

高温对单搭接接头强度的影响

王玉奇 何晓聪 周森 邢保英 杨慧艳

(昆明理工大学机电工程学院,昆明 650000)

文 摘 对不同温度下单搭接接头进行拉伸试验,对比不同温度对接头强度的影响。结果表明,温度越高,接头强度越低,同时,随着温度的升高,胶层的破坏模式也发生变化。通过有限元数值仿真,模拟不同温度下胶层表面上等效应力的分布情况,得出温度越高,胶层热应力越大,接头强度越低等结论。

关键词 高温,粘接接头,有限元,热应力

中图分类号: TG495

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.01.017

Influences of High Temperature on Strength of Adhesively Bonded Single Lap Joints

WANG Yuqi HE Xiacong ZHOU Sen XING Baoying YANG Huiyan

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000)

Abstract In order to explore the strength of the structure with lap joints, the adhesively bonded single lap joints with differential temperature were tested in tension loading which creates shear across the bondline. The equivalent stress was obtained through finite element analysis to define the effect of temperature, which helped to get the conclusions that the higher of the temperature, the bigger of the thermal stress and thermal stress value and the stronger of the adhesive strength. Then, the failure modest of the adhesive varied with the increasing of the temperature.

Key words High temperature, Bonded joint, FEM, Thermal stress

0 引言

随着科技的迅猛发展,胶接技术作为一种独特的结构连接技术,因其具有操作简单、周期短、成本低、抗疲劳性好、可连接异种材料等优点,在轻质设计的汽车工业领域和航空工业领域中越来越重要^[1]。

近年来,温度对粘接接头强度的影响,日益受到国内外学者的关注^[2-7]。L. F. M. da Silva 和 R. D. Adams^[8]研究了3种结构胶黏剂在-55~200℃的拉伸和剪切性能。M. Kemal 等^[9]指出在黏接剂与被黏物接口处的自由边和相应的粘接区域是最重要区域,而且粘接面边缘处的条件好坏对黏接剂和被黏物的临界应力起着重要作用。L. D. R. Grant 等^[10]指出适用于室温的失效准则在高低温下同样适用。针对高温环境下,温度对单搭接接头破坏模式的影响以及热

应力对单搭接接头强度影响的文献相对较少。

本文通过试验研究分析了20、50、80和90℃对接头强度和破坏模式的影响,并运用有限元法分析了粘接层的热应力分布,为以后的相关设计提供参考。

1 试验

1.1 试件制备

试件的制备:被黏物为5052铝合金板,尺寸110 mm×20 mm×1.5 mm;黏接剂为丙烯酸酯(3M-DP810)。用无水乙醇对板材表面进行脱脂处理,干燥后涂抹3M-DP810黏接剂,粘接面积20 mm×20 mm。根据文献^[11],为了将粘接层厚度控制在0.20 mm,在粘接层中加入两段直径为0.16 mm长度为10 mm的细铜丝,如图1所示。将粘接好的试件在室温下固化24 h。

收稿日期:2013-09-30

基金项目:国家自然科学基金项目(50965009);昆明理工大学分析测试基金(2011489)

