

立体製織構造を用いた炭素繊維強化複合材料の 層間破壊挙動の解明

信州大学 繊維学部機械・ロボット学科 施 建

Interlaminar Fracture Behavior of Carbon Fiber Reinforced Composite Materials using
Three-Dimensional Woven Structures

Jian Shi

Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University

繊維強化複合材料は軽量かつ高い比強度・比弾性率を持ち、航空・自動車分野などで活用されているが、層間剥離に弱いという課題がある。本研究ではこの問題を解決するため、Z方向に補強糸(Z糸)を通した三次元織物構造を設計・製織し、層間強度の向上を試みた。h:l:u=1:2:1という構造を採用し、織物を熱可塑性ポリウレタン樹脂と組み合わせて複合材料を成形した。特に、プレス成形を行うことで樹脂の含浸性を向上させ、織物全体に均一に樹脂を行き渡らせることができた。力学試験では、プレス成形を施した試料が最も高いエネルギー吸収性能を示し、層間剥離や破壊を抑制する効果が確認された。

Fiber reinforced composite materials are lightweight and have high specific strength and specific modulus of elasticity, and are used in the aviation and automotive fields, but they have the problem of being vulnerable to interlaminar delamination. To solve this problem, in this study, we designed and woven a three-dimensional woven structure with reinforcing threads (Z threads) passing through in the Z direction to improve interlaminar strength. We adopted a structure of h:l:u=1:2:1 and combined the woven fabric with thermoplastic polyurethane resin to form a composite material. In particular, press molding improved the resin impregnation and allowed the resin to be distributed uniformly throughout the entire woven fabric. In mechanical tests, the press molded sample showed the highest energy absorption performance, and the effect of suppressing interlaminar delamination and fracture was confirmed.

1. はじめに

繊維強化複合材料は金属材料より軽量であり、比強度比弾性率が高いことが挙げられ、航空・宇宙、自動車などの輸送機器分野で展開している¹⁾。しかし、繊維強化複合材料何層も薄いプリプレグを重ねて作られており、その構造は二次元的であり、層と層の間は樹脂のみの接着となっているため、層間強度が弱く、層間剥離や破壊が起りやすいという欠点が存在する。筆者らの研究室はこれまで繊維に表面処理を施し、界面特性を改善し、繊維強化複合材料の層間せん断強度、引張強度、曲げ強度等の力学特性を向上した。

一般的なテキスタイルは通常次の3種類に分けられることが多い：織物、編物、組物。立体的な三次元テキスタイルとは、面内積層群を貫通して強化する繊維を持つテキスタイルと定義されるものであり²⁾、持つ構造や組織によって多くの種類が存在している³⁻⁴⁾。

三次元織物を用いた繊維強化複合材料の研究において、丸形、矩形、ハニカム等の様々な形状の構造が検討されているが⁵⁻⁷⁾、十分な種類の構造が検討されているとは言い難く、特性や応用性の明らかになっていないものも多くある。現在多くの研究で用いられている作製方法としては、Chen ら⁸⁻⁹⁾に見られるようなハンドレイアップ法に似た方法があるが、作製方法はまだ確立されておらず、改良する余地がある。

本研究は立体製織構造を持つ繊維強化複合材料を作製し、層間方向に通したZ糸が層間強度を向上させることを目的とし、立体製織の設計パラメータの設定、製織条件、成形方法、力学特性の多方面から検討を行った。

2. 実験方法

2.1 設計パラメータの設定

立体製織構造を持つ三次元織物を設計・製織するにあたって、まず構造を示すパラメータの設定を行った。Fig.1には立体製織構造の緯断面図を示している。一つのレポートとして、Fig.1(a)に示すような構造をFig.1(b)に示すように曲線部分を直線で示す。そして織物の構造としては、Fig.1(b)で示した直線上に緯糸の断面が現れるので、Fig.1(c)のように台形の形を緯糸の断面に置き換えた図を作成する。そしてFig.1(c)で示した緯断面図に単一のZ糸がどのように通るのかを示すFig.1(d)のような図を作成した。設計パラメータにはZ糸が通った緯断面の糸本数を採用し、上面の糸本数を u 、底面の糸本数を l 、Z方向の糸本数を h (単位：本)とした。本研究では段ボールの断面形状を参考に、設計パラメータ $h:l:u=1:2:1$ にした。

