铝合金 2A12 在热冲击条件下的力学性能

吴大方

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100083)

宋 昊

(中国一航北京长城计量测试技术研究所 国防科技重点实验室，北京 100095)

高镇同 晏震乾

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100083)

摘 要：测试并确定航空航天材料在复杂高速热冲击条件下的强度极限等关键参数，对于航空航天材料和结构的可靠性评定、寿命预测以及高速飞行器的安全设计具有重要的意义.针对强度设计手册中没有航空航天材料在高速热冲击环境下的强度极限等表征参数的现状，使用自行研制的高速飞行器瞬态气动热试验模拟系统，对铝合金材料 2A12 在多种不同的瞬态热冲击条件下，进行气动加热模拟与热载联合试验研究，得到在瞬态热、力学环境的共同作用下铝合金 2A12 材料的强度极限等力学性能变化状况.为研究分析航空航天材料和结构在高速热冲击环境下的承载能力和结构减重提供可靠依据.

关 键 词：气动加热；瞬态；铝合金；热特性

中图分类号：V 216.4；V 416.4

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)05-0531-04

Mechanical properties of 2A12 Al alloy at transient heating

Wu Dafang

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Song Hao

(National Laboratory Metrology and Calibration of Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Gao Zhentong Yan Zhenqian

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Testing and determining the pivotal parameters such as ultimate strength and thermal stress at the complicated condition of transients heating is very important to the reliability estimate, life prediction of aerospace materials and security design of the high-speed flight vehicle. Because there are no ultimate strength and other important token parameters at high temperature transients heating environment in the intensity design handbook yet, the high temperature ultimate strength and other mechanical properties of 2A12 Al alloy under different transient heating temperature and load environments was obtained by using experimental simulation system of the transients aerodynamic heating for high-speed flight vehicle. Reliable basis was provided for studying the loading capacity and weight lightened of aerospace materials and structure at transient heating environment.

Key words: aerodynamic heating; transients; aluminum alloys; thermal properties

收稿日期：2006-06-28

作者简介：吴大方(1950－)，男，湖南长沙人，教授，wdf1950@163.com.

铝合金材料密度低，耐腐蚀性能好，抗疲劳性能较高，且具有较高的比强度、比刚度，是制造导弹、飞机结构与零部件的理想材料. 其中 2A12 为可热处理的强化铝合金，具有良好的塑性成形能力和机械加工性能，是航空航天领域中使用最广泛的铝合金之一. 对于 2A12 在常温和非常温下的力学性能，人们已经进行了许多实验研究工作[1-3]. 由于高速飞行时，气动加热产生的瞬态高温热应力使飞行器材料的弹性模量下降，使得刚度和强度降低，并且使疲劳寿命受到严重影响，因此对航空航天材料进行热强度试验，测试并确定材料在复杂高速热冲击条件下的强度极限等关键参数，对于航空航天材料的寿命预测及可靠性评定以及高速飞机的安全设计有着非常重要的意义，现国内外对在高速热冲击条件下材料性能方面研究报道较少. 近年来，虽有少数实验通过大电流快速加热方法研究材料在热冲击条件下的力学性能及温升率对材料拉伸响应影响[2-5]的论文，但模拟高速飞行时材料的真实受热状况，研究航空材料在瞬态热冲击条件下的力学性能，国内外至今还鲜有报道.

本文使用高速飞行器瞬态气动热试验模拟系统[6]，在瞬态热冲击的条件下，对硬铝合金 2A12 在 150℃，200℃，250℃和 300℃下进行气动热模拟试验与热载联合试验，观察分析在瞬态热、力学环境的共同作用下材料的力学性能变化及结构的受力状况，为研究分析航空航天材料和结构在高速热冲击环境下的承载能力提供可靠依据.

1 瞬态气动热试验模拟系统

为得到高速飞行器表面各部分的热应力、应变、结构膨胀量等高温力学性能参数，须建立高速飞行器瞬态气动热试验模拟系统. 瞬态气动热试验系统是一个如图 1 所示的独立的计算机数字闭环测控系统，由红外加热装置、电功率调节装置、热流和温度传感器、信号放大器、模/数转换器、数/模转换器、控制用计算机等部分组成. 系统工作时，由热流和温度传感器将连续变化的信号采入，经过放大后送入 A/D 进行模数转换. 将测量到的热流和温度值与设定值进行比较后将偏差送入控制程序，计算机通过控制算法对采样数据进行计算得到控制量，并经过 D/A 转换成模拟信号后驱动电功率调节装置，调节石英加热装置上的电压，从而实现飞行器表面热流和温度连续变化过程的自动控制. 针对高速飞行器气动模拟试验瞬态热控过程所具有的变化复杂、高度非线性、瞬变、强耦合的特点，将模糊控制方法应用于瞬态气动热模拟控制系统. 该系统能够按照高速飞行器飞行过程中表面热流和温度的瞬态连续变化对气动模拟加热过程实施快速、准确的动态控制.

