

三维角联锁结构复合材料弹性性能的 细观设计探讨

Micro-design of Elastic Property for 3D Angle-interlock
Structure Composites

杨彩云¹, 田玲玲², 刘 雍³

(1 天津工业大学 复合材料研究所 先进纺织
复合材料教育部重点实验室, 天津 300160; 2 北京市
纺织纤维检验所, 北京 100025; 3 东华大学纺织学院, 上海 200051)

YANG Caiyun¹, TIAN Lingling², LIU Yong³

(1 Ministry of Education Key Laboratory of Advanced
Textile Composite Materials, Composites Research Institute, Tianjin
Polytechnic University, Tianjin 300160, China; 2 Textile Fiber Measure Institute
of Beijing, Beijing 100025; 3 Textile College, Donghua University, Shanghai 200051)

摘要: 基于对三维角联锁结构复合材料真实细观结构的图像分析, 建立了几何分析模型, 在该模型中假设经纱的横截面呈矩形, 纬纱的横截面呈凸透镜形, 并运用刚度平均原理, 推导出了以角联锁结构复合材料预制件的 7 个宏观设计参数和纤维、树脂的弹性性能指标为参数变量的弹性性能计算公式, 在此基础上编制了能提供三种选择的计算机预测软件, 即选择组织结构、力学模型和任意一个偏轴角, 从而初步实现了角联锁结构复合材料弹性性能的细观设计。实验结果表明, 依据本研究提出的几何分析模型并采用刚度平均理论预测的等效工程弹性常数与实际测得的值之间总体趋势相同, 数据基本相符。

关键词: 三维角联锁结构; 复合材料; 弹性性能; 细观设计

中图分类号: TB332, V258 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)08-0003-05

Abstract: An investigation is reported in which a geometric model based upon analyzing micrographs of sections for 3D angle-interlock structural composites was developed. The rectangular cross-section of the warp and the convex cross-section of weft were assumed in the geometric model. The predicting equations of equivalent engineering elastic constants were worked out according to variable parameters including seven structural parameters and elastic constants of fiber and resin using the stiffness averaging method and the geometric model. Equivalent engineering elastic constants predicting software of 3D angle-interlock structural composites were programmed, which provides three choices of weave structure, mechanical model and axis off angle. Micro-design of elastic property for 3D angle-interlock structural composites is achieved basically. The experiment results show that both values of theory prediction of equivalent engineering elastic constants and experiments data are accordant.

Key words: 3D angle-interlock structure; geometric model; composites; elastic property; micro-design

三维(3D) 纺织复合材料是应航空航天、船舶、汽车、建筑等领域的需要而于 20 世纪 70 年代才崛起的先进复合材料。其中的三维角联锁结构复合材料适宜制备大型复合材料制件, 对其力学性能的研究于 20 世纪 80 年代末才刚刚出现在刊物上^[1], 到目前为止这方面的研究仍相对较少^[2-7]。三维角联锁结构复合材料的力学性能研究主要集中在弹性性能预测方面, 所运用的预测理论包括层合板理论、取向平均(刚度平均)

理论和有限元理论。由于层合板理论预测三维角联锁结构复合材料的弹性性能存在的局限性以及有限元理论建模上存在的难度, 因而, 用刚度平均理论解决三维角联锁结构复合材料的力学性能预测是目前的最佳选择。在用刚度平均理论预测三维角联锁结构复合材料的力学性能时, 所依据的几何模型的真实程度是预测系统可靠性的关键因素, 而预测系统已知数据包括的

内容是判断该预测系统是否实用的标志。本工作以基于对三维角联锁结构复合材料真实细观结构的图像分析而建立的几何模型及合理假设为出发点, 运用刚度平均方法, 将复合材料预制件设计参数与弹性性能的计算公式联系起来, 编制了三维角联锁结构复合材料的弹性性能预测计算机软件, 并将预测结果与实测结果进行了对比。对比结果表明依据本工作提出的几何分析模型并采用刚度平均理论预测的等效工程弹性常数与实际测得的值之间总体趋势相同, 数据基本相符。该预测软件具有很强的实用性, 预测用到的几何模型更真实地反映了复合材料内纱线的几何状态。这项内

