

正交叠层机织布整体穿刺工艺的纤维弯曲伸长机理

朱建勋, 何建敏, 王海燕

(东南大学经济管理学院, 南京 210096)

[摘要] 分析了正交叠层机织布整体穿刺工艺机织布与钢针的相互作用, 提出并建立了纤维的弯曲伸长及伸长断裂模式, 讨论了影响纤维弯曲伸长的结构参数。通过理论分析和试验结果说明, 绕针弯曲伸长断裂是Z向钢针直径和Z向距比值 X 的函数, 为减少整体穿刺的纤维伸长断裂应选取较小的 X 比值。

[关键词] 整体穿刺; 纤维; 弯曲伸长; 结构参数; 伸长断裂

[中图分类号] TB332 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)05-0059-04

1 引言

立体织物是高性能纤维在三维空间多方向连续排布形成的纤维增强体, 在复合材料中起着增加强度、改善性能的作用^[1,2]。立体织物是近30多年来发展起来的性能最优的纤维增强结构, 主要应用于航空、航天等军事及新技术领域。许多国家都投入大量人力、财力进行研究, 新的立体织物结构和编织技术不断涌现, 以确保在立体织物增强高性能复合材料领域中的领先地位^[3]。

穿刺技术是立体织物的一种成型技术, 穿刺织物是平面机织物与正交非织造三向织物的组合织物^[4], 最早由美国的AVCO公司研究成功。如采用碳纤维的MOD-3^[5], 在进行了一系列研究试验后, 获得了重大技术突破, 材料综合性能试验表明优于正交三向织物碳/碳材料, 现已成为战略导弹的关键材料。

我国穿刺技术研究一直得到了国家重点计划的资助, 完全依靠自己的力量取得了突破性进展, 技术研究和应用成果先后获国家技术发明奖和国家科技进步奖。

迄今为止, 国内外穿刺技术的研究热点都集中在碳纤维穿刺织物经复合成碳/碳复合材料的力学

和热力学性能方面^[6,7]。为了进一步改善和提高穿刺织物性能, 有必要对穿刺织物的结构进行研究。

2 正交叠层机织布整体穿刺工艺

正交叠层机织布整体穿刺是指将机织布的经向(或纬向)依次以 0° 、 90° 方向叠层后置于Z向等距密排的钢针阵列上, 通过穿刺模板与钢针阵列的相对运动, 机织布被钢针阵列穿刺至一定高度后, 再由纤维逐一取代Z向钢针而形成立体织物的一种编织成型技术。工艺流程与穿刺工序示意如图1所示^[4]

平面叠层机织布在Z向钢针整体穿刺过程中, 机织布平面面积被钢针挤占, 经纬向纤维被排挤、推移, 充填到钢针周围的空隙中, 增加了织物的纤维含量, 有利于复合材料性能的提高。与此同时, 钢针的挤占使纤维弯曲、变形、伸长、断裂, 造成了纤维的损伤, 降低了复合材料的力学性能。为此, 研究整体穿刺工艺, 减少穿刺工序对机织布纤维的弯曲成为整体穿刺技术研究的重点课题。

