

光纤布拉格光栅监测碳纤维复合材料固化成型过程*

于海涛¹, 刘文涛², 张金栋³, 周蒙², 魏鹏², 肇研³

- (1. 中航工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司, 哈尔滨 150066;
2. 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;
3. 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191)

[摘要] 碳纤维复合材料固化成型时, 温度和内应力对成型质量的影响巨大。鉴于碳纤维复合材料厚度通常为几毫米, 传统的热电偶和电阻应变片等温度应变传感器由于体积较大, 无法实现嵌入式监测。为了获得成型过程中材料内部实时的温度和应变, 采用光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器进行监测。试验中使用两个 FBG 传感器, 一个作为温度传感器, 另一个作为应变传感器, 内嵌于碳纤维预浸料铺层之中, 分别用于监测碳纤维复合材料固化过程中内部的温度和应变等参量。试验结果表明, 采用两个光纤光栅传感器分别用来监测碳纤维复合材料固化过程中内部温度和应变的变化是可行的。

关键词: 碳纤维复合材料; 固化; 光纤布拉格光栅; 温度; 应变

Monitoring the Curing Process of Carbon Fiber Composites With Fiber Bragg Grating

YU Haitao¹, LIU Wentao², ZHANG Jindong³, ZHOU Meng², WEI Peng², ZHAO Yan³

- (1. AVIC Harbin Aircraft Industry Group Company Limited, Harbin 150066, China;
2. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
3. School of Materials and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] When carbon fiber composites is curing, temperature and internal stress has a huge impact on manufacturing quality. Given that the thickness of carbon fiber composites is only a few millimeters, the traditional thermocouple and resistance strain gauge, due to large volume, are unable to realize embedded monitoring. In order to get the materials internal real-time temperature and strain during the curing process, the Fiber Bragg Grating (FBG) sensors are necessary. Two FBG sensor were used in the experiments, with one as a temperature sensor, another as strain sensor, embedded in carbon fiber prepreg layer, to monitor the temperature and strain inside the carbon fiber composites in the process of curing. The experimental results show that using two fiber Bragg grating sensors to monitor the change of the internal temperature and strain of the carbon fiber strain is feasible.

Keywords: Carbon fiber composites; Cure process; Fiber Bragg grating; Temperature; Strain

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.04.076

碳纤维复合材料固化成型过程中, 温度和应变是对该产品质量影响最重要的两个控制参量。目前, 常用的温度测量方法一般有热电偶温度传感器和光纤光栅温度传感器, 常用的应变测量方法有电阻应变片、迈克尔逊干涉仪传感器、F-P 外腔干涉仪传感器^[1-2]、FBG 传感器^[3-7]和布里渊光时域反射计传感器。鉴于试验中要监测的复合材料厚度仅为几毫米, 传统的温度应变传感器由于体积较大无法实现嵌入式监测, 而光纤光栅传感

器具有尺寸小^[8], 对结构铺层、力学性能影响小、灵敏度高、测量温度、应变范围宽等优势而被选为本实验所用温度和应变传感器。本文提出了一种利用光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)监测碳纤维复合材料固化成型整个过程中内部的应变和温度的方法。

1 试验原理

1.1 光纤布拉格光栅传感器工作原理

光纤布拉格光栅的谐振方程为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

* 基金项目: 国防基础科研计划(A0520110033)。

式中, 光纤布拉格光栅波长 λ_B 是光纤布拉格光栅发射回来的入射光在自由空间中的中心波长; n_{eff} 是光纤纤芯针对自由空间中心波长的折射率, Λ 是光栅周期, 也就是光栅常数。

可见, 光纤光栅的谐振波长 λ_B 取决于光栅周期 Λ 和纤芯模的有效折射率 n_{eff} , 任何使这两个参量发生改变的物理过程都将引起光栅谐振波长偏移。能够引起这两个参量发生改变的最直接和常见的因素是应变和温度。因为无论是对光栅进行拉伸还是挤压, 都将导致光栅周期的改变, 并且光栅本身所具有的弹光效应也使得光纤的纤芯和包层的折射率发生改变, 从而使光纤的纤芯模的有效折射率 n_{eff} 发生相应改变。因此, 单纯的应变将引起光栅谐振波长偏移。此外, 温度变化也会引起谐振波长漂移, 因为材料的热胀冷缩, 温度改变会引起光栅周期改变, 由于热光效应, 光纤的纤芯和包层的折射率也会改变, 这将引起纤芯模的有效折射率改变。图 1 为光纤光栅传感系统的基本原理图。