容为纺织复合材料设计人员增加了一个很有实用价值的设计手段, 同时为今后的深入研究奠定了基础。

1 三维角联锁结构

图 1 给出了常用的 4 种三维角联锁结构的纵截面示意图, 区别在于是否带有衬经、衬纬。用标号 No. 1 - No. 4 分别表示带衬经和衬纬的角联锁结构、带衬经的角联锁结构、带衬纬的角联锁结构、角联锁结构(不带衬经和衬纬)^[8]。

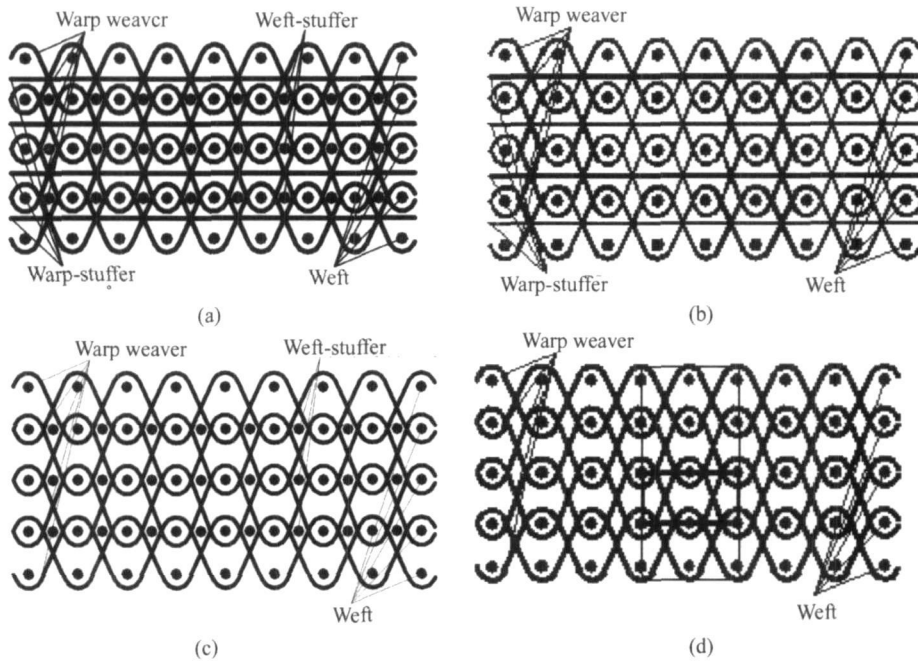


图 1 四种角联锁结构的纵截面示意图(a) No. 1; (b) No. 2; (c) No. 3; (d) No. 4

Fig. 1 Vertical sectional shapes of of four kinds of angle-interlock structures(a) No. 1; (b) No. 2; (c) No. 3; (d) No. 4

2 细观结构与几何分析模型

2.1 细观结构

细观结构是建立真实几何分析模型的基础。到目前为止的公开研究文献往往只注意观察了复合材料的纵截面图, 很少见到有关横截面的形态图。纵截面、横截面图是复合材料细观结构不可分割的两个方面, 同时它们也是推导几何分析模型参数与预制件设计参数之间关系的依据。图 2a-d 分别是 No. 1- No. 4 四种结构复合材料的纵截面显微镜照片, 图 2e-f 分别是 No. 1, No. 2 二种结构复合材料的横截面显微镜照片 (No. 3- No. 4 的横截面照片与之类似)^[9]。根据对照片的观察, 作如下假设:

(1) 纬纱和衬纬纱的横截面为凸透镜形, 短轴沿厚

度方向, 经纱横截面为矩形, 在相邻的上下两根纬纱之间经纱呈紧密排列状态;

(2) 纬纱和衬纬纱的纵截面中心线为直线, 经纱的纵截面中心线分为两段, 一段是纱线边部与纬纱密切接触的曲线段, 另一段是直线段。

2.2 几何分析模型及参数关系

以不带衬经和衬纬的角联锁结构 No. 4 为例。其重复单元为巨胞, 如图 1d 中的细框大矩形所示。在该大矩形的内部包含着粗框小矩形单元体, 单元体沿厚度方向的重复排列构成大矩形(表面的单元体与内部的单元体存在细小差异)。该单元体的几何参数为 a (x 方向)、 b (z 方向)、 c (y 方向)。其中 x, y, z 轴分别对应经向、厚度方向和纬向。由于对称性, 沿 x 方向选取单元体的 $1/2$ 作细观几何分析。图 3a, b 分别是沿 xoz 和 yoz 的几何分析模型。