3 纤维弯曲伸长机理

3.1 纤维弯曲模式

穿刺模板下移过程中, 穿过机织布的钢针面积

从零（钢针针尖）逐渐增大到最大（针杆横截面面积）。在钢针针尖锥体的作用下机织布中的纤维产生移位堆挤、弯曲伸长等一系列复杂的变化。

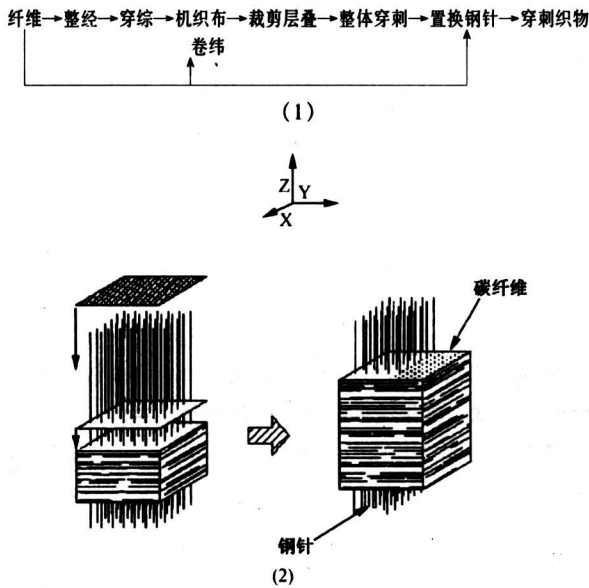


图 1 正交叠层机织布整体穿刺织物编织工艺流程 (1) 与穿刺工序示意图 (2)
Fig.1 Weaving process and procedure of integrated piercing fabrics of orthogonal laminated woven fabrics (1) and diagram of piercing working procedure (2)

为考察穿刺对纤维的弯曲影响，根据工艺作如下假设：

- 1) Z 向钢针阵列密排等距，行、列平直，相互垂直；
- 2) 机织布经纬密相等，纤维在平面方向较少弯曲；
- 3) 机织布经向或纬向严格沿钢针阵列的行、列铺放；
- 4) Z 向钢针阵列一次同时整体穿刺每层机织布。

据此，机织布与 Z 向钢针整体穿刺后，一部分纤维会按理想位置挤占钢针阵列的行或列的缝隙中，如图 2 所示。这些纤维在机织布中只作平移，纤维基本保持平直、不弯曲。然而，由于工艺的复杂性，许多纤维并不能按理想位置挤占钢针的缝隙，纤维被钢针排挤，绕针形成复杂的弯曲和伸长。机织布与 Z 向钢针整体穿刺过程就是纤维重新排布过程，并介于理想位置与绕针弯曲的复杂组合状况之间：一部分纤维平直，一部分纤维弯曲；

纤维某一段长度内平直排布，另一段长度内绕针弯曲；再加上机织布的经纬方向的相互影响，系统变得很复杂。

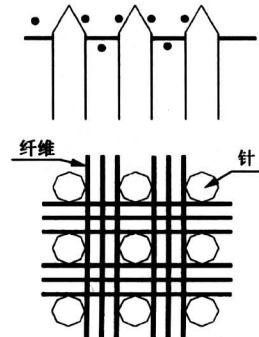


图 2 纤维按理想位置挤占钢针缝隙
Fig.2 The fibers occupy idea position crack between needles

分析纤维弯曲的多种形态，可以将绕针弯曲抽象为图 3 所示的 4 种基本弯曲模式，其他形态是 4 种基本弯曲模式的组合。

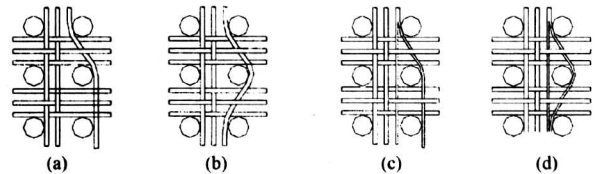


图 3 纤维绕针弯曲的四种基本模式
Fig.3 The four types of basic methods of fiber by pass bending

(a) (b) 图所示为整束纤维绕过某一钢针的模式，(c) (d) 图所示为整束纤维的一部分绕过钢针的模式，(a) (c) 绕过某钢针后，纤维占据了另一相邻钢针行或列的位置，(b) (d) 绕过某一钢针后回到原钢针行或列的位置。

3.2 纤维弯曲伸长

整束纤维或整束纤维的一部分绕过某一钢针弯曲等同于该整束纤维或整束纤维的部分长度在该钢针处被迫弯曲伸长。整束与整束的部分长度弯曲伸长可用同一模式来研究，如图 4 所示：

