

锻造设备对 TA15 钛合金显微组织及性能的影响研究

王 哲¹, 何 健¹, 张 帅¹, 刘程程², 郭明辉¹

(1. 陕西宏远航空锻造有限责任公司, 陕西 咸阳 713801; 2. 北京星航机电装备有限公司, 北京 100074)

摘 要:采用 Deform 软件对 TA15 钛合金在液压和锤压锻造条件下的变形进行模拟并采用两种锻造设备进行生产对比, 结果表明: 采用 Deform 软件液压模块对 TA15 钛合金进行锻造, 等效应变沿厚度方向呈对称分布, 中心位置等效应变最大, 而采用锤击模块进行模拟, 近下模位置等效应变较小, 近上模具位置等效应变较大。TA15 钛合金锻件中心位置片层 α 相厚度均粗于表层片层 α 相, 采用 400 kJ 对击锤生产的 TA15 钛合金锻件, 相较于 100 MN 油压机生产锻件, 片层 α 相厚度较小。TA15 钛合金锻件表层位置抗拉强度均高于其中心位置, 采用 400 kJ 对击锤生产的 TA15 钛合金锻件抗拉强度较高。

关键词:TA15 钛合金; 锻造设备; Deform 模拟; 片层 α 相; 力学性能

中图分类号: TF823, TG115

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)01-0080-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.01.012

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
聊
科
研
与
作
者
互
动

Influence of forging equipment on microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloy

Wang Zhe¹, He Jian¹, Zhang Shuai¹, Liu Chengcheng², Guo Minghui¹

(1. Shaanxi Hongyuan Aviation Forging Co., Ltd., Xianyang 713801, Shaanxi, China; 2. Beijing Xinghang Electro-mechanical Equipment Co., Ltd., Beijing 100074, China)

Abstract: Deform software were employed to simulate hydraulic press and hammer press forging processes of TA15 titanium alloy, and two kinds of forging equipment were used to produce TA15 titanium alloy forgings. The results show that when hydraulic module of deform software is used to deform TA15 titanium alloy, the equivalent strain distributes symmetrically along the thickness direction, and the equivalent strain at the center is the largest. However, the equivalent effect near the lower die becomes smaller and the equivalent effect near the upper die becomes larger. The center thickness of lamellar α phase is higher than that of surface. The thickness of lamellar α phase is fine than produced by 400 kJ counter hammer of TA15 titanium alloy. The tensile strength of TA15 titanium alloy forgings at the surface is higher than that of center. The tensile strength of TA15 titanium alloy forging produced by 400 kJ counter hammer is higher.

Key words: TA15 titanium alloy, forging equipment, deform simulation, lamellar α phase, mechanical properties

收稿日期: 2021-08-19

作者简介:王哲 (1987—), 男, 陕西咸阳人, 博士, 高级工程师, 主要从事大型飞机发动机锻件研制及新型高强高韧钛合金材料研究, E-mail: tianchenzhe@163.com。

0 引言

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性好、良好的生物兼容性等优点被广泛应用于航空、航天、船舶、医疗等领域^[1-3]。TA15 钛合金是一种高铝当量近 α 合金, 名义成分 Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V, 是我国科研人员在前苏联 BT-20 基础上改进而成^[4-6]。该合金兼有 α 型和 $\alpha+\beta$ 型钛合金的优点, 如良好的热加工性、热强性和可焊接性, 较高的室温以及中温强度, 可在 450 ~ 500 ℃ 长期使用, 而被应用于整体隔框、进气道格栅防护罩和中央翼下壁板等部件^[7-8]。

航空结构钛合金主要采用锻造为主的成型方式, 近 α 及 $\alpha+\beta$ 型钛合金在 $\alpha+\beta$ 相区锻造获得的双态组织具有优异的综合性能, 其中变形量和变形温度决定了初生 α 相含量和体积分数, 锻造和热处理冷却方式决定了 β 转变组织的形态^[9-10]。近些年, 国内外对该合金进行了深入的研究, 张旺峰研究了 TA15 钛合金大型锻件退火温度和保温时间对室温和 500 ℃ 高温拉伸性能的影响关系^[11]; 曹京霞通过比较两个 ($\alpha+\beta$) 两相区轧制的 TA15 钛合金环形件的显微组织和力学性能, 分析了两个环形件的工艺控制特征及微观组织对力学性能的影响^[12]; 徐文臣

