

文章编号: 0258-7025(2010)03-0847-05

激光立体成形 TC17 钛合金组织研究

王俊伟 陈 静 刘彦红 赵晓明 张凤英 黄卫东

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 通过对激光立体成形(LSF)TC17 钛合金沉积态、去应力退火后状态及时效热处理后状态下的微观组织分析,研究了不同热处理方式对激光立体成形组织的影响。结果表明,沉积态组织由贯穿多个熔覆层呈外延生长的粗大柱状晶组成,柱状晶主轴垂直于激光扫描方向或略向扫描方向倾斜;沉积态原始 β 晶内组织是编织极其细密的网篮组织, α 板条长度为 $1\sim 3\ \mu\text{m}$,宽度仅 $0.1\sim 0.2\ \mu\text{m}$,为典型的 $\alpha+\beta$ 两相组织特征。沉积态试样经 $600\ \text{C}$ 保温 $1\ \text{h}$,炉冷(FC)退火后,显微组织无明显变化,仍为典型的网篮组织,但 α 板条长度和宽度有所增加,长宽比减小;经 $550\ \text{C}$ 保温 $4\ \text{h}$,空冷(AC)退火后,显微组织中出現部分等轴 α 相。对沉积态试样进行时效热处理时,随着保温时间的增加, α 相呈长大趋势,长宽比逐渐减小,当保温时间达到 $8\ \text{h}$ 时, α 相发生明显的球化,仅残留有少量的 α 板条。

关键词 激光技术;激光立体成形;TC17 钛合金;显微组织;球化;热处理

中图分类号 TG156.99;TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103703.0847

Research on Microstructure of TC17 Titanium Alloy Fabricated by Laser Solid Forming

Wang Junwei Chen Jing Liu Yanhong Zhao Xiaoming Zhang Fengying Huang Weidong

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract The influences of different heat treatments on the microstructure of TC17 alloy fabricated by laser solid forming (LSF) are investigated, while the alloy in three states of as-deposited, after relief annealing and aging treatment. The results indicate that the microstructure of as-deposited sample consists of coarse columnar grains which grow epitaxially from the substrate along the deposition direction z . The microstructure within the columnar grain shows typical $\alpha+\beta$ structure. The original β grains are composed of extremely fine basketweave microstructure. And the α phase has lath morphology, its length and width are $1\sim 3\ \mu\text{m}$ and $0.1\sim 0.2\ \mu\text{m}$, respectively. After furnace cooling (FC) annealing treatment following $1\ \text{h}$ holding at $600\ \text{C}$, the length and width of the α lath both increased while the length/width ratio decreased, but no other changes can be observed. The equiaxed α phase will be observed on the β matrix after air cooling (AC) annealing treatment following $4\ \text{h}$ holding at $550\ \text{C}$. During aging treatment, the α laths coarsen continuously as the aging time increases, whereas their length/width ratio gradually decreases. When the holding time reaches $8\ \text{h}$, most of the α laths are spheroidized, only a few left.

Key words laser technique; laser solid forming; TC17 titanium alloy; microstructure; spheroidization; heat treatment

1 引 言

钛合金由于具有比强度高、热强性好和耐腐蚀性好等优点,在航空、航天、航海、能源和医学等领域具有广阔的应用前景^[1~3]。TC17(Ti-5Al-2Sn-2Zr-

4Mo-4Cr)钛合金是一种富 β 的 $\alpha+\beta$ 型钛合金,是美国通用电器公司在 20 世纪 70 年代为先进的 GE 发动机所研制,该合金具有高强度、高韧性和高淬透性,又称为“三高”钛合金,主要用于制造发动机风

收稿日期:2009-11-16;收到修改稿日期:2009-12-11

基金项目:国家自然科学基金(50871089)资助项目。

作者简介:王俊伟(1984—),男,硕士研究生,主要从事 TC17 钛合金激光立体成形修复方面的研究。

E-mail: wangjunwei84@yahoo. cn

导师简介:陈 静(1970—),女,博士,副教授,主要从事激光制造与再制造方面的研究。

E-mail: phd2003cjj@nwpu. edu. cn(通信联系人)