作者简介:王玉奇,1987年出生,博士研究生,主要研究方向为薄板材料连接新技术。E-mail:sdyuqi@126.com

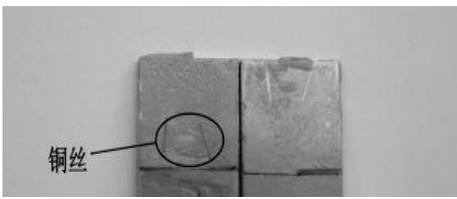


图1 胶层中的铜丝

Fig.1 Copper wire in adhesive layer

1.2 试验操作

采用 MTS 试验机先对 5052 铝合金板材进行力学测试,再对接头进行力学测试。

(1) 试验温度分别取 20、50、80 和 90℃。其中 20℃ 为参考温度。

(2) 在试件两端分别粘贴 20 mm×20 mm×1.5 mm 垫片,以防产生扭矩,移动温控箱,使试样处于温控箱的中心位置,以保证受热均匀,如图 2 所示。

(3) 在进行高温试验过程中,保温 10 min,温度波动为 ±3℃;拉伸速率为 5 mm/min,对其进行拉伸—剪切测试。

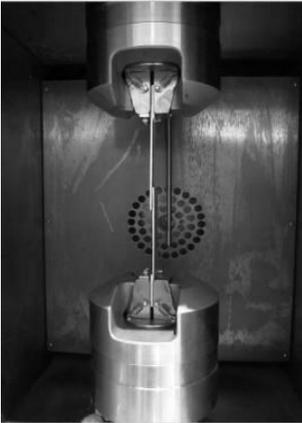


图2 温控箱中的单搭接试件

Fig.2 Adhesive bond in an oven

2 结果及分析

2.1 温度对 5052 铝合金板材的影响

被黏物 5052 铝合金板材在不同温度下的破坏模式,如图 3 所示。



图3 5052 铝合金板材在四个温度下的破坏模式

Fig.3 Failure modes of aluminum alloy plate

4 个试件断裂位置不一样,由加工或装夹过程中产生的应力集中造成。5052 铝合金板材在四个温度宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014 年 第 2 期

下的载荷—位移曲线(图 4),对应的最大失效载荷分别为 6702.6、6438.4、6378.2 和 6566.7 N,而最大与最小失效载荷值相差 5%,可认为对铝合金板材的强度没有影响。在分析温度对单搭接试件的影响时可以排除温度对铝合金板材的影响。

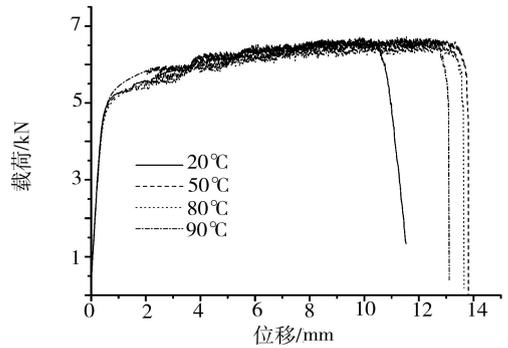


图4 5052 铝合金板材在四个温度下的载荷—位移曲线

Fig.4 Force-displacement curve of aluminium alloy plate with different temperature

2.2 温度对单搭接试件破坏模式的影响

为保证试验数据的有效性,每组做 6 个单搭接试件,分别观察和分析不同温度下接头的破坏模式(图 5)。

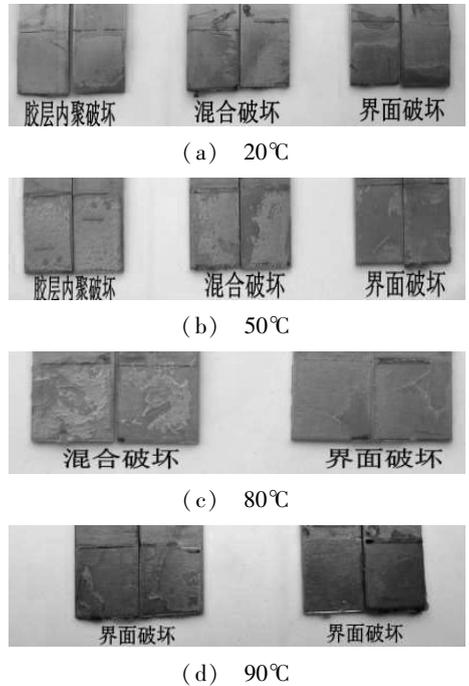


图5 不同温度试件破坏模式

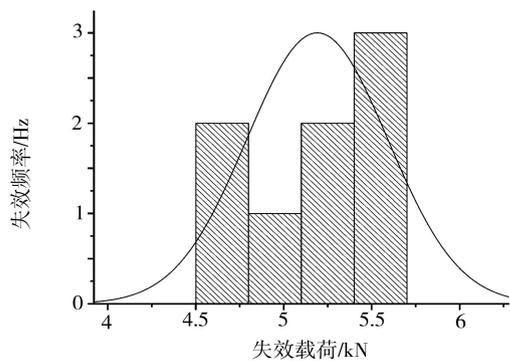
Fig.5 Failure modes at different temperature

