

复合材料热膨胀成型工艺研究与应用

靳武刚

(信息产业部电子第三十九研究所, 西安 710065)

摘要 简要叙述热膨胀工艺的原理和成型工艺过程, 对热膨胀芯模的材料性能和设计、制造进行试验, 分析影响膨胀压力的因素, 并与热压罐成型工艺进行性能对比。以硅橡胶材料制作的芯模与钢模组合使用制备碳纤维复合材料制件, 应用效果较好。研究表明, 该工艺适用于多腔体复合材料制件的整体共固化成型。

关键词 复合材料 热膨胀 工艺

纤维增强塑料是工程塑料应用的一种重要形式, 其中连续纤维增强树脂基复合材料是最具有工程应用价值的结构材料之一。碳纤维复合材料是现代先进复合材料的代表, 因其高比强度、高比刚性的特点而在航天、航空、电子等领域广泛应用。现代先进复合材料结构设计基本特点是尺寸大、形状复杂, 强调整体性, 对制造技术提出了更高的要求, 一般的工艺方法难以适应。

热膨胀工艺是指复合材料预浸料在闭合刚性阴模中通过硅橡胶芯模的热膨胀来实现对复合材料加压固化的成型工艺方法。该方法也可用开放式阴模, 硅橡胶模主要起均压作用, 固化压力来源于外压源。闭模法只需要烘箱对模具加热, 不需要造价昂贵的热压罐设备, 而且成型模具相对而言比较简单, 只要求阴模有很好的刚度。同时, 硅橡胶芯模能产生各个方向的膨胀压力, 特别适用于结构复杂的复合材料结构件的成型。笔者主要讨论闭模法成型多腔体复合材料结构件。

1 热膨胀成型工艺基本原理

碳纤维复合材料结构件形式多样, 成型工艺也各不相同。一般复合材料成型工艺中, 复合材料固化压力来源于外压力源, 如负压、压力袋、热压罐、模压等。热膨胀工艺与之有本质的区别, 热膨胀工艺又称热胀法。以线胀系数较大的材料为芯模, 刚体材料为阴模, 复合材料置于芯模与阴模之间, 见图 1。当模具受热后, 芯模材料会受热膨胀, 但由于芯模材料的线胀系数比阴模材料大几十倍, 因此芯模的体积膨胀受到阴模的限制, 则在模腔内产生压力, 这种压力称为热胀压力, 以此实现对复合材料固化

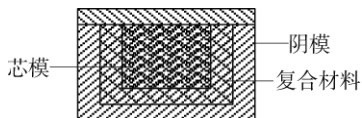


图 1 热膨胀成型组装模具示意图

过程的加压。这种方法是靠芯模热膨胀产生的压力, 无需外压源, 适合于复杂结构制品的整体共固化。在某些多腔体结构中, 克服了外压难以传递均匀的缺点, 具有不可替代的优点^[1]。

2 热膨胀成型工艺过程

热膨胀工艺中, 根据制件的结构特点, 必须设计阴模和芯模两套模具。阴模为钢质, 模具内腔尺寸为碳纤维复合材料制件的设计外形尺寸。芯模外形为复合材料制件的内腔体形状, 尺寸比制件设计的值小一定的量, 所减少的尺寸称为工艺间隙。工艺间隙在整个工艺中的关键作用是控制加压点和压力的大小。在复合材料制造中, 先在钢质阴模内按设计铺放预浸料, 然后在腔体内放置膨胀芯模, 模具组装后进行加热固化。图 2 示出热膨胀工艺过程示意图。图 2 中, ①自由膨胀段, 硅橡胶芯模膨胀填充工艺间隙; ②初始加压段, 硅橡胶芯模膨胀挤压复合材料层达到设计尺寸; ③恒压段, 恒温固化, 硅橡胶芯模保持膨胀体积, 压力恒定; ④降温降压段, 随温度下降, 硅橡胶芯模快速收缩, 压力迅速减小。

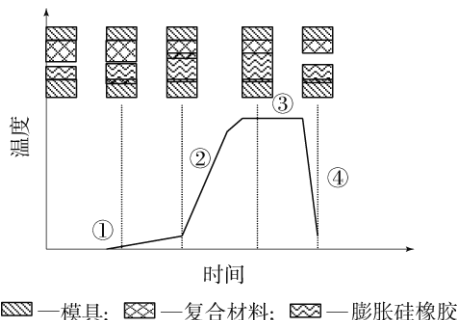


图 2 热膨胀工艺过程示意图

3 热膨胀工艺研究

3.1 热膨胀硅橡胶的性能

一般来说, 线胀系数较大的材料都可以用来

膨胀加压。芯模材料的线胀系数与阴模应有较大的差异,因而阴模一般用刚性较好的材料。表 1 给出了部分常用模具材料的线胀系数,阴模材料采用 A3 钢,芯模材料采用目前应用较为成熟的 R10301 硅橡胶。

