

学术论文

基于纤维弯曲伸长模式的 Z 向钢针针尖形态优化

朱建勋^{1,2}, 何建敏¹, 王海燕¹, 周之刚²

(1. 东南大学经济管理学院, 南京 210096; 2. 南京玻璃纤维研究设计院, 南京 210012)

[摘要] 分析了整体穿刺过程中纤维弯曲伸长机理, 建立了钢针的力学模型, 分别讨论了作用在针尖上的最大弯曲正应力、最大剪切应力以及穿刺阻力与针尖半径和针尖长度之间的关系, 然后根据获得的结果对钢针针尖的形状进行了优化。

[关键词] 整体穿刺; 弯曲正应力; 剪切应力; 针尖半径; 针尖长度; 优化

[中图分类号] TB332 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)09-0018-04

1 引言

高性能纤维在三维空间多方向连续排布、相互交缠形成的纤维织物称为立体织物^[1], 可作为增强体用于制作先进复合材料^[2]。整体穿刺是制造立体织物的一种工艺技术, 最早由美国 AVCO 公司研究成功^[3]。在国家重点计划的资助下, 我国整体穿刺技术获得了重大技术突破。采用碳纤维叠层机织布与 Z 向钢针阵列整体穿刺, 再由碳纤维逐一替代 Z 向钢针形成碳纤维穿刺织物, 经碳复合制造的先进碳/碳复合材料, 已成功用作高性能隔热材料, 使我国在该领域跻身于世界先进水平。

整体穿刺织物是一种采用整体穿刺工艺技术间接成型的立体织物, 其工艺流程如图 1 所示。整体穿刺工艺过程中, 在穿刺模板的作用下, 等距密排 Z 向钢针穿过叠层机织布, 布面受到钢针的占挤, 纤维被排挤、推移、弯曲变形^[4], 如图 2 所示。同时钢针在布面纤维的推挤、拉伸作用下, 针尖产生位置偏移、弯曲, 严重时针尖断裂, 失去应有的功能, 影响到整体穿刺工艺的顺利实施。因此, 在研究整体穿刺过程中纤维弯曲伸长机理的同时, 分析纤维与钢针之间的相互作用, 建立钢针的力学模

