

T6 处理与硼/6061 铝复合材料强度性能的关系

北京航空材料研究所 孙长义

本文探讨 T6 处理与硼/6061 铝复合材料强度性能的关系。对于纤维体积密度为 45% 的板材试样, T6 处理后, 有可觉察到的强度增加趋向, 增幅接近于混合定则的估算值。对于 50% 密度的试样, 强度变化无明显规律性。文章从纤维与基体膨胀系数、界面结合状态、残余应力等方面讨论了 T6 处理的影响。并认为由于 6061 铝合金熔点较低, 复合时利于减少纤维损伤。同时为了简化工艺防止构件淬火变形, 在有些情况下, 虽选用 6061 铝合金, 但不进行 T6 处理是适宜的。

The Influence of Heat Treatment on the Fracture Behaviour of B/6061Al Composite

Sun Changyi

(Beijing Institute of Aeronautical Materials)

In this paper the influence of T6 heat treatment on the fracture behaviour of B/6061Al composite was investigated. The effects of various factors such as difference between thermal expansion coefficients of the boron fiber and aluminium, interfacial bonding strength, and residual-stress were also discussed. It was found that the tensile strength of composite with fiber volume fraction 45% was increased slightly and the variations in composite strength with fiber volume fraction 50% were complicated after T6 heat treatment. Therefore, in many cases the B/6061Al composite can be manufactured by diffusion bonding, and no subsequent heat treatment is normally carried out.

由于高的比强度与比刚度, 硼纤维增强铝复合材料在现代航空航天技术领域中受到广泛重视。为了发挥更好的结构效益, 追求更高的应用效果, 在硼/铝复合材料的应用研究过程中, 曾选择不同铝合金作为基体, 其中使用较多的是铝-镁-硅系 6061 变形铝合金。很明显, 最初选取这种铝合金的主要目的, 是希望通过时效处理来进一步提高硼/铝复合材料的性能水平。然而硼/铝复合材料是方向性增强的非均质材料, 纤维与基体的热膨胀系数有很大差异。受热工艺影响的界面结合状态, 在一定程度上左右着材料的强度水平, 因此热处理的作用与影响是很复杂的。

一、实验方法

使用 CVD 工艺生产的直径 140 μm 钨芯硼纤维, 纤维含 3 μm 厚的碳化硼涂层。6061 铝合金箔厚度为 35 μm 与 60 μm 。

在滚筒上铺设一定厚度的铝合金箔, 按设计的纤维体积密度, 将纤维通过溶胶槽缠绕在箔上, 制取带铝合金箔的硼纤维树脂带。经剪裁、叠合, 在真空热压炉中真空加热除胶, 再以 49MPa 压力在 540 $^{\circ}\text{C}$ 热压 1.5h。

六层纤维树脂带叠合后得到厚 1mm 的板材, 线切割成 10mm \times 75mm 的试样。性能测试时, 在试样端部两侧粘接 10mm \times 25mm 的钝铝夹持片, 在 Instron 1253 试验机上以 0.5mm/min 的速度, 测量抗拉强度。18 层纤维树脂带热压后的板材厚约 3mm, 线切割成 3mm \times 3mm \times 40mm 的试样测量热膨胀系数。

T6 处理: 530 $^{\circ}\text{C}$ 固溶水淬后 160 $^{\circ}\text{C}$ 18h 人工时效。

二、实验结果与讨论

实践表明, 由于连续纤维增强金属基复合材料方向性增强的特点及材质的不均匀性, 固溶化后的淬火操作有一定的困难。实验时曾在硼/铝板两侧用钢板夹持, 并随同一起加热水淬, 复合材料板有时仍会出现弯曲变形现象。切割成试样后, 必然影响测试数据的准确性。显然, 如果硼/铝复合材料制件呈非对称形, 或按受载设计需要局部采用纤维角度铺设时, 自由态的淬火操作所造成的变形是较难避免的。根据作者判断, 美国各技术集团虽曾选用多种可热处理的铝合金作为基体材料, 研制硼/铝复合材料航空发动机叶片^[1], 但并不特定要求进行时效处理的重要原因之一, 即在于此。

