

热压罐工艺的传热分析和框架式模具温度场分布

Analysis of Heat Transfer and Temperature Field Distribution on Frame Tooling in Autoclave Process

北京航空制造工程研究所 王永贵 梁宪珠 薛向晨
哈尔滨工业大学 张博明 姜 澎 岳广全 张 敏

[摘要] 分析了热压罐工艺中框架式模具的传热路径和传热方式及其传热空气流态,通过模拟试验和实测试验两种方式研究热压罐工艺的框架式模具温度场分布特点。

关键词: 热压罐工艺 框架式模具 温度场分布

[ABSTRACT] Based on the analysis of heat transfer route and heat transfer mode on frame tooling, and the analysis of air flow pattern in autoclave process, temperature field distribution is researched from simulative to practical experimen.

Keywords: Autoclave process Frame tooling Temperature field distribution

复合材料已成为与钛合金、铝合金、合金钢并驾齐驱的四大航空结构材料之一 (B787 结构用量达 50%, A350XWB 结构用量达 52%)^[1]。而复合材料中应用最为广泛的仍然是采用热压罐工艺成型技术的先进树脂基复合材料。先进树脂基复合材料热压罐工艺技术成型过程中常常伴随着复杂的热量交换和化学反应,其中温度场特别是固化温度场在成型工艺中影响非常明显,大型的、复杂的、整体化的构件更是如此。本文研究的是采用热压罐工艺时,应用于典型航空翼面类蒙皮构件的框架式模具温度场分布。

1 在热压罐工艺中框架式模具的传热路径

在热压罐工艺中,以电热阻丝为加热源,以流体介质(低温条件下一般为空气,高温条件为惰性气体)作为传热载体,以风机作为气体强迫循环的动力,完成对模具进行循环加热的过程;通过循环水带走热量来完成模具的降温过程。温度比较高时,热压罐罐壁蓄热比较大,无论是升温过程还是降温过程在罐壁和框架式模具间都会发生热辐射。在热历程中,框架式模具内部各点总会出现温度差异从而引起其内部热传导发生。整个过程如图 1 所示。

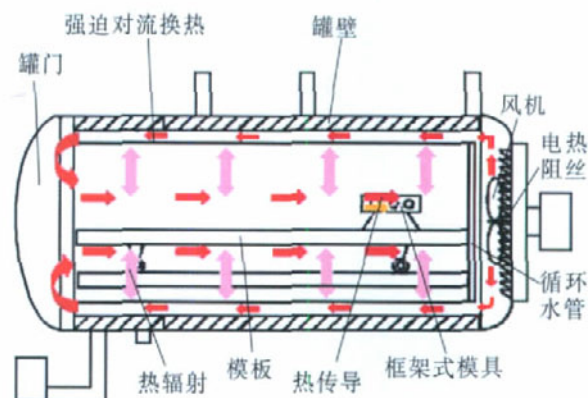


图 1 热压罐工艺的模具传热路径
Fig.1 Heat transfer route for frame tooling in autoclave process

大型复杂复合材料构件采用热压罐工艺成型时,热源有 2 个:一个是电热源(热阻丝),一个是内热源(先进树脂基复合材料固化放热)。温度较高时,热压罐壁蓄热比较大。升温时热源的热量传递路径见图 2 (a)。

降温时,固化反应几乎已经完全结束,所以可以忽略内热源。此时,热量主要通过传热载体(一般为气体)向冷水管传递。降温时的热量传递路径见图 2 (b)。

不过,大多数航空结构用复合材料固化温度都在 200℃以下,在热压罐工艺中热辐射的影响比较小,传热方式主要以强迫对流换热和热传导为主^[2]。

2 热压罐内的气体流态分析^[3]

根据传热路径分析,当单独研究框架式模具温度场时,模具贴模面与循环气体传热为对流换热方式,而且是风机驱动的强迫对流换热方式。具体而言,当循环气体流经温度不同的框架式模具壁面时,就会发生热传递而形成温度分布。在紧贴框架式模具壁面的气体中,温度梯度发生显著变化,这部分气体形成热

