

钛合金短时高温蠕变与持久行为初步研究

Preliminary Research on Short-Time and High Temperature Creep and Endurance Behavior of Titanium Alloy

北京机电工程研究所 张伟堂

[摘要] 钛合金在航天超声速飞行器上的应用达到了其耐温极限,研究其在短时、高温、大应力作用下的蠕变与持久行为对于热结构变形控制、防止结构破坏失效具有重要意义。在对6种钛合金材料短时高温蠕变、持久性能测试的基础上,对不同钛合金的短时蠕变、持久性能进行了对比分析,对钛合金的短时高温蠕变机理进行了初步探讨。

关键词: 钛合金 短时 高温 蠕变 持久

[ABSTRACT] The application of titanium alloys on supersonic aerospace crafts now exceeds their upper heat-resist limit. Thus it comes to be significant to research on the creep and endurance behaviors under the occasion of high temperature, high stress within relatively short duration of time. Series of experiments on six titanium alloys are performed, while the creep and endurance properties under short-time and high temperature condition are studied. On the establishment of that, the diversities of different titanium alloys are evaluated and analyzed, and a preliminary discussion on the short-time and high temperature creep rupture mechanism of titanium alloys is presented.

Keywords: Titanium alloy Short time High temperature Creep Endurance

钛合金因具有耐高温、低密度、高比强度、高比刚度、耐腐蚀等优点,在航空航天领域得到广泛应用。尤其在先进的航空发动机中,钛合金的大量应用有利于提高发动机的推重比,从而提高飞机的机动性能;在航天领域,随着宇航器特别是航天飞行器对于减重、高温蠕变与持久性能的日益重视,对于通过材料降低飞行器结构重量、减小静动热载荷作用下的变形、提高结构承载能力与可靠性的需求日益迫切,耐高温、高比强度的钛合金材料成为飞行器设计的首选^[1-2]。

对于钛合金来讲,蠕变可以在很低的温度下发生。钛合金在航天超声速飞行器上尽管多数在短时、一次性条件下使用,但往往应用部位的温度达到了钛合金的温度极限,且由于高速飞行带来的高载、高热使得结构部位存在大应力分布。钛合金的弹性模量随温度的升高迅速下降至较低水平,在大应力条件下,结构弹性变形较大,

加之蠕变变形的累积,可能导致飞行器结构变形超过设计允许值而失效,严重时如超过材料的持久强度极限将导致结构断裂破坏。因此,研究钛合金材料在短时、高温、大应力作用下的蠕变与持久行为,对于控制航天超声速飞行器结构变形、防止结构破坏失效具有重要意义。

本文从某航天超声速飞行器的钛合金材料应用角度出发,在对6种钛合金材料短时高温蠕变、持久性能测试的基础上,对不同钛合金的短时蠕变、持久性能进行对比分析,对钛合金的短时高温蠕变机理进行初步探讨。

1 钛合金蠕变、持久强度的基本特点

蠕变是指在长时间的恒温、恒应力作用下而发生的缓慢的塑性变形,由蠕变而最后导致的断裂,成为蠕变断裂;持久强度是指材料长时间在载荷作用下抵抗蠕变断裂的能力,即在给定的温度和时间材料(试样)发生断裂的应力值,一般以持久强度极限来表示,有时也以试样在恒温、恒应力作用下的持久时间评定材料的持久性能。

影响材料蠕变性能的因素包括化学成分、工艺、工作条件和构件尺寸与形状等。蠕变和持久强度对温度变化十分敏感,温度升高 $5\sim 6^{\circ}\text{C}$,蠕变速率约增加一倍,持久寿命比原值减少 $1/3$ 左右;温度升高 50°C 左右时,若应力维持不变,持久寿命约为原值的 $1/10$ 左右。现有高温设备,如涡轮发动机、火电设备等均工作在稳态蠕变阶段,工作时间从几百小时到上万小时。蠕变在低温下也会发生,但只有当温度高于 $0.4T_m$ (材料的熔点)时蠕变才较显著。钛合金的熔点约为 1668°C ,当使用温度高于 500°C 时,蠕变较为明显。

