

航空结构用新型高性能钛合金材料 技术研究与发展

Research and Development of Advanced New Type Titanium Alloys for Aeronautical Applications

朱知寿 / 北京航空材料研究院先进钛合金航空科技重点实验室

导读:大量采用先进钛合金材料及其应用技术,不仅可以大幅度改善结构减重效果,而且可以延长使用寿命、提高安全可靠,因此成为了新一代飞机和新型发动机先进性的显著标志之一。本文分析了我国钛合金加工材料的发展现状及存在的主要问题,提出了采用自主创新和按体系发展是实现我国航空钛合金材料及应用技术立足国内自主保障的关键途径,指出了材料创新和工艺技术创新是实现航空结构钛合金从单一高性能到综合高性能跨越、提升技术成熟度以及向规模化、稳定化和低成本化发展的技术保障。

关键词: 钛合金; 航空结构应用; 损伤容限; 组织控制技术; β 锻造; β 热处理

Keywords: titanium alloys; aeronautical applications; damage tolerance; microstructure control; β forging; β heat treatment

0 引言

为了确保飞机的安全使用寿命,进一步降低结构重量,提高飞机的战斗力和舒适度,降低飞机的燃油消耗和使用成本,先进的破损-安全的设计理念和损伤容限设计理念在现代飞机结构设计中得到了成功的应用。作为飞机结构材料的钛合金材料,不再追求单一高强度,而要求钛合金结构材料不仅具有轻质、高强、高韧、低裂纹扩展速率,还要有低的缺口敏感性、良好的耐环境稳定性、长的疲劳寿命和抗损伤能力以及良好的抗应力腐蚀与抗氢脆能力等更高的综合性能^[1-2]。

为了满足新一代飞机主承力结构的大尺寸、高减重、长寿命和低成本的设计与应用需求,采用高性能损伤容限型钛合金材料及其应用技术是重要途径之一,国外发达国家在新型损伤容限型钛合金材料与应用方面已有了很大

的发展,已经把中强度的Ti6Al4V ELI和高强度的Ti-6-22-22S等新型损伤容限型钛合金成功应用到美国F-22/F-35、C-17等新一代飞机中,极大地提高飞机的使用寿命和战斗力。

近年来,虽然中国钛产业得到了快速发展,钛材产量位居世界第四位,航空结构用钛合金产品也得到了稳步发展,但与世界发达国家相比,我国在钛合金应用水平、产品结构和用量等方面仍存在相当大的差距^[3-5]。例如,我国用于航空结构用的钛合金半成品只占钛加工材的10%,而世界发达国家航空钛合金应用的平均水平在50%左右(图1)。

为此,我国应进一步加强航空结构用新型钛合金材料及其加工和应用方面的创新性研究力度,提高航空高端钛合金产品用量、材料利用

率、成本控制、综合性能和应用水平,建立关键主干材料技术,完善具有中国特色的航空结构用钛合金材料体系,提升自主保障能力,是提高新型钛合金在航空工业用量的重要推动力和技术保障。

本文主要叙述了我国航空结构用新型钛合金材料及其应用技术方面的研究进展,重点探讨新型损伤容限型钛合金的材料特点、性能水平和应用前景,并与国外航空钛合金材料技术进行对比,为更好地把握下一步研究方向和应用目标提供参考。

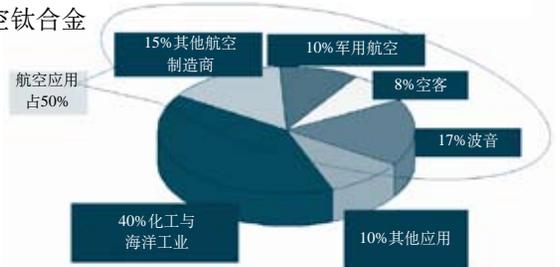


图1 钛合金在不同工业领域的用量比例情况

1 航空结构用高性能钛合金材料组织与性能关系特点

1.1 综合性能要求

随着新一代飞机和发动机的研制与发展要求的不断提高,对航空用钛合金材料的综合性能提出的要求也变得更加苛刻,图2所示为航空用钛合金材料的主要基本性能和使用性能要求示意图。