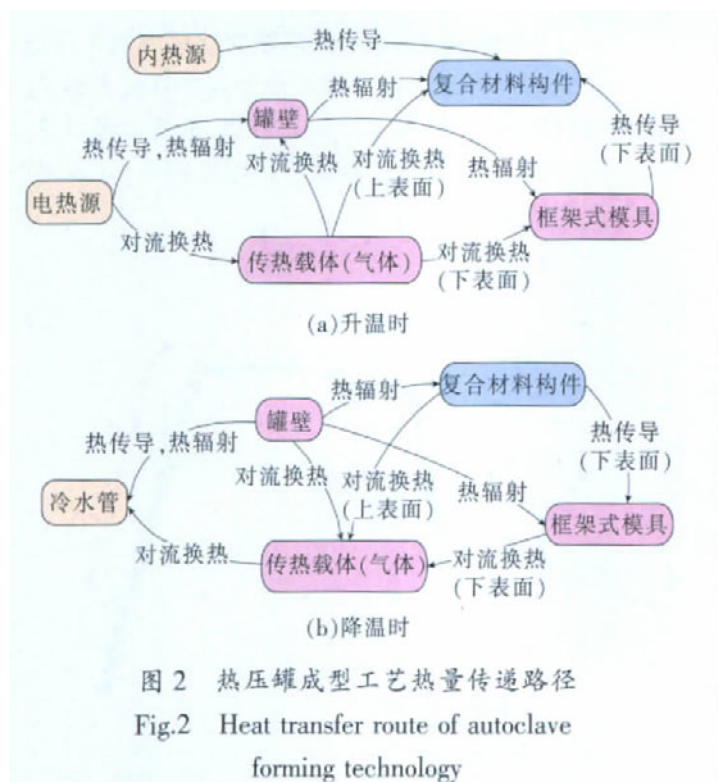


图2 热压罐成型工艺热量传递路径
Fig.2 Heat transfer route of autoclave forming technology

边界层。根据传热理论的传热条件可知,在温度边界层靠气体一侧以热对流为主要传热方式,在温度边界层中以热传导为主要传热方式。

当气体在热压罐内流动时,可作气体在管内流动情况处理,则其雷诺数为

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu}$$

式中, ρ 为气体密度, u 为风速, D 为热压罐直径, μ 为气体的动力粘度。

热压罐内气体作为理想气体考虑,根据克拉伯龙方程式:

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT, \text{ 即 } \rho = \frac{pM}{RT}$$

则有,

$$Re = \frac{PMuD}{RT\mu}$$

对空气而言,摩尔质量 $M=29 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$, 普适气体常数 $R=8.3145 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 空气的动力粘性系数 μ 如表 1 所示,取值 $1.82 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。在热压罐起始,压力 $P=1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$, 风速 $u=1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 热压罐直径 $D=2.5 \text{ m}$, 绝对温度 $T=273.15+20=293.15 \text{ K}$ 。

$$Re = \frac{1.01325 \times 10^5 \times 29 \times 10^{-3} \times 1.5 \times 2.5}{8.3145 \times 293.15 \times 1.82 \times 10^{-5}} = 2.48 \times 10^5 > 1.0 \times 10^4$$

在热压罐工艺中的通常固化阶段, $p=1.01325 \times 10^5 \times (1+6) = 7.09275 \times 10^5 \text{ Pa}$, $u=3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $D=2.5 \text{ m}$, $\mu=2.59 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 绝对温度 $T=273.15+200=473.15$ (固化温度取 200°C)。则:

$$Re = \frac{7.09275 \times 10^5 \times 29 \times 10^{-3} \times 3 \times 2.5}{8.3145 \times 473.15 \times 1.82 \times 10^{-5}} = 2.15 \times 10^6 > 1.0 \times 10^4$$

气体在热压罐中流动时是典型的管道内换热情况,根据传热学雷诺准数理论,当 $Re < 2.3 \times 10^3$ 时流态为层流,当 $2.3 \times 10^3 < Re < 1.0 \times 10^4$ 时流态为过渡态,当 $Re < 1.0 \times 10^4$ 时流态为紊流。由上面热压罐起始雷诺数和复合材料固化时雷诺数的计算可知,在该热历程中空气的流态为紊流。