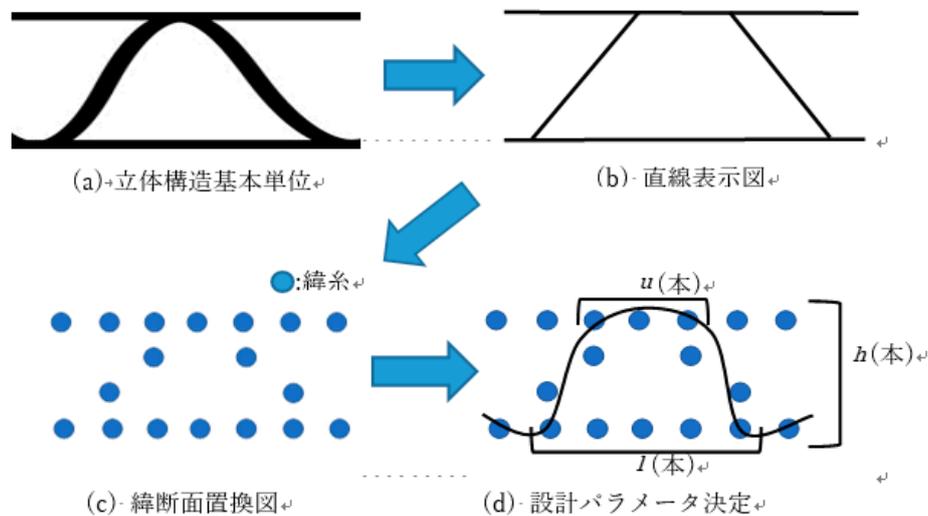


Fig.1 パラメータ設定の手順模式図

2.2 組織図の作成

組織図はFig.2のような緯糸と経糸の交絡を示すたて糸方向交絡図をもとに、一般的な二次元織物の組織図の作成方法と同じように作成した。糸の交絡を示す交絡図は、Fig.1(c)の緯断面図に経糸がどのように配置されるかを追加することで作製をした。また、Fig.3に基本となる構造($h:l:u=1:2:1$)のものの中で、最小となるものの組織図とそれに対応する緯断面図を示す。Fig.3に示した図の区間a, b, cは組織図と断面図の対応する区間を示す。また、設計上の都合により、Fig.2で示した断面図とは上下が逆になっている。