航空用钛合金材料应具备的基本性能包括:低密度(轻质)、高强度(或高比强度)、高模量(或高比模量)、高韧性、高的疲劳强度、较低的疲劳裂纹扩展速率(或较高疲劳裂纹扩展门槛值)。同时,航空用钛合金材料还必须具备的使用性能有:低的缺口敏感性、良好的耐环境稳定性(耐腐蚀、抗氧化)、长的疲劳寿命和抗损伤能力、抗应力腐蚀与抗氢脆能力、良好的工艺性能(机械加工性能好、易成形、可焊接)和较低的使用成本等。

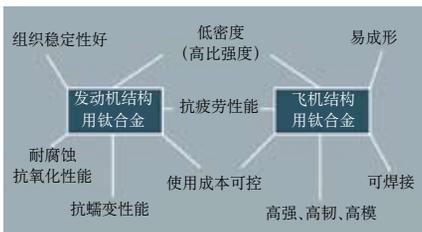


图2 新一代飞机和发动机用钛合金材料综合性能要求

1.2 组织与性能关系特点

如何使新型钛合金获得综合高性能是钛合金材料研制和应用研究的努力方向。由于钛合金的固态相变具有多样性和复杂性,所以钛合金材料的成分、工艺、组织和性能等四要素之间的相互关系也是材料科学研究的热点。钛合金材料的显微组织不仅取决于相变过程,更与热机械处理工艺密切相关,采取不同的热处理以及热加工工艺,可以得到具有不同性能的显微组织类型。

表1 钛合金组织类型与性能的一般关系

性能 \ 类型	片层组织	网篮组织	双态组织	等轴组织
拉伸性能	高	较高	较高	稍低
拉伸塑性	低	良	好	优
冲击韧性	低	优	好	较好
疲劳性能	低	较好	好	优
断裂韧性	高	较好	较好	低
蠕变抗力	高	较好	较好	低

钛合金典型的显微组织主要有等轴组织、双态组织、网篮组织和片层组织四类,如图3所示。等轴组织类型的钛合金具有较高的拉伸塑性和疲劳强度,尤其是断面收缩率较高,但是断裂韧性、冲击韧性和持久强度较差。双态组织类型的钛合金塑性较好,具有较高的疲劳强度,但是断裂韧性及高温性能不如片层组织。而具有网篮组织的钛合金因在 $(\alpha + \beta)/\beta$ 相变点以上温度加热和开始变形,转变 α 相编织成网篮状结构,这种组织断裂韧性好、持久强度高、具有高的热强性和抗蠕变性,但塑性和疲劳性能将会在一定程度上降低。具有片层组织的钛合金一般加热在 β 相区进行,因具有粗大原始 β 晶粒和转变 α 相呈片状规则排列,这种组织断裂韧性和疲劳裂纹扩展抗力均较好,但塑性、疲劳性能等都在一定程度上有所降低。其各自的具体性能情况见表1。

现在的问题是,如何突破钛合金组

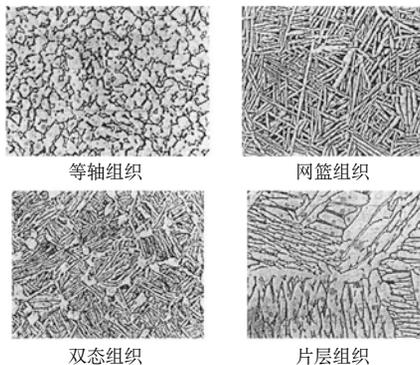


图3 钛合金的典型组织类型

织类型与综合性能的一般关系,通过材料创新和工艺创新,实现综合高性能水平,以满足新一代飞机和发动机的设计和使用要求。

2 技术创新是实现航空结构钛合金从单一高性能到综合高性能跨越的关键途径

开展航空结构用新型钛合金材料研究是提高钛合金用量和应用水平的重要保证。目前,我国已拥有一系列先进的钛合金熔炼与加工设备和先进的棒线材自动生产线等,具备开展新型航空钛合金材料研制和产业化的硬件条件。

此外,我国在结构钛合金新型热机械处理等加工技术方面已经积累了较丰富的经验。近十年来,为了实现结构钛合金从单一高性能向综合高性能的组织控制转变,也相继研制并成功应用了材料成分设计创新和工艺技术创新相结合的综合强韧化技术,从根本上提升了我国新型钛合金材料的综合性能水平,为关键材料技术立足国内和自主保障做了一些准备工作。