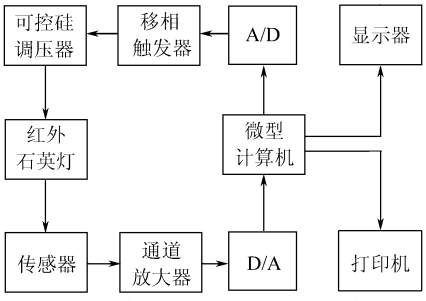


图 1 瞬态气动热试验系统结构图

2 高速热冲击下的热载联合试验

2.1 试 件

试件材料为 2A12(LY12)，采用哑铃形平板试件，其形状和尺寸如图 2 所示. 为了保证试片中部加热区的温度均匀，试件设计得比较长，总长度为 300 mm，平直段有 160 mm，厚度为 2 mm.

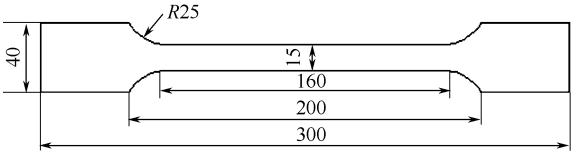


图 2 试验试件(单位：mm)

2.2 试验装置

热载联合试验系统如图 3 所示，由加热、加载两个部分组成. 图 4 为试件加热器的结构示意图，图 5 为加热器的顶视图，为使试件表面加热均匀，石英红外辐射加热管采取密集排列方式，两根加热灯管之间的距离只有 2 mm. 在石英红外辐射器对试件施加可控的动态加热的同时，对试件与结构施加集中载荷或分布载荷，并实时测量、记录材料或结构的温度、应力、应变等物理参量. 气动热模拟试验系统是一个以计算机为中心的多变量、实时瞬态过程自动控制系统.

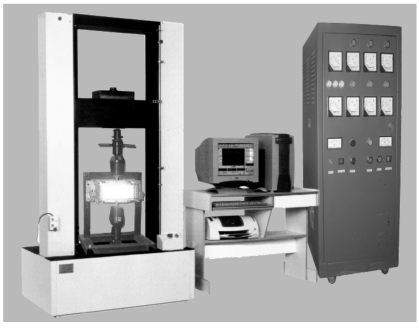


图 3 试验装置图

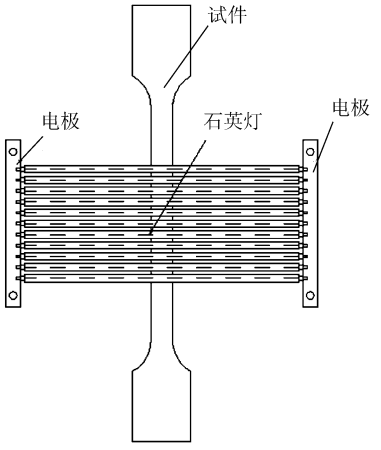


图 4　试件加热装置

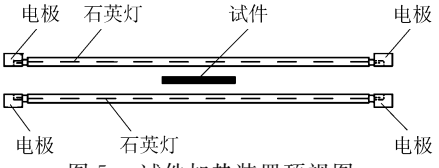


图 5　试件加热装置顶视图

2.3　试验方法

拉伸试验在 5 种不同的温度(室温、150℃,200℃,250℃,300℃)下进行,除室温试验外,在对试片施加拉伸载荷前,由热控系统控制石英灯加热装置快速升温,20 s 将试片表面加热到设定温度,恒温 20 s 后施加拉伸载荷,拉伸速度为 20 mm/min. 温度设定曲线如图 6a～图 6d 所示. 试验中需特别注意热、载系统之间的电耦合问题. 因试件和热电偶均为金属导体,若不采取绝缘措施,加热系统将与加载系统之间会产生严重的电子干扰,影响试验结果. 为此设计了专用的绝缘过渡部件并与电信号光隔元件相结合,使两个系统隔离开,不产生电信号的耦合.