表 1 部分模具材料的线胀系数

模具材料	线胀系数/ K^{-1}
A3 钢	12.5×10^{-6}
球墨铸铁	10.8×10^{-6}
铝合金	22.5×10^{-6}
殷钢	1.7×10^{-6}
硅橡胶	2800×10^{-6}

R10301 硅橡胶是由成都有机硅研究中心生产的价格便宜的一种双组分室温硫化硅橡胶,A 组分为红色,B 组分为无色,胶料粘度低,流动性好,浇注性能好。在硫化过程中不产生低分子挥发物,无腐蚀作用。硫化橡胶尺寸稳定性好,使用最高温度为 $200^{\circ}C$,在容器内加热、加压永久变形小。基本性能见表 2^[2]。

表 2 R10301 硅橡胶性能

项 目	数 值
密度/ $g \cdot cm^{-3}$	1.3
粘度/ $Pa \cdot s$	105
拉伸强度/MPa	>3
拉伸弹性模量/MPa	270
断裂伸长率/%	>300
撕裂强度/ $kN \cdot m^{-1}$	>8
硬度(邵氏)	30~40
硫化时间/h	48
线胀系数/ K^{-1}	2800×10^{-6}
体胀系数/ K^{-1}	9130×10^{-6}

热胀压力由热胀材料的两种性质来决定,一是体胀系数,二是拉伸弹性模量。体胀系数决定了温度升高引起的芯模的体积变化量,它是确定成型压力增量的基础;拉伸弹性模量决定了在自由膨胀受到限制时压力增加的程度。

3.2 硅橡胶芯模的设计和制造

硅橡胶芯模的计算和设计是热胀法的关键。硅橡胶芯模在封闭腔体中的热膨胀压力 P 可按(1)公式计算:

$$P = k \times \alpha^R \cdot (t - t_0) \tag{1}$$

式中: ——膨胀压力,MPa;

k ——拉伸弹性模量,MPa;

α^R ——体胀系数, K^{-1} ;

t ——测定点温度, $^{\circ}C$;

t_0 ——起始温度, $^{\circ}C$ 。

由(1)式计算的压力是很大的,超过了复合材料成型一般要求。复合材料中树脂凝胶温度(t_{gel})时的压力(P_{gel})对于产品的外形尺寸、树脂含量、空隙率和力学性能都有很大影响。为了准确地把握产生膨胀压力的起始温度,在芯模与复合材料内腔间设计了一定的工艺间隙,以此来调节加压点及压力大小。芯模经过自由膨胀后才产生压力。设计中确定工艺间隙是设计和计算的核心。对于硅橡胶芯模从室温 t_0 上升到 t_{gel} 时产生的自由热膨胀量 V_{2R} 可用(2)式表示:

$$V_{2R} = V_{0R} [1 + \alpha^R (t_{gel} - t_0)] \tag{2}$$

式中: V_{2R} ——温度为 t_{gel} 时的自由热膨胀体积;
 V_{0R} ——在室温时硅橡胶芯模体积;
 t_{gel} ——复合材料中树脂凝胶温度。

复合材料中树脂凝胶温度 t_{gel} 时的压力 P_{gel} 用(3)式计算:

$$P_{gel} = k \cdot \frac{\Delta V}{V_{2R}} \tag{3}$$

式中: P_{gel} ——复合材料中树脂凝胶温度时的压力;
 ΔV ——该温度下自由热膨胀硅橡胶芯模装入模具所需要的体积压缩量,即对复合材料产生压力的一部分硅橡胶体积。

P_{gel} 一般要求大于 0.6 MPa ,由此可推算出 ΔV ,为工艺间隙的设计提供依据。实际上, ΔV 受模具内腔体积、硅橡胶体积、固化后复合材料体积及压力和温度等因素的影响,温度分布又受到传热速度和温差等其它因素的影响。因此,工艺间隙最终经过试验修正才能达到要求。

按此修正尺寸设计了硅橡胶浇注模,为提高效率,设计为一模多腔。硅橡胶芯模的制造是控制制件质量的重要环节,其制造工艺直接影响着成型制件的性能。严格工艺程序,制造了 16 件硅橡胶芯模,其一致性较好,装配间隙均匀。经高温、高压使用后,压缩变形很小,重复使用了几次后性能无明显下降。

3.3 固化工艺

在一般的外压力源固化工艺中,加压时机可以准确控制。本工艺中压力随温度变化,在设计确定后,可控制参数为升温速率、恒温温度及恒温时间。因此,制定适宜的温度控制程序是关键。