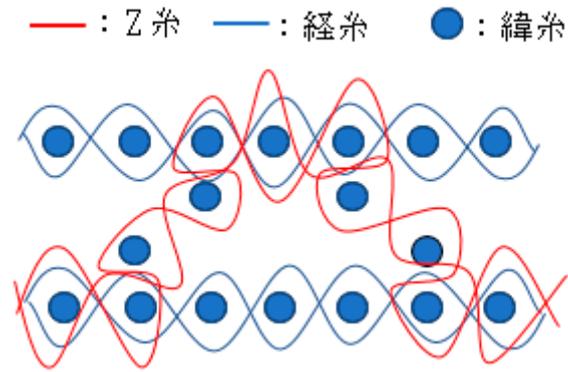


Fig.2 たて糸方向の交絡図

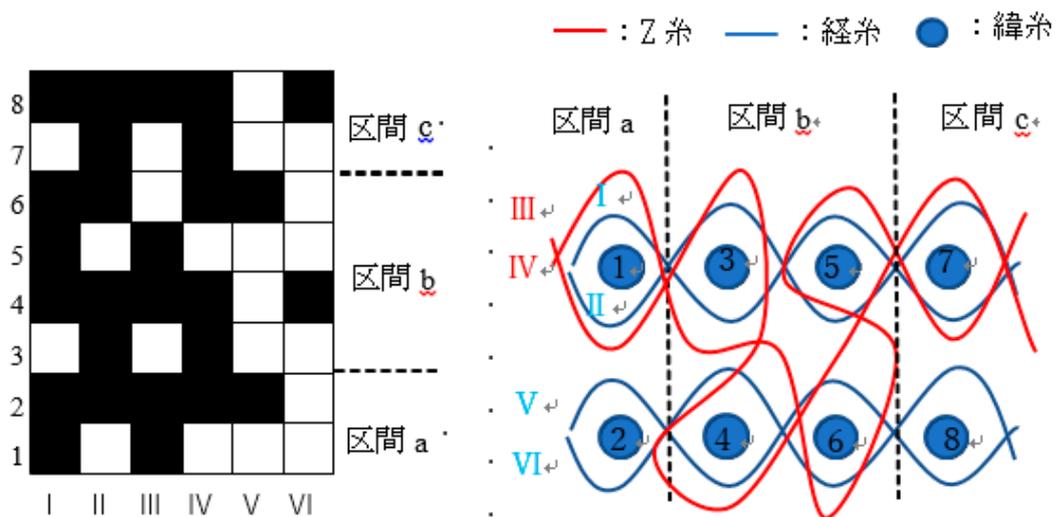


Fig.3 最小となる波形構造織物の組織図と対応する緯断面図

2.3 製織条件

強化材として用いるために立体織物は2.1で決定した $h:l:u = 1:2:1$ を製織した。織物の設計及び製織パラメータを Table1 に示す。

Table1 織物の設計及び製織パラメータ

織物		W1
設計パラメータ	$h:l:u$	1:2:1
Z方向	h (本)	30
	理論長さ (mm)	7
底面	l (本)	60
	理論長さ (mm)	14
上面	u (本)	30
	理論長さ (mm)	7

2.4 成形方法

繊維強化複合材料作製のため、強化材は2.3で設定した条件で立体製織した三次元織物を用いた。マトリクスは三菱化学株式会社のポリテトラメチレングリコール(PTMG)と東京化成工業株式会社のヘキサメチレンジイソシアネート(HDI)を用いて合成した熱可塑性ポリウレタンエラストマ(TPU)を用いた。

2.5 力学試験

作製した繊維強化複合材料の層間特性を評価のためにZ方向からの圧縮試験を行った。試験装置はフォーステスターMCT-2150(株式会社エー・アンド・ディ)、試験は直径20mm、および60mmの圧縮子を用いて試料中央を圧縮し、初期位置まで戻る動作を1サイクル行った。試験速度は10mm/min、初荷重は0.05N、最大圧縮変形量は試験片厚みの80%までとした。

3. 結果と考察

3.1 立体製織

製織したW1織物の表面部をFig.4に緯断面をFig.5に示す。すべての写真の横方向は織物の経糸方向を示す。Fig.5の断面写真を見ると、立体構造が出来ており、三次元織物が製織できていることがわかる。また、他のパラメータの織物も同様に立体構造が出来ていた。 $h:l:u=1:2:1$ の織物は設計上、経糸方向の長さが1波形につき中空部が上下面よりも約1.6倍の長さを持ち、その差がなければ設計通りの波形構造が出ないと考えら

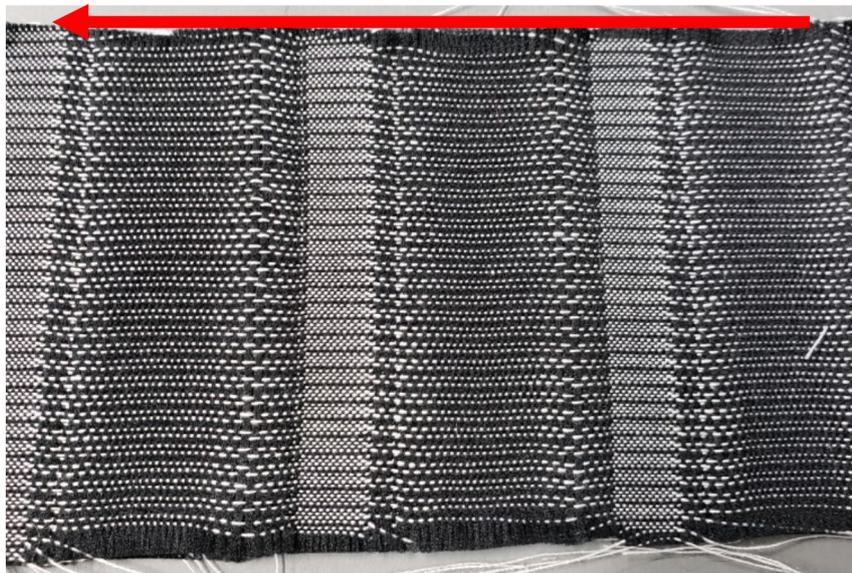


Fig.4 W1織物の表面部写真



Fig.5 W1織物の断面写真

れる。そこで、設計通りに製織できているかの検討のため W1 織物の経糸方向長さ測定を行った。

経糸長さ測定は Fig.6 に示した A と B の 2 か所を行った。経糸長さ測定の結果を平均したものを Table2 に示す。A、B ともに実測値は設計値よりも大きくなっており、特に A は約 3 倍も大きくなっている。また、有意水準 0.05 で t 検定