扇、压气机盘件和大截面的锻件。

激光立体成形(LSF)技术是近 10 年发展起来的一项实体自由成形技术,能够实现高性能致密金属零件的快速无模近终形制造^[4]。该技术具有的增材制造特点能够较好地解决钛合金零件加工难题,同时制备的材料具有致密的微观组织和良好的综合性能^[5]。钛合金的性能与其微观组织有着密切的关联,而不同的热处理方式又会影响钛合金的微观组织,在不同的加热、冷却条件下,会使钛合金呈现不同的组织;通过适当的热处理方式可以控制热处理过程中的相变并获得预期的显微组织,从而改善钛合金的力学性能和工艺性能。本文拟开展研究激光立体成形 TC17 钛合金沉积态及不同热处理后获得的组织演化规律,旨在为 TC17 钛合金零件的激光修复合理热处理规范的制订提供研究基础。

2 实验材料及方法

激光立体成形实验是在西北工业大学凝固技术国家重点实验室建立的 LSF-I 型激光立体成形装备

表 2 TC17 钛合金粉末化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical compositions of the TC17 titanium alloy powder (mass fraction, %)

Al	Sn	Zr	Mo	Cr	Fe	Si	N	H	O	Ti
5.02	2.15	2.01	4.06	3.95	0.047	0.025	0.012	0.004	0.087	Bal.

表 3 激光立体成形 TC17 钛合金热处理方式

Table 3 Heat treating routines of the LSF TC17 alloy

Number	Temperature / °C	Holding time /h	Cooling method
1		As-deposited	
2	600	1	FC
3	550	4	AC
4	630	4	AC
5	630	5	AC
6	630	7	AC
7	630	8	AC

将激光立体成形制备的 TC17 试样线切割成 5 mm×8 mm×8 mm 的试样共 7 块,然后在 SX-4-

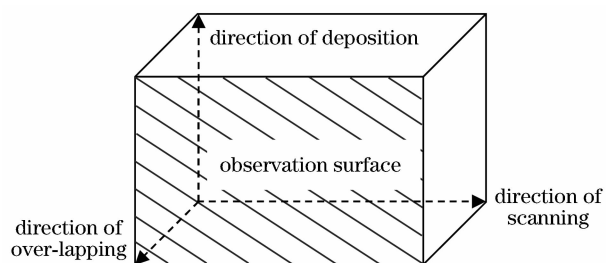


图 1 激光立体成形试样观察面

Fig. 1 Observation surface of LSF sample

上完成的。该装备由 RS-850 型 CO₂ 激光器, LMP-408 型 4 坐标数控工作台, DPSF-1 型送粉器, 同轴送粉喷嘴和惰性气体保护箱等组成。实验采用的主要工艺参数如表 1 所示^[6]。实验材料为纯钛基板和粒径为 -100~+200 目(75~150 μm)的 TC17 球形粉, TC17 球形粉化学成分如表 2 所示。实验之前将粉末材料在 150 °C 真空条件下(≤0.1 Pa)进行烘干处理,以减少粉末吸潮对成形质量带来的不良影响,用砂纸对纯钛基材表面进行打磨处理,再用丙酮清洗干净。

表 1 激光立体成形工艺参数

Table 1 Parameters of the process of LSF

Laser power /W	1600~2200
Scanning speed / (mm/s)	4~10
Powder feeding rate / (g/min)	3~5
Shielding gas flow / (L/h)	200~400
Laser spot diameter /mm	2.0~3.0
Overlap rate /%	30~50
Increment of z axis /mm	0.2~0.35

10 箱式电阻炉内进行热处理,选用的热处理规范如表 3 所示,冷却方式分别有炉冷(FC)和空冷(AC)。试样经腐蚀液[V(HF):V(HNO₃):V(H₂O)=1:3:50]腐蚀后采用 OLYMPUS GX71 型倒置式金相显微镜和 JSM-6390A 型扫描电子显微镜(SEM)观察试样的微观组织,观察面如图 1 所示。

3 实验结果与分析

3.1 沉积态显微组织

图 2 为激光立体成形 TC17 钛合金沉积态的显微组织,可以看出,激光立体成形 TC17 钛合金沉积态的宏观组织为贯穿多个熔覆层呈外延生长的粗大柱状晶,柱状晶主轴垂直于光束扫描方向或略向光束扫描方向倾斜。不同熔覆层之间呈层带结构。此外,宏观组织呈现明暗交替的现象,这是由于组织内晶粒不同的晶体学取向所致。