金属材料的蠕变过程可用如图1所示的蠕变曲线表示。按照蠕变速率的变化情况,可将蠕变过程分为3个阶段。 ob 部分为第一阶段,包括瞬时变形 oa 和蠕变变形 ab ,瞬时变形又包括弹性变形 oa' 及瞬时塑性变形 $a'a$ 两部分; ab 部分称蠕变起始阶段,这部分的蠕变速率是逐渐减小的,开始时蠕变速率很大,随着时间的延长蠕变速率逐渐减小,到 b 点时蠕变速率达到最小值; bc 部分为第二阶段,这部分的蠕变变形与时间成线性关系,即蠕变速率基本维持恒定,在整个蠕变过程中这部分的蠕变速率最小,故称为稳态蠕变阶段或最小蠕变速

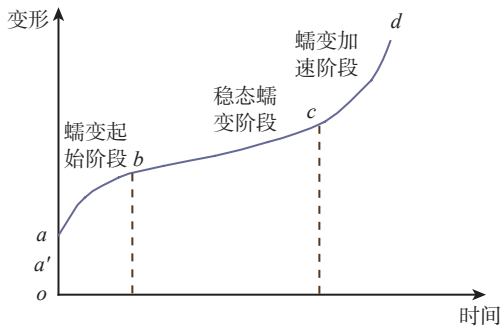


图1 金属材料典型蠕变曲线
Fig.1 Typical creep curve of metals

率阶段；cd部分为蠕变第三阶段，由于在这一部分蠕变变形速率逐渐增加，故这部分称为蠕变加速阶段，直至d点材料断裂^[3]。

在蠕变起始阶段，钛合金等金属材料的蠕变变形以晶内滑移和晶界滑动方式为主。位错刚开始运动时，障碍较少，蠕变速率较快；随后位错逐渐塞积、位错密度逐渐增大，晶格畸变不断增加，造成形变强化；在较高温度下，位错可通过攀移形成亚晶而产生回复软化，当晶格畸变能增加到一定程度后，带来位错攀移的驱动力大幅增加，材料回复软化效应趋于明显；当位错攀移与位错滑移达到平衡时，蠕变速率将达到最小，变形开始进入稳态蠕变阶段。

在稳态蠕变阶段，晶内变形以位错滑移和位错攀移方式交替进行，晶界变形以滑动和迁移方式交替进行。晶内滑移和晶界滑动使材料强化，而位错攀移和晶界迁移使材料软化。

在加速蠕变阶段，蠕变速率随着时间的延长而逐渐增大，直至产生蠕变断裂。

对于短时(1h以内)、一次性飞行使用的超声速飞行器来说，在高温、大应力的作用下，钛合金结构的蠕变变形多发生在蠕变初始阶段

以及稳态蠕变阶段的刚开始部分。但是，如果飞行器结构所承受的温度达到钛合金材料的耐温极限，结构应力接近或超过钛合金材料的屈服强度，那么钛合金结构的软化效应将非常明显，持久强度大幅降低，材料/结构进入蠕变加速阶段的可能性大大增加，蠕变变形超过设计限制或发生蠕变断裂的风险将较大。因此，研究钛合金材料的短时高温蠕变与持久行为对于从设计上确保航天超声速飞行器的飞行安全是非常重要的。

2 钛合金短时高温蠕变与持久性能测试

对6种中/高温钛合金材料进行了短时、高温下的蠕变与持久强度极限的测试，包括TA15、Ti55、Ti62421S、Ti6431S 4种变形钛合金板材与ZTA15、ZTi55 2种铸造钛合金材料。所测项目均用板状试样，4种变形合金测试试样均从大宽幅、退火态(M)的2mm厚薄板上沿纵向(长度方向)切取、机加而成，ZTA15、ZTi55测试试样通过铸造并经热等静压后切取、机加而成。

