*方向的平均值为31.9 J，电弧增材制造TC4钛合金沿*XY*方向及*Z*方向的冲击性能差异不大，*X*方向的略高于*Z*方向的。

电弧增材制造TC4钛合金冲击断口如图8所示。冲击断口韧窝较深，断口起伏明显，撕裂棱明显，表现出较好的冲击性，其裂纹扩展主要以沿α片层断裂，其断裂行为为韧性断裂，并且*X*方向与*Z*方向的韧窝大小相似，断裂形式相同，与表2中数据相吻合。

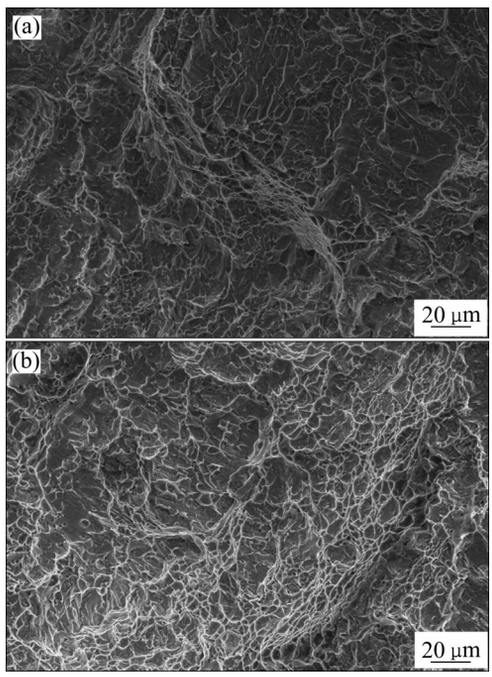

图8 CMT-WAAM制备的TC4钛合金冲击断口显微组织

Fig. 8 Impact fracture microstructures of TC4 titanium alloy prepared by CMT-WAAM: (a) *X* direction; (b) *Z* direction

2.5 疲劳性能

采用升降法对试样的疲劳寿命进行测定，结果表2所示。在应力比为*R*=0.06下的高周疲劳性能，

表2 CMT电弧增材试样疲劳寿命

Table 2 Fatigue life of CMT WAAM sample

Serial	Stress, σ/MPa	Cycle/10^3
1	500	150.2
2	480	4814.2
3	480	2047.7
4	460	4125.2
5	460	152.5
6	440	10000
7	440	2971.4
8	440	10000
9	440	10000
10	420	6662.3
11	420	10000
12	400	7126.2
13	400	10000
14	380	10000

疲劳试验的加载频率为120 Hz，加载波形为正弦波。载荷峰值应力分别设置为380、400、420、440、460、480和500 MPa，共计6个水平。测试了14根试样，最终测得的成形件高周疲劳极限为460 MPa。

图9所示为试样经过循环载荷作用后产生的疲劳断口整体形貌，由疲劳裂纹源区、疲劳裂纹扩展区、疲劳瞬断区3部分组成。由图9可以看出，疲劳断口整体不平整，呈现两个差异明显的区域，较光滑的裂纹源区和裂纹扩展区，较为粗糙的疲劳瞬断区，分界处呈起伏的台阶状。

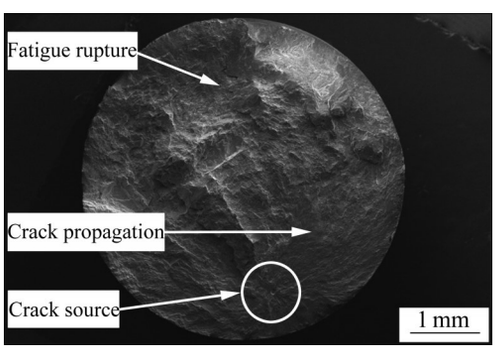

图9　CMT-WAAM制备的TC4钛合金疲劳断裂表面形貌(载荷峰值应力为480 MPa)

Fig. 9　Fatigue facture surface morphology of TC4 titanium alloy prepared by CMT-WAAM (σ_{max}=480 MPa)

图10所示为裂纹源区微观组织形貌。试样疲劳源形核于缺陷位置，缺陷的类型主要包括不规则的未熔合缺陷和球形气孔缺陷两种类型。疲劳性能对缺陷特征十分敏感，缺陷的存在使试样内部几何条件不连续，缺陷周围局部出现应力集中现象，塑性变形增大，周围滑移带位错大量增多，导致α/β相撕裂，萌生疲劳裂纹[21]。