2.1 通过材料创新开发出我国航空用新型高性能钛合金材料

1) TC21高强高韧损伤容限钛合金

在通用 $\alpha-\beta$ 型高强度钛合金成分体系基础上,创造性地通过添加铌(Nb)元素,控制钼(Mo)和铬(Cr)元素

表2 TC21钛合金电子束(EBW)焊接接头性能对比

合金	状态	σ_b (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	δ_5 (%)	ψ (%)	α_{ku} (J/cm ²)	K_{IC} (MPa \sqrt{m})	疲劳极限强度 σ_D , MPa ($R=0.1, N=10^7$)	
								$K_f=1$	$K_f=3$
TC21	EBW	1138	1051	8.3	20.8	29.8	88.6	643	315
	基体	1174	1083	11.3	20.0	51.5	90.6	653	277
Ti-62222S	EBW	1171	1096	3.5	16.1	17.5	—	—	—
	基体	1182	1094	12.2	36.5	41.3	—	—	—
BT20	EBW	996	993	10.2	38.8	28.2	43.7	604	270
	基体	992	947	17.8	42.8	48.9	84.1	547	203

含量,提出了新型高强、高韧、高模、可焊、损伤容限型TC21钛合金的成分配比,采取第一性原理计算合金元素影响趋势,筛选出主干合金化元素;通过钼当量校核等手段确定了TC21钛合金主干成分;经过小锭试验、中试验验证和1t级工业化锭的熔炼与加工,完成了合金组织设计与验证、强韧化工艺与综合性能匹配技术等,最终创立了新一代飞机结构用TC21钛合金。TC21钛合金是我国具有自主知识产权的新型飞机结构用钛合金,具有高强度、高韧性、高可焊性、低裂纹扩展速率等性能,其综合力学性能比在美F-22飞机应用的Ti-6-22-22S(美)和苏-27系列飞机广泛应用的BT20(俄)钛合金更加优异,具有非常优异的电子束焊接性能(表2),适合于制造飞机大型整体框架类重要承力构件。

2) TC4-DT中强度高韧高损伤容限钛合金

TC4-DT钛合金是中强度高损伤容限型钛合金,它是通过采用纯净化熔炼、合金成分优化和间隙元素控制等手段,从材料成分优化设计上提升了TC4钛合金的综合力学性能,并进一步通过采用新型的 β 热处理工艺,使该合金具有很高的韧性、低的疲劳裂纹扩展速率、优异的焊接性能、优良的工艺性能和较低的成本等综合性能,特别适合制造飞机大型整体框架类重要

承力构件。

TC4-DT钛合金通过采用准 β 热处理工艺,可以获得中强度($\geq 825\text{MPa}$)、高韧性($\geq 90\text{MPa}$)、优异焊接性能(与母材相当)(图5)和低疲劳裂纹扩展速率(图6),目前已被大量用于飞机安全寿命级关键承力部件中。

2.2 采用钛合金新型准 β 锻造工艺技术实现高强度损伤容限型钛合金的综合高性能

采用高温 β 锻造工艺代替常规的 $\alpha+\beta$ 锻造钛合金金构件,由于变形温度高、抗力小、易于成形、成品率高等特点,在生产中受到了高度的重视。同时,高温 β 锻造获得的网篮组织正是大应力高温长时间使用条件下的零件(如盘类零件)所希望得到的组织,也是高损伤容限长寿命设计所需的高断裂韧度、低疲劳裂纹扩展速率的基本保证,在飞机结构构件的应用中具有广泛的发展前景。但普通的 β 锻造工艺由于生产控制难、组织与性能稳定性差、特别是室温塑性常常降低到不可接受的地步等原因,在实际生产中难以实施。为此,提出了一种新型的钛合金

“准 β 锻造工艺^[6]”,通过控制钛合金复杂构件低倍组织和高倍显微组织均匀性,从根本上解决了网篮组织塑性偏低的难题,该工艺可使普通 α 和 $\alpha+\beta$ 钛合金获得高塑性的网篮组织(图7),同时提高了钛合金的应用水平,为损伤容限钛合金的应用奠定了技术基础。