在光学显微镜下观察试样的显微组织时,当放大倍率达到 500 倍时,显微组织模糊不清,分析原因可能为:1) β 基体上 α 相没有析出或析出很少;2) β 基体上析出的 α 相极其细小,利用光学显微镜仅能观察到粗大柱状晶形貌,无法观察到晶内微观相结

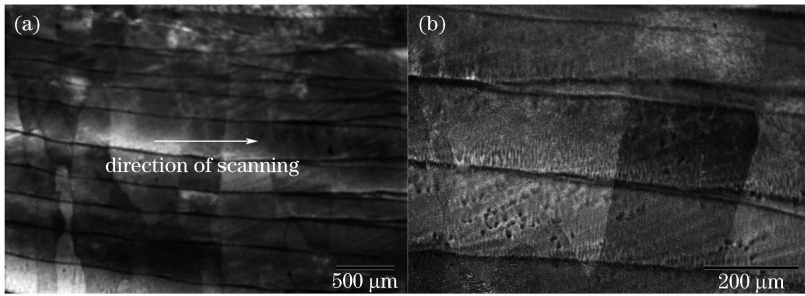


图 2 沉积态试样显微组织。(a) β 柱状晶的外延生长;(b) 试样中部显微组织

Fig. 2 Microstructure of the LSF TC17 titanium alloy

(a) epitaxial columnar β grains growth; (b) microstructure in the middle of the deposit

构,应使用更高放大倍率的扫描电子显微镜进行显微组织分析。

为了确定试样中 β 基体上是否有 α 相析出,对试样进行了 X 射线衍射(XRD)分析,结果如图 3 所示。从图 3 可以发现有多处 α 相峰出现,证明沉积态试样有较多 α 相析出,试样整体为 $\alpha + \beta$ 两相组成。同时对激光立体成形 TC17 钛合金沉积态试样进行 SEM 分析,结果如图 4 所示。由图 4 可以发现,沉积态的显微组织为编织细密的网篮组织, β 基体中析出的 α 相极其细小,长度约 $1 \sim 3 \mu\text{m}$,宽度约 $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 。由于晶内组织极其细小,因此在光学显微镜下无法观察到微观相结构。