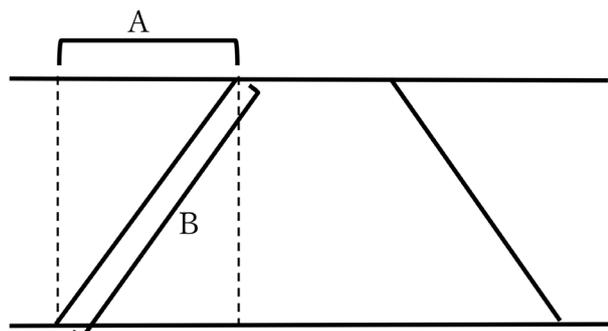


Fig.6 経糸長さ測定箇所模式図

をしたところ A、B に有意差はなく、これより本来ならばなければならない長さの差がないことがわかった。このことより設計通りの波形構造ではなく、設計よりも平たい波形になっていることがわかった。このように設計と大きく異なった原因としては、製織時のたて糸の送り出し速度と考えられる。設計した三次元構造は上、下層とその中の Z 糸層の三層から構成されている。Z 糸の上、下層の長さは同じものの、Z 糸の長さは上、下層より長いことが分った。しかし、製織時にたて糸は一つのビームがコントロールしており、送り出し速度は同じであるため、上、下層と波形部のたて糸の送り出し長さも同じであった。そのため、A、B の長さには大きな差がなかった。結果として、Fig. 4 の表面部の写真を見ると、織物の上下面のみを形成する部分では疎に、上下面と中空部が重なる部分、中空部のみを形成する部分では密になっていることがわかり、織物各部に見られる密度に差があった。標準的な波形構造三次元テキスタイルを製織するため、ダブルワープビームが設置しなければならない。一方、今回作製した三次元織物において、その中空部は筒状であり、該当織物を強化材とする複合材料の圧縮特性の影響要因についてはまだ明らかになっていない。そこで、本研究はその成形方法や設計パラメータが圧縮特性などの影響を検討した。

Table2 経糸長さ測定結果(mm)

	A	B
1	12.7	12.9
2	11.4	11.7
3	11.2	11.6
average	11.8	12.1
s.d.	0.7	0.6
設計値	3.5	7.8

3.2 成形方法

本研究で作製した立体織物が上下に開くことによって中空構造を再現したものを利用し、織物を上下に開き、その形状を維持させることによって形状のコントロールをすること。樹脂に熱可塑性樹脂を用い、繊維強化複合材料の成形時に必要な樹脂を乾燥させる際の温度を調整することで、樹脂の粘度をコントロールし、樹脂を上から下に流し、樹脂を

織物全体に行き渡らせ、また余分な樹脂は下に落とすこと。これらの要素によって従来の方法の欠点である形状の依存性を解消出来ると考えた。織物を樹脂に浸漬させるだけでなく、浸漬させた後に外圧をかけることにより、樹脂がより含浸するのではないかと考えプレス成形を行った。

3.3 圧縮試験

プレス成形を行っていない試験片を $W1_{NP}$ と称し、その応力-ひずみ曲線を Fig.7 に、プレス成形を行った試験片を $W1_P$ と称し、その応力-ひずみ曲線を Fig.8 に、最大応力、エネルギー吸収量を Table3 に示す。 $W1_{NP}$ 試料は中空部が潰れているため、裏表の判断がつかなかったため片側からの圧縮のみ行った。結果より、 $W1_{NP}$ 試料は応力が最大値であったが、エネルギー吸収量を見るとほとんど吸収できていないことがわかり、衝撃された際衝撃エネルギーは全て層間剥離や繊維の破壊に消費される。エネルギー吸収量の最大は $W1_P$ 試料の圧縮径 20mm であった。エネルギー吸収量の大きい試験片は衝撃の際、衝撃エネルギーを吸収するため、層間剥離が起きにくいである。