为了最大程度消除硼/铝复合材料在淬火时变形的影响,先将板材线切割成试样,再用图1的方法进行淬火工序,效果良好。

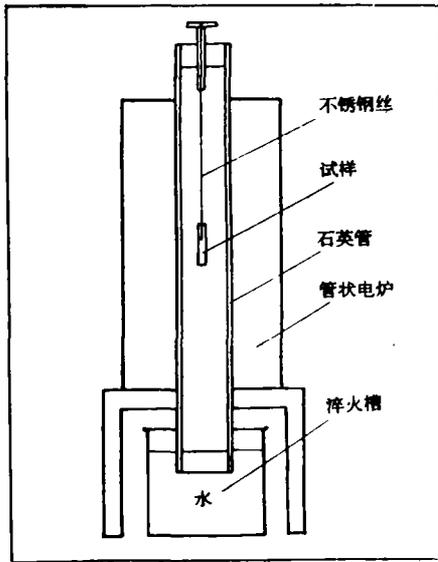


图1 硼/6061 铝板试样, 竖式水封法固溶加热水淬

若纯铝板材 σ_b 按100MPa计,而6061铝合金热加工态为160MPa、T6处理后为300MPa时,用混合定则对复合材料的强度估算表明,当纤维体积含量为50%时,硼/6061铝复合材料经T6处理后与纯铝基体的硼/铝复合材料相比,其强度增益可达100MPa左右。对6061铝合金基体来说,T6处理前后的强度增益约为70MPa。表1为两种纤维体积密度硼/6061铝复合材料T6处理前后的强度性能变化。纤维原始平均强度为2800MPa。

表1 T6处理对硼/6061铝复合材料强度的影响

试验编号	纤维体积密度, %	T6处理前的抗拉强度, MPa	T6处理后的抗拉强度, MPa	强度值增益, MPa
1	45	1060	1110	50
2	45	1150	1210	60
3	45	1060	1110	50
4	45	1070	1090	20
5	50	1190	1210	20
6	50	1220	1220	0
7	50	1250	1210	-40

注:表中每一强度数据为3~4根试样的测试平均值

实验结果发现,对于纤维体积密度为45%的复合材料试样,T6处理后有强度增加的可见趋向,其增值幅度接近于混合定则的估算值。在纤维体积密度为50%的情况下,T6处理对强度的影响没有明显的规律性,甚至有的试样出现强度负值增长。一般说来,纤维体积密度较低的复合材料,基体强化性质所占的比例略大,时效强化的作用,相对易于表现。

铝与硼纤维的膨胀系数分别为 $2.4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 与 $4.9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$,两者差异较大。制成复合材料后的膨胀系数示于表2。测定值与资料数据相符。

表2 硼/6061铝复合材料的热膨胀系数

材料	纤维体积密度, %	温度范围 °C	热膨胀系数 $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	注
硼/6061铝	50	-195~25	4.0	取自文献资料[2]
		25~370	6.0	
硼/6061铝	45	34~300	6.24	
		34~500	6.26	

当硼/铝复合材料从制造状态的高温下冷却时,在复合后界面有良好结合的前提下,基体处于拉伸状态而产生塑性变形和弹性拉伸,而纤维则处于压缩状态只产生弹性收缩。与纤维体积密度有关的复合材料内部的总的应力,应该是平衡的。也即基体所受的总的拉伸应力,在数值上与纤维所受的总的轴向压缩应力相等。在已知纤维体积密度 V_f ,纤维与基体的膨胀系数 α_f 与 α_m ,纤维与基体的弹性模量 E_f 和 E_m ,及制造温度 T 的情况下,基体中的内应力是可以从理论上加以计算的[3]:

$$(\sigma)_m = \frac{V_f E_f E_m}{E_m} \cdot (\alpha_f - \alpha_m) \cdot \Delta T$$

式中 ΔT 为计算时选取的温度与复合温度之差。对于6061铝合金,热压扩散结合温度可选为 540°C 。室温 20°C 时, ΔT 为 -520°C 。复合材料的弹性模量 E_c 与纤维体积密度有关,用混合定律计算值与实验测定值基本相符。 E_f 和 E_m 分别为360GPa和70GPa。用上式计算的硼/6061铝复合材料纤维体积密度与基体中内应力的关系如图2所示。对于纤维体积密度为50%复合材料来说,铝合金基体中的内应力已达到550MPa左右。显然,如此高的应力值远超过铝合金的屈服点,使铝合金基体产生塑性变形,并使内应力部分弛豫。X-射线衍射分析指出,热压制造态的硼/6061铝复合材料,铝合金基体中的拉伸残余应力为90MPa,而T6处理以后,该应力值可达到160MPa左右[4]。增长的幅值为70MPa,在量值上,与用混合定律估算的基体时效强化增值相当。有的学者采用模拟方法[5],实验测定了铝合金基体因膨胀系数的差异,受强迫的制约作用而产生塑性变形,和随之产生的应变硬化作用。在测定该铝合金基体在拉伸时的应力-应变曲线时,可以明显观察到屈服点有所提高,屈服强度增加约30MPa。该模拟试验中,使铝基体受到热膨胀制约的是钢材。实际上,硼纤维的膨胀系数要小于钢材,因此铝基体受硼纤维的制约作用产生应变硬化,而导致屈服强度的提高,在数值上应该大于30MPa。