图1 光纤光栅传感系统的基本原理图

Fig.1 Basic principle of fiber Bragg grating sensing system diagram

当光纤光栅受应变和周围的温度影响发生变化时, 将导致光栅周期 Λ 和有效纤芯折射率 n_{eff} 产生变化, 从而产生光栅 Bragg 信号的波长漂移 $\Delta\lambda_B$, 通过监测 Bragg 波长 λ_B 的变化情况, 即可获得测点上光纤光栅的应变和周围温度的变化状况。

1.2 碳纤维复合材料内部温度应变的测量原理

由于光纤光栅的谐振波长对应应力应变和温度的变化都非常敏感, 因此温度、应变如果同时改变的话, 光纤光栅传感器则不能将两种信号分开, 对于温度测量可以使用特殊的钢管将光纤光栅封装起来, 使其不受外界应变的作用而作为单纯的温度传感器, 而应变传感器则无法使其不受温度的作用, 常用的解决方法是温度补偿法^[9-10], 即一根

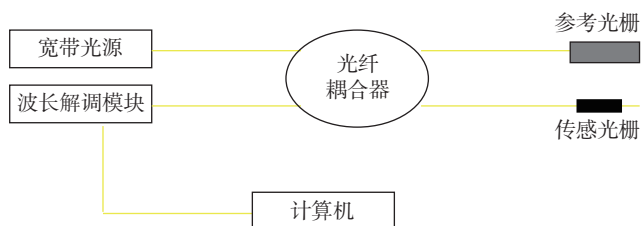


图2 基于参考光纤光栅法的温度应变分离检测示意图

Fig.2 Separating temperature and strain test schematic diagram based on the method of reference fiber Bragg grating

光纤光栅作为传感光栅不仅受到温度作用, 同时还受到应变作用, 另一根不受应变作用的封装光纤光栅作为参考光栅, 二者置于相同的温度环境中, 如图 2 所示。

由于温度变化使得传感光栅波长移动量和参考光栅波长移动量大小相等, 符号相同; 而参考光栅不受应变作用, 传感光栅不仅受到温度作用, 同时还受到应变作用, 因此传感光栅的布拉格波长移动量中既含有温度变化因素, 又含有应变变化因素; 将两只光纤光栅返回的布拉格波长移动量做减法处理, 就可以很容易地消除传感光栅温度变化对应变测量的影响。光栅布拉格反射波长随着温度、应变的变化而变化的关系式为:

$$\Delta\lambda = K_T \Delta T + K_\epsilon \Delta\epsilon \quad (2)$$

对于参考光栅, 由于其不受应变的作用, 中心波长变化量 $\Delta\lambda_1$ 和温度该变量 ΔT 的对应关系是:

$$\Delta\lambda_1 = K_{T1} \Delta T \quad (3)$$

式(3)中, K_{T1} 是参考光栅的温度灵敏度系数。而传感光栅的中心波长变化量 $\Delta\lambda_2$ 和温度改变量 ΔT 、应变 $\Delta\epsilon$ 的对应关系式为:

$$\Delta\lambda_2 = K_{T2} \Delta T + K_\epsilon \Delta\epsilon \quad (4)$$

式(4)中, K_{T2} 是传感光栅的温度灵敏度系数, K_ϵ 是应变灵敏度系数。(3)、(4)两式联立消去 ΔT 得:

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta\lambda_2 - \frac{K_{T2}}{K_{T1}} \Delta\lambda_1}{K_\epsilon} \quad (5)$$

根据裸栅的理论应变敏感系数 $1.2\text{pm}/10^{-6}\epsilon$, 由式(5)给出该点的应变值。因此, 该监测方法的重点在于合理制备参考光栅。