在 20℃ 时,出现了胶层、混合和界面破坏三种破坏模式,其中胶层破坏模式占 40%,混合破坏模式占 20%,界面破坏模式占 40%。在 50℃ 时,出现了胶层、混合和界面破坏三种模式,其中胶层破坏模式占 33.3%,混合破坏模式占 11.1%,界面破坏模式占 55.6%,与 20℃ 时相比,发生内聚破坏模式和发生混合破坏模式的试件减少,而发生表面破坏模式的试件增多。在 80℃ 时,出现了混合破坏和界面破坏两种

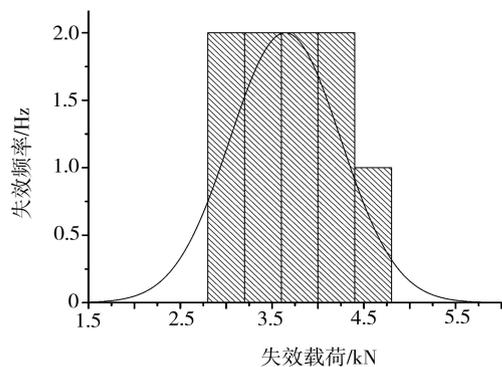
模式,其中混合破坏模式占 12.5%,界面破坏模式占 87.5%,与 50℃ 时相比,没有出现胶层破坏模式,发生界面破坏模式的试件明显增多。在 90℃ 时,只出现了界面破坏模式,即界面破坏模为 100%,与 80℃ 时相比,不但没有发生混合破坏模式,而且发生界面破坏模式的试件明显增多。通过以上分析,可以得到,随着温度的变化,粘接接头的破坏模式会发生变化,温度过高时,会影响粘接效果。

2.3 温度对粘接接头强度的影响

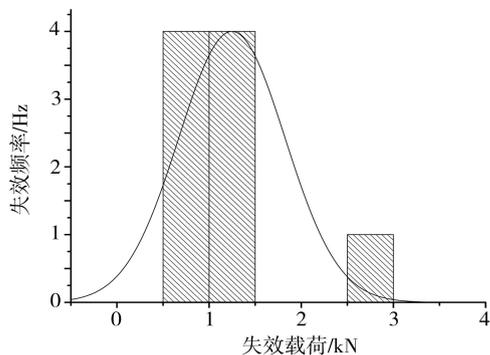
对于试验结果,用 Matlab 的拟合优度检验试件最大失效载荷的统计分布,使用样本置信区间估计命令以 95% 的置信度估计置信区间来检验数据的有效性。经 Matlab 拟合优度检验,在 20、50、80 和 90℃ 下粘接接头的最大失效载荷均服从正态分布,则试验数据为有效试验数据。试件在四个不同温度下最大失效载荷正态分布直方图见图 6。