采用热模拟压缩试验研究了 TA15 钛合金的动态热压缩行为及其机理^[13]; 欧阳德来基于位错理论探讨了 TA15 钛合金在大应变条件下的加工硬化率曲线及动态再结晶行为^[14]。

目前, 锻造设备主要分为液压和锤压两种, 液压机采用近静压方式进行材料变形, 而锤压采用冲击方式使材料获得变形能, 国内外针对两种锻造方式对 TA15 钛合金组织及力学性能影响关系的研究鲜有报道。该合金淬透深度仅为 15 ~ 20 mm, 锻件表面与中心组织和性能差异较大^[15]。笔者针对某 TA15 钛合金自由锻件力学性能偏低的问题, 采用 Deform 软件分别进行了 TA15 钛合金锻件在液压和锤击两种锻造条件下的变形模拟, 分析了不同变形参数下 TA15 钛合金显微组织及力学性能的影响关系, 为后续该类产品工艺设计提供理论依据。

1 试验材料及方法

试验采用宝钛集团提供的经三次真空自耗电弧熔炼的 TA15 钛合金铸锭, 铸锭经 β 相区开坯和 ($\alpha+\beta$) 相区锻造成 $\varnothing 200$ mm 规格的棒材, 化学成分见表 1。该炉批 $[Mo]_{eq}=3.39$, $[Al]_{eq}=7.2$, 采用淬火金相法测得相变温度 995 ℃。

表 1 TA15 钛合金化学成分
Table 1 Chemical compositions of TA15 titanium alloy %

Ti	Al	V	Mo	Zr	C	Fe	Si	O	N	H
Bal.	6.83	2.26	1.81	2.22	0.006	0.047	0.024	0.11	0.006	0.002 5

图 1 为棒材显微组织, 可以看出, 初生 α_p 相分布于 β 相基体上, 初生 α_p 相含量约 55%, 呈球状或蠕虫状, 形态均匀。

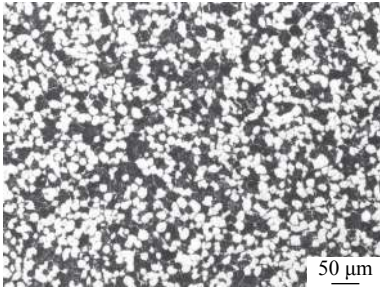


图 1 TA15 钛合金棒材显微组织
Fig. 1 Microstructure of TA15 titanium alloy bar

采用 Deform 软件对 TA15 钛合金不同锻造设备变形过程进行模拟, 并采用 $\varnothing 200$ mm 规格 TA15 钛合金棒材在 100 MN 油压机及 400 kJ 对击锤进行锻件生产, 锻后热处理制度: 850 ℃, 2 h, AC, 研究

锻造设备对其显微组织及力学性能影响关系。具体模拟参数及锻造工艺见表 2。室温拉伸试样采用 $\varnothing 13$ mm $\times$ 71 mm 标准拉伸试样, 在 Instron 万能试验机上进行拉伸性能检测。金相试样经去除氧化层、预磨、抛光后, 采用 $V(HF): V(HNO_3): V(H_2O)=1:2:7$ 的 Kroll 腐蚀液进行侵蚀, 显微组织观察采用 Leica DMI3000M 金相显微镜进行。

表 2 TA15 钛合金锻件变形参数
Table 2 The experiments conditions of TA15 titanium alloy forging deformation

试验条件	润滑方式	模具温度/℃	加热温度/℃	变形量/%
锤击模块	0.3	300	975	35
液压模块	0.3	300	975	35
400 kJ对击锤	石墨粉	300	975	35
100 MN油压机	石墨粉	300	975	35