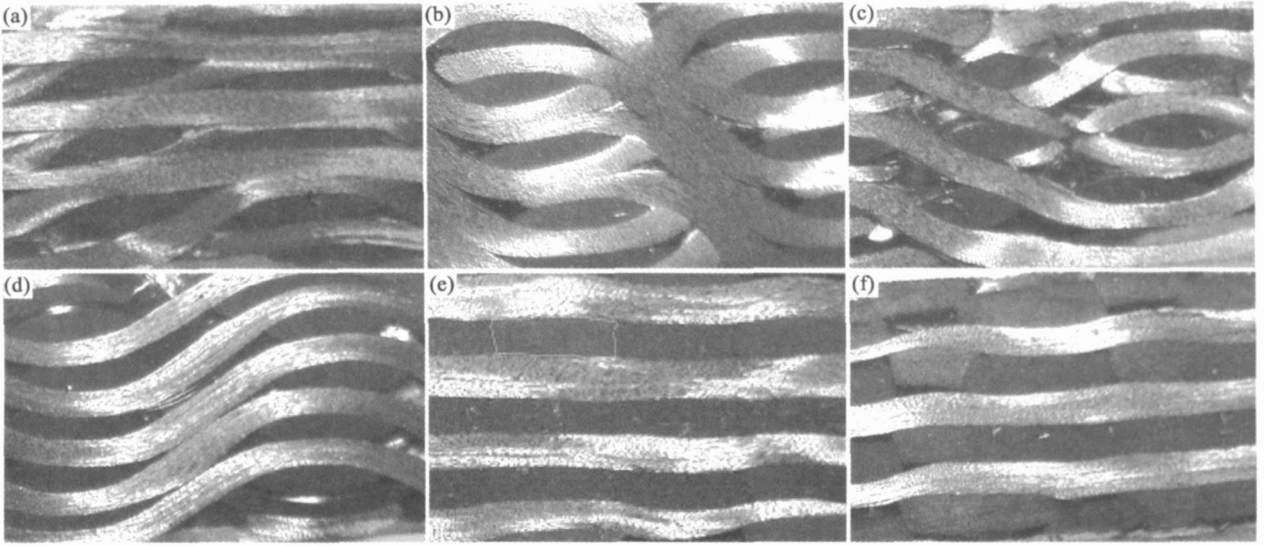


图2 三维角联锁结构复合材料截面显微镜照片 (a) No. 1 纵截面; (b) No. 2 纵截面;
(c) No. 3 纵截面; (d) No. 4 纵截面; (e) No. 1 横截面; (f) No. 2 横截面

Fig. 2 Microimages of sections for 3D angle interlock structures composites (a) No. 1 longitudinal section;

(b): No. 2 longitudinal section; (c) No. 3 longitudinal section; (d) No. 4 longitudinal section; (e) No. 1 cross section; (f) No. 2 cross section

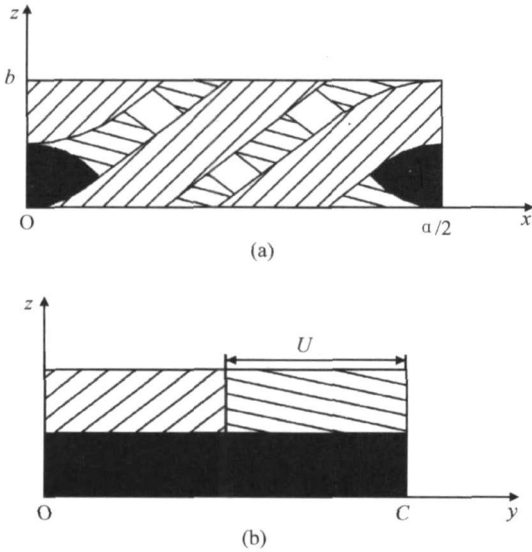


图3 角联锁结构沿 xoz (a) 和 yoz (b) 的几何分析模型

Fig. 3 Geometric models for xoz (a) and yoz (b) cross-section of angle-interlock structure