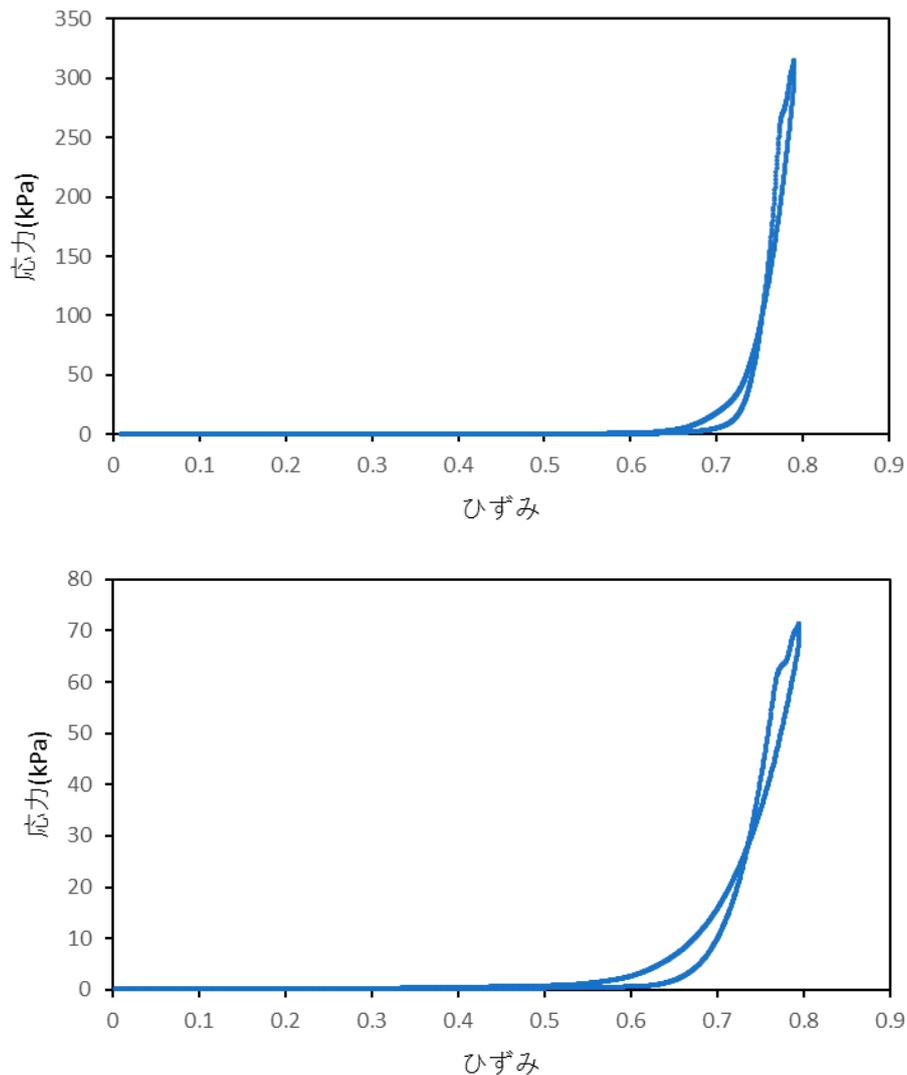


Fig.7 $W1_{NP}$ 試料の応力-ひずみ曲線(上: $\Phi = 20\text{mm}$, 下: $\Phi = 60\text{mm}$)