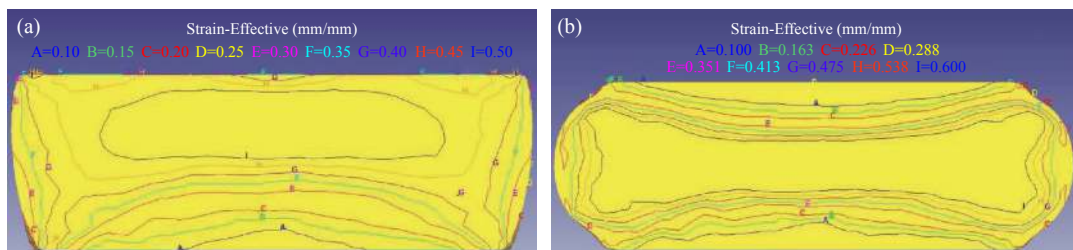
注: Deform 软件进行锤击模拟时, 采用总打击能量的 70%; 400 kJ 对击锤的变形采用 0.7 GPa 风压; Deform 软件进行液压模拟和 100 MN 油压机锻造均采用 1 mm/s 变形速率。

2 结果与分析

2.1 采用 Deform 模拟的 TA15 钛合金锻件等效应变

图 2 为采用 Deform 软件的锤击模块和液压模块对 TA15 钛合金变形模拟后等效应变分布, TA15 钛合金等效应变分布可分为三个区域, 难变形区、

易变形区以及小变形区。在相同变形量条件下, 锻件的最大等效应变量差异较小。但三个区域等效应变分布特征不同, 采用锤击模块进行模拟, 锻件大变形区靠近上模区域, 而下模区域等效应变较小。采用液压设备参数条件进行模拟, 锻件等效应变沿厚度方向呈对称分布, 上下表层为小变形区 (等效应变 ≤ 0.1), 中心部位为大变形区 (等效应变 ≥ 0.5)。



(a) 400 kJ 对击锤; (b) 100 MN 油压机

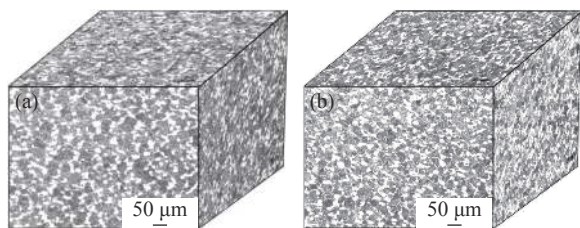
图 2 TA15 钛合金不同锻造设备条件 Deform 模拟等效应变分布

Fig. 2 The deform simulate equivalent strain of TA15 titanium alloy at various deformation equipments

TA15 钛合金在不同设备进行锻造后等效应变分布特征不同, 其主要原因在于, 在液压锻造过程中, 上下模具与锻件持续接触, 锻件与上下模具之间发生热传导现象, 能量散失相同, 因此等效应变沿厚度呈对称分布。而采用锤击设备进行锻造, 上模与锻件进行短暂接触后立即分开, 而下模与锻件持续接触, 靠近上模部位热量散失较小, 变形过程中等效应变较高, 小变形区主要集中于靠近下模位置。

2.2 锻造设备对 TA15 钛合金显微组织的影响

图 3 为不同锻造条件下 TA15 钛合金锻件 3D 显微组织。可以看出, 显微组织中球状初生 α_p 相和片状 α 相分布于 β 相基体, 初生 α_p 相含量约 25%, 三个方向显微组织差异较小。



(a) 400 kJ 对击锤; (b) 100 MN 油压机

图 3 不同锻造设备条件下锻件 3D 显微组织

Fig. 3 The 3 direction microstructure of TA15 titanium alloy at various deformation equipments

图 4 为不同锻造设备条件下沿厚度方向不同等效应变区域显微组织, 为避免锻造过程中由于模具温度较低对锻件产生冷模组织对性能分析的偏差, 锻件表层位置取样在距离下模具 20 mm 处进行, 以