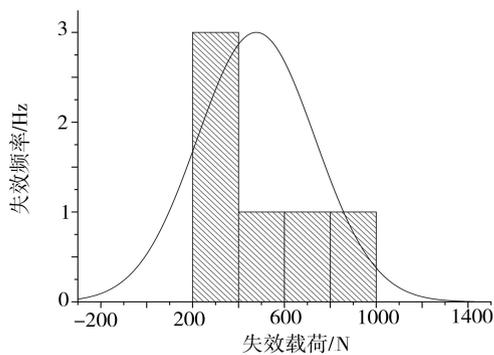
(a) 20℃



(b) 50℃



(c) 80℃



(d) 90℃

图 6 不同温度时最大失效载荷正态分布直方图

Fig. 6 Normal histogram of maximum failure load at different temperature

均值和方差见表 1,可以看到,温度越高,粘接接头强度越低。单搭试件在不同温度下的位移—载荷曲线如图 7 所示。

表 1 不同温度下粘接接头最大失效载荷的统计量

Tab.1 Statistic of maximum failure load in different temperature

温度 /℃	平均值/N	方差
20	5190.7	161060
50	3644.7	363680
80	1247.3	332840
90	477.3	65851

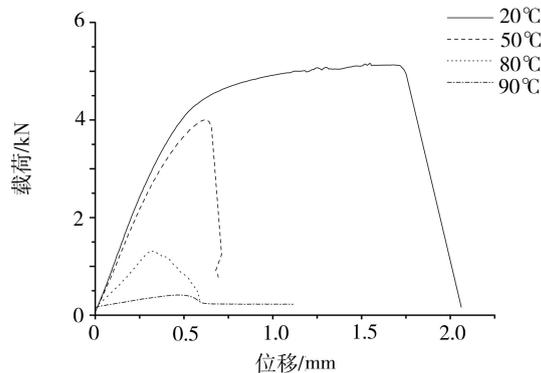


图 7 单搭试件在不同温度下的位移—载荷曲线

Fig. 7 Force-displacement curve of adhesive bond at different temperature

图 7 可知:(1)开始时,呈现斜直线,说明载荷值逐渐变大,接头还处在弹性阶段,达到峰值即失效载荷后,载荷值逐渐减小;(2)对比四个温度下试件拉伸初始阶段的直线斜率,温度越高,对应直线的斜率越小,黏接剂的弹性模量越小;(3)对比四个温度下拉伸载荷的峰值,温度越高,峰值越小,黏接剂的剪切强度也越小

3 有限元法仿真分析

在拉伸—剪切试验中,单搭接接头受到剪切力和剥离应力的作用,且由于外界为高温环境,被黏接件宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014 年 第 2 期

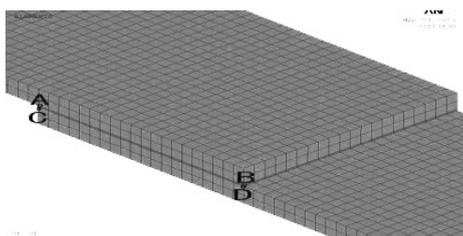
与黏接剂之间还存在着热应力。本部分采用理论分析法和有限元法分析粘接接头在四种温度下的热应力分布情况。

3.1 有限元模型的建立

借鉴 U. K. Vaidya 等^[12]的分析模型,铝合金板和黏接剂被定义为线弹性材料。在 20℃ 中,采用 3D solid45 单元;在 50、80 和 90℃ 中使用热-结构顺序耦合,采用 3D solid70 三维热实体单元,该单元可用于三维稳态或瞬态的热分析问题,并可补偿由于恒定速度场质量输运带来的热流损失。该热单元在进行结构分析时,可被一个等效的结构单元 solid45 所代替。接头部分的几何形状和有限元模型,如图 8 所示。5052 铝合金板和胶层材料属性见表 2。



(a) 接头的几何形状



(b) 接头的有限元模型

图 8 接头部分的几何形状和有限元模型

Fig. 8 Geometry and finite element model of adhesive joints

表 2 5052 铝合金板与丙烯酸酯材料属性

Tab.2 Material properties of aluminum alloy and methacrylate

材料	热导率/ W·(m·K) ⁻¹	线胀系数/ 10 ⁻⁵ K ⁻¹	弹性模 量/MPa	泊松 比	比热容/ J·(kg·K) ⁻¹	密度/ g·cm ⁻³
5052 铝合金	235	2.0	69460	0.30	880	2.68
丙烯酸酯	0.19	5.5	330	0.34	1400	0.98

3.2 胶层热应力分析

当物体温度发生变化时,物体将由于膨胀而产生线应变,由于铝合金板与黏接剂的弹性模量、线胀系数相差很大,并且两者粘接在一块相互约束,必然产生热应力,即

$$\varepsilon_T = \alpha \Delta T \quad (1)$$

$$\sigma_T = E \varepsilon_T \quad (2)$$

式中, ε_T 为线应变, σ_T 为热应力, ΔT 为温度改变值, α 为线胀系数, E 为弹性模量。因此,在铝合金板和黏接剂弹性模量、线胀系数一定的情况下,温度改变值 ΔT 越大,线应变越大,对应的热应力越大。则通过公式(1)(2)可以得到单搭接试件在四种温度下,

胶层中热应力的大小关系为 $\sigma_{T90} > \sigma_{T80} > \sigma_{T50} > \sigma_{T20}$, 在 50℃ 时的胶层热应力云图,如图 9 所示。