型, 以期减小由于穿过机织布引起的纤维对钢针的作用应力, 优化钢针针尖形态, 是整体穿刺工艺技术的重要研究内容。

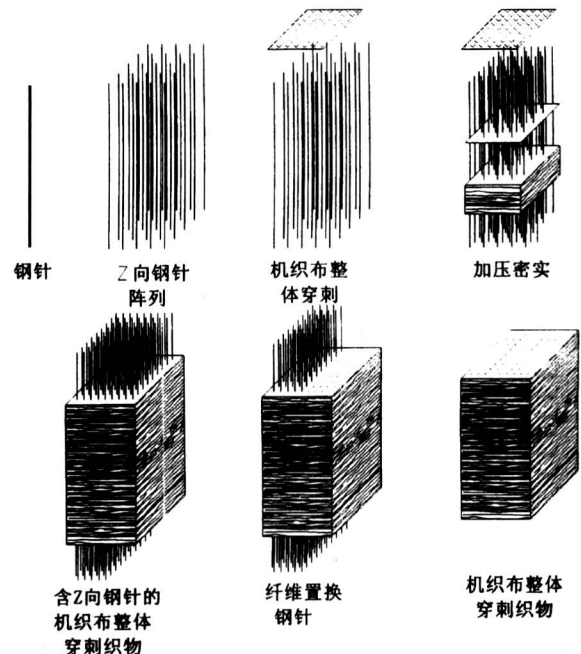


图 1 整体穿刺织物成型工艺示意图

Fig.1 Weaving process and procedure of integrated piercing fabrics

[收稿日期] 2003-01-29; 修回日期 2003-04-12

[作者简介] 朱建勋 (1960-), 男, 江苏通州市人, 南京玻璃纤维研究设计院教授级高级工程师, 博士研究生

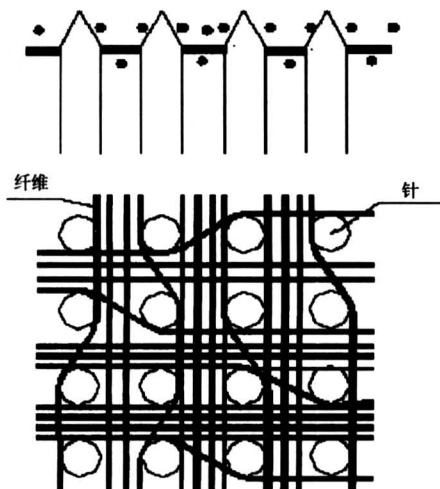


图 2 钢针挤布示意图

Fig.2 The steely needles occupy crack in the fabric

2 钢针针尖形状

穿刺钢针由针杆与针尖两部分组成，针尖可以有不同形态，它是通过多工位机械磨削而成的。磨削前要设定锥体曲面的曲线。图 3 为放大的钢针针尖形态示意图。

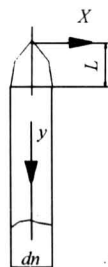


图 3 钢针针尖示意图

Fig.3 The form of needlepoint

设以针尖顶点为坐标原点，指向针杆方向为 Y 轴的正向。图 3 中： d_n 为钢针针杆直径 (mm)； L 为钢针针尖长度 (mm)。

针尖曲线数学解析表达式如下：

$$y_m = a_m x_m^m, \quad (m > 0). \quad (1)$$

在给定的坐标系及 d_n , L 参数下，求出系数 a_m 有：

$$y_m = 2^m L d_n^{-m} x_m^m. \quad (2)$$

由此可得不同针尖形态任一位置的钢针半径：

$$x_m = \frac{1}{2} d_n L^{-\frac{1}{m}} y_m^{\frac{1}{m}}. \quad (3)$$

3 纤维弯曲伸长张力

在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（针杆横截面积）。在钢针尖锥体的作用下机织布中的纤维产生移位推挤、弯曲伸长等一系列复杂的变化，并与钢针产生相互作用。

纤维弯曲具有多种形态^[5]。纤维经绕针产生伸长，其伸长率 ϵ 为

$$\epsilon = \frac{L' - d_z}{d_z} = \frac{2x_m \cdot \arcsin\left(\frac{2x_m}{d_z}\right) + \sqrt{d_z^2 - 4x_m^2} - d_z}{d_z}, \quad (4)$$

式中： d_z —相邻两钢针之中心间距 (mm)。

根据纤维材料学理论可知^[6]，弯曲伸长纤维产生了张力 F_0 ：

$$F_0 = E(nA_{\text{纤维}})\epsilon, \quad (5)$$

式中 E —纤维束的杨氏模量； n —修正系数， $n \leq 1$ ； $A_{\text{纤维}}$ —伸长纤维束的截面积。

整束纤维弯曲伸长时， $n = 1$ ；整束纤维中部分纤维弯曲伸长时， $n < 1$ 。

4 针尖形态优化

整体穿刺时，由于等距密排 Z 向钢针与叠层机织布的相互运动，针尖穿刺机织布的面积由零变大，针尖受到布面因纤维弯曲伸长形成的张力也由零逐渐增大，若此时针尖的刚性足以抵抗机织布纤维的弯曲伸长张力，则整体穿刺便能顺利实施。因此，针尖形态优化应以提高钢针针尖的刚性和减小机织布纤维弯曲对钢针的张力为目标。