图10(a)与(b)所示分别为480 MPa和460 MPa下由气孔萌生的裂纹源，图10(c)为440 MPa下由未熔合缺陷萌生裂纹源。试样近表面气孔疲劳源的尺寸在50 μm至130 μm之间，未熔合缺陷的长轴尺寸近似200μm。在峰值应力水平递减的条件下，试样a的寿命为4814.2×10^{3}周，高于试样b的寿命(4125.2×10^{3}周)，且远高于试样c的疲劳寿命(2971.4×10^{3}周)，这主要是由不同缺陷类型、大小、位置对电弧增材制造TC4钛合金的疲劳裂纹萌生速率的影响造成，结果表明直径越大，距离表面越

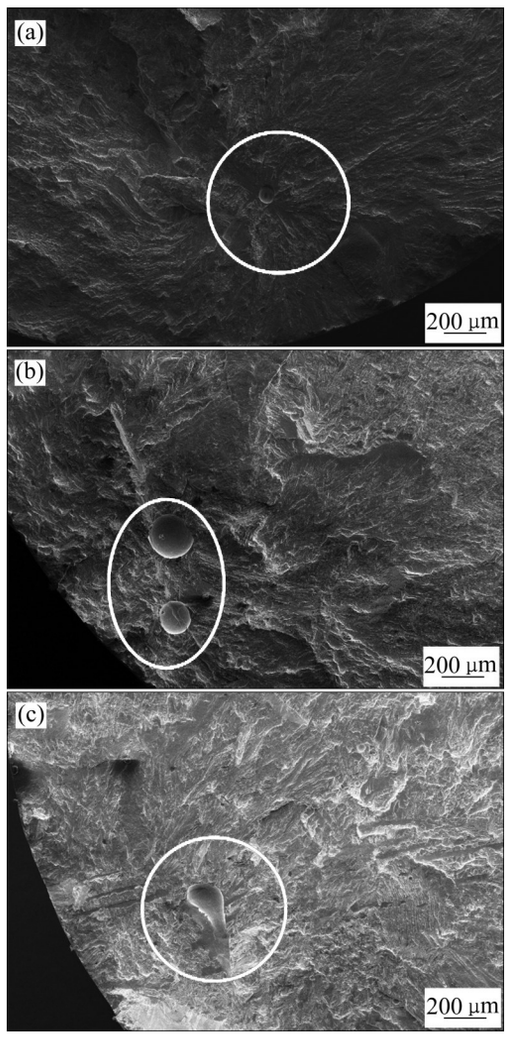

图10　不同应力下TC4钛合金样品疲劳源区微观形貌

Fig. 10　Fatigue source area micro morphologies of TC4 titanium alloy under different stress: (a) σ_{max}=480 MPa, N_f=4814.2×10^3; (b) σ_{max}=460 MPa, N_f=4125.2×10^3; (c) σ_{max}=440 MPa, N_f=2971.4×10^3

近，造成的应力集中越明显，试样的疲劳寿命也就越短。

图11所示分别为应力480 MPa和500 MPa下CMT电弧增材制造TC4钛合金疲劳试样裂纹扩展区试样的微观组织形貌，以疲劳辉纹和二次裂纹为主要表现形式，其中在每次载荷循环的作用下以裂纹源产生的疲劳裂纹为起点，持续延伸的距离被称为疲劳辉纹，裂纹扩展方向与载荷方向垂直，且疲劳辉纹相互平行图与裂纹扩展方向垂直。图11(a)与(b)所示分别为载荷480 MPa和500 MPa的裂纹扩展区试样，图11(a)中疲劳辉纹所占面积比例明显高于图11(b)中疲劳辉纹所占面积比例，二次裂纹