胶层表面 AB 与胶层表面 CD 上的应力成反对称分布^[13],因此本文只分析胶层表面 AB 上的应力。单搭接试件在 20、50、80 和 90℃ 下,胶层表面 AB 热应力曲面如图 10 所示。

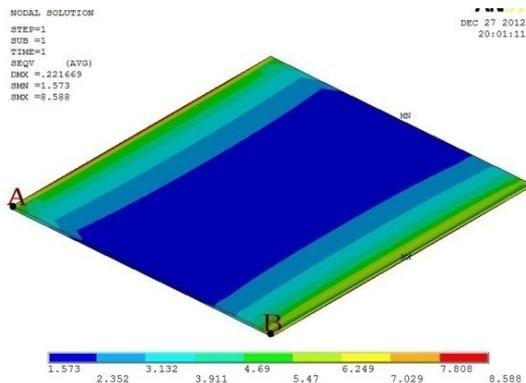
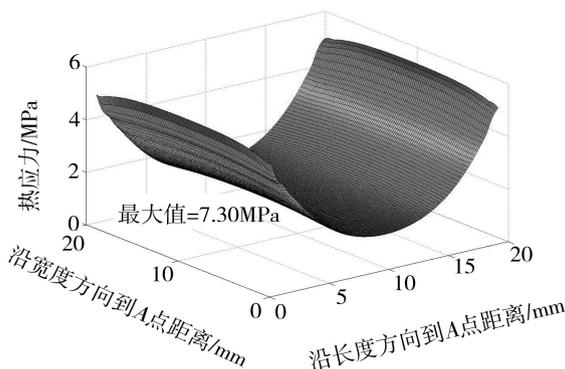


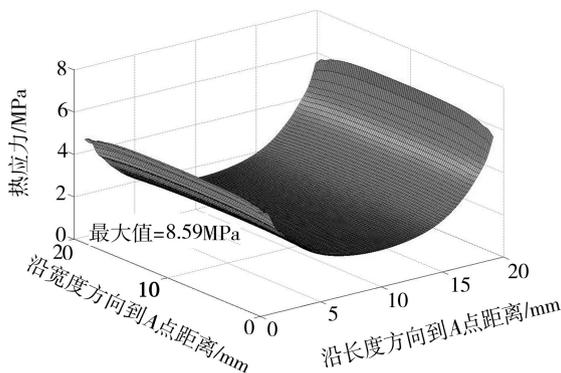
图 9 50℃ 时单搭接试件胶层热应力云图

Fig. 9 SEQV of thermal stress of bondline at 50℃

通过分析,可以得到:四种温度下,胶层的热应力分布相同,均表现为“高-低-高”的分布形式,最大热应力都出现在沿长度方向的端部,最小热应力都出现在胶层中部;在 20、50、80 和 90℃ 下,胶层最大热应力分别为 7.30、8.59、8.61 和 8.62 MPa,则温度越高, Von mises 应力越大 ($\sigma_{T90} > \sigma_{T80} > \sigma_{T50} > \sigma_{T20}$),粘接接头强度越低。



(a) 20℃



(b) 50℃

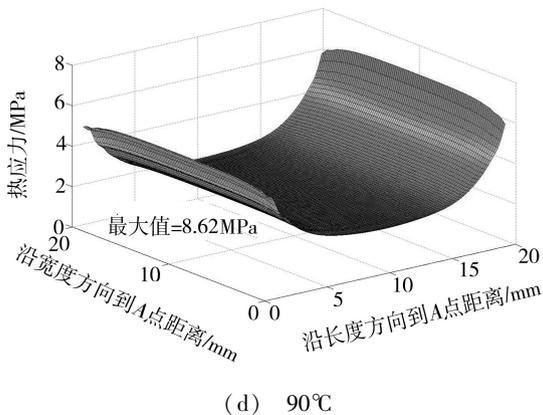
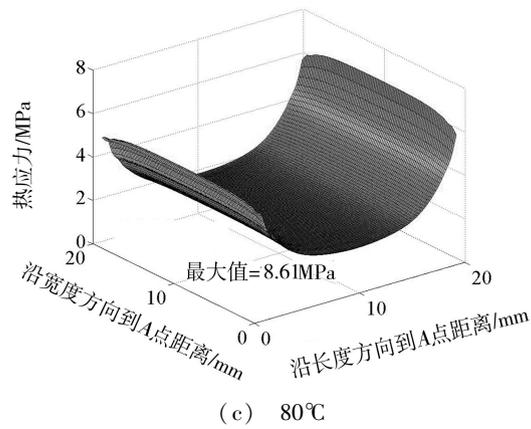