2.1 钛合金短时高温蠕变测试

图2给出了TA15、Ti55、Ti62421S、Ti6431S、ZTA15、ZTi55 6种钛合金分别在500℃×400MPa、

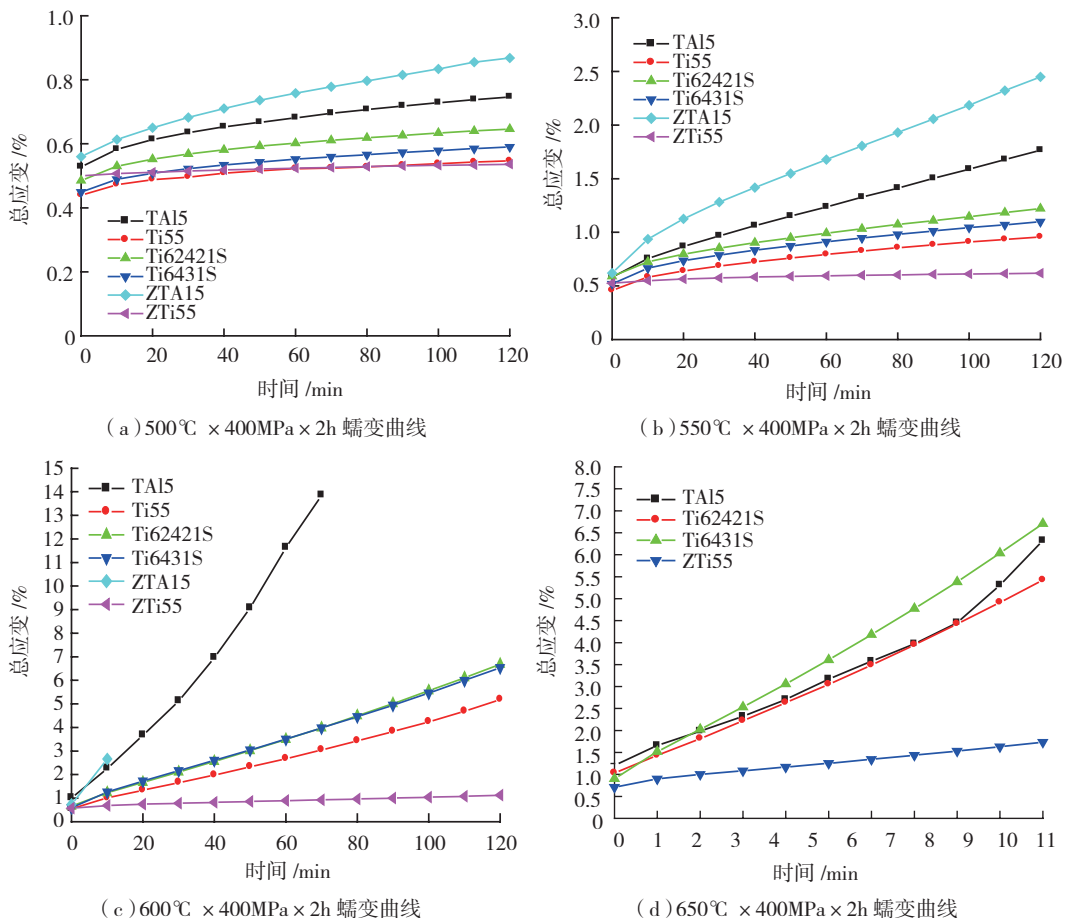


图2 6种钛合金短时高温蠕变测试结果

Fig.2 Results of short-time and high temperature creep tests on six titanium alloys

550℃ × 400MPa、600℃ × 400MPa、650℃ × 400MPa 条件下 2h 内的高温蠕变测试结果。其中,600℃ × 400MPa 条件下,TA15 试样测至 70min 即断裂,ZTA15 试样测至 10min 即断裂;650℃ × 400MPa 条件下,TA15、ZTA15 试样不能加至满载即断裂从而未测得蠕变数据,Ti55、Ti62421S、Ti6431S、ZTi55 试样只测得 10min 内蠕变数据。