4.1 纤维张力对钢针的作用

钢针的受力情况有多种，但可以抽象为如图 4 所示的两种最基本的受力状态。

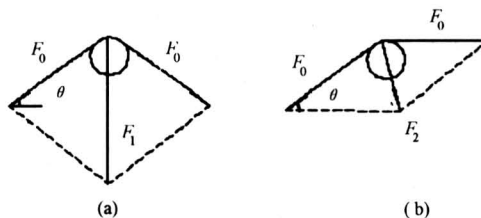


图 4 纤维对钢针的作用力

Fig.4 The forces on the needlepoint acted by fiber

(a), (b) 两种情况下针尖所受纤维张力的合力分别为:

$$F_1 = 2F_0 \cdot \sin\theta, \quad F_2 = 2F_0 \cdot \sin \frac{\theta}{2}.$$

如果钢针的周围同时有几根纤维一起弯曲, 则钢针的受力是 (a), (b) 两种情况的某一组合, 合力的最大值可用下面的通式来表示

$$F = 2\sqrt{2}kF_0 \cdot \sin\theta, \quad (6)$$

其中 k 为一次穿刺的碳布层数。

4.2 针尖的强度

以纤维为研究对象, 取单元体进行受力分析^[7], 如图 5 (a) 所示, 其中 N 和 F_3 分别是针尖

$$\begin{cases} \sum X = 0 \\ \sum Y = 0 \\ F_3 = N \cdot f \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} N \cdot \sin\alpha - F - F_3 \cdot \cos\alpha = 0 \\ F_4 - F_3 \cdot \sin\alpha - N \cdot \cos\alpha = 0 \\ F_3 = N \cdot f \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} N = F / (\sin\alpha - f \cdot \cos\alpha) \\ F_3 = Ff / (\sin\alpha - f \cdot \cos\alpha) \\ F_4 = F \cdot \frac{f + \text{ctg}\alpha}{1 - f \cdot \text{ctg}\alpha} \end{cases} \quad (7)$$

将钢针所受的力在 X 、 Y 两个方向上分解, 根据作用力与反作用力原理有

$$F_x = F, \quad F_y = F_4.$$

把作用在针尖上的最大弯曲正应力、最大剪切应力和穿刺阻力分别作为目标函数来考查钢针的使

$$\sigma = \frac{M(y_m)}{W_{\text{针尖}}} = \frac{2\sqrt{2}kEnA_{\text{纤维}} \cdot \frac{2x_m \cdot \arcsin\left(\frac{2x_m}{d_z}\right) + \sqrt{d_z^2 - 4x_m^2} - d_z}{d_z} \cdot \frac{2x_m}{d_z} \cdot (y_m - l)}{\frac{\pi(2x_m)^3}{32}} \quad (8)$$

考查 σ 与 x_m 之间的关系, 对 σ 求 x_m 的一阶导数, 整理式 (8) 得

$$\sigma = k' \left[2x_m \cdot \arcsin\left(\frac{2x_m}{d_z}\right) + \sqrt{d_z^2 - 4x_m^2} - d_z \right] \cdot \frac{1}{x_m^2}, \quad \text{式中 } k' = \frac{16\sqrt{2}kEnA_{\text{纤维}}(y_m - l)}{\pi d_z^2}.$$

$$\frac{d\sigma}{dx_m} = 2k' \frac{-x_m \cdot \arcsin\left(\frac{2x_m}{d_z}\right) - \sqrt{d_z^2 - 4x_m^2} + d}{x_m^3} > 0. \quad (9)$$

可以利用单调性来证明式 (9) 的分子大于零, 即 $x_m = 0$ 时, 分子大于零, 对分子求导数, 可以再用求导的方法证明分子的导数大于等于零, 因此分子恒大于零。

σ 随 x_m 的增加而单调增大, 为了考查 σ 与 m 之间的增减关系, 再对式 (3) 求 x_m 关于 m 的偏导数:

$$\frac{\partial x_m}{\partial m} = \frac{d_n}{2m^2} L^{-\frac{1}{m}} y_m^{\frac{1}{m}} (\ln L - \ln y) > 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial m} = \frac{\partial \sigma}{\partial x_m} \cdot \frac{\partial x_m}{\partial m} > 0. \quad (11)$$

对纤维的压力和摩擦力, F 是纤维张力的合力最大值, F_4 为穿刺压力, α 为针尖曲线在受力点的切线与 X 轴的夹角, 列出力平衡方程:

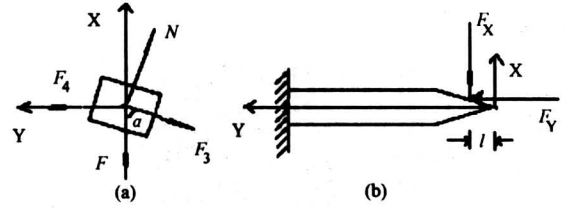


图5 纤维块受力及针尖受力示意图

Fig.5 The forces that act on fiber piece and the forces that act on the needlepoint

用性能, 并对钢针的针尖曲线进行优化。

4.2.1 弯曲 钢针的弯矩: $M(y_m) = (y_m - l) \cdot F$ 。

因偏心距相对长度较小, 不考虑偏心力 F_y 产生的弯矩有钢针的弯曲正应力 σ :

σ 随 m 的增加而单调增大, 因此从弯曲角度考虑, 低次曲线的针尖优于高次曲线的针尖。

求 x_m 关于 L 的偏导数得

$$\frac{\partial x_m}{\partial L} = -\frac{d_n}{2m} L^{-\frac{1}{m}-1} y_m^{\frac{1}{m}} < 0. \quad (12)$$

x_m 随 L 的增加而减小, 结合式 (9) 可知, σ 随 L 的增加而单调减小, 因此从弯曲角度考虑, 针尖越长越好。

4.2.2 剪切 尖针所受的剪力: $T(y_m) = F$ 。

针尖横截面上的剪应力:

$$\tau = \frac{F}{A_{\text{针尖}}} = \frac{2\sqrt{2}kEnA_{\text{纤维}} \cdot \frac{2x_m \cdot \arcsin\left(\frac{2x_m}{2d_z}\right) + \sqrt{d_z^2 - 4x_m^2} - d_z}{d_z} \cdot \frac{2x_m}{d_z}}{\pi x_m^2} \quad (13)$$

简化式(13)得

$$\tau = k' \left[2x_m \cdot \arcsin\left(\frac{2x_m}{d_z}\right) + \sqrt{d_z^2 - 4x_m^2} - d_z \right] \cdot \frac{1}{x_m} \quad (\text{式中 } k' = \frac{4\sqrt{2}kEnA_{\text{纤维}}}{\pi d_z^2}) \quad (14)$$

$$\frac{d\tau}{dx_m} = k' \frac{d_z - \sqrt{d_z^2 - 4x_m^2}}{x_m^2} > 0 \quad (15)$$

结合式(10)和式(12)可知, τ 随 m 的增加而单调增加, 随 L 的增加而单调减小, 因此从剪切的角考虑同样是低次曲线的针尖优于高次曲线的针尖, 针尖越长越好。

4.3 纤维弯曲伸长阻力

布面受钢针挤占, 纤维弯曲伸长, 形成较大阻力。虽然钢针针杆直径相等, 纤维弯曲伸长的阻力亦相同, 但在针尖 $(0, L)$ 内, 针尖直径不断变化, 受到的纤维弯曲伸长的阻力亦有变化:

$$F_Y = F \cdot \frac{f + \text{ctg}\alpha}{1 - f \cdot \text{ctg}\alpha} = F \cdot g(x_m) \quad (16)$$

式中 $\text{ctg}\alpha = \frac{x_m}{y_m}$ 。

$$\frac{\partial F_Y}{\partial x_m} = \frac{\partial F}{\partial x_m} \cdot g(x_m) + F \cdot \frac{\partial g(x_m)}{\partial x_m} > 0 \quad (17)$$

结合式(10)和式(12)可知, 钢针受到的阻力随 m 的增加而单调增加, 随 L 的增加而减小, 因此低次曲线针尖受到的阻力小于高次曲线针尖的, 针尖长的钢针受到的阻力小于针尖短的钢针。