描述几何分析模型的参数除了包括单元体的几何参数 a, b, c 之外, 还有: 凸透镜形纬纱纤维束截面的厚度(即短轴) D 和长、短轴长度之比 a_f , 长方形经纱纤维束截面的宽 W 和长 U 。通过这 7 个参数即可确定经纱对 x 轴的倾角 θ 和纤维体积含量 V_f 。图 4 和式 (1) – (5) 表明各个参数之间的关系。

$$r_f = \frac{D}{4}(1 + a_f^2) \quad (1)$$

$$L_d^2 = \left(\frac{a}{2}\right)^2 + (b + D - 2r_f)^2 - (2r_f + W)^2 \quad (2)$$

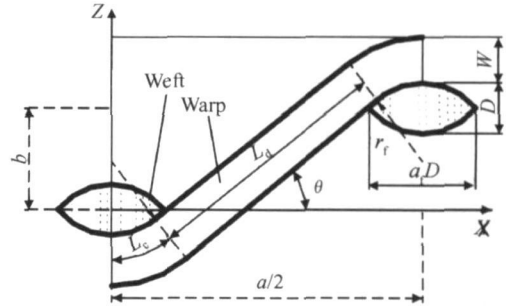


图4 几何分析模型的参数关系

Fig. 4 Parameters relationship in geometric model

$$L_c = (r_f + \frac{W}{2})\theta \quad (3)$$

$$\sin\theta = \frac{L_d(b + D - 2r_f) + \frac{a}{2}(2r_f + W)}{L_d^2 + (2r_f + W)^2} \quad (4)$$

$$V_f = V_f^i + V_f^w \quad (5)$$

式中: r_f 是凸透镜形的绘图半径; θ 是直线段经纱的倾角; V_f^i, V_f^w 分别是接结经纱和纬纱的纤维体积含量。 V_f^i, V_f^w 二者的计算方法如下:

$$V_f^i = 2(L_d + 2L_c)S_j/V \quad (6)$$

$$V_f^w = cS_w/V \quad (7)$$

其中, 单元体的体积: $V = abc/2$ 。经纱、纬纱的截面面积分别为:

$$S_j = W \times U \quad (8)$$

$$S_w = r_f(2r_f \arcsin(\frac{a_f D}{2r_f}) - a_f D) + a_f D^2/2 \quad (9)$$

2.3 设计参数、几何模型参数之间的数学关系

为实现力学性能的细观设计, 必须建立细观的几

何分析模型参数与宏观的预制件设计参数之间的数学关系。三维角联锁结构预制件的设计参数包括: ①纱线细度 T ; ②衬经与接结经的排列比 R_s/R_j ; ③衬纬与纬纱的排列比 R_f/R_w ; ④接结经纱密度 P_j ; ⑤衬经密度 P_s ; ⑥纬纱密度 P_w ; ⑦衬纬密度 P_f 。密度的单位是根/层/cm。通过分析可以得到以下关系:

$$a = 2 \frac{10}{P_w} \tag{10}$$

$$b = D + W \tag{11}$$

$$c = 2 \frac{10}{P_j} \tag{12}$$

$$S = S_w = S_j = \frac{T}{900\delta} \tag{13}$$

$$U = \frac{10}{P_j} \tag{14}$$

$$W = \frac{S}{U} \tag{15}$$

式中 δ 表示纤维材料的密度。

另外, 凸透镜形纬纱纤维束横截面的长、短轴长度之比 a_f 值的大小直接关系到纤维体积含量, 影响 a_f 的因素非常复杂, 如: 纱线细度、织造工艺、织物结构、复合工艺等。在其他因素保持不变的情况下, a_f 只是织物密度的函数, 织物密度越大, a_f 越小。在本研究确定的原料、工艺条件下, 有经验公式如下:

$$a_f = \frac{30}{P_j + P_s + P_w + P_f} \tag{16}$$

联立式(1), (9), (13), (16) 即可得出 D 值。

3 等效工程弹性常数

纺织复合材料的弹性常数可以通过纤维束的性能、树脂的性能、各个纤维束与 x 轴的夹角及其纤维体积含量等计算得到。正轴下单向复合材料是横观各向同性的, 运用细观力学分析方法由纤维和基体的性能得到单向复合材料的刚度/柔度矩阵。再根据每一种纤维束成分(接结经纱、衬经纱、纬纱、衬纬纱)对 x 轴的倾角分别转换单向复合材料的刚度/柔度矩阵得到相应的复合材料的刚度/柔度矩阵。最后按等应变力学模型, 根据每一种成分在单元体中所占的纤维体积含量按体积平均得到三维纺织复合材料的等效工程弹性常数^[10-12], 即