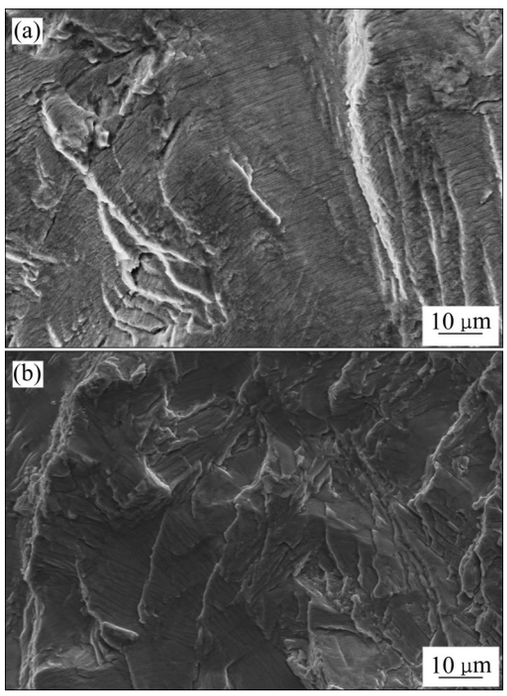

图 11 不同应力下 TC4 钛合金样品的裂纹扩展区微观形貌

Fig. 11 Crack propagation zone micro morphologies of TC4 titanium alloy under different stress: (a) σ_{max}=480 MPa, N_f=4814.2×10^3; (b) σ_{max}=500 MPa, N_f=150.2×10^3

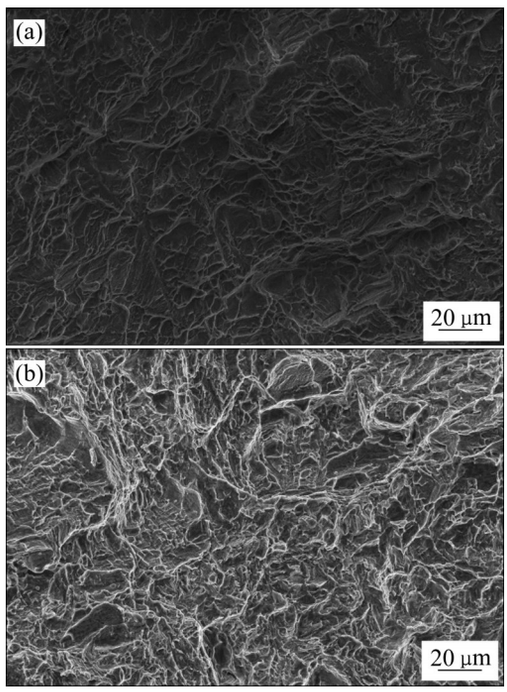

图 12 不同应力下 TC4 钛合金样品的瞬断区断口微观形貌

Fig. 12 Instantaneous fracture zone micro morphologies of TC4 titanium alloy under different stress: (a) σ_{max}=480 MPa, N_f=4814.2×10^3; (b) σ_{max}=460 MPa, N_f=152.5×10^3

的数量明显小于图 11(b)中的，疲劳辉纹的宽度也明显小于图 11(b)中的，其中图 11(a)中疲劳辉纹宽度约为 0.4 μm，图 11(b)中疲劳辉纹的宽度大约为 1.0 μm。由此可知，载荷大小与疲劳辉纹的宽度呈现出正相关，提高施加载荷，疲劳辉纹的宽度增大，相应的疲劳裂纹的扩展速率也会增大，同时，伴随着载荷的提升，二次裂纹和台阶的数量增多。由于疲劳裂纹是向四周沿着不同高度扩展，而不是沿着同一平面扩展，致使疲劳源附近裂纹表面在反复张开与闭合，进而发生摩擦形成裂纹扩展去的台阶[22]。

疲劳裂纹瞬断区指的是当试样疲劳裂纹扩展到残余部分不足以适应外加往复载荷时，疲劳裂纹失稳扩展，直至发生瞬断现象。图 12 所示为疲劳瞬断区微观形貌。均可观察到断口表面与裂纹源和裂纹扩展区的平整不同，其表面为凹凸不平的状态，且广泛分布密集的微孔聚集型韧窝，以及由于塑性变形形成的撕裂棱。这是由于片层组织内大量的位错现象阻碍了裂纹的扩展，晶界和试样以撕裂的方式连接在一起，同时晶界处产生较大的塑性形变，并逐渐形成了撕裂棱和韧窝。由此可知，试样发生断裂的方式为典型的塑性断裂。

3 结论

1) 采用 CMT 电弧增材设备制备了 TC4 钛合金试样，沉积态组织由粗大β柱状晶组成，长轴近似平行于沉积方向，晶内由细小的网篮组织和细长α片层组成。

2) CMT 电弧增材制造 TC4 钛合金试样其拉伸强度较高，但伸长率较低，呈中等各向异性。该合金具有良好的冲击性能，且取样方向对冲击性能影响较小。

3) 对 CMT 电弧增材制造 TC4 钛合金进行了高周疲劳极限测试，其疲劳极限值达 460 MPa(R=0.06)，其疲劳寿命低于锻件的主要原因为在 CMT 成形件内部存在气孔及未熔合等缺陷，且直径越大，距离表面越近，试样的疲劳寿命越低。

REFERENCES

[1] 田彩兰, 陈济轮, 董 鹏, 等. 国外电弧增材制造技术的研究现状与展望[J]. 航天制造技术, 2015, 4(2): 57−60.
TIAN Cai-lan, CHEN Ji-lun, DONG Peng, et al. Current state and future development of the wire arc additive manufacture technology abroad[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015, 4(2): 57−60.