该工艺已经分别在中强度

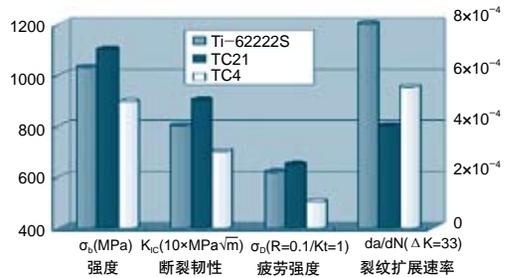


图4 TC21钛合金的强度、韧性、疲劳和裂纹扩展抗力等性能

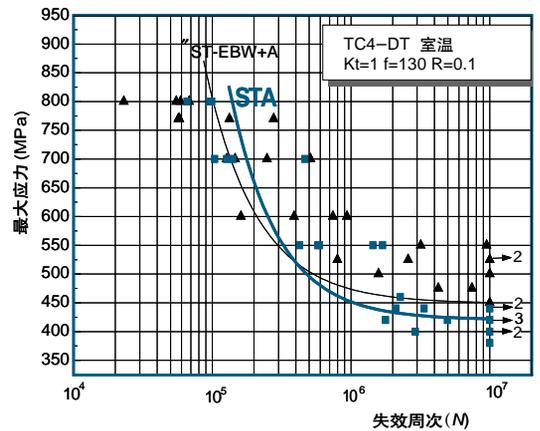


图5 TC4-DT钛合金焊接接头与母材基体的疲劳寿命S-N曲线对比

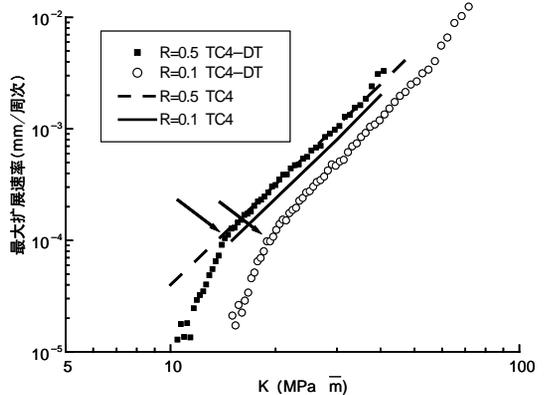
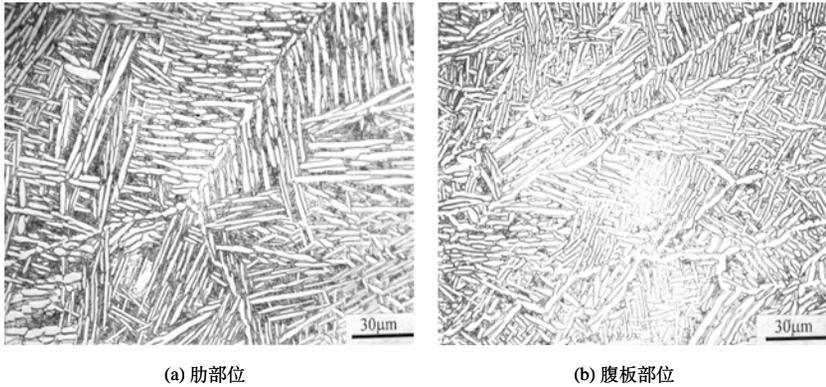


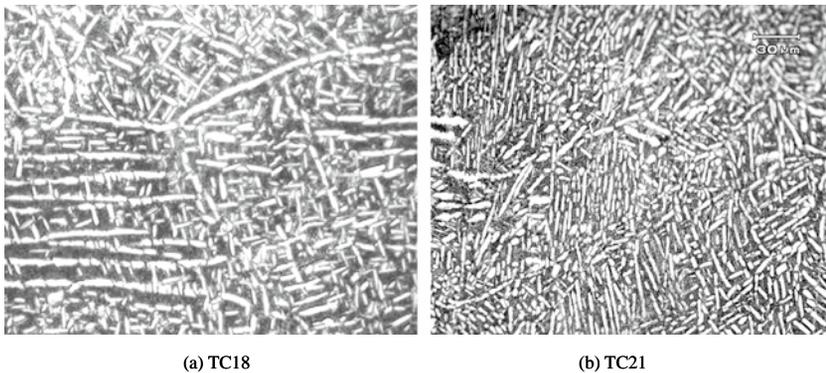
图6 TC4-DT钛合金在Paris区的da/dN- ΔK 数据及其与TC4钛合金的对比



(a) 肋部位

(b) 腹板部位

图7 TC6钛合金经准β锻造得到的模锻件显微组织



(a) TC18

(b) TC21

图8 钛合金经准β锻造得到的模锻件显微组织

TC6(BT3-1)钛合金、高强度TC18(BT22)钛合金以及高强韧TC21钛合金等实际构件中得到了应用(图8)。对于TC6钛合金,相比普通锻造工艺和近β锻造工艺^[7],“准β锻造”工艺得到的模锻件 K_{IC} 值提高了25%以上,疲劳裂纹扩展速率明显降低,光滑疲劳极限提高了14%以上^[8]。而且,经准β锻造得到的锻件 K_{IC} 值和 a_k 值都明显高于常规锻造得到的锻件 K_{IC} 值和 a_k 值,由此可以看出准β锻造工艺较常规锻造具有优越性^[8]。