2.2 钛合金香持久强度极限测试

图 3 给出了 TA15、Ti55、Ti62421S、Ti6431S、ZTA15、ZTi55 6 种钛合金材料 500℃ ~650℃、45min 的持久强度极限测试结果。

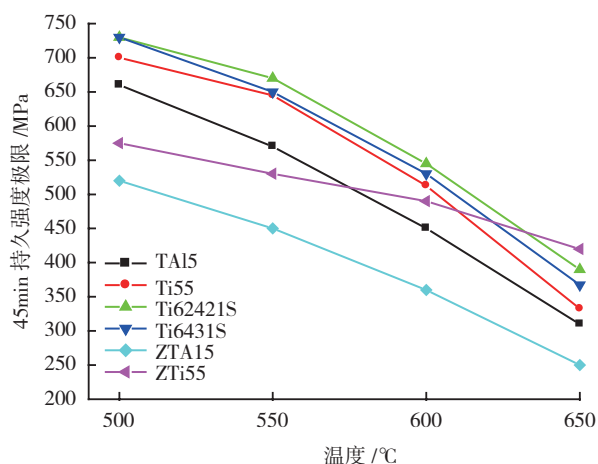


图3 6种钛合金45min高温持久强度极限测试结果

Fig.3 Results of 45min high temperature endurance strength tests on six titanium alloys

3 钛合金短时高温蠕变与持久性能分析与探讨

对 6 种中 / 高温钛合金材料的短时、高温下的蠕变与持久强度极限测试结果进行分析,可以得出如下结论:

(1) 温度对钛合金的蠕变与持久强度影响较大。

500℃时,400MPa 的作用应力均低于各钛合金材料的屈服强度(表 1 中列出了 6 种中 / 高温钛合金材料的高温拉伸强度实测值),蠕变变形处于明显的起始阶段和稳态蠕变阶段,即刚开始时变形速率较大,随着时间的延长,变形速率逐渐减小并保持恒定。在这一阶段,各钛合金材料的蠕变变形以晶内滑移和晶界滑动的位错滑移方式为主,在温度、应力作用下的较短时间内,材料得到形变强化。从各钛合金材料在 500℃、45min 的

表1 6种钛合金实测拉伸强度

温度 / °C	σ_1 / MPa						$\sigma_{0.2}$ / MPa					
	TA15	Ti55	Ti62421S	Ti6431S	ZTA15	ZTi-55	TA15	Ti55	Ti62421S	Ti6431S	ZTA15	ZTi55
500	745	752	735	742	526	541	612	623	611	612	415	447
550	670	713	686	694	511	510	550	571	556	561	402	423
600	578	647	620	620	461	505	452	497	478	496	376	420
650	455	538	540	523	415	491	298	361	363	348	311	400

持久强度极限测试结果也可以看出这一点,即当达到各材料的抗拉强度时试样即断裂,表现为拉伸特征。

550℃时,ZTA15 在接近其屈服强度的 400MPa 的应力作用下,蠕变变形速率明显较 500℃时增大,说明当作用温度接近材料的耐温极限时,材料的蠕变抗力明显降低;其他 5 种钛合金材料在 550℃的蠕变变形也比 500℃时大,但蠕变速率增幅不如 ZTA15 明显。

600℃时,400MPa 的应力作用下,ZTA15 试样 10min 即被拉断,TA15 试样 70min 被拉断,与 550℃作用时其持久强度明显降低;且从测得的蠕变曲线看,600℃时,TA15、ZTA15 呈现“加速蠕变”特征,蠕变以位错攀移为主,材料在高温下被软化,较短时间内即被拉断。因此,在 400MPa 的应力作用下,TA15、ZTA15 的短时耐温极限应低于 600℃,在超声速飞行器上应用时,应控制其使用部位的温度在 550℃左右。