5 结论

1) 整体穿刺是制造立体织物的一种工艺技术。钢针穿过机织布过程中, 造成纤维弯曲伸长, 从而使钢针针尖受到弯曲、剪切、摩擦等作用。

2) 钢针针尖形态由针尖曲面形状和针尖长度

决定, 不仅影响钢针的刚性, 还影响机织布的纤维弯曲伸长, 两者相互关联, 需进行优化。

3) 以最大弯曲正应力和剪切应力作为目标, 钢针形态结构的优化结果是低次曲线优于高次曲线, 长针尖优于短针尖。

4) 以作用在针尖上的穿刺阻力作为目标, 钢针形态结构的优化结果也是低次曲线优于高次曲线, 长针尖优于短针尖。

参考文献

- [1] 朱建勋, 蒋云, 陆晓华, 等. 三维编织机锭子、轨道及锭槽结构尺寸的选择[J]. 宇航材料工艺, 1998, (3):49~53
- [2] 杜善义, 沃丁柱, 章怡宁, 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. 230~254
- [3] Rolincik P G. Properties and application of mod 3 pierced fabric composites [A]. 17th National Symposium of SAMPE[C]. Calif, USA. 1972, (4): 11~13
- [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] 朱建勋, 何建敏, 王海燕. 正交叠层机织布整体穿刺工艺的纤维弯曲伸长机理[J]. 中国工程科学, 2003, 5(5): 59~62
- [6] 纺织材料学编写组. 纺织材料学[M]. 北京: 纺织工业出版社, 1982. 306~380
- [7] 张志民. 复合材料结构力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1996. 89~91

(下转第31页)

对于上例,使用常用算子的不同组合,如算子对 $(\cap, \dot{+})$ 或 $(\cap, \dot{\epsilon}^+)$, (\cap, \oplus) , (\otimes, \cup) 均不能作出评判。只有用算子对 $(\dot{\cdot}, \cup)$ 或 $(\dot{\epsilon}, \cup)$ 可以作出评判。换言之,当 Zadeh 算子 (\cap, \cup) 失效时,应该选择那对算子组合来进行决策,亦是一个困难的问题。

综上所述,从实用的观点出发,当 Zadeh 算子 (\cap, \cup) 失效时,应该停止尝试过程,而采用式(7)给出的新的统一的 Fuzzy 综合决策准则。

7 结语

新的模糊综合评判标准和方法有如下重要性:

- 1)直接使用未转换的数据;

- 2)避免丢失原始信息;
- 3)避免增加干扰信息;
- 4)对于不同文献中的相关结论,用此标准容易判断出谁的结论最好。

因此,新的模糊综合评判标准和方法具有特别重要的应用价值和意义。

参考文献

- [1] 罗承忠. 模糊集引论 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1989. 47~48, 257~258
- [2] 韩立岩, 汪培庄. 应用模糊数学 [M]. 北京: 首都经贸大学出版社, 1998. 148~154

A Sort of Continued Fuzzy Operators and Its Application

Zhang Shiqiang

(Department of Mathematics, Chongqing University of Medical Sciences, Chongqing 400016, China)

[Abstract] A sort of continued fuzzy operators is given. Proceeded from applied point of view, relation between the triangle norm operators most in use and the continued fuzzy operators is analyzed. A new fuzzy synthetic evaluation criterion and method are given. The new fuzzy synthetic evaluation criterion and method have some important characteristics as follows: using directly untransformed data; avoiding loss of original information; avoiding increase in interference information; being very easy to tell which result is better in different papers.

[Key words] fuzzy mathematics; fuzzy synthetic evaluation; triangle norm operator; continued fuzzy operators

(cont. from p. 21)

Optimizing Z-directional Steely Needlepoint Based on Fiber Bending and Elongation

Zhu Jianxun^{1,2}, He Jianmin¹, Wang Haiyan¹, Zhou Zhigang²

(1. College of Economics Management, Southeast University, Nanjing 210096 China;

2. NanJing Fiberglass Reseach & Design Institute, Nanjing 210012 China)

[Abstract] This paper analyzes the mechanism of fiber bending and elongation of integrated piercing process, and builds the mechanical model of steely needle, then discusses the increasing and decreasing relation between maximum bending stress, maximum shear stress and the resistance that acts on needlepoint and radius and length of needlepoint, then optimizes the form of needlepoint according to the result.

[Key words] integrated piercing; bending stress; shear stress; radius of needlepoint; length of needlepoint; optimization