(e) 对应图 3 中 (a) (c) 的弯曲模式，(f) 对应于图 3 中 (b) (d) 的弯曲模式，(e) (f) 在 A、B 和 A'、B' 之间的纤维弯曲伸长形式完全相同，B'、C' 可视为以 B' 为中心同 A'、B' 完全对称，(f) 的伸长为 (e) 的 2 倍。为此仅需分析图 (e) 所示的弯曲伸长。

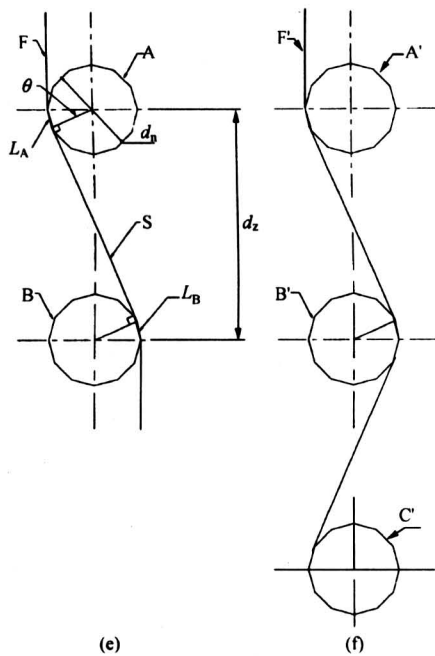


图 4 纤维绕过钢针的弯曲伸长模式

Fig.4 The bending and elongation module of fiber by pass bending

图中： d_z —相邻两钢针的中心距，mm， d_n —钢针直径，mm。

纤维 F 从 A 钢针的左侧绕至 B 钢针的右侧，F 取最短的路径 S，则 S 同 A、B 两钢针相切。原长为两钢针中心距 d_z 的纤维绕过钢针后的长度为：

$$L = L_A + L_B + S = 2L_A + S = 2 \cdot \frac{d_n}{2} \theta + 2 \sqrt{\left(\frac{d_z}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_n}{2}\right)^2} = d_n \arcsin\left(\frac{d_n}{d_z}\right) + \sqrt{d_z^2 - d_n^2} \quad (1)$$

L_A 、 L_B 为纤维 F 从钢针 A、B 相切点开始绕过 A、B 的一段纤维长度。

设 L' 为纤维绕钢针弯曲伸长与原长或不发生弯曲伸长的差值，则

$$L' = L - d_z = d_n \arcsin\left(\frac{d_n}{d_z}\right) + \sqrt{d_z^2 - d_n^2} - d_z \quad (2)$$

式 (2) 表明， L' 是关于 d_n 与 d_z 的函数。

求 L' 关于 d_z 的偏导数：

$$\frac{\partial L'}{\partial d_z} = \frac{\sqrt{d_z^2 - d_n^2}}{d_z} - 1 < 0 \quad (3)$$

式 (3) 表明， L' 关于 d_z 是单调减小的。即，Z 向距 d_z 越小，纤维弯曲伸长量越大；Z 向距越大，

纤维弯曲伸长量越小。

求 L' 关于 d_n 的偏导数：

$$\frac{\partial L'}{\partial d_n} = \arcsin\left(\frac{d_n}{d_z}\right) > 0 \quad (4)$$

式 (4) 表明， L' 关于 d_n 是单调增加的。即钢针直径 d_n 越小，纤维弯曲伸长量越小；钢针直径 d_n 越大，纤维弯曲伸长量越大。

以上分析可知，选取较大的 Z 向距 d_z 和较小的钢针直径 d_n ，可减小纤维的绕针弯曲伸长。

3.3 纤维弯曲断裂

由纤维材料力学可知，某一长度纤维在拉伸作用下产生拉伸变形，当该长度的相对拉伸变形长度超过纤维断裂伸长率时，纤维产生断裂。同理，纤维绕针弯曲形成的相对伸长若超过纤维允许的断裂伸长率时纤维断裂。