在热压罐中气体流过框架式模具上表面时,可作气体外掠平板情况处理,则其雷诺数:

$$Re = \frac{PMuL}{RT\mu}$$

表1 空气的动力粘性系数

温度/ $^\circ\text{C}$	动力粘性系数/ $(\text{Pa} \cdot \text{s} \times 10^{-5})$	温度/ $^\circ\text{C}$	动力粘性系数/ $(\text{Pa} \cdot \text{s} \times 10^{-5})$	温度/ $^\circ\text{C}$	动力粘性系数/ $(\text{Pa} \cdot \text{s} \times 10^{-5})$
-50	1.46	70	2.04	250	2.80
-20	1.63	80	2.10	300	2.97
0	1.72	90	2.16	350	3.15
10	1.78	100	2.18	400	3.30
20	1.82	120	2.28	500	3.62
30	1.87	140	2.35	600	3.92
40	1.92	160	2.41	800	4.45
50	1.96	180	2.50	1000	4.95
60	2.01	200	2.59		

式中, L 为框架式模具特征尺寸。

在这里 L 为 2m, 热压罐启动时,

$$Re = \frac{1.013 \ 25 \times 10^5 \times 29 \times 10^{-3} \times 1.5 \times 2}{8.314 \ 5 \times 293.15 \times 1.82 \times 10^{-5}} = 1.99 \times 10^5 > 5.0 \times 10^5 ;$$

在热压罐工艺中的通常固化阶段

$$Re = \frac{7.092 \ 75 \times 10^5 \times 29 \times 10^{-3} \times 3 \times 2}{8.314 \ 5 \times 473.15 \times 1.82 \times 10^{-5}} = 1.72 \times 10^6 > 5.0 \times 10^5 .$$

气体在框架式模具上表面流动时为典型的外掠平板情况, 根据传热学临界雷诺数界定, 从层流过渡到紊流的临界雷诺数 $Re_c = 5.0 \times 10^5$, 由上述面热压罐工艺起始雷诺数和复合材料固化时雷诺数的计算可以判定在该热历程中空气的流态多数情况下为紊流。

3 热压罐工艺的框架式模具温度场分布特点

典型先进复合材料固化的工艺规范如图 3 所示。

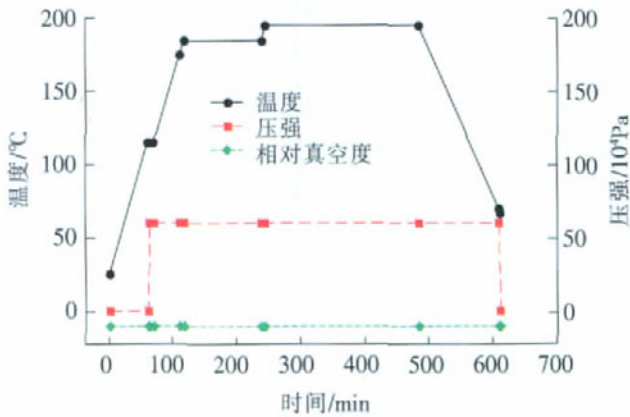


图 3 典型复合材料的固化工艺规范
Fig.3 Curing criterion for representative composite

在按工艺规范用热压罐进行固化的过程中, 框架式模具温度场研究主要采用 2 种方式来进行: 模拟试验和实测试验。采用模拟试验和实测试验研究热压罐工艺的框架式模具温度场分布的结果对比如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 从总体趋势看, 模拟试验结果与实测试验结果能较好吻合。如果不考虑温度转折点的热历程时间差异, 模拟试验结果与实测试验结果差异在 10°C 以内。

从图 3 和图 4 可以看出, 在先进复合材料固化的热历程中, 明显分为 3 个阶段: 升温阶段、保温阶段和降温阶段。对于框架式模具温度场的研究相应地也是

从这 3 个阶段入手, 主要以框架式模具的上表面(工作面) 为研究对象, 3 阶段框架式模具最大温差的典型情况见图 5。从图中可以看出, 框架式模具最大温差出现在升温阶段, 降温阶段温差较大, 而保温阶段则比较小。