本试验的热冲击过程为各种不同斜率的直线组合而成的控制过程,按照曲线的上升、保持、转折过渡等不同情况,选择了分段多目标的控制策略. 在各段的联接处,由于相邻各段的斜率变化非常大,为了将系统在该处的超调量和振荡减至最小,本文对转折过渡区域进行了智能化处理以应对不同控制算法自动切换. 使用了非线性比例、微分控制算法. 它是一种模糊控制方式. 其控制算法的表达式为

$$\tilde{y} = K_p \tilde{e} + K_d \tilde{\dot{d}} + K_o \int \tilde{e} \mathrm{d}t \qquad (1)$$

式中,$\tilde{y}$ 是控制器输出信号的模糊值;e 是反馈量与给定值的偏差值;$\tilde{e}$ 是控制器偏差信号的模糊值;$\tilde{\dot{d}}$ 是 e 的变化率的模糊值;K_p,K_d 和 K_o 分别为比例、微分和时间系数.

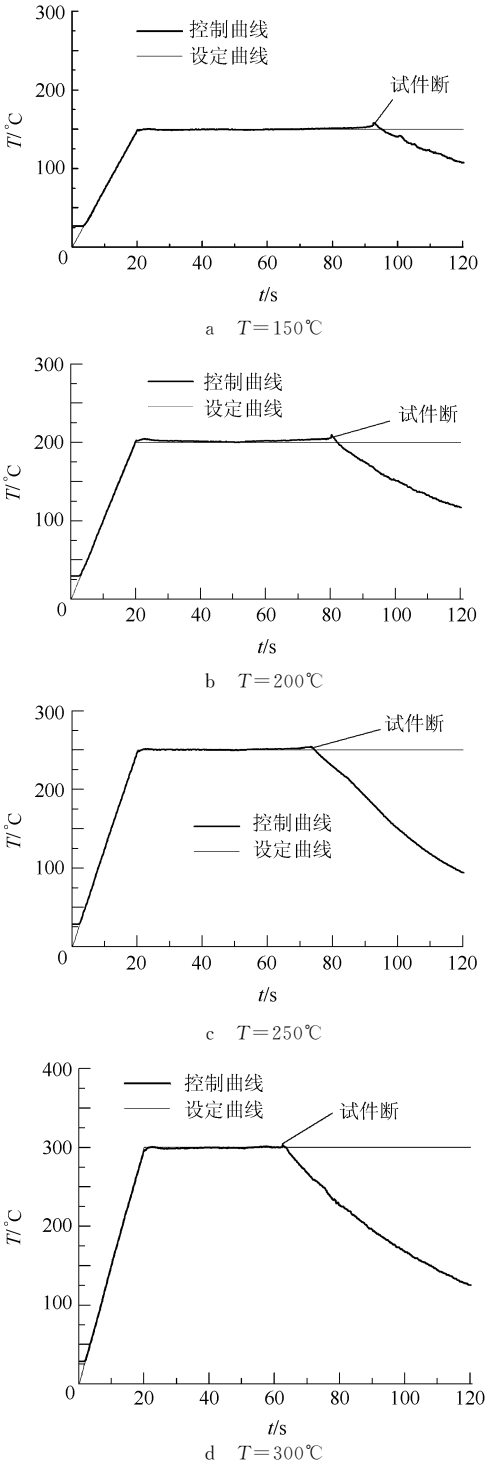


图 6　温度控制曲线

经实验证明本系统不论是对快速升温阶段的定斜率控制,还是对各种快速连续变化的线性、非线性过程以及它们的组合曲线,都取得了很好的控制效果.

3　试验结果

图 6a～图 6d 分别为 150℃,200℃,250℃和 300℃热控过程的设定曲线和实际控制结果曲线,试件被拉断时热控系统关闭,试件温度下降. 从图

中的控制结果可以看到,在拉伸过程中,温度"设定曲线"和"控制曲线"重合在一起,取得了相当好的快速动态控制效果.从图可知设定温度越高,试件被拉断所需的时间越短.

图7为在以上瞬态热冲击环境下(150℃,200℃,250℃,300℃)各拉伸试件的载荷-位移(P-ΔL)曲线.从图7中可以看出,在瞬态热冲击条件下,随着温度升高,材料的弹性模量和强度极限均下降,其中弹性模量下降的并不显著,而强度极限对于不同温度,变化剧烈,当温度升为300℃,材料的强度极限仅为常温时的40%,承载能力显著降低.尽管强度极限下降很多,铝合金材料在瞬态热冲击的条件下(300℃)的强度极限,对于导弹设计人员来说非常重要,因为强度手册表明该材料在300℃时已没有承载能力,而强度手册中的试验条件为长时期恒温后加载的结果,导弹飞行时间短,铝合金材料在导弹发射初期高速升温段的强度极限参数对安全设计和减重极为重要.