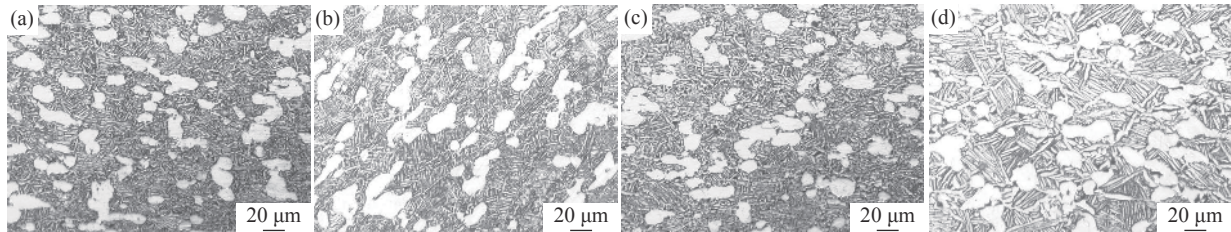
及在锻件沿厚度方向中心位置取样。可以看出, 经 400 kJ 对击锤进行锻造后, 表层 20 mm 处 (等效应变 0.2) 显微组织片层 α 相细小且杂乱排列 (片层厚度约 1.6 μm); 中心位置 (等效应变 0.5) 片层 α 相比表层片层 α 相粗大 (片层厚度约 1.8 μm); 经 100 MN 油压机进行锻造后, 靠近下模具表层 20 mm 处 (等效应变 0.1) 显微组织球状初生 α 相较为细小, 片层 α 相细小且杂乱排列, 但比 400 kJ 对击锤锻造后锻件表层 20 mm 处的片层 α 相粗 (片层厚度约 2.0 μm); 中心部位片层 α 相比表层片层 α 相粗大 (片层厚度约 2.6 μm), 与 400 kJ 对击锤显微组织演变特征相同, 呈短棒状。

TA15 钛合金经不同锻造设备条件下生产的锻件显微组织中片层 α 相形貌差异较大, 其主要原因在于采用 400 kJ 对击锤进行锻造, 变形速率较快, 温降过程中析出的片层 α 相仅发生动态回复过程, 未发生长大现象^[16], 形成细小杂乱的片层 α 相组织 (图 4a 和 b); 而采用 100 MN 油压机进行锻造, 变形速率较低, 变形过程中析出的片层 α 相发生动态回复再结晶过程, 变形速率越低, 动态回复再结晶过程约充分^[17], 形成排列整齐且粗大的片层 α 相组织 (图 4c 和 d)。

TA15 钛合金锻件不同取样位置显微组织中片层 α 相形貌差异较大, 其主要原因在于, 钛合金在锻造过程中由于温降析出大量片层 α 相, 中心部位变形量较大 (等效应变 0.5), 片层 α 相发生动态再结晶

过程,片层 α 相析出、长大,并且锻后中心部位冷却速率较慢,大量二次 α 相析出并附着在片层 α 相上并长大,因此在锻件中心部位形成粗大的片层 α 相

组织。靠近模具位置在锻造过程中冷却速率较大,且变形量小(等效应变 0.1),锻后冷却较快,形成细小针状片层 α 相组织^[18]。



(a) 400 kJ 对击锤锻造后锻件表面; (b) 400 kJ 对击锤锻造后锻件心部;
(c) 100 MN 油压机锻造后锻件表层; (d) 100 MN 油压机锻造后锻件心部

图 4 不同锻造设备 TA15 钛合金锻件沿厚度方向显微组织

Fig. 4 The microstructure of TA15 titanium alloy along thickness at various deformation equipments

2.3 锻造设备对 TA15 钛合金锻件力学性能的影响

表 3 为不同锻造设备条件下分别沿厚度方向不同位置取样进行力学性能测试结果,由表 3 可知,不同位置取样的采用 400 kJ 对击锤进行锻造的 TA15 钛合金抗拉强度均高于 100 MN 油压机锻造的锻件。在同一锻造设备上锻造的锻件其力学性能与取样位置也有重要影响,采用 400 kJ 对击锤锻造后锻件抗拉强度可达 991 MPa,而采用 100 MN 油压机锻造后锻件抗拉强度仅为 965 MPa,锻件表层抗拉强度比中心抗拉强度高约 10 MPa。

表 3 不同锻造设备条件下不同取样位置 TA15 钛合金锻件力学性能

Table 3 The mechanical properties of TA15 titanium alloy at various deformation equipments and sampling location

锻造设备	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%	取样位置
400 kJ对击锤	991	920	15.0	47	位置1
	980	895	16.5	46	位置2
100 MN油压机	965	877	18.0	49	位置1
	945	836	17	49	位置2