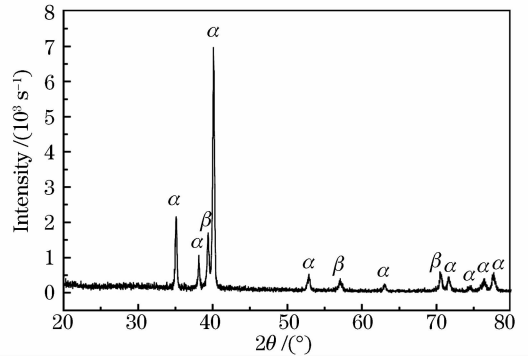


图 3 沉积态试样 XRD 分析

Fig. 3 XRD analysis of LSF TC17 alloy

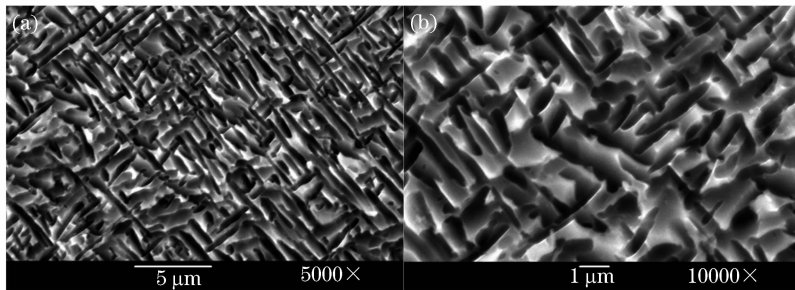


图 4 不同放大倍数下沉积态试样 SEM 照片

Fig. 4 SEM images of as-deposited sample with different magnifications

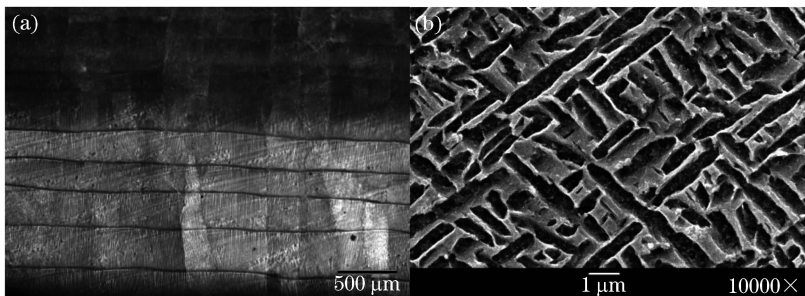


图 5 600 °C 保温 1 h, 炉冷退火后显微组织照片。(a) 光镜照片;(b) SEM 照片

Fig. 5 Microstructure photos of furnace cooling annealing after 1 h holding at 600 °C

(a) optical micrographs; (b) SEM photos

3.2 退火态显微组织

图 5 为激光立体成形 TC17 钛合金在沉积态和

去应力退火(600 °C, 1 h, FC)后的微观组织,从图 5 可以看出,沉积态试样经过 600 °C 退火后,宏观组织

仍呈现激光立体成形典型的柱状晶组织,退火对晶界连续性基本没有影响。显微组织无明显变化,仍为编织细密的网篮组织,只是 α 板条的长度和宽度均有所增加,长度增加到 $1\sim 4\ \mu\text{m}$,宽度 $0.2\sim 0.4\ \mu\text{m}$,且长宽比减小。

图6为激光立体成形 TC17 钛合金在沉积态和去应力退火($550\ ^\circ\text{C}$, 4 h, AC)后的组织照片,宏观组织较沉积态无明显变化,晶界保持连续性。比较图5(b)和图6(b)所示两张 SEM 照片可以发现,沉积态试样经过典型退火热处理方式 $550\ ^\circ\text{C}$ 去应力退火后^[7],部分 α 板条长度和宽度有所增大,且有大量的次生 α 相析出,同时在显微组织中还出现了部分等轴 α 相,等轴 α 长 $0.5\sim 1\ \mu\text{m}$,宽 $0.3\ \mu\text{m}$ 。这表明经过 $550\ ^\circ\text{C}$ 去应力退火热处理后,显微组织为 α 板

条和等轴 α 相的双态组织。

3.3 时效热处理显微组织

4[#]~7[#]试样保温温度为 $630\ ^\circ\text{C}$,冷却方式为空冷,分别保温4,5,7和8 h,热处理后4个试样的显微组织照片如图7所示。对比图7(a)~(d)可以发现,随着保温时间的增加, α 板条的长度和宽度都呈逐渐增大趋势,且长宽比逐渐减小。随着时效时间的增加,初生 α 相排列更加规则,在初生 α 相间析出了尺寸较小的次生 α 相。这主要是由于激光快速加热和快速冷却的特殊加工工艺造成了成形件的熔凝组织容易出现过饱和亚稳组织,随着时效过程的进行,亚稳组织分解,为初生 α 相的粗化和次生 α 相的生长创造了条件。因此,随着保温时间的增加,整个组织呈现出逐渐均匀化的特征。

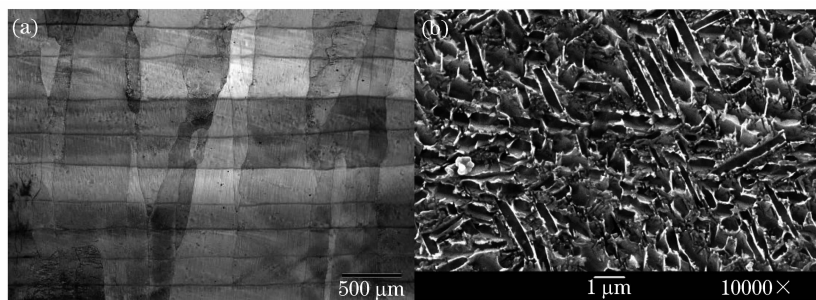


图6 $550\ ^\circ\text{C}$ 保温4 h,空冷退火后显微组织照片。(a)光镜照片;(b)SEM照片

Fig. 6 Microstructure photos of air cooling annealing after 4 h holding at $550\ ^\circ\text{C}$