然而,事实表明,热处理对硼/6061铝复合材料强度

性能的影响,并不总是有利的。这是因为在对连续纤维增强金属基复合材料的内应力进行分析或计算时,往往忽略或简化了计算模式中的界面行为。实践证明,纤维-基体间界面结合的类型与状态,是影响硼/铝复合材料力学性能的重要因素^[6]。热处理工序使复合材料又经受一次热冲击,除纤维会增加损伤外,基于原制造状态下纤维与基体的界面结合情况不同,也易产生不同程度的界面脱粘作用,直接影响复合材料受载时负荷的传递。同时,人工时效处理在强化基体的同时,由于基体合金的蠕变现象,也会造成基体与纤维间应力状态的松弛。这些因素对于复合材料热处理后的强度提高存在不利的倾向。很显然,由于纤维与基体之间的界面效应而产生的这类作用,应该受到纤维体积分数的影响。

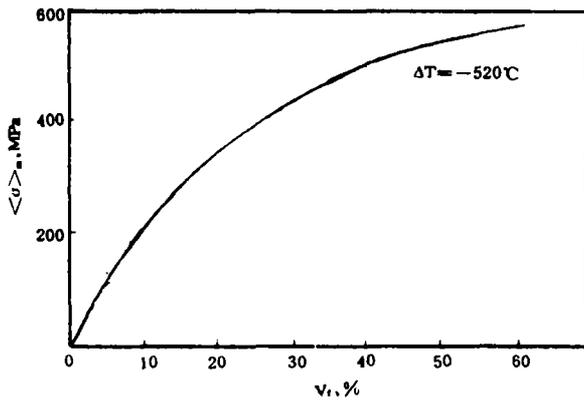


图2 硼/6061 铝复合材料基体中内应力与纤维体积分数的关系

6061 铝合金具有良好的塑性,其熔点低于纯铝。在其他工艺参数相同时,为了得到同样状态的界面结合,可降低硼/6061 铝复合材料的真空热压温度约 30℃。这无疑会降低热压时纤维的损伤,对提高复合材料性能水平有积极意义。同时,即使不进行 T6 处理,热加工状态的 6061 铝合金的强度值,比纯铝要高约 60MPa。因此,在工程应用硼/铝复合材料时,建议选用 6061 铝合金作基体,但为了简化工艺及避免带来不必要的麻烦,对具体构件可以不进行热处理。

三、结 论

1. 由于热膨胀系数差异引起的纤维与基体的相互制约作用、复合材料界面效应及内应力变化的综合影响, T6 处理对硼/6061 铝复合材料强度性能的作用是复杂的,某相的作用起主导地位时,会产生不同的结果。
2. 本实验条件下,纤维体积密度 45% 的硼/6061 铝复合材料, T6 处理后强度有提高的趋向。50% 纤维体积比的材料,无明显规律性。
3. 硼/6061 铝有良好的复合工艺性能。工程应用时,为了简化工艺或防止复合材料构件变形,有时候不进行热处理是适宜的。

参加此项工作的还有徐洪清、金成山、姚治平、戴南荣、高山等同志。

参考文献 (略)

(上接第 6 页)

(2) 航空有特殊要求的重要功能材料由材料工业部门或专门机构研究材料,航空工业系统的研究机构与材料生产部门合作结合航空特点进行应用研究与性能评估。例如,红外探测器材料碲镉汞 (HgCdTe),飞机及导弹整流罩用红外透射光学材料氟化镁、蓝宝石,航空激光陀螺、激光制导、激光雷达用激光材料红宝石激光晶体、钕-钇铝石榴石激光晶体 (YAG),传感器材料,电子吊舱关键功能材料砷化镓等。

(3) 航空用关键新型功能材料应在航空工业内部进行材料及应用研究。例如,红外吸波材料、雷达吸波材料和结构吸波材料等飞机隐身材料,整体风档和气泡式座舱的隐身透明座舱材料,诱饵材料,恒弹性合金,零膨胀玻璃,减震材料,热障涂层材料,防钛零件摩擦起火的材料,耐磨材料、封严材料和防腐蚀材料等。

2. 在航空材料、热工艺及理化测试技术发展中心设立航空功能材料专业委员会,将航空工业系统的功能材料专家及有关的设计和使用人员组织起来,对航空功能材料的发展进行规划、分工和配套发展,并根据需要与可能不断调整发展计划。

3. 在北京航空材料研究所建立功能材料研究、测试及加工基地,建立必要的研究、测试及加工设备和仪器,组成总公司所属的挂靠在北京航空材料研究所的功能材料实验室,并以此为枢纽连接产品设计和制造部门组成航空功能材料及制品的设计、研究及生产的完整体系。

4. 将航空功能材料及其制造技术列入航空材料及航空制造技术中长期发展规划及相应的五年计划,并予以适当比例的经费支持。

六、结束语

综合上述,现代航空技术广泛应用的最新技术成就多数是借助于功能材料的特性而实现的,不论在未来的军用航空技术还是民用航空技术,功能材料的作用都将越来越大。而这一技术领域在我国却十分落后,为此,特建议,制定统一的发展规划,建立航空功能材料研究、测试及加工基地,组成航空功能材料的产品设计、材料研究和产品生产的统一体系,将航空功能材料研究列入国家计划,并予以足够的经费支持,集中力量,根据需要进行研究,以逐步适应我国航空技术发展的需要。