注:位置1指厚度方向距离下模20 mm处;位置2指厚度方向中心位置。

钛合金 α 与 β 相界面的结合能较弱,微裂纹通常沿着 α/β 相界面处扩展,当裂纹扩展方向与 α/β 相界面控制一致时,裂纹沿 α/β 相界面方向扩展。细小的片层 α 相存在大量 α/β 相界面,为裂纹的萌

生提供了大量裂纹形核源,降低了应力集中现象^[19]。当显微组织中大量 α 相以片层组织形式存在,片层 α 相集束的不同取向阻碍了裂纹扩展,当裂纹穿越集束边界时改变方向,导致裂纹分叉和二次裂纹的萌生,这些过程均需消耗更多的能量^[20],因此 400 kJ 对击锤锻造后的 TA15 钛合金表面和心部均具有较高的强度,且表层位置强度比中心位置抗拉强度约高 20 MPa。

3 结论

采用 Deform 软件对 TA15 钛合金液压和锤击两种锻造过程进行模拟以及采用两种锻造设备进行生产,结果表明:

1) 采用 Deform 软件液压模块对 TA15 钛合金进行模拟,等效应变沿厚度方向呈对称分布,中心位置等效应变最大;而采用锤击模块进行模拟,近下模位置等效应变较小,近上模具位置等效应变较大。

2) TA15 钛合金锻件中心位置片层 α 相较表层片层 α 相粗大;采用 400 kJ 对击锤生产的 TA15 钛合金锻件,相较 100 MN 油压机生产锻件的片层 α 相厚度要小。

3) 采用 400 kJ 对击锤生产的 TA15 钛合金锻件强度较高,表层位置强度比中心位置抗拉强度约高 20 MPa。

参考文献

- [1] Niinomi M, Akahori T, Takeuchi T, *et al.* Titanium alloy[J]. Materials Science & Engineering. C, Biomimetic and Supramolecular Systems, 2005, C25(3): 417-425.
- [2] Zhu Zhishou. Research and development of new aviation high performance titanium alloy material technology[M]. Beijing:

- Aviation Industry Press, 2013.
(朱知寿. 新型航空高性能钛合金材料技术研究与进展[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.)
- [3] Bruni S, Martinesi M, Stio M, *et al.* Effects of surface treatment of Ti-6Al-4V titanium alloy on biocompatibility in cultured human umbilical vein endothelial cells[J]. *Acta Biomaterialia*, 2005, 1(2): 223-234.
- [4] Wei Zhijian. Study on isothermal forging process of TC11 titanium alloy compressor disk[J]. *Mechanic Works (Hot Working)*, 2003, (3): 49-50, 52.
(魏志坚. TC11钛合金压机盘等温锻造工艺研究[J]. *机械工人(热加工)*, 2003, (3): 49-50, 52.)
- [5] Sha Aixue, Li Xingwu, Chu Junpeng. Ordinary annealing of TA15 titanium alloy[J]. *Rare Metals*, 2003, 27(1): 213-215.
(沙爱学, 李兴无, 储俊鹏. TA15钛合金的普通退火[J]. *稀有金属*, 2003, 27(1): 213-215.)
- [6] Wang Z, Wang X, Zhu Z. Characterization of high-temperature deformation behavior and processing map of TB17 titanium alloy[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2017, 692: 149-154.
- [7] Li Miaoquan, Li Xiaoli, Long Li, *et al.* Thermal deformation behavior and processing diagram of TA15 alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2006, 35(9): 1354-1358.
(李淼泉, 李晓丽, 龙丽, 等. TA15合金的热变形行为及加工图[J]. *稀有金属材料与工程*, 2006, 35(9): 1354-1358.)
- [8] Li Xingwu, Sha Aixue, Zhang Wangfeng, *et al.* TA15 alloy and its application prospect in aircraft structure[J]. *Titanium Industry Progress*, 2003, 20(5): 90-94.
(李兴无, 沙爱学, 张旺峰, 等. TA15合金及其在飞机结构中的应用前景[J]. *钛工业进展*, 2003, 20(5): 90-94.)
- [9] Wang Bin, Guo Hongzhen, Yao Zekun, *et al.* Effect of hot pressing parameters on flow stress and microstructure of TA15 alloy[J]. *Forging Technology*, 2006, (6): 106-109.
(王斌, 郭鸿镇, 姚泽坤, 等. 热压参数对TA15合金流动应力及显微组织的影响[J]. *锻压技术*, 2006, (6): 106-109.)
- [10] Wang Zhe, Wang Xinnan, Shang Guoqiang, *et al.* Study on hot deformation behavior of new ultra-high strength and toughness titanium alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47(3): 810-815.
(王哲, 王新南, 商国强, 等. 新型超高强度钛合金热变形行为研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47(3): 810-815.)
- [11] Zhang Wangfeng, Wang Yuhui, Ma Jimin. Heat treatment strengthening and mechanism of TA15 titanium alloy heavy forgings[J]. *Rare Metals*, 2010, 34(1): 1-5.
(张旺峰, 王玉会, 马济民. TA15钛合金大锻件热处理强化及机制[J]. *稀有金属*, 2010, 34(1): 1-5.)
- [12] Cao Jingxia, Fang Bo, Huang Xu, *et al.* Effect of microstructure on mechanical properties of TA15 titanium alloy[J]. *Rare Metals*, 2004, (2): 362-364.
(曹京霞, 方波, 黄旭, 等. 微观组织对TA15钛合金力学性能的影响[J]. *稀有金属*, 2004, (2): 362-364.)
- [13] Xu Wenchen, Shan Debin, Li Chunfeng, *et al.* Study on dynamic thermal compression behavior and mechanism of TA15 titanium alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2005, 25(4): 10-15.
(徐文臣, 单德彬, 李春峰, 等. TA15钛合金的动态热压缩行为及其机理研究[J]. *航空材料学报*, 2005, 25(4): 10-15.)
- [14] Ouyang Delai, Lu Shiqiang, Cui Xia, *et al.* Study on TA15 titanium alloy by work hardening rate β critical conditions for dynamic recrystallization of zone deformation[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2010, 30(2): 17-23.
(欧阳德来, 鲁世强, 崔霞, 等. 应用加工硬化率研究TA15钛合金 β 区变形的动态再结晶临界条件[J]. *航空材料学报*, 2010, 30(2): 17-23.)
- [15] He Fei, Chen Haifeng, Wang Yuhui. Effect of microstructure on high temperature tensile properties of TA15 alloy[J]. *Materials Engineering*, 2012, (2): 13-15.
(贺飞, 陈海峰, 王玉会. 显微组织对TA15合金高温拉伸性能的影响[J]. *材料工程*, 2012, (2): 13-15.)
- [16] Li Xingwu, Liu Ruimin, Sha Aixue, *et al.* Effect of microstructure on fatigue properties of TA15 alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2002, 38(z1): 280-281.
(李兴无, 刘瑞民, 沙爱学, 等. 显微组织对TA15合金疲劳性能的影响[J]. *金属学报*, 2002, 38(z1): 280-281.)
- [17] Li Shikai, Xiong Baiqing, Hui Songxiao. Effect of heat treatment system on microstructure and properties of TA15 alloy[J]. *Journal of Material Heat Treatment*, 2008, (6): 82-85.
(李士凯, 熊柏青, 惠松晓. 热处理制度对TA15合金组织与性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2008, (6): 82-85.)
- [18] Liu Ruimin, Li Xingwu, Sha Aixue. Study on microstructure and properties of TA15 alloy plate[J]. *Material Development and Application*, 2005, (4): 27-30.
(刘瑞民, 李兴无, 沙爱学. TA15合金板材的组织与性能研究[J]. *材料开发与应用*, 2005, (4): 27-30.)
- [19] Gan Guoqiang, Li Ping, Xue Kemin. Effect of thermal deformation parameters on microstructure and phase transformation kinetics of TA15 alloy[J]. *Functional Materials*, 2011, 42(B11): 828-831.
(甘国强, 李萍, 薛克敏. 热变形参数对TA15合金组织的影响及其相变动力学[J]. *功能材料*, 2011, 42(B11): 828-831.)
- [20] Yang Hongtao, He Jianxiong, Tan Yong, *et al.* Study on microstructure and properties of TA15 titanium alloy ring forgings[J]. *Forging Technology*, 2005, 30(S1): 137-139.
(杨洪涛, 何剑雄, 谭勇, 等. TA15钛合金环形锻件组织与性能的研究[J]. *锻压技术*, 2005, 30(S1): 137-139.)