2 试验

2.1 原材料及试验装置

本试验选用 U3160/522 碳纤维织物增强环氧树脂预浸料, 织物和预浸料物理性能分别如表 1、表 2 所示。

光纤布拉格光栅采用耐高温的表面涂覆聚酰亚胺保护层光纤光栅, 性能参数如表 3 所示。

试验中所用的主要仪器及设备如表 4 所示。

表1 U3160织物的物理性能

项目	技术指标	试验标准	
长度 /m	100	GB/T 3362	
幅宽 /mm	1000 ± 5	GB/T7689.1	
厚度 /mm	0.16 ± 0.02	Q/WTX005-2008	
单位面积质量 / (g · m ⁻²)	160 ± 7	Q/WTX005-2008	
织物密度 / (根 · 100 ⁻¹ mm ⁻¹)	经向	80 ± 4	GB/T 7689.2
	纬向	40 ± 2	GB/T 7689.2
拉伸断裂强力 / (N · 25 ⁻¹ mm ⁻¹)	≥ 1800	GB/T 7689.5	

2.2 试验过程

表2 U3160/5224预浸料的物理性能

性能	典型值	试验方法
树脂质量含量 /%	35.8~47.3	JC/T 780-1987 (1996)
挥发分含量 /%	≤ 1	JC/T 776-1985 (1996)
单层预浸料层厚 /mm	0.166	GB/ T 3855-1983

表3 FBG传感器的性能参数

FBG传感器的性能参数					型号
中心波长 /nm	芯层直径 / μm	皮层外径 / μm	涂层外径 / μm	反射率 /%	BUAA17-3
1535~1550	9	125	250	> 90	

表4 仪器及设备

名称	型号	生产厂家
热压罐	DN-600-2MON	北京博简技术咨询有限公司
温箱	MT3065	广州爱斯佩克环境仪器有限公司
标准应变校准装置	SK-1	北京长城计量测试技术研究所
光纤光栅解调仪 旋转流变仪	BH17-1 AR2000	美国 BaySpec 公司 美国 TA 公司

本试验检测的是 L 型碳纤维固化成型过程中内部温度、应变的信息,试验所用预浸料的树脂基体为双马 5224,增强纤维为 U3160,在第 8、9 层之间位置(L 型碳纤维总共有 16 层),选定的两个测点,具体布置示意图如图 3 所示。1[#]、3[#] 传感器代表封装后的温度传感器,黄色线条代表传输光纤,灰色矩形代表封装后的温度传感器,用来监测碳纤维成型过程中内部温度变化,并作为应变传感器的温度补偿光栅;2[#]、4[#] 传感器是裸栅,作为应变传感器,用来监测碳纤维成型过程中内部应变变化。

图 4 是 L 型碳纤维中光纤光栅温度、应变传感器布置实物图,由左至右,4 个传感接头分别对应 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]

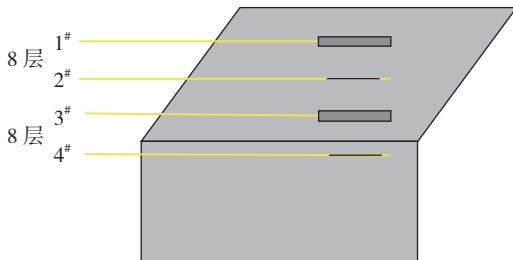


图3 L型中光纤光栅温度、应变传感器布置示意图

Fig.3 Temperature and strain sensors of fiber Bragg grating layout diagram in the L



图4 L型碳纤维中光栅温度、应变传感器布置实物图

Fig.4 Temperature and strain sensors of fiber Bragg grating pictures in the L

传感器。

在试验过程中,热压罐内的温压控制变化首先以 1.5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率,从室温升温至 140 $^{\circ}\text{C}$,140 $^{\circ}\text{C}$ 保温半小时,并在 10min 内加压至 0.6MPa,然后继续升温,升到 180 $^{\circ}\text{C}$ 后保温 2h;之后以 0.75 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的降温速率降温,降至常温,泄压,出罐,脱模。