2.3 采用钛合金新型准β热处理工艺技术实现中等强度损伤容限型钛合金的综合高性能

通过β热处理工艺,可以提高钛合金的损伤容限性能和高温蠕变性能,所以在航空发动机盘件以及

飞机重要承力结构件中都得到了应用^[9]。但是,采用这种普通的β热处理工艺,得到的片层组织粗大,塑性和疲劳强度偏低,不能达到综合高性能水平(图9和图10)。为此,提出了采用新型“钛合金准β热处理工艺^[10]”,通过对TC4-DT钛合金大量的工艺验证和应用试验分析,结果表明(图5和图6)该工艺可提高钛合金片层组织塑性、复杂截面特大型锻件组织性能均匀性、以及降低普通β热处理在实际生产中的组织控制难度和不合格率等技术关键,从而满足飞机结构综合高性能的要求^[11-13]。图11为通过采用一种新型准β热处理工艺获得的TC4-DT钛合金片层组织结构特征。

此外,这几年快速发展和推广

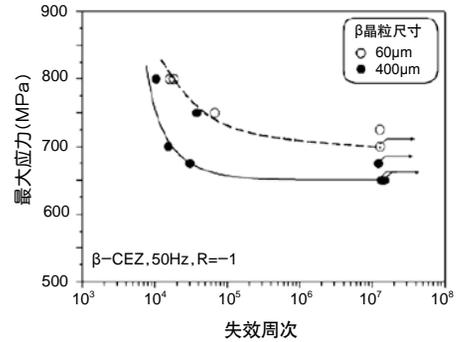
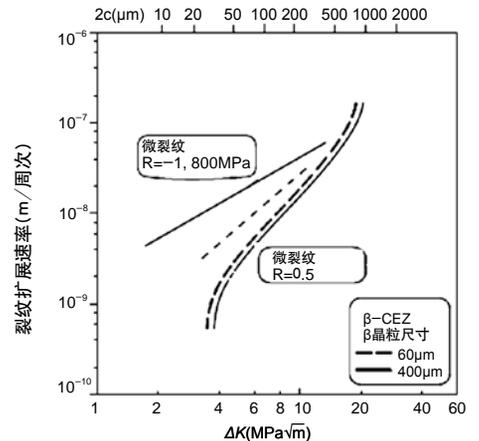


图9 β-CEZ钛合金具有不同晶粒大小的片层组织高周疲劳S-N曲线

图10 β-CEZ钛合金具有不同晶粒大小的片层组织疲劳裂纹扩展性能($\Delta K-da/dN$ 曲线)

应用的钛合金等温锻造^[14]、激光快速成形(LRF)^[15-17]、先进焊接等先进加工和制造技术,也在不同程度上提升了钛合金构件的综合应用性能。

3 通过提升技术成熟度,实现高性能损伤容限型钛合金批量应用“零的突破”

在材料创新和工艺技术创新的基础上,通过面向使用需求、及时开展工程化应用研究,突破关键技术,进一步提升了材料技术成熟度,使综合高性能损伤容限型钛合金(TC21和TC4-DT)成长为新一代飞机用的主干钛合金,为飞机实现损伤容限长寿命设计和结构减重奠定了坚实的技术基础,从而实现了损伤容限型钛合金在我国飞机关键承力部件上装机应用“零的突破”。