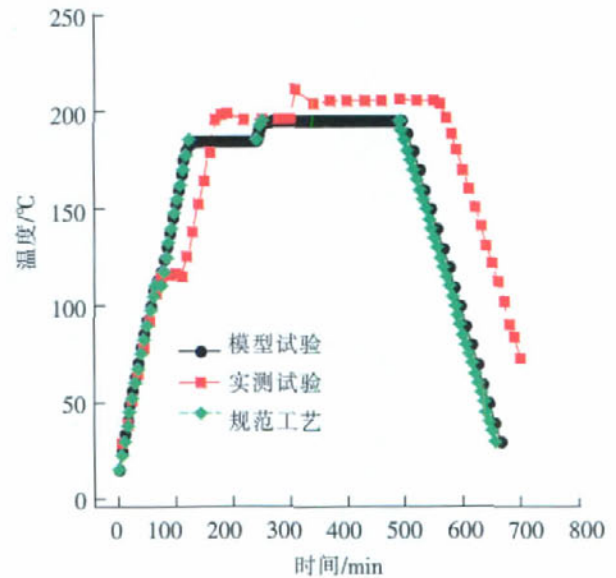


图 4 热压罐工艺的框架式模具温度场分布
Fig.4 Temperature field distribution of frame tooling in autoclave process

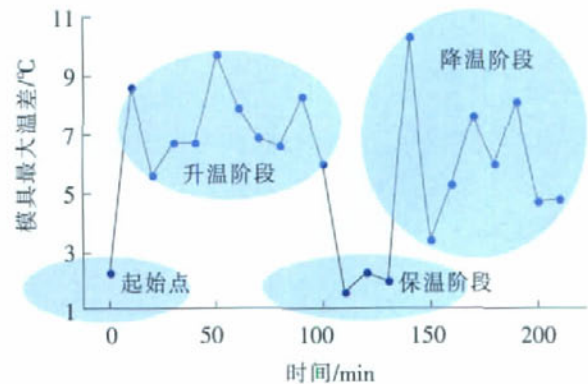


图 5 升温、保温和降温阶段框架式模具的最大温差分布
Fig.5 Maximal difference distribution in temperature of frame tooling in raising temperature phase, holding temperature phase and falling temperature phase

(1) 升温阶段。

图 6 是热压罐工艺的框架式模具温度场在升温阶段的典型分布模拟试验结果, 图 7 是模具上表面温

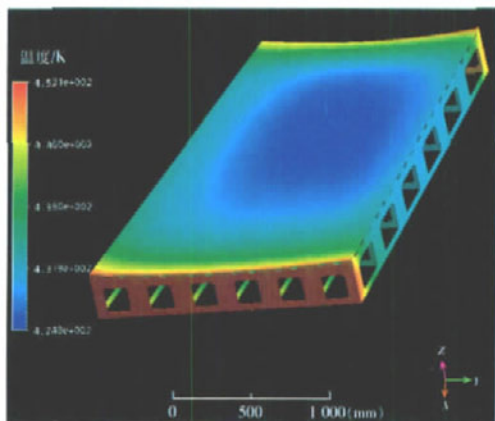


图6 模具温度场在升温阶段的典型分布
(模拟试验)

Fig.6 Representative distribution of frame tooling temperature field in raising temperature phase (simulative experiment)

度场在升温阶段的典型投影分布实测试验结果(左边为罐尾)。从图6、7可以看出,在升温阶段,框架式模具高温区主要分布在罐门进风端(次者在罐尾出风端),低温区主要分布在框架式模具中间位置。在升温阶段框架式模具温差比较大。