不失一般性，为研究绕针弯曲产生的断裂，需将纤维某处的绕针弯曲放在一段纤维长度中来考虑。这是因为机织布与钢针整体穿刺时纤维绕针弯曲的出现具有概率特性。此外，由于纤维的滑移和变形，在机织布某段纤维一处出现绕针弯曲时，该段纤维未出现绕针弯曲的平直部分具有提供拉伸变形所需的部分纤维伸长量，减少了一处因绕针弯曲产生集中伸长而断裂的机率。如图 5 所示，设纤维 F_p 上 P 点产生绕针弯曲，a 针到 b 针之间的距离为 nd_z ，因绕针弯曲 a 针到 b 针之间的纤维长度为 $L + (n - 1)d_z$ ，则该段纤维不发生伸长裂伸的条件为：

$$\frac{L + (n - 1)d_z - nd_z}{nd_z} < \epsilon, \quad \frac{L}{d_z} < n\epsilon + 1 \quad (5)$$

式中： n ——给定长度内的钢针数；

ϵ ——纤维材料的断裂伸长率。

将 (1) 式代入 (5) 式得：

$$\frac{d_n}{d_z} \arcsin\left(\frac{d_n}{d_z}\right) + \sqrt{1 - \left(\frac{d_n}{d_z}\right)^2} < n\epsilon + 1,$$

令 $x = \frac{d_n}{d_z}$ ，则有

$$x \arcsin x + \sqrt{1 - x^2} < n\epsilon + 1 \quad (6)$$

机织布的纤维确定后， ϵ 为定值，在已知的钢针根数 n 内，若 d_n 与 d_z 的比值满足式 (6)，可保证在 nd_z 长度内一处出现绕针弯曲但不造成断裂。同样，当 d_n 与 d_z 选取后，可以计算出一处

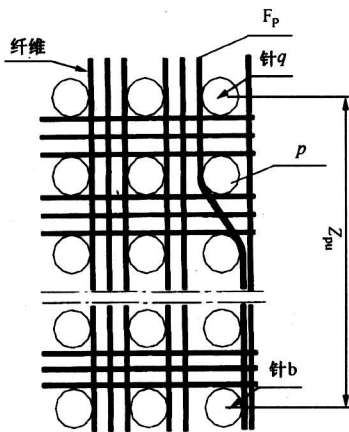


图5 一段纤维 F_p 一处 P 点
出现绕针弯曲

Fig.5 A piece of fiber (F_p) will be happened bending around needles (P)

出现绕针弯曲但又不形成纤维断裂所需的平直纤维的最小长度 nd_z 。

为研究 x 与 n 的关系, 考虑式 (6) 的极限情况, 有:

$$x \arcsin x + \sqrt{1 - x^2} = n\epsilon + 1$$

$$\text{或 } n = \frac{x \arcsin x + \sqrt{1 - x^2} - 1}{\epsilon}, \quad (7)$$

对 x 求偏导数有

$$\frac{\partial n}{\partial x} = \arcsin x > 0. \quad (8)$$

式 (8) 表明, n 关于 x 是单调增加的。 x 大, 所需平直纤维最小长度对应的钢针数大; x 小, 所需平直纤维最小长度的钢针数小。 x 大, d_n 对 d_z 的比值大, x 小, d_n 对 d_z 的比值小。

同前述 L 一样, n 值也是 d_n 、 d_z 的函数, 但 n 值更能反应工程实际情况。 n 值的意义是, 某一组结构参数对应的 n 值越大, 表明为减少纤维绕针弯曲断裂所需对应的平直纤维的长度越长, 整体穿刺时产生伸长断裂的可能性就大。

4 试验验证

选取若干直径的钢针 d_n 和 Z 向距 d_z 组合, 采用碳纤维机织布进行整体穿刺试验, 在相同的织物几何结构和复合工艺条件下, 测取碳纤维穿刺织物平面方向的拉伸应力 δ_{x-y} , 结果如表 1 所示。