[2] 刘奋成, 贺立华, 林 鑫, 等. 电弧沉积制造TC4钛合金的组织和力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(10): 1−5.
LIU Fen-cheng, HE Li-hua, LIN Xin, HUANG Chun-ping, BU Wen-de. Study on microstructure and mechanical properties of arc deposition manufactured TC4 titanium alloy[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(10): 1−5.

[3] 杨 光, 彭辉杰, 李长富, 等. 电弧增材制造5356铝合金的组织与性能研究[J]. 稀有金属, 2020, 44(3): 249−254.
YANG Guang, PENG Hui-jie, LI Chang-fu, et al. Microstructure and mechanical property research on wire+arc additive manufactured 5356-aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44(3): 249−254.

[4] 张 栋, 陈茂爱, 武传松. 高速CMT焊送丝速度和焊接电流波形参数的优化[J]. 焊接学报, 2018, 39(1): 119−122.
ZHANG Dong, CHEN Mao-ai, WU Chuan-song. Optimization of wave form parameters for high speed CMT welding of steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(1): 119−122, 134.

[5] 孙军浩, 曹 睿, 陈剑虹. 铝/钛异种金属冷金属过渡熔钎焊接头分析[J]. 焊接学报, 2015, 36(3): 51−54.
SUN Jun-hao, CAO Rui, CHEN Jian-hong. Analysis of welding-brazing joints of Ti/Al dissimilar metals obtained by cold metal transfer method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(3): 51−54.

[6] 谢 勇, 王福德, 从保强, 等. 电弧增材制造Ti-6Al-4V组织和力学性能调控研究进展[J]. 航空制造技术, 2020, 63(22): 54−62.
XIE Yong, WANG Fu-de, CONG Bao-qiang, et al. A review of microstructure and mechanical properties in wire arc additive manufactured titanium alloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(22): 54−62.

[7] 朱知寿. 我国航空用钛合金技术研究现状及发展[J]. 航空材料学报, 2014, 34 (4): 44−50.
ZHU Zhi-shou. Recent research and development of titanium alloys for aviation application in China[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 44−50.

[8] 陈 伟. CMT电弧增材制造TC4钛合金组织及力学性能调控[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019: 37−40.
CHEN Wei. Microstructure and mechanical property control of CMT arc additive manufacturing TC4 titanium alloy[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019: 37−40.

[9] BERMINGHAM M J, NICASTRO L, KENT D, et al. Optimising the mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by wire+arc additive manufacturing with post-process heat treatments[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 753(11): 247−255.

[10] 李 雷, 于治水, 张培磊, 等. TC4钛合金电弧增材制造叠层组织特征[J]. 焊接学报, 2018, 39(12): 37−43.
LI Lei, YU Zhi-shui, ZHANG Pei-lei, et al. Microstructural characteristics of wire and arc additive layer manufacturing of TC4 components[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 39(12): 37−43.

[11] 马振书, 陈广森, 吴倩茹, 等. 脉冲频率和热输入对电弧增材制造TC4钛合金形貌和组织的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(7): 2145−2150.
MA Zhen-shu, CHEN Guang-sen, WU Qian-ru, et al. Influence of pulse frequency and heat input on macrostructure and microstructure of TC4 titanium alloy by arc additive manufacturing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(7): 2145−2150 .

[12] WANG F D, WILLIAMS S, RUSH M. Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured Ti_6Al_4V alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57(5/6/7/8): 597−603.

[13] WANG F D, WILLIAMS S, COLEGROVE P, et al. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(2): 968−977.

[14] ZHANG J K, WANG X Y, PADDEA S, et al. Fatigue crack propagation behaviour in wire+arc additive manufactured Ti-6Al-4V: effects of microstructure and residual stress[J]. Materials & Design, 2016, 90: 551−561.