2.3 温度传感器的封装

封装温度传感器所使用的管材内径应大于光纤光栅的外径,并且尽可能地减小对结构铺层、力学性能的影响,通过对市场上管材的调研和试验论证,最终确定使用医用注射器针头作为封装温度传感器所用的管子,封装温度传感器如图 5 所示,图 5 中最上面黄色的线为聚酰亚胺光纤光栅,光纤光栅上标记的两个黑色点之间是光纤光栅,中间的外径约为 0.73mm、内径约为 0.41mm、长度为 3cm 的针头,最下面表示将聚酰亚胺光纤光栅插入针管中。

封装时,将聚酰亚胺光纤光栅插入针管针头之中,两端涂上高温胶,在高温条件下进行固化。

2.4 温度传感器的应变检测

使用上述方法封装的传感器需要通过应变检测试验检测温度传感器封装是否合格,进而提高试验成功

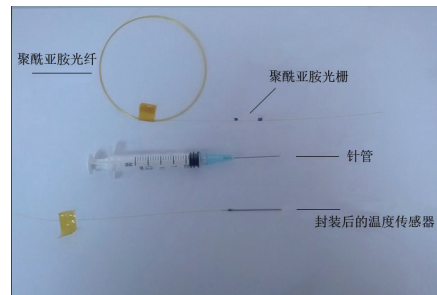


图5 注射器针头封装的温度传感器

Fig.5 Temperature sensor packaged by syringe needle

率。图6为试验所用的应变检测装置,光纤光栅温度传感器通过502胶水牢牢粘在应变梁上,后面红色示数代表应变梁的挠度。光纤光栅温度传感器与解调装置相连,检测时通过改变应变梁挠度,观察并记录光纤光栅温度传感器的应变感应信息。

图7为试验中所用的温度传感器的应变检测结果,



图6 应变检测装置

Fig.6 Strain detecting device

从图中可以看出,封装的光纤光栅温度传感器在应变梁挠度改变时,温度传感器测的应变大小 $< \pm 4 \times 10^{-6}$,可以认为温度传感器不感受应变的作用,即封装合格。

2.5 传感器的温度标定

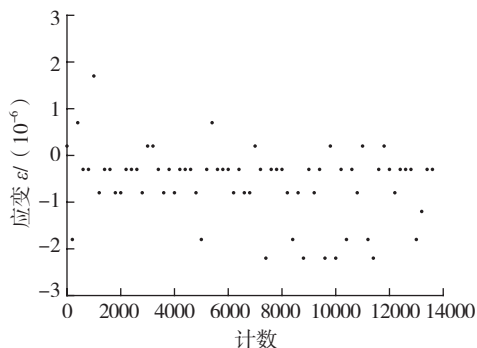


图7 温度传感器应变检测结果

Fig.7 Result of temperature sensor strain detection

应变检测合格的温度传感器和试验所用的应变传感器都要进行温度的标定。温度标定使用 ESPEC 温箱 (温度范围 $-20^{\circ}\text{C} \sim 160^{\circ}\text{C}$) 进行标定,在 $30^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 范围内,每隔 30°C 标定 1 个点,来回 1 个循环进行标定,标定结果如表 5 所示。

3 结果与讨论

图8是嵌入到碳纤维复合材料中的两个光纤光栅温度传感器和热压罐内热电偶测得的温度对比图。

从图中可以看出,1#、3#温度传感器与热电偶的数据吻合,说明封装的温度传感器测量效果很好,比较真实地反映了内部温度的变化过程。

图9是L型碳纤维结构件平面处的温度应变传感

表5 传感器标定结果

传感器	公式
1# 温度传感器	$W=0.0113\text{nm}/^{\circ}\text{C} \cdot T+1544.632 \text{ nm}$
2# 应变传感器	$W=0.0112 \text{ nm}/^{\circ}\text{C} \cdot T+1544.753 \text{ nm}$
3# 温度传感器	$W=0.0111 \text{ nm}/^{\circ}\text{C} \cdot T+1534.679 \text{ nm}$
4# 应变传感器	$W=0.0106 \text{ nm}/^{\circ}\text{C} \cdot T+1534.562 \text{ nm}$