(2)保温阶段。

在保温阶段,框架式模具上表面温度相对稳定,上表面温度场分布均匀,温差相应较小。

(3)降温阶段。

图8是框架式模具温度场在降温阶段的典型分布模拟试验结果,图9是热压罐工艺的框架式模具上

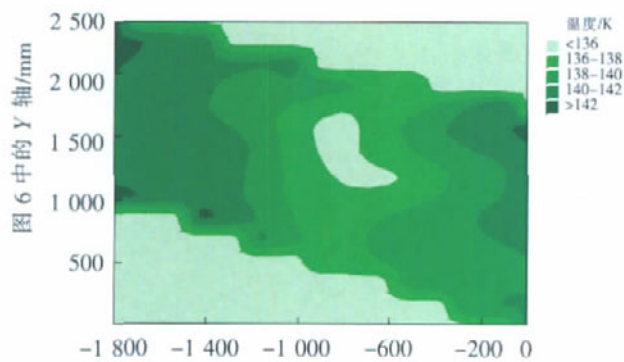


图7 模具上表面温度场在升温阶段的典型投影分布(实测试验)

Fig.7 Representative projective distribution of frame tooling upper surface temperature field in raising temperature phase (practical experiment)

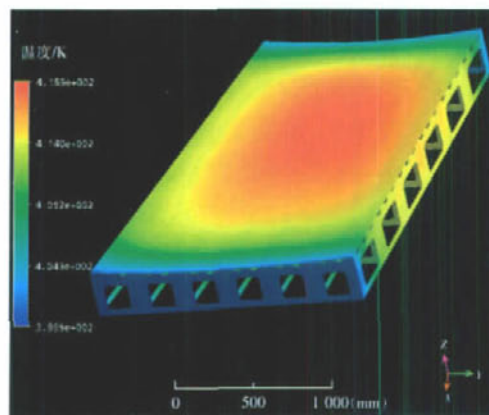


图8 模具温度场在降温阶段的典型分布
(模拟试验)

Fig.8 Representative distribution of frame tooling temperature field in falling temperature phase (simulative experiment)

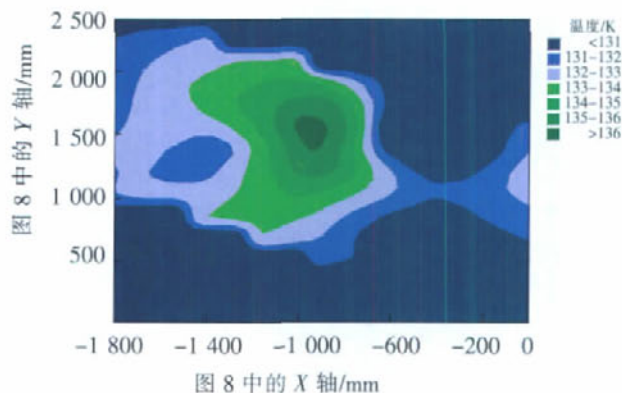


图9 框架式模具上表面温度场在降温阶段的典型投影分布(实测试验)

Fig.9 Representative projective distribution of frame tooling upper surface temperature field in falling temperature phase (practical experiment)

4 结束语

综上所述,在热压罐工艺中框架式模具的传热路径复杂,传热方式以强迫对流换热和热传导为主,传热空气的流态以紊流为主。从总体趋势看,模拟实验

(下转第87页)

的研究结果表明电弧的预热作用能够提高激光能量的利用率,增强热源相互作用,激光-电弧等离子体相互作用则是提高热源相互作用程度的关键机制⁹⁾。

激光等离子体与电弧等离子体的相互作用同2种热源的相关参数有关:第一,激光能量要大,以便产生足够多的等离子体;第二,激光与电弧之间的距离要小(最好小于3mm),具备这2个条件就可以使2种等离子体产生更强的耦合作用。在本试验中,激光平均功率仅为300W,能量比较低,其焊接模式为热传导模式,激光产生的等离子体很稀薄;另外,2个热源之间的距离为3.8mm,相对来说比较大,上述的2个因素使得两种热源产生的等离子体间的相互作用被抑制,因此激光-电弧等离子体相互作用机制对增加焊缝熔深的贡献比较小。