[15] ZHANG J K, ZHANG X, WANG X Y, et al. Crack path selection at the interface of wrought and wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V[J]. Materials & Design, 2016, 104: 365−375.

[16] XIE Y, GAO M, WANG F D, et al. Anisotropy of fatigue crack growth in wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V

[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 709: 265−269.

[17] 王 斌. TC4钛合金电弧熔丝沉积成形工艺研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018: 14−18.
WANG Bin. Study on wire and arc additive manufacturing forming process of TC4 titanium alloy[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2018: 14−18.

[18] 陈冬卅. TIG 电弧增材制造 TC4 组织和性能的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019: 10−15.
CHEN Dong-sa. Study on the microstructure and properties of TIG arc additive TC4[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019: 10−15.

[19] 杨 光, 王 斌, 钦兰云, 等. 激光和电弧增材制造 TC4 钛合金组织和性能研究[J]. 稀有金属, 2018(9): 903−908.
YANG Guang, WANG Bin, QIN Lan-yun, et al. Microstructure and properties of TC4 titanium alloy by laser deposition and wire & arc additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2018(9): 903−908.

[20] 何 智, 胡 洋, 曲宏韬, 等. 超声冲击电弧增材制造钛合金零件的各向异性研究[J]. 航天制造技术, 2016(6): 11−16.
HE Zhi, HU Yang, QU Hong-tao, et al. Research on anisotropy of titanium alloy manufactured by ultrasonic impact treatment and wire and arc additive manufacture[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2016(6): 11−16.

[21] 钦兰云, 吴佳宝, 王 伟, 等. 激光增材制造 Ti-6Al-2Mo-2Sn-2Zr-2Cr-2V 钛合金组织与疲劳性能研究[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 102−111.
QIN Lan-yun, WU Jia-bao, WANG Wei, et al. Microstructure and fatigue properties of Ti-6Al-2Mo-2Sn-2Zr-2Cr-2V titanium alloy fabricated by laser deposition manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 102−111.

[22] 范梅香, 熊 毅, 陈艳娜, 等. TC11 钛合金室温高周疲劳断口及微观组织[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 6−11, 4.
FAN Mei-xiang, XIONG Yi, CHEN Yan-na, et al. Fatigue fracture and microstructure of TC11 titanium alloy after high cycle fatigue at room temperature[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 40(1): 6−11, 4.

Microstructure and mechanical properties of CMT wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V titanium alloy

LI Chang-fu[1], ZHENG Jian-shen[1], ZHOU Si-yu[1], YANG Guang[1], WANG Xiang-ming[2]

(1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;
2. Shenyang Aircraft Design Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract: TC4 titanium alloy samples were fabricated by cold metal transfer wire arc additive manufacturing process(CMT-WAAM). Tensile strength, impact toughness and fatigue resistance of the samples in as-deposited condition were evaluated. The fatigue fracture mechanism of the WAAM-fabricated samples was investigated. The results show that the macrostructure of the as-deposited samples is consists of coarse β columnar crystals grown epitaxially. And the microstructure is composed of α elongated lamellar and basket weave due to low heat input of CMT. The tensile strength is high, reaching the level of forgings, but the plasticity is low, slightly lower than that of forgings, and there is a certain anisotropy. The tensile fracture shows semi-cleavage and semi-ductile fracture. The WAAM-fabricated samples, showing obvious anisotropy, have higher tensile strength and lower plasticity compared with the forgings. The tensile fracture shows a semi-cleavage and semi-ductile fracture mechanism. The as-deposited samples show a good impact ductility, and the anisotropy of impact performance is not significant. The fatigue limit of the as-deposited sample is 460 MPa, and the fatigue crack sources nucleate at strip-shaped incomplete fusion and pore defects. With the increase of the size of defect diameter and decrease of distance between sample surface and defect, stress concentration becomes more critical, which results in a lower fatigue strength and a shorter fatigue life.

Key words: CMT wire arc additive manufacturing; TC4 titanium alloy; microstructure; tensile strength; fatigue property

---

Foundation item: Project(2018YFB1105805) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project(52005351) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(SHSYS201902) supported by Shenyang Aerospace University National Defense Key Laboratory Open Fund, China

Received date: 2021-10-24; **Accepted date:** 2021-12-09

Corresponding author: Yang Guang; Tel: +86-18040037100; E-mail: yangguang@sau.edu.cn

(编辑　龙怀中)