(a) optical micrographs; (b) SEM photos

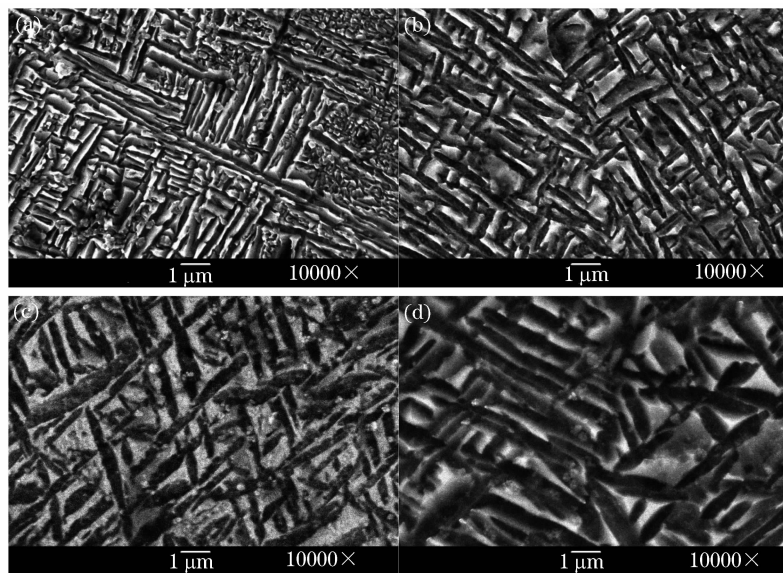


图7 时效热处理后的 SEM 照片

Fig. 7 SEM photos of aged heat treatment for different times. (a) 4 h; (b) 5 h; (c) 7 h; (d) 8 h

从图7(b)可以看出,经时效热处理后仍保留有明显的晶界,晶界处析出尺寸较小的次生 α 相。并且时效热处理后可以发现局部 α 相取向一致的 α 域。

3.4 热处理过程中 α 相的球化现象

如图8所示,在 $630\ ^\circ\text{C}$ 保温8 h,空冷时效热处理后的试样中部发现了 α 相的球化现象。如图所

示,试样经过8 h时效热处理后,大部分 α 相长度显著减小,宽度显著增加,长宽比接近1:1,仅残留有少量的细针状 α 相,即该热处理方式下试样部分区域的 α 相发生了明显的球化现象。

对于 α 相在热处理过程中粗化和球化的机制,国内外已经有很多研究成果。T. Seshacharyulu等^[8]和N. Stefansson等^[9,10]都对Ti-6Al-4V的静态球化动力学进行了深入的研究,N. Stefansson等^[10]还建立了900~950℃之间变形和退火后控制组织静态球化机制的模型。该机制将片状组织的球化划分为两个阶段,第一个阶段包括在变形和静态热处理初期晶界分裂造成的片状组织分离;第二个阶段发生组织的粗化。一般认为钛合金不经过变形很难发生片状组织的球化^[11]。对于激光立体成形TC17钛合金,由于沉积过程中经历了快速加热和快速冷却过程,试样内部保留了较大的残余应力^[12,13],因此,在本文时效8 h热处理方式下发生 α 相的球化现象很大可能是残余应力和热处理方式共同作用的结果。

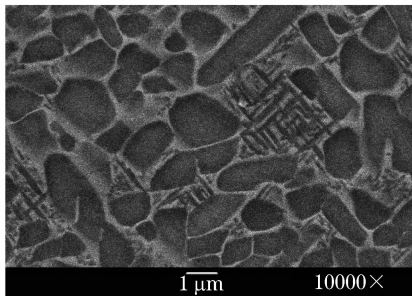


图8 时效热处理8 h后的SEM照片

Fig. 8 SEM photo of aged heat treatment for 8 h

4 结 论

利用光学显微镜、扫描电子显微镜对激光立体成形TC17钛合金沉积态、去应力退火和时效热处理3种状态下试样的微观组织进行了分析,得出以下结论:

1) 成形件的微观组织主要由贯穿多个熔覆层呈外延生长的粗大柱状晶组成,柱状晶主轴垂直于激光扫描方向或略向扫描方向倾斜;

2) 沉积态试样经600℃保温1 h,炉冷去应力退火后,显微组织为网篮组织, α 相有一定程度的粗化;经550℃保温4 h,空冷退火后,部分 α 板条转化为等轴 α ;

3) 沉积态试样经时效热处理后,随着时效时间的增加, α 相呈逐渐粗大趋势,长度和宽度均有所增

加,但显微组织仍为网篮组织。在时效热处理8 h后的试样中发现 α 相的球化现象,大部分 α 相长度减小,宽度增加,长宽比显著减小,但仍残留有少量针状 α 相。

参 考 文 献

- Duan Chuanbao. A briefing of development in titanium industry at home and abroad [J]. *Shanghai Steel Research*, 2003, (1): 39~42
段传宝. 国内外钛工业发展状况概述[J]. 上海钢研, 2003, (1): 39~42
- Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Shen Lida *et al.*. Research states of laser surface modification technology on titanium alloys [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(6): 24~32
王东生, 田宗军, 沈理达等. 钛合金激光表面改性技术研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(6): 24~32
- Wu Jiang, Gao Bo, Tan Hua *et al.*. Titanium base of complete denture fabricated with laser rapid forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1139~1142
吴江, 高勃, 谭华等. 激光快速成形技术制造全口义齿钛基托[J]. 中国激光, 2006, **33**(8): 1139~1142
- Huang Weidong, Li Yanmin, Feng Liping *et al.*. Laser solid forming of metal powder materials [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2002, (3): 40~43
黄卫东, 李延民, 冯莉萍等. 金属材料激光立体成形技术[J]. 材料工程, 2002, (3): 40~43
- F. G. Arcella, F. H. Froes. Producing titanium aerospace components using laser forming [J]. *Journal of Metals*, 2000, **52**(5): 28~30
- Yu Jun, Chen Jing, Tan Hua *et al.*. Effect of process parameters in the laser rapid forming on deposition layer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 1014~1018
于君, 陈静, 谭华等. 激光快速成形工艺参数对沉积层的影响[J]. 中国激光, 2007, **34**(7): 1014~1018
- Editorial Board of Practical Handbook for Engineering Materials. Practical Handbook for Engineering Materials. Titanium Alloy & Copper Alloy [M]. The second edition. Beijing: China Standards Press, 2001. 179~187
工程材料实用手册编辑委员会. 工程材料实用手册. 钛合金 & 铜合金[M]. 第二版. 北京: 中国标准出版社, 2001. 179~187
- T. Seshacharyulu, S. C. Medeiros, W. G. Frazier *et al.*. Microstructural mechanisms during hot working of commercial grade Ti-6Al-4V with lamellar starting structure [J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2002, **325**(1-2): 112~125
- N. Stefansson, S. L. Semiatin, D. Eylon. The kinetics of static globularization of Ti-6Al-4V [J]. *Metall. Mater. Trans. A*, 2002, **33**: 3527~3534
- N. Stefansson, S. L. Semiatin. Mechanisms of globularization of Ti-6Al-4V during static heat treatment [J]. *Metall. Mater. Trans. A*, 2003, **34**: 691~698
- Zhou Jun, Zeng Weidong, Shu Ying *et al.*. Influence of hot processing parameters on globularization of lamellar α in Ti-17 alloy [J]. *Hot Working Technology*, 2005, (1): 16~18
周军, 曾卫东, 舒滢等. 热变形参数对Ti-17合金的片状 α 球化过程的影响[J]. 热加工工艺, 2005, (1): 16~18
- Zhang Shuangyin, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Influence of heat treatment on residual stress of Ti-6Al-4V alloy by laser solid forming [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, **38**(5): 774~778
张霜银, 林鑫, 陈静等. 热处理对激光立体成形TC4残余应力的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, **38**(5): 774~778
- Jia Wenpeng, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Temperature/stress field numerical simulation of hollow blade produced by laser rapid forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1308~1312
贾文鹏, 林鑫, 陈静等. 空心叶片激光快速成形过程的温度/应力场数值模拟[J]. 中国激光, 2007, **34**(9): 1308~1312