总体等效刚/柔度矩阵为:

$$[C]_z = V_f^s[C]_s + V_f^j[C]_j + V_f^w[C]_w + V_f^f[C]_f + V_m[C]_m [S]_z = [C]_z^{-1} \tag{17}$$

式中 $[C]_s, [C]_j, [C]_w, [C]_f$ 分别是衬经纱, 接结经纱, 纬纱, 衬纬纱制成的单向复合材料沿 x 轴方向的

刚度矩阵, 即分别经过应力转换矩阵转换后的刚度矩阵, 不难理解, $[C]_s = [C]$, 也就是衬经纱单向复合材料的刚度矩阵与纤维束的正轴刚度矩阵完全相同, 此外还有 $[C]_w = [C]_f$ 。 $[C]_m$ 是树脂的刚度矩阵。 V_f^s, V_f^j, V_m 分别是衬经纱, 衬纬纱和树脂的体积含量, 其计算式如下:

$$V_f^s = \frac{a}{2} S_j / V \tag{18}$$

$$V_f^f = c S_w / V \tag{19}$$

$$V_m = 1 - V_f^s - V_f^j - V_f^w - V_f^f \tag{20}$$

4 实验验证

纤维原料为 T700 12K 碳纤维, 基体材料采用 TDE-86[#] 环氧树脂, 复合固化采用 RTM (Resin Transfer Molding) 工艺, 即树脂传递模塑法固化成型, 拉伸试验以我国国家标准 GB1447-83 为依据, 同时参考了 NASA-94-cr4609^[13], 测试仪器为日本岛津(SHIMADZU)的 AG-250KNE 型万能材料试验机。表 1 给出了图 1 所示四种结构的设计参数、纤维和树脂的弹性常数、复合材料试片的尺寸。

表 2 给出了实测的结果和采用等应变力学模型时理论预测的纤维体积含量以及等效工程弹性常数结果。可以看出, 二者具有较好的吻合性。实验数据与预测结果的差异一方面反映了三维纺织复合材料力学性能测试中的数据分散性, 另一方面也是理论上的假设、简化与真实结构状态之间的区别的体现。

分析表 2 的数据可以发现, 弹性模量的理论预测值均高于实测值, 符合复合材料力学理论中有关刚度平均法预测结果通常给出的是材料弹性模量的上线这一观点^[12]; 无论是实测值还是预测值, 带衬经的 No. 1, No. 2 结构的经向弹性模量均高于不带衬经的 No. 3, No. 4, 这一点充分体现了衬经纱的增强作用; 同样, 无论是实测值还是预测值, 带衬纬的 No. 1, No. 3 两种结构的纬向弹性模量均高于不带衬纬的 No. 2, No. 4, 这一点充分体现了衬纬纱的增强作用。

5 结论

(1) 复合材料的显微镜照片和力学性能测试结果均表明, 以凸透镜形纬纱横截面和矩形经纱横截面为特征的几何分析模型更接近纤维束在复合材料内部的真实形态, 在此基础上编制的预测软件较为真实地反映了三维角联锁结构复合材料弹性性能的固有属性。

表 1 设计参数、纤维和树脂的弹性常数、复合材料试片的尺寸
Table 1 Parameters, elastic constants of fiber and resin, specimen dimension