注:表中 T 代表温度,单位: $^{\circ}\text{C}$, W 代表中心波长,单位: nm 。

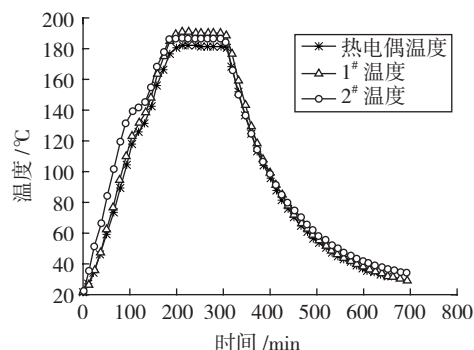


图8 光纤光栅温度传感器与热电偶测得温度对比图

Fig.8 Comparison diagram of temperature measured by OFTS and thermocouple

器测得的温度应变历程图,图10是L型碳纤维结构件拐角处温度应变传感器测得的温度应变历程图。

由图9可以看出,从原点至A点是试验第1阶段,为常压升温阶段,从A点到B点是试验第2阶段,为常压保温阶段,B点为加压点,从此刻开始热压罐内加压至6个大气压,B点到C点是试验第3阶段,为高压升温阶段,C点到D点是试验第4阶段,为 180°C 保温阶段,D点到最后是试验第5阶段,为自然冷却降温阶段。从应变随时间变化关系可以看出初始应变为0,随着温度升高,光纤光栅首先呈负应变状态,这是由于埋植光纤时对光纤有一定的预紧力,当温度上升,树脂粘度逐

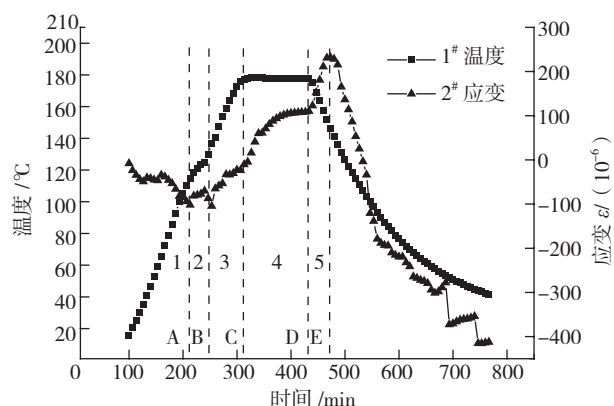


图9 L型碳纤维结构件平面处温度、应变历程图

Fig.9 Changing process of temperature and strain on L type carbon fiber structure plane

渐下降变为粘流态时,这部分拉应力得到释放,表现为应变向负方向移动。紧接着树脂升温体积膨胀,光纤光栅呈正应变状态,应变曲线在升温阶段的最低点为加压力点,由于突然的加压产生压应变,加压之后,树脂经过挤压向边缘流动,同时随着温度继续升高,拉应变继续增大。 D 点之前,树脂的交联反应完成,复合材料作为统一的整体只受到升温膨胀作用的影响。 D 点之后,应变又出现了反常的向正方向增大现象,原因可能还是由于降温速率偏快。复合材料中增强纤维与基体树脂的质量比约为2:1,而比热容比约为1:2,即降低相同的温度二者释放的热量相近。然而碳纤维的热导率比环氧树脂大得多,热量耗散也快很多,因此在降温初始阶段,光纤光栅所反映的应变变化主要是碳纤维的变化,而碳纤维热膨胀系数为负数,所以出现了应变向正方向移动现象。 E 点之后,由于上一阶段碳纤维的热量过快耗散,光纤光栅主要反映树脂冷却收缩而出现的压应变。

在图10中,降温阶段之前与图10相似,初始应变为0, D 点之前完成固化反应, E 点之后出现的应变抬高是因为光栅本身既受到纵向应变影响又受到横向应变影响,降温阶段纵向和横向都发生收缩,纵向收缩压缩光栅,应变减小;横向收缩拉长光栅,应变增大。横向收缩占主导则应变测量结果增大发生抬高,纵向收缩占主导则应变测量结果降低,二者相互作用相互影响,从图10和图11中的光栅应变传感器测得的应变曲线波浪形态可见其影响;另外这也可能是预浸料所用树脂和聚酰亚胺光纤光栅结合性较差^[11],光栅在碳纤维里面发生松动造成了应变抬高。