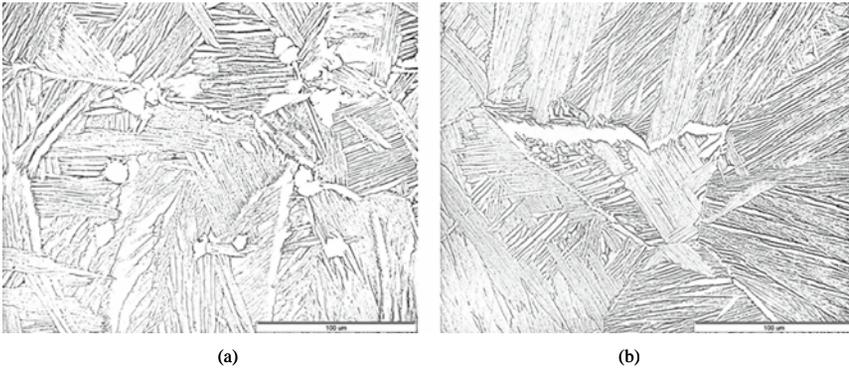


图11 采用新型准 β 热处理工艺获得的TC4-DT钛合金片层组织结构特征

4 我国航空用高性能钛合金材料的发展趋势

1) 高性能损伤容限型钛合金是新一代飞机的主干材料,在实际应用中应加强品种规格系列化和应用批量稳定化,扩大应用范围和用量,进一步提升技术成熟度。

2) 在积累实际构件设计与制造的经验 and 数据基础上,发挥自主创新能力,建立具有中国特色的航空用钛合金材料体系,使关键材料立足国内、按体系发展,实现低成本。

3) 进一步发展超高强度级别的综合高性能钛合金材料和特种功能材料,以满足下一代航空航天飞行器的发展需求。

5 结论

虽然我国钛材产量位居世界第四位,但航空航天用高端钛材产量只占总量的10%左右,与世界的50%水平仍存在着相当的差距,因此需要加强综合高性能钛合金材料和应用的创新性研究,提高航空航天钛合金的应用水平和用量,这也是缩短与世界发达国家差距的重要途径和保障。

此外,技术创新是实现航空结构钛合金从单一高性能到综合高性能跨越的关键途径。航空结构钛合金材料应立足

国内、按体系发展,逐渐摆脱“杂、乱、散”的局面,以便能形成具有中国特色的航空钛合金材料体系,实现规模化、稳定化和低成本化发展。

再者,通过采用新型的准 β 锻造、准 β 热处理、等温精密锻造、快速成形、先进焊接等钛合金加工与制造技术,在提高钛合金构件的性能的同时,促进钛合金在航空航天领域的应用水平和用量。

AST

参考文献

- [1] 曹春晓. 钛合金在大型运输机上的应用[J]. 稀有金属快报, 2006 (1): 17-21.
- [2] 杨健. 钛合金在飞机上的应用[J]. 航空制造技术, 2006 (11): 41-43.
- [3] Zhou Lian. Ti-2007 Science and Technology [C], Japan: 2007.
- [4] 邓炬. 正在崛起的中国钛工业[J]. 稀有金属快报, 2007, 26(6).
- [5] 赵永庆. 钛合金的研究与开发[J]. 钛工业进展, 2005, 22(4).
- [6] 朱知寿, 王庆如, 郑永灵. 钛合金准 β 锻造工艺: 中国, ZL 01131237.8 [P]. 2004-7-28.
- [7] Zhou Yigang, Zeng Weidong, Yu Hanqing. Ti-2003 Science and Technology [C]. Germany, 2003: 1623-1630.

[8] 朱知寿, 周晓虎, 等. 高强韧损伤容限钛合金新型 β 锻造工艺研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34 (S3): 537-542.

[9] Cao Chunxiao, et al. Ti-1999 Science and Technology[C]. Russia, 1999: 1794-1804.

[10] 朱知寿, 王庆如, 王新南, 等. 一种钛合金准 β 热处理工艺: 中国, ZL 200410090864.3 [P]. 2008-8.

[11] 王新南, 朱知寿, 童路, 等. 锻造工艺对TC4-DT和TC21损伤容限型钛合金疲劳裂纹扩展速率的影响[J]. 稀有金属快报, 2008, 27(7): 12-16.

[12] 朱知寿, 马少俊, 王新南, 等. TC4-DT损伤容限型钛合金疲劳裂纹扩展特性的研究[J]. 钛工业进展, 2005, 22(6): 10-13.

[13] 王新南, 童路, 朱知寿等. 中强高损伤容限型TC4-DT钛合金热处理冷却速率与强韧性的关系研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 37(S3): 537-540.

[14] 王治政, 朱益藩, 庞克昌. 稀有金属材料与工程 [J], 2005, 34 (S3): 736-739.

[15] Snow D B, Breinan E M, Kear B H. Process Fourth Inter, Sympo [C]. Alaitors Publishing Div, 1980.

[16] 杨海鸥, 陈静, 等. Rene 95高温合金激光快速成形试样的力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(S1).

[17] 朱知寿. 航空钛合金激光快速成形技术的材料应用问题[J]. 国际航空, 2011(1): 42-45.

作者简介

朱知寿, 博士, 研究员, 中航工业钛合金材料技术首席技术专家, 主要从事航空用先进钛合金材料和应用技术研究。