Parameter		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
Structural design parameters	T	800	800	800	800
	R_s/R_j	1: 2	1: 2	0: 2	0: 2
	R_t/R_w	1: 1	0: 1	1: 1	0: 1
	$P_j/\text{Layer/cm}$	6. 8	6. 8	7. 0	7. 0
	$P_j/\text{Layer/cm}$	3. 4	3. 4	0	0
	$P_w/\text{Layer/cm}$	1. 8	2. 0	1. 7	2. 7
	$P_t/\text{Layer/cm}$	1. 8	0	1. 7	0
Fiber elastic constants ^[14]	$\delta/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1. 8	1. 8	1. 8	1. 8
	E_{fl}/GPa	230	230	230	230
	E_{cl}/GPa	40	40	40	40
	$G_{\text{fl12}}/\text{GPa}$	24	24	24	24
	v_{12}	0. 26	0. 26	0. 26	0. 26
	v_{23}	0. 3986	0. 3986	0. 3986	0. 3986
Resin elastic constants	E_m/GPa	3. 5	3. 5	3. 5	3. 5
	v_m	0. 35	0. 35	0. 35	0. 35
Specimen dimension		250mm×25mm×4mm	250mm×25mm×4mm	250mm×25mm×4mm	250mm×25mm×4mm

表 2 实测结果和理论预测结果
Table 2 Experiment results and theory predicting results

Elastic constant	No. 1		No. 2		No. 3		No. 4	
	Experiment	Predicting	Experiment	Predicting	Experiment	Predicting	Experiment	Predicting
E_x/GPa	83. 68	85. 00	80. 71	81. 15	46. 17	50. 82	45. 54	50. 33
E_y/GPa	50. 42	53. 97	37. 45	40. 34	52. 60	58. 82	48. 14	52. 59
E_z/GPa	—	25. 26	—	23. 47	—	24. 28	—	22. 26
G_{xy}/GPa	—	6. 40	—	6. 04	—	6. 12	—	6. 24
G_{yz}/GPa	—	7. 49	—	7. 13	—	7. 09	—	7. 03
G_{xz}/GPa	—	13. 75	—	14. 15	—	12. 20	—	17. 02
v_{xy}	—	0. 070	—	0. 078	—	0. 068	—	0. 049
v_{yz}	—	0. 365	—	0. 360	—	0. 364	—	0. 328
v_{xz}	—	0. 585	—	0. 618	—	0. 557	—	0. 714
$V_f/\%$	60. 06	65. 72	56. 14	60. 59	60. 64	62. 40	59. 22	62. 23

(2) 三维角联锁结构复合材料弹性性能的计算过程是以复合材料预制件的 7 个宏观设计参数和纤维、树脂的弹性性能指标为参数变量, 同时还可进行组织结构、偏轴角、力学模型的选择, 初步实现了三维角联锁结构复合材料弹性性能的细观设计。

参考文献

[1] WHITNEY, T J , CHOU T W. Modeling of 3-D angle-interlock textile structural composites[J]. Journal of Composite materials, 1989, 123(9): 809– 911.
[2] CHOU T W , KO F K. Textile structural composites[M]. U. S. A: Elsevier Science Publishers B. V., 1989. 129– 170.

[3] BYUN, J H and CHOU, T W. Elastic properties of three dimensional angle-interlock fabric preforms [J]. J Text Inst, 1990, 81 (4): 538– 548.
[4] COX B N , DADKHAH M S. The macroscopic elasticity of 3D woven composites [J]. Journal of Composite Materials, 1995, 29 (6): 785– 819.
[5] POCHIRAJU K, CHOU T W. Three-dimensionally woven and braided composites. I: a model for anisotropic stiffness prediction [J]. Polymer Composites, 1999, 20(4): 565– 580.
[6] SHENG S Z, HOA S V. Modeling of 3D angle interlock woven fabric composites[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2003, 16(1): 45– 58.

表 1 不同温度下时效 1440min 后 γ' 相的 $\ln k$, k , \bar{r}_t 的计算值
Table 1 The $\ln k$, k , \bar{r}_t at different temperature after ageing 1440min

T/K	$T^{-1}/K^{-1} \cdot 10^{-4}$	$\ln k$	$k/(nm^3 \cdot min^{-1})$	\bar{r}_t/nm	$\left \frac{r_{calc}-r_{exp}}{r_{calc}} \right /\%$
1323	7.559	8.87	7135.96	201.11	1.25
1273	7.856	7.85	2562.31	154.52	3.59
1223	8.177	6.74	846.13	106.81	1.94
1173	8.525	5.54	254.23	71.54	9.80
1123	8.905	4.23	68.63	46.23	8.50
1023	9.775	1.23	3.41	16.99	2.48