650℃时,6 种钛合金材料的屈服强度均低于 400MPa;在 400MPa 的应力作用下,TA15、ZTA15 试样不能加至满载即断,其他 4 种高温钛合金试样在 10min 左右被拉断,且 10min 内的蠕变变形速率、变形量明显加大,45min 的持久强度极限明显降低。说明在 650℃时,材料以位错攀移方式蠕变从而使其在很短时间内即被软化,蠕变抗力与持久强度显著降低。因此,对于 Ti55、ZTi55、Ti62421S、Ti6431S 高温钛合金材料,在超声速飞行器上短时应用时,也应控制其使用部位的温度,如需在 650℃的结构部位使用,应控制结构应力在材料的屈服强度之下,以控制变形,降低断裂、破坏的风险。从确保飞行器飞行安全角度考虑,建议将 4 种高温钛合金材料应用在 600℃左右的机体部位。

需要指出的是,ZTi55 与其他 5 种中 / 高温钛合金的蠕变与持久强度有不同的特点。在耐温极限内,ZTi55 的屈服强度随温度的升高下降幅度较小,在高温、应力作用下,蠕变变形速率很低,持久强度极限随温度的升高降幅比其他 5 种钛合金材料明显得低,甚至在 600℃以下、400MPa 的应力作用下,蠕变变形速率约为“零”。这种现象与 ZTi55 材料的组织结构有直接的关系,作为铸造组织,晶粒较变形合金的粗大,明显抑制了高温、大应力作用下的晶内滑移和晶界滑动,另外,高温元素的固溶强化作用使得材料的蠕变抗力大大提高。

(2) 高温、大应力作用下,钛合金材料的蠕变总变形显著增大,持久强度大幅降低。

温度、应力、时间的综合作用显著影响着钛合金

(下转第 125 页)

5 结论

随着钛合金焊接技术的发展和成熟,已经在飞机制造中占据越来越重要的地位,甚至引起了飞机结构设计的变革。在飞机制造领域,我国钛合金焊接技术与国外先进国家相比仍有一定差距,主要体现在焊接过程计算机辅助控制技术。我国现有飞机制造中还存在较多的焊接问题急待解决,如封闭结构焊接、焊接变形等。所以需要加速新的钛合金焊接方法以及辅助控制技术在飞机典型结构上的应用研究,相信在需求牵引和技术推动的作用下,我国飞机设计和制造水平将会得到的进一步提升。

参考文献

- [1] 刘善国. 国外飞机先进制造技术发展趋势. 航空科学技术, 2003(4):26-29.
- [2] 孙聪, 王向明. 现代战斗机机体结构特征分析. 北京: 航空工业出版社, 2007:32.
- [3] 王向明, 刘文琰. 飞机钛合金结构设计与应用. 北京: 国防工业出版社, 2010:44-46.
- [4] 巩水利, 张雁, 柴国明. 高能束流焊接技术的发展及其在航空领域的应用. 国防制造技术, 2009, 6(3):12-15.
- [5] 李亚江, 吴娜, Puchkov P U. 先进焊接技术在航空航天领域中的应用. 航空制造技术, 2010(9):43-47.
- [6] 王亚军, 卢志军. 焊接技术在航空航天工业中的应用和发展建议. 航空制造技术, 2008(16):26-31.
- [7] 胡愈刚, 王晓平, 周亮. TC18 钛合金焊接技术在飞机起落架制造中的应用研究. 航空制造技术, 2011(16):72-74.
- [8] Lee H K. Fracture resistance of a steel weld joint under fatigue loading. Engineering Fracture Mechanics, 2000(66):403-419.
- [9] 陈国庆, 张秉刚, 王延, 等. TA15 钛合金潜弧焊接接头组织与性能分析. 焊接学报, 2010, 31(7):5-8.
- [10] 王利发, 刘建中, 胡本润, 等. TA15 钛合金潜弧焊接接头疲劳损伤研究. 失效分析与预防, 2007, 2(2):16-19.
- [11] 杨剑赞, 邢丽, 黄春平, 等. TC4 钛合金厚板潜弧焊接接头的显微组织. 机械工程材料, 2011, 35(12):81-84.
- [12] 李昊, 陈洁, 陈磊, 等. 双光束激光焊接技术在民用飞机上的应用现状及发展. 航空制造技术, 2012(21):50-53.
- [13] 阿·格·布拉杜欣, 勃·斯·坚尼索夫, 弗·斯·索特尼科夫. 1420 铝锂合金飞机结构的焊接工艺问题. 材料工程, 1997(2):38-41.
- [14] 关桥, 张崇显, 郭德伦. 动态控制薄板构件低应力无变形焊接方法及其装置: 中国, 93101690.8[P]. 1993-02-25.
- [15] 关桥, 李菊. 热拉伸效应控制飞行器板壳结构焊接变形. 航空制造技术, 2007(9):30-34.
- [16] 翁路露, 杨建国, 李军, 等. 随焊旋转冲击控制焊接变形新方法. 材料科学与工艺, 2010, 18(4):564-566.
- [17] 杜欲晓, 王大鹏, 郭德伦, 等. 活性剂对 TA15 钛合金对接及 T 形穿透焊接头的影响. 焊接学报, 2010, 31(7):98-100.
- [18] 李晓红, 张连锋. 钛合金活性焊剂焊接技术. 航空制造技术, 2008(25):113-114.
- [19] 张秋平. 活性焊剂氩弧焊技术及其应用. 飞航导弹, 2004(6):57-60.