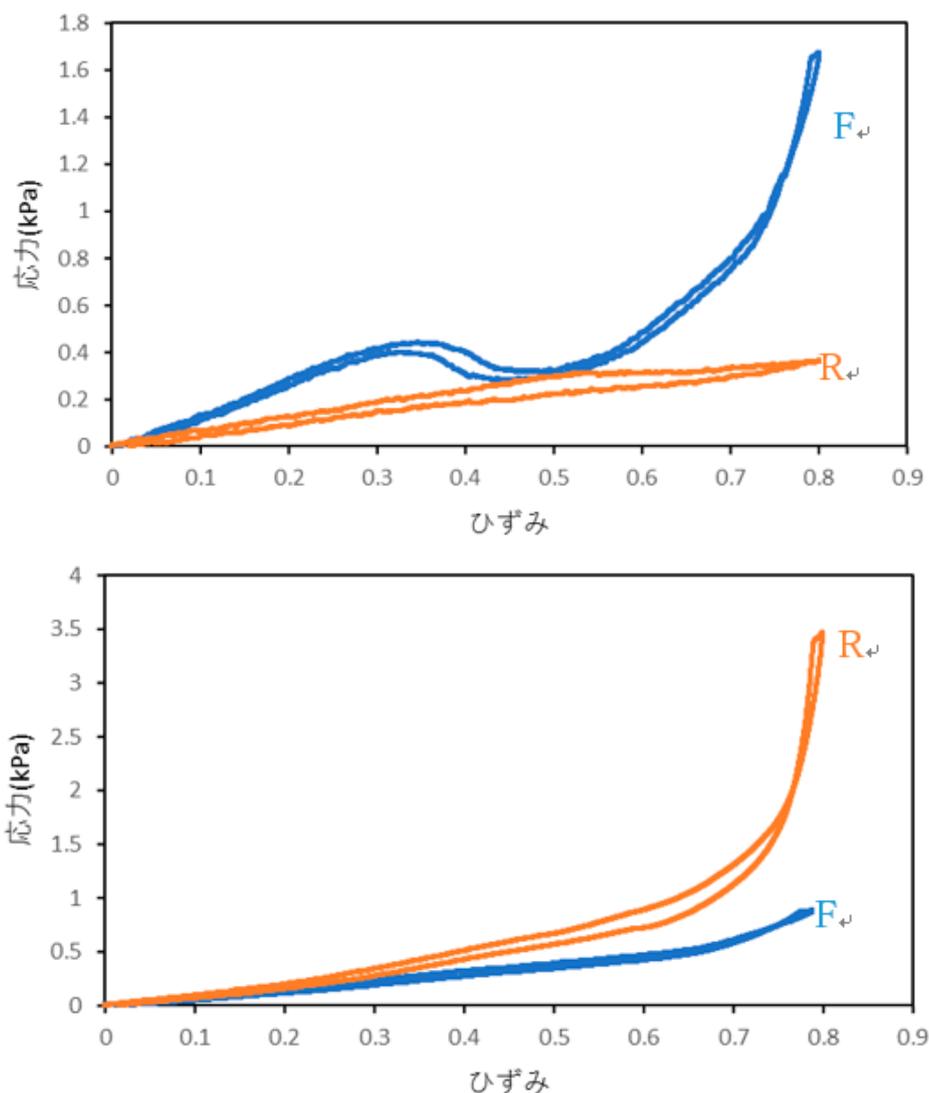


Fig.8 W1_P 試料の応力 - ひずみ曲線(上 : Φ = 20mm, 下 : Φ = 60mm)

Table3 W1_{NP} 試料、W1_P 試料の最大応力とエネルギー吸収量

	圧縮子直径 (mm)	表裏	最大応力(kPa)	エネルギー吸収量(J)
W1 _{NP} 試料	20		314.8	0.007
	60		71.2	0.06
W1 _P 試料	20	F	6.7	0.02
		R	1.5	0.2
	60	F	0.9	0.1
		R	3.5	0.1

4. 結論

本研究により、Z系を通した三次元織物構造とプレス成形法の組み合わせは、繊維強化複合材料の層間強度とエネルギー吸収特性を効果的に向上させることが示された。今後、より高性能な複合材料の実用化に向けた有効な手法となると考えられる。

5. 謝辞

本研究は、令和4年度日本板硝子材料工学助成会の研究助成を受けて行ったものである。同助成会に心より感謝いたします。

6. 参考文献

- 1) 乗田敏毅, 繊維強化複合材料, 高分子, 34, 910 (1985).
- 2) 安居義治, 三次元織物技術の動向, 日本複合材料学会誌, 26, 163 (2000).
- 3) X.Chen, *Advances in 3D Textiles*, Woodhead Publishing, (2015).
- 4) A.P.Mouritz, M.K.Bannister, P.J.Falzon, and K.H. Leong, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 30, 1445 (1999).
- 5) Y.Wan, J.Yang, and S.Yu, *Mater. Sci. Eng. A*, 595, 106 (2014).
- 6) T.Umer, and A.P.Mouritz, *J. Compos. Mater.*, 50, 1877 (2016).
- 7) Y.Li, Z.Zhang, and Y.Gao, *Nat. Commun.*, 14, 4930 (2023).
- 8) X.Chen, Y.Sun and X.Gong, *Text. Res. J.*, 78, 771 (2008).
- 9) X.Chen, Y.Sun and X.Gong, *Text. Res. J.*, 78, 1011 (2008).