3 结论

(1) GH742 合金在 1120℃保温 1h 后基体中的 γ' 相可以完全固溶。

(2) GH742 合金在一定温度时效时, 随着保温时间延长, 合金中高密度的细小 γ' 相粗化为低密度的粗大 γ' 相, 即发生 Ostwald 熟化。并且 γ' 相的长大粗化速率与时效温度有关, 当合金在较高温度时效时, 由于温度较高合金中元素扩散速率较快, 界面能降低幅度较大, γ' 相粗化速率高。

(3) GH742 合金中 γ' 相的粗化符合 LSW 理论, 合金中 γ' 相颗粒尺寸与时效时间 t 和时效温度 T 的关系: $\bar{r}_t^{-3} = 2.18 \times 10^{15} e^{-\frac{(289.53 \pm 1.48)}{RT}} t$ 。

(4) 计算得出 GH742 合金中 γ' 相的粗化激活能为 (289.53 ± 1.48) kJ/mol, 这表明合金中 γ' 相颗粒的粗化主要是由 γ' 相形成元素 Al, Ti 等在 Ni 基体中的扩散所控制。

参考文献

[1] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册第二卷[M]. 第2版. 北京: 中国标准出版社, 2002. 482.

[2] 郭士文, 张玉锁, 童开峰, 等. 镍基高温合金长期时效后 γ' 相长大动力学[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2003, 24(6): 576– 579.

[3] 侯介山, 郭建亭, 周兰章, 等. K44 镍基高温合金长期时效过程中 γ' 相粗化对拉伸性能的影响[J]. 金属学报, 2006, 42(5): 481– 486.

[4] VAN E H, DER MOLEN, OBKAK J M, et al. Control of γ' particles size and volume fraction in the superalloy Udimet700 [J]. Met Trans, 1971, 2: 1627– 1633.

[5] 张绍维, 斯特温斯 R N, 戴维斯 C K L. 镍基高温合金中 γ' 相长大和分布规律的研究[J]. 材料工程, 1992, (3): 17– 19, 33.

[6] 刘建涛, 刘国权, 胡本芙, 等. FGH96 合金中 γ' 相的高温粗化行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(3): 418– 422.

[7] 陈国良. 高温合金学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987. 200.

[8] CALLIARI I, MAGRIN L M, DABALA M. Microstructure evolution of Udimet720 superalloy [J]. J Mater Eng Perf, 1999, 8(1): 111– 115.

[9] ARDEL A J, NICHOLON R B. On the modulated structure of aged Ni-Al alloys[J]. Acta Metall, 1966, 14: 1295– 1309.

[10] ARDEL A J. The growth of gamma prime precipitates in aged Ni-Al alloys[J]. Met Trans, 1970, 1: 525– 534.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50471097)
收稿日期: 2006-08-14; 修订日期: 2007-03-20
作者简介: 李红宇(1973–), 女, 博士研究生, 现主要从事高温合金方面的研究, 联系地址: 北京科技大学新金属材料国家重点实验室(100083)。

(上接第 7 页)

[7] 易洪雷. 三维机织复合材料的结构与力学性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2002.

[8] 杨彩云, 李嘉禄. 复合材料用 3D 角联锁结构预制件的结构设计及新型织造技术[J]. 东华大学学报, 2005, 31(5): 53– 58.

[9] 杨彩云, 李嘉禄. 一个基于三维机织复合材料细观结构导出其厚度计算公式的新方法[J]. 复合材料学报, 2005, 22(6): 178– 182.

[10] 航空航天工业部科学技术研究院. 复合材料设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1990. 51– 54.

[11] 肖长发. 纤维复合材料[M]. 北京: 中国石化出版社, 1995. 58– 62.

[12] 王兴业, 肖加余, 唐羽章, 等. 复合材料力学分析与设计[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999. 157– 164.

[13] NASA 94-CR-4609. Test Methods for Textile Composites[S].

[14] CHEN L, TAO X M, CHOY C L. Mechanical analysis of 3-D braided composites by the finite multiphase element method[J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(16): 2383– 2391.

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(06YFJMJC03000)
收稿日期: 2006-08-21; 修订日期: 2007-03-05
作者简介: 杨彩云(1959–), 女, 教授, 博士, 主要从事纺织复合材料制备及力学性能方面的研究工作, 联系地址: 天津工业大学复合材料研究所(300160)。E-mail: yangcaiyun@tjpu.edu.cn