穿刺织物平面方向的力学性能反映了机织布纤维的绕针弯曲伸长及断裂损伤情况。表 1 的试验结果验证了理论分析的正确。

表 1 碳纤维穿刺织物平面方向力学性能 δ_{x-y} 与 x 值的关系

Table 1 Relation between mechanics property (δ_{x-y}) in the plane surface direction of carbon fiber piercing woven fabrics and X value

d_n/mm	0.9	0.8	0.7
d_z/mm	1.5	1.4	1.2
x	0.600	0.571	0.583
δ_{x-y}/MPa (相对值)	100	176	140

5 结论与展望

1) 正交叠层机织布整体穿刺工艺造成钢针挤占布面面积, 纤维由此产生绕针弯曲和伸长, 钢针直径和 Z 向距影响纤维的弯曲伸长。

2) 一段纤维出现一处绕针弯曲伸长并形成断裂是钢针直径和 Z 向距比值 x 的函数, 为减少整体穿刺的纤维伸长断裂应选取较小的 x 比值。

3) 正交叠层机织布整体穿刺工艺作为立体织物一种新的成型工艺, 尽管取得了技术突破, 但许多研究还不完善。作者研究的 Z 向距和钢针直径的选取除对纤维绕针弯曲和伸长断裂影响外, 还涉及织物的其他性能, 其影响结果和在多目标下的参数优化有待进一步研究。

参考文献

- [1] 郭正. 宇航复合材料 [M]. 北京: 宇航出版社, 1999. 1~4
- [2] 吴人洁. 复合材料 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2000. 3~40
- [3] Frank K. Preform fiber architecture for ceramic-matrix composites [J]. Ceramic Bulletin, 1989, 68 (2): 401~413
- [4] 朱建勋. 细编穿刺织物的结构特点及性能 [J]. 宇航材料工艺, 1998, (1): 41~43
- [5] Rolincik P G. Properties and application of mod 3 pierced fabric reinforced carbon/carbon composites [A]. In: 17th National symposium of SAMPE [C]. Calif, USA: 1972, (4): 11~13
- [6] 杜善义等. 复合材料及其结构的力学、设计、应用和评价 (第 3 册) [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000. 288~297
- [7] Ye L, Dayhyani H R. On deformation characteristics of fiber reinforced woven fabric composites [J] Composites Part A 1997, (28A): 869~894

(下转第 69 页)

A New Evolution-reasoning Method in Conceptual Design Based on Extension Theory

Zhao yanwei^{1,2}, Liu haisheng², Zhang Guoxian¹

(1. College of Mechanical & Electronic Engineering, Shanghai University,
Shanghai 210072, China; 2. College of Mechanical & Electronic Engineering,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

[Abstract] After existing study methods are analyzed, a new researching model for conceptual design based on extension and genetic algorithms was presented. The inner-model and outer-model of product project were set up with matter elements. In genetic algorithms the coding for individual, the means for cross-over and mutation were all founded based on the inner-model. The fitness function was set up combined with relationship function. The technique solves the innovative and incompatible problems in conceptual design. The feasibility of the new researching model is testified by three conceptual design examples for retarder.

[Key words] conceptual design; matter elements transform; genetic algorithms; evolution reasoning; extension appraisal

(cont. from p. 62)

The Mechanism of Fiber Bending and Elongation in the Integrated Piercing Process of Orthogonal Laminated Woven Fabrics

Zhu Jianxun, He Jianmin, Wang Haiyan

(College of Economics and Management, Southeast University, Nanjing 210096, China)

[Abstract] The paper analyzes the interaction between woven fabric and needle in the integrated piercing process of orthogonal laminated woven fabrics, proposes and establishes fiber bending elongation and elongation breakage model, and talks over the structure parameters influencing fiber bending elongation. Through theory analysis and testing result analysis, the paper indicates that breakage caused by bending and elongation around needles is a function of the ratio X between diameter of needle in Z direction and needles distance in Z direction, and suggests that smaller X value be chosen in order to reduce fiber elongation breakage of the integrated piercing.

[Key words] integrated piercing; fiber; bending elongation; structure parameter; elongation breakage