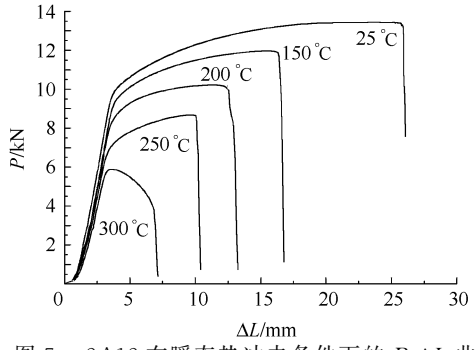


图7 2A12在瞬态热冲击条件下的 P-ΔL 曲线

为排除偶然性,对各种温度条件下的试件都做了重复性试验,图8为相同材料在相同条件下(300℃)的3次拉伸试验结果.从图中可以看出,重复性试验结果一致性良好.

从图6a～图6d可知,加载开始后各试件的承载时间,25℃室温环境下试片于83.3 s时被拉断,其它热冲击温度下拉断时间依此为52.2 s(150℃),40 s(200℃),32.6 s(250℃),22.1 s(300℃).各种温度条件下材料的承载时间的获得对导弹飞行过程中剩余强度的确定和结构减重提供了重要依据.

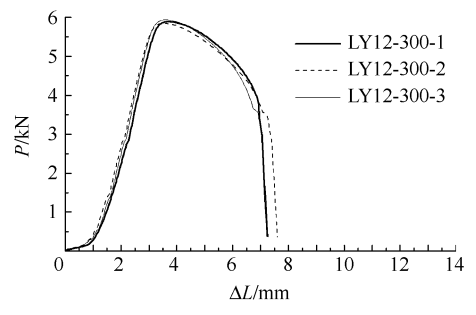


图8 2A12在高速加热到300℃的 P-ΔL 曲线

4 结 论

本文对在飞机、导弹中常用的2A12铝合金在不同瞬态热冲击温度下的力学性能进行了试验研究,得到2A12在瞬态热冲击条件下的强度极限等关键使用参数.为研究分析航空材料和结构在瞬态热、力学环境的共同作用下的力学性能变化及结构受力状况与承载能力提供了重要的试验依据.

参考文献(References)

[1] 《中国航空材料手册》编辑委员会.中国航空材料手册[M].北京:中国标准出版社,2001
《China aeronautical materials handbook》Redaction Committee. China aeronautical materials handbook[M]. Beijing: China Standard Press, 2001(in Chinese)

[2] 王国韬,谢惠民,戴福隆,等.大电流快速加热条件下LY12铝板动态变形的云纹干涉法实验研究[J].实验力学,1997,12(3):449－456
Wang Guotao, Xie Huimin, Dai Fulong, et al. Experimental study on the dynamic deformation of LY12 aluminum plate heated by strong current with moiré interferometry[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1997, 12(3): 449－456 (in Chinese)

[3] 杨运民,彭向和,陈裕泽,等.温升率对LY12铝合金拉伸响应特性的影响[J].金属学报,2000,36(9):926－930
Yang Yunmin, Peng Xianghe, Chen Yuze, et al. Effect of heating speed on mechanical properties of LY12 aluminum alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 36(9): 926－930 (in Chinese)

[4] 韩铭宝,刘宗德,刘怡光.热冲击下A3钢力学性能的研究[J].爆炸与冲击,1999,19(1):20－26
Han Mingbao, Liu Zongde, Liu Yiguang. An experimental study on the mechanical behavior of A3 steel under rapid heating[J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(1): 20－26(in Chinese)

[5] 谭云,余勇,潘晓霞,等.高温热冲击对J75不锈钢力学性能及微观组织的影响[J].金属学报,2002,38(7):684－688
Tan Yun, Yu Yong, Pan Xiaoxia, et al. Effect of high temperature thermal shocking on the mechanical property and microstructure of stainless steel J75[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(7): 684～688(in Chinese)

[6] 吴大方,房元鹏,张敏.高速飞行器瞬态气动热试验模拟系统[J].航空计测技术,2003,23(1):9－11,14
Wu Dafang, Fang Yuanpeng, Zhang Min. Experimental simulation system of transient aerodynamic heating for high-speed flight vehicle[J]. Aviation Metrology & Measurement Technology, 2003, 23(1): 9－11, 14(in Chinese)

(责任编辑:赵海容)