繊維製造におけるレーザー加熱の利用

Application of Laser-heating in Fiber Production

大 越 豊

カラーザスらによるナイロンの発表当時と比較すると、合成繊維の生産速度は飛躍的に向上しました。研究ベースなら音速に近い毎秒 200m 以上でも製造できることも実証されています。一方で、一般的な合成繊維原材料の加熱原理はほとんど変わっていません。接触式のヒーターもしくは流体状の熱媒体によって繊維表面を温め、繊維内部は表面から伝わった熱によって温められるのが一般的です。ただし細くて長い形態を特徴とする繊維は、元々衣服など断熱材として使われるほどですので、一般的に加熱効率が良くありません。また高分子材料の熱伝導率も一般にあまり大きくありません。したがって同じ大きさの装置で製造することを考えると、生産速度が増すほど、より急速に加熱することが必要になり、熱効率は低下しますし、繊維断面内の温度差も大きくなります。ただし繊維断面内に温度差が有ると繊維の性能が悪くなってしまいますので、生産速度が増すほど装置も大きくなり、熱効率も悪くなるのが普通です。熱伝達と熱伝導によって繊維を温める限り、以上のようなジレンマを避けることはできません。このため、生産速度が増すにつれて、エネルギー消費の点でかなり無理が来ている製造プロセスも多いのではないのでしょうか。たとえば、ポリエステルやナイロンの延伸工程では、200℃前後まで誘電加熱で加熱された直径数十 cm の熱ロールが、秒速 100m 程度の超高速で回転しています。ロール表面のうち、実際に繊維が巻き付いている部分はそれほど多くありませんので、消費エネルギーの多くは周囲の空気を暖めるために使われています。ヒーターから漏れる熱によって作業環境が悪化し、これを改善するための冷房にもエネルギーが必要になります。地球資源が枯渇しつつあり、省エネルギーの必要性が高まってきている現在、製造プロセスを原理から抜本的に見直してみるのも価値が有るように思います。本稿では、繊維を熱伝達や熱伝導とはまったく異なる原理である熱放射、特にレーザー光を使って温め

る場合の特徴を紹介し、年頭の話提供にしたいと思います。

放射による加熱の場合、材料に吸収される部位まではエネルギーが電磁波(多くは赤外光)として伝搬します。このため、熱伝達や熱伝導と比較すると、瞬間的かつ均一な加熱が可能です。図 1 は円形断面の繊維にレーザー光を照射した際の繊維断面内温度分布を、繊維軸からの位置に対し

図 1 レーザーを周方向から均等に入射した場合の繊維半径方向温度分布。 KD は吸収係数と繊維直径の積。 τ は平均吸収エネルギーで規格化した吸収エネルギー。回折効果は考慮していない⁶⁾。

て示したものです。 K は照射した光に対する吸収係数、 D は繊維の直径で、両者の積は無次元数になっています。例えば PET を炭酸ガスレーザーで加熱する場合、 $KD = 1.15$ は直径 100 μm の繊維内での温度分布に対応します。おもしろいことに、繊維表面での屈折によって集光する結果、繊維直径が比較的小さなものでは、繊維表面部よりも繊維中心部の温度の方が高くなります。繊維表面から熱を伝導させた場合には、この様なことは決して起こりませんので、放射加熱独特の現象と言えるでしょう。

繊維にレーザー光を照射すると、図 1 に示したような温度分布がほぼ瞬間的に繊維断面内にできます。このため、繊維表面から熱が伝導するよりもはるかに速く、繊維全体を温めることができます。この様子を表したのが図 2 です。繊維表面からの熱伝導で加熱する場合(a)と比較して、レーザー光を照射した場合(b)の方がはるかに速く温度が均一になることが分かります。このように急速かつ均一に

YUTAKA OHKOSHI
信州大学 繊維学部 工学博士
〒386-8567 上田市常田 3-15-1
Tel: 0268-21-5364
E-mail: yokoshi@shinshu-u.ac.jp
〈専門〉繊維材料学、高分子成形加工学
〈趣味〉読書