图 10 四种温度胶层表面 AB 热应力曲面

Fig. 10 Thermal stress of surface AB of adhesive layer at different temperature

3.3 试验与仿真结果对比分析

试验结果显示,温度越高,黏接剂剪切强度越小,使得粘接接头强度降低,并且在四种温度条件下,粘接接头的强度相差较大。仿真分析结果表明,温度越高,胶层中的热应力越大,也会使得粘接接头强度降低。

4 结论

通过试验法研究了高温对粘接接头强度的影响,通过有限元法分析了粘接层热应力分布情况,最后,对比了试验结果和仿真结果,得到如下结论。

(1) 温度对粘接接头强度影响明显:温度越高,黏接剂剪切强度越小,使得粘接接头强度越低,并且随着温度的升高,粘接接头的破坏模式也会发生变化,20°C 粘接接头的破坏模式为胶层破坏、混合破坏和界面破坏模式;50°C 时,以界面破坏模式为主,含有少部分的胶层破坏和混合破坏模式;80°C 时,仍以界面破坏模式为主,含有少部分的混合破坏模式;90°C 时,为界面破坏模式。

(2) 有限元结果表明:当温度取 20、50、80 和 90°C 时,温度越高,热应力越大,也会使得粘接接头强度越低。

(3) 对比试验结果和仿真结果表明:高温对粘接

接头强度影响明显,温度升高时,黏接剂剪切强度会变小,胶层热应力会越大,进而导致粘接接头强度降低。

参考文献

- [1] 孔凡荣,游敏,郑小玲,等. 胶粘剂力学性能参数对劈裂载荷作用下胶接头中应力分布的影响[J]. 航空材料学报,2006(4):110
- [2] Lucas F M da Silva, Adams R D. Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2007, 27: 449
- [3] Lucas F M da Silva, Adams R D. Joint strength predictions for adhesive joints to be used over a wide temperature range[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2007, 27: 362
- [4] Kemal Apalak M, Gul Apalak Z, Gunes R, et al. Steady-state thermal and geometrical non-linear stress analysis of an adhesively bonded tee joint with double support[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2003,27: 115
- [5] Al-Samhan A, DarwishInt S M. Factors influencing thermol-mechanical stresses developed in bonded tools[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2005, 25:379
- [6] 孔凡荣,游敏,郑小玲,等. 间隙连接对胶接头应力分布和强度的影响[J]. 宇航材料工艺,2004,34(4):39
- [7] He X C. A review of finite element analysis of adhesively bonded joints[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives,2011,31:248
- [8] Lucas F M da Silva, Adams RD. Measurement of the mechanical properties of structural adhesives intensionand shear over a wide range of temperatures[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2005, 19:109
- [9] Kemal A M, Gunes R, Eroglu S. Thermal residual stresses in an adhesively bonded functionally graded tubular single lap joint[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007, 27: 26
- [10] Grant L D R, Adams R D, Lucas F M da Silva . Effect of the temperature on the strength of adhesively bonded single lap and T joints for the automotive industry[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2009, 29: 535
- [11] He X C, Ichikawa M. Effect of thickness control of adhesive layer on strength of adhesive joints[C]//70th Proceeding of JSME Spring Annual Meeting, Tokyo,1993:490
- [12] Vaidya U K, Gautam A R S, Hosaur M, et al. Experimental numerical studies of transverse Impact response of adhesively bonded lap joints in composite structures[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006, 26: 184
- [13] 陈焯,李玉龙,史飞飞,等. 板厚、温度和速度对单搭接胶接头强度的影响[J]. 爆炸与冲击, 2009(5):449

(编辑 任涛)