我们利用表3的数据计算出复合热源作用下焊缝有效热输入是TIG电弧和低功率激光作用下的有效热输入之和的2.19倍,可见复合后用于熔化焊缝金属的有效能量大大提高了。在激光焊中,激光能量利用率会随着工件温度的升高而增大。在复合热源中,在前的热源TIG电弧预先对激光作用点前方的工件进行加热,使工件表面温度升高甚至达到熔点,从而提高了激光的吸收率而降低了其在工件表面的反射率;同时,激光直接作用在高温金属上,减少了熔化焊缝金属所需的能量,因此,在相同的激光能量下,能够使更多的焊缝金属熔化,焊缝熔深就会增加。因此,在本试验条件下,焊缝熔深的增加很可能是由于TIG电弧对工件进行了预热,从而提高激光能量的利用率,增加了焊缝的有效热输入引起的。在这种机制下,焊缝的熔宽没有变化,或者变化很少,见图5。

表3 焊缝有效热输入之比和横截面积比值

有效热输入之比	Q_{ch}/Q_{et}	Q_{ch}/Q_{el}	$Q_{ch}/(Q_{et}+Q_{el})$
横截面积比值	2.377 2	28.222 5	2.192 5

3 结论

(1)建立了低功率脉冲YAG激光-TIG电弧焊接复合热源系统,试验证明本系统能够显著增加焊缝熔深。

(2)低功率YAG脉冲激光与TIG电弧复合热源表现出了1+1>2的效果。不锈钢1Cr18Ni9Ti在复合热源作用下的焊缝熔深是2热源分别单独作用时的

熔深之和的2.07倍,同时前者熔池的深宽比也要明显优于后两者。

(3)在本文叙述的试验条件下,复合热源增加焊缝熔深的机理初步认为是TIG电弧通过对工件的预热,提高了激光能量的利用率,从而增加了焊缝有效热输入。

参 考 文 献

- [1] Claus Bagger, Flemming O Olsen. Review of laser hybrid welding. *Journal of Laser Application*, 2005, 17(1): 2-14.
- [2] 朱轶峰,董春林. 激光电弧复合焊接技术. *航空制造技术*, 2002(11): 32-34.
- [3] 韩立军. 激光焊接技术在汽车制造中的应用与发展. *机械工人(热加工)*, 2007(6): 42-47.
- [4] 滕文华. 激光-电弧复合焊接在汽车制造中的应用. *电焊机*, 2004, 34(6): 9-11.
- [5] Staufer, Herbert. Laser-hybrid welding of ships. *Welding Journal*, 2004, 12(6): 32-33.
- [6] 康乐,黄瑞生,刘黎明,等. 低功率YAG激光-MAG电弧复合焊接不锈钢. *焊接学报*, 2007, 28(11): 69-72.
- [7] 陈彦宾,李俐群,吴林. 电弧对激光吸收与散焦的定量测量. *焊接学报*, 2003, 24(3): 56-58.
- [8] 王后孝. 熔焊过程的热效率. *焊接*, 2007(10): 15-19.
- [9] 高明,曾晓雁,严军,等. 激光-电弧复合焊接的热源相互作用. *激光技术*, 2007, 31(5): 465-468. (责编 淡蓝)

(上接第83页)

结果与实测试验结果能较好吻合。如果不考虑温度转折点的热历程时间差异,模拟试验结果与实测试验结果差异在10℃以内。

热压罐工艺的框架式模具温度场分布特点:在升温阶段框架式模具高温区主要分布在罐门进风端(次者在罐尾出风端),低温区主要分布在框架式模具中间位置,而且框架式模具温差比较大;在保温阶段模具温差相对比较小;在降温阶段温度分布大体呈现与升温阶段相反的趋势,温差也比较大。

参 考 文 献

- [1] 刘善国. 国外飞机先进制造技术发展趋势. 2002年航空制造技术学术交流会议论文集. 北京:航空制造技术杂志社, 2002.
- [2] Andrew Johnston. An investigation of autoclave convective heat transfer. Quebec: Concordia University Montreal, 2004.
- [3] 严家騷. 工程热力学(第三版). 北京:高等教育出版社, 2002: 75-79. (责编 淡蓝)