在固化过程中,特别是在加压段,当温度变化很小时,压力增量却很大。为了减小模具、复合材料与硅橡胶之间的温差,在接近 t_{gel} 前减小升温速率,并

增加恒温时间,在加热时严格控制温度。热膨胀工艺制备的碳纤维树脂基复合材料(CFRP) 力学性能见表 3,比较结果与热压罐工艺基本相当。

表 3 热膨胀工艺制备的 CFRP 力学性能

项 目	热膨胀工艺	热压罐工艺	差值比较 / %
拉伸强度 / MPa	1 259. 1	1 310	- 3. 9
拉伸弹性模量 / GPa	119. 6	125	- 4. 3
弯曲强度 / MPa	1679. 4	1640	2. 4
弯曲弹性模量 / GPa	126. 3	113	11. 8
剪切强度 / MPa	66. 7	65	2. 6

4 应用实例

经过以上的试验研究,根据图 3 制件的结构特点和要求,笔者采用了热膨胀工艺,一次共固化成型背架构件,设计制造了筋条预成型模、膨胀硅橡胶芯模和主钢模。筋条预成型模用于预成型 T 型筋条,以保证筋条预压实,便于膨胀硅橡胶芯模能顺利放入筋条间的型腔中;钢模用于铺覆背架主体结构,与膨胀硅橡胶芯模组合后使用。研制出的背架制件主体、筋条、外加强筋,其外观平整光滑、厚度均匀、棱角分明,平面平整无翘曲,外形尺寸和定位尺寸完全满足设计要求,CFRP 背架制件实物照片见图 3。



图 3 热膨胀成型的复合材料背架构件

5 结论

对热膨胀工艺的原理和影响因素进行了分析,研究了热膨胀硅橡胶的性能,总结了膨胀压力的设计和计算方法,设计和制造了硅橡胶芯模,并在实践中取得了成功。热膨胀工艺在设计 的加 压 温 度 范 围 内 可 产 生 全 方 位、多 角 度 的 足 够 压 力,适 用 于 多 腔 体 整 体 复 合 材 料 制 件 的 共 固 化 成 型。

参 考 文 献

1 肖少伯. 复合材料成型新工艺——热胀成型法. 宇航材料工艺, 1996(6): 10
2 蒋元兴,朱达通,刘宏涛,等. 碳/环氧复合材料软模法成型工艺研究. 见: 第九届全国复合材料学术会议论文集. 北京: 世界图书出版社, 1996.

STUDY AND APPLICATION OF THERMAL EXPANSION MOLDING OF COMPOSITE

Jin Wugang

(The 39th Electronics Institute of MII, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT The principle and molding process of the thermal expansion technology of the composite are briefly introduced. The material property, design and manufacture of the thermal expansion core mold are tested, the influencing factors on the expansion pressure are analyzed and the technology is compared with the autoclave molding process. The core mold made of thermal expansion silicon rubber is used with steel mold to mold CF composite products with good result. The research showed that this technology was suitable for the global co-curing molding of the multi-cavity composite products.

KEYWORDS composite, thermal expansion, technology

北京普利宏斌化工材料有限责任公司

本公司为中科院化学所关系企业,技术力量雄厚;是美国大湖化学公司(世界上产量领先的溴系阻燃剂生产厂)在中国(港澳台地区除外)的经销商。在北京、上海、广州设有仓库,常年提供现货服务!

- 1. 阻燃剂: 十溴联苯醚(DE - 83R)、十溴二苯乙烷(环保阻燃剂)、四溴苯酐、四溴双酚 A(适于 ABS)、聚溴化苯乙烯(PBS - 64HW)(适于尼龙,热稳定性好,不析出)、苯氧基四溴双酚 A 碳酸酯齐聚物(BC - 58、BC - 52)(适于 PC、PBT、PET、PC/ABS 合金,且热稳定性好)、磷酸酯系列阻燃剂、三氧化二锑(闪星牌)。
- 2. 抗氧化剂和光稳定剂: 1010、168、DLTP、UV531、UV944、UV770、UV328。
- 3. 弹性体及界面相容剂(进口): 乙丙胶、POE、SBS、EMA、EAA、ACR、聚酯弹性体 TPEE、超韧尼龙增韧剂、PC/ABS 合金相容剂、接枝 PP、接枝 PE。
- 4. 其它各种工程塑料及化工材料。

地址: 北京市海淀区上地信息路 1 号国际科技创业园 1 号楼 802 室 邮编: 100085
电话: (010) 82895069 82895070 82895071 82895072 传真: (010) 82895068
http: //www. polyadd. com E - mail: ustczh@ sina. com sales@ polyadd. com