2004(6):57-60.

[20] 王敏, 杨磊, 于瑛, 等. 钛合金 T 形结构单面焊背面双侧成形焊接接头组织与性能. 航空材料学报, 2012, 32(1):45-49.

[21] 王敏, 谷佩锋, 魏强, 等. 激光-TIG 复合热源焊接钛合金 T 形结构焊缝成形特点及影响因素分析. 焊接学报, 2010, 31(12):105-108.

(责编 深蓝)

(上接第 121 页)

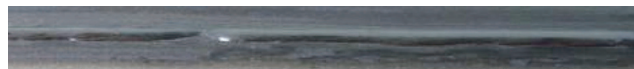


图3 TC18钛合金氩弧焊焊缝背面成形

Fig.3 Excess weld metal of argon arc welded TC18

材料的蠕变与持久强度。从测试结果看出,在大应力作用下,随着超声速飞行器机体结构温度的升高,钛合金材料/结构的蠕变变形显著增大,持久时间、持久强度极限明显降低。尤其是在高温下,当作用应力接近或超过材料的屈服强度时,钛合金材料的蠕变变形速率非常大,呈现出“加速蠕变”的特征,持久只有十余分钟的时间,且蠕变变形值较大,对飞行器的机体刚度影响较大。

因此,对于短时、一次性使用的超声速飞行器来讲,在设计、选材时,首先应关注所选钛合金材料的蠕变性能与持久强度,根据所应用部位的载荷、温度、时间及强度、刚度要求,对材料的蠕变与持久强度水平进行实测,为合理应用提供依据;其次,在材料应用设计时,应控制其使用温度、作用应力在合适的范围之内,使用温度不能超过材料的耐温极限,作用应力应低于材料对应温度下的屈服强度。只有根据飞行器的使用条件,全面了解材料的性能与使用限制,才能确保飞行器机体结构的强度、刚度满足设计要求,并与机体结构重量协调统一。

4 结束语

温度对钛合金材料的蠕变性能与持久强度影响较大。在超声速飞行器设计、选材时,除了关注钛合金材料的耐温极限、高温拉伸强度之外,应对材料在高温、大应力、短时作用下的蠕变变形和持久强度给予足够的重视。只有全面掌握所选用钛合金材料的短时高温蠕变与持久强度特点及性能,才能从设计上合理控制飞行器机体结构的变形,降低及避免材料超限使用带来的机体结构破坏的风险。

参考文献

- [1] 张伟堂. 超声速飞行器用高温钛合金初步应用研究. 航天材料信息网学术会议文集, 2009:155-157.
- [2] 张伟堂. 钛合金紧固件在航空航天领域的应用与分析. 航天材料信息网学术会议文集, 2010:178-180.
- [3] 陶春虎等, 刘庆琛, 曹春晓, 等. 航空用钛合金的失效及其预防. 北京: 国防工业出版社, 2002.

(责编 亦非)