由于在降温过程中,树脂体积收缩是由温度变化控制的,所以建立光纤布拉格光栅应变变化与温度变化的关系十分重要^[12-13],图11给出了L型碳纤维结构件整个固化成型工艺过程中拐角处光纤布拉格光栅应变随温度变化的关系图。

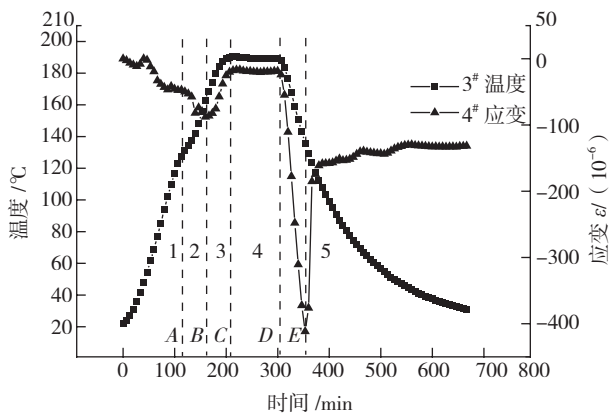


图10 L型碳纤维结构件拐角处温度、应变历程图

Fig.10 Changing process of temperature and strain on L type carbon fiber structure corner

由图11可以看出, A 到 B 这一段,由于碳纤维还未发生完全固化,监测到的应变大小几乎为零, B 到 C 这一段降温过程中,经过足够长时间后固化处理的完全固化树脂仅承受温度降低导致的体积变化^[14-15],反向增大, D 点之后应变反向减小。

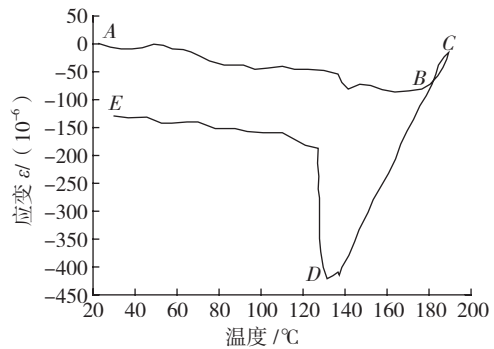


图11 L型碳纤维结构件拐角处应变随温度变化历程图

Fig.11 Strain variation with temperature on L type carbon fiber structure corner

4 结论

利用两个光纤光栅传感器,一个作为参考光栅不受应变作用仅测量温度,另一个作为传感光栅监测碳纤维固化成型过程中各个阶段内部的应变变化情况。结果表明,温度测量准确,应变测量结果合理并且可以得到解释,即使用两个光纤光栅,利用温度补偿方法监测碳纤维复合材料固化成型过程中的温度应变完全可行。

参考文献

- [1] LAWRENCE C M, NELSON D V, BENNETT T E, et al. Determination of process-induced residual stress in composite materials using embedded fiber optic sensors[J]. SPIE, 2013(3042):154-165.
- [2] LAWRENCE C M, NELSON D V, SPINGARN J R, et al. Measurement of process-induced strains in composite materials using embedded fiber optic sensors[J]. SPIE, 2013(2718):60-68.
- [3] PARLEVIET P P, BERSEE H E N, BEUKERS A. Measurement of (post-)curing strain development with fibre Bragg gratings[J]. Polymer Testing, 2010, 29(3):291-301.
- [4] MULLER M, COLLOMBET F, OLIVIER P, et al. Assessment of cure residual strains through the thickness of carbon-epoxylaminates using FBGs, part I: elementary specimen [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009, 40(1):94-104.
- [5] OLIVEIRA R DE, LAVANCHY S, CHATTON R, et al. Experimental investigation of the effect of the mould thermal expansion on the development of internal stresses during carbon fibre composite processing[J]. Composites Part A, 2008, 39(7):1083-1090.
- [6] GIORDANO M, LAUDATI A, NASSER J, et al. Monitoring by a single fiber Bragg grating of the process induced chemophysical transformations of a model thermoset[J]. Sensors and Actuators

(下转第84页)