図2 繊維表面からの熱伝導(a)、およびレーザー光照射(b)で加熱した際の温度分布。加熱前を0、最終温度を1として規格化。左端で外気温を0から1に変化させ、(b)では同時に平均温度が1になるだけの光エネルギーを $KD=1.15$ の繊維に照射すると仮定。 ξ と z は繊維直径で規格化した半径方向および繊維軸方向に対する位置。 $\xi=0$ が繊維の中心、 $\xi=\pm 0.5$ が繊維表面に対応する。 Pe はPeclet数⁶⁾。

繊維を加熱できるため、生産性を落とさずに装置を小型化できます。このため熱効率も向上しますし、作業性や設置面積の上でも有利です。さらに延伸のように温めながら繊維を引き伸ばす工程では、これに加えて安定性の向上が見込めます。加熱(軟化)しながら引き伸ばすのは本質的に不安定になりやすいのですが、急速均一加熱することでこれを防げるのです。この結果、例えばネック延伸点の位置を非接触で精密に固定できますし、高倍率まで安定した流動延伸も可能になります。これらは繊維の均一性の向上¹⁾や極細繊維の製造²⁻⁵⁾、その場測定⁶⁻⁸⁾に利用できます。特に比較的太いモノフィラメントを精密かつ高速に延伸するのに適しています¹⁾。また加熱時間が短いため、熱分解も抑制できます。この結果、例えば熔融紡糸工程の繊維をレーザー加熱することにより、実質的な高温紡糸が容易になり、高強度の繊維が製造できる⁹⁾ことが確かめられています。この他、不織布の融着などにも利用できるかもしれません。

繊維の加熱源として熱放射を利用すること自体は、特に新しいことではありません。ハロゲンヒーターや赤外線ヒーターは良く使われています。ただし、黒体放射を利用した光源の場合、プランクの放射法則から予測できるように、エネルギー密度を高めようとするとき波長域が短波長側

に移動してしまい、繊維材料にとって吸収効率の低い近赤外域や可視光領域、さらには材料の分解・劣化を引き起こしやすい紫外領域にエネルギーが集中してしまいます。したがって、繊維材料を瞬間的に加熱できる高輝度の赤外線光源を作るのは難しいのです。一方、レーザー光源にはこのような制約はありません。むしろ、工業的に最もポピュラーで価格性能比の高い炭酸ガスレーザーの波長は $10.6\mu\text{m}$ 、多くの繊維材料が適度の吸収係数を示す領域です。繊維の加熱にレーザー光を用いるという発想も決して新しいものでは有りません^{10, 11)}が、近年、光通信技術の発展の余波を受けてレーザー機器の性能向上も著しく、価格的にもこなれてきています。導入の検討に値する分野も多くなって来ているのではないのでしょうか。

Reference

- 1) 伊香賀敏文、遠藤雅紀、黒田幸司、大越 豊、後藤康夫、奈倉正宣、鴻野勝正、中井浩一、繊維学会誌、**64**、181、(2008)。
- 2) Y. Ohkoshi, J. Watanabe, W. Okumura, Y. Gotoh, M. Nagura, *Sen'i Gakkaishi*, **58**, 182(2002)。
- 3) 鈴木章泰, 高分子, **52**, 833(2003)。
- 4) K. Nakata, K. Fujii, Y. Ohkoshi, Y. Gotoh, M. Nagura, M. Numata, M. Kamiyama, *Macromol. Rapid Commun.*, **28**, 792(2007)。
- 5) A. Suzuki, K. Aoki, *Euro. Polym. J.* **44**, 2499, (2008)。
- 6) W. Okumura, T. Yamaguchi, Y. Ohkoshi, Y. Gotoh, M. Nagura, *Int. Polym. Process.*, **17**, 124(2002)。
- 7) W. Okumura, T. Kanegae, Y. Ohkoshi, Y. Gotoh, M. Nagura, *Int. Polym. Process.*, **18**, 46(2003)。
- 8) T. Yamaguchi, K. Kim, T. Murata, M. Koide, S. Hitoosa, H. Urakawa, Y. Ohkoshi, Y. Gotoh, M. Nagura, M. Kotera, K. Kajiwar, *J. Polym. Sci., Polym. Phys.*, **46**, 2126(2008)。
- 9) 増田正人, 船津義嗣, 風間邦彦, 鞠谷雄士, 繊維学会誌, **60**, 338(2004)。
- 10) 特開 S48-8886
- 11) 栗田和夫、石原英昭、寺谷次雄、伊庭伊八郎、特開 S61-207635