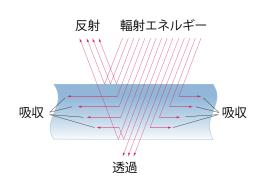
炭素繊維強化プラスチック成型への赤外線加熱 **の応用**(プラスチックス誌 2013 年 10 月号)

1 はじめに

炭素繊維強化プラスチックは航空機に採用され、市場が徐々に拡大してきている。現在は熱硬化性 CFRP(CFRTS)が 主流であるが、熱可塑性 CRFP(CFRTP)も多分野への応用が注目されてきた。両者の成形プロセスは異なるが、どちら も加熱プロセスがあり、品質・生産速度を決める重要な鍵となっている。ヘレウスでは CFRTP プレプレグ加熱プロセス に赤外線システムを提供しており、欧州を中心に多くの実績を持つ。両者の例を幾つか紹介しつつ、急速に広がりつつ ある CFRTP のプレス成型での、赤外線システムの応用について話を進めていきたい。

2 輻射加熱の原理と特長

初めに、輻射加熱の原理を簡単に説明する。赤外線は電磁波の一種 で、ある波長を持った光エネルギーである。右図のように光源から輻 射された赤外線光は目的物に照射され、その物質の中でエネルギーが 共振吸収される。吸収されたエネルギーは分子(または原子)を振動 させ、振動させられた分子間で摩擦熱が発生する。これが赤外線加熱 原理である。光が照射されれば対象物は加熱されるので、前面に透過 性の高い耐熱ガラスを配置して、ガラス越しで加熱することも可能で ある。また、空気により遮断される事が無いので風との共有が可能と なってくる。あるいは真空中での加熱にも利用できる。



3 赤外線ヒーターの種類

工業用に用いられる電気式赤外線ヒーターは、波長範囲で 0.8 ~ 5μm、温度範囲で 400 ~ 2,500℃である。日本では古 くから遠赤外線と近赤外線という2つの表現が一般的だが、ドイツ・ヘレウス社では自社商品群に合わせてさらに細か く分類している。以下の表を参考されたい。なお、赤外線の分類方法は業界で統一されておらず、各社が独自の表現をとっ ていることが多いので注意が必要である。

性能比較表													
	石英管サイズ	最長加熱長	発熱体温度*3	最大エネルギー 波長	立上り速度	最大エネルギー 密度*4	平均寿命**5						
	Ф 10mm	1m		約 1.2µ	1~2秒	100kW/m ²							
短波長赤外線ヒーター *1	23×11mm	2.6m	1,400 ∼ 2,100°C	約 1.2µ	1~2秒	150kW/m ²	5,000時間以上						
	34×14mm	6m		約 1.6µ	3~5秒	150kW/III							
中波長カーボンヒーター	Ф 19mm	1.5m	050 1 45000	% 5.0.0	0 254	100kW/m ²	0.0000#####						
	34×14mm	3.0m	950~1,450℃	約 2.0µ	2~3秒	150kW/m ²	8,000時間以上						
	18×8mm	1m											
中波長赤外線ヒーター	22×10mm	1.5m	800~950℃	約 2.6µ	1~2分	60kW/m ²	2万~3万時間						
	33×15mm	6m											
長波長赤外線ヒーター*2	セラミック	パネル型	500 ∼ 700°C	約 4.0µ	30kW/m ²	2万~3万時間							

^{※1} 別称: 近赤外線レーター

^{*2} 別称:遠赤外線ヒータ

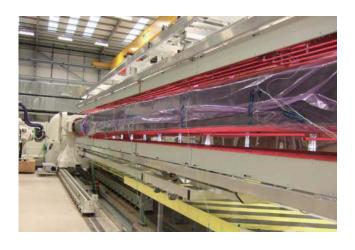
^{*3} 石英ガラス内の発熱体温度を意味します(石英ガラス管面温度ではありません)。長波長赤外線ヒーターはセラミックパネルの表面温度を意味します。

^{*4} 単位面積1m²当たりに実際に設置できる最大量を意味します。

^{*5} 実績時間を意味します(保証時間ではございません)。

4 熱硬化性 CFRP (CFRTS) での応用

CFRTSでは赤外線システムが採用される例はそれほど多いとは言えない。CFRTSの熱硬化に用いられるのは、オートクレーブが基本である。成型品に圧力を掛けながら、硬化反応を進めていくにはオートクレーブが最適と言えよう。しかし、赤外線の特徴を活かしながら採用している例があるので紹介したい。写真は航空機主翼での採用例である。ここではドレーピング後の加熱に用いられている。特殊シートで覆われているのがお分かりいただけるだろうか。シートを真空にし、対象物を圧縮させながら加熱している。おそらくは、基材内に残る空気を取り除く役目も兼ねているはずである。ここでは透過力の強い短波長赤外線を採用し、赤



外線は透明シートを透過し直接 CFRPS を加熱しているのが特徴である。温度均一性を上げるために、対象物を反復回転させ、さらに複数のゾーンに分け、放射温度計で細かく PID 制御を行っている。その他、何点もの熱電対が見られるが、温度制御とは別に細かく温度測定がされ工程管理データとして記録されているとの事である。

5 熱可塑性 CFRP (CFRTP) への応用



CFRTPには赤外線ヒーターシステムが多様なプロセスで採用されているが、大きく分けると CFRP プレプレグ製造プロセス(炭素繊維乾燥、繊維開繊、および樹脂含浸)と、成形プロセスの2つに分かれる。今回は成形用予備加熱を取り上げる事にする。

先ずは CFRTP でのドレーピング成形での採用例を紹介しよう。同じドレーピングであっても、CFRTP の場合は成形直前に基材を加熱する必要がある。この写真は原油搬送用の海底配管の製造工程で、配管の断熱材を保護するために CFRTP が使用されている。ドレーピング直前加熱には赤外線システムが用いられているが、赤外線ヒーターは

短波長赤外線が採用されており、非接触で急速加熱をしている。プロセス速度に応じて出力を追従させている。この工程では急速加熱の為の高出力と制御のための応答性が必要とされている。

6 CFRTP プレス成型への応用

本題へと入る。今日、CFRTP 成形でプレス成型が本格的に始まりつつある。生産速度・能力を考えると、CFRTP ではプレス成型方式が広まっていくものと思われる。インジェクションとの複合型プレス方式も含め、今後の技術進歩に期待したい。ところで、そのプレス工程では熱可塑性プレプレグの加熱が不可欠である。実ラインにおけるプレプレグのプレス直前加熱に求められるのは、右下の点であろう。

カーボンは赤外線の吸収率が高い素材であるので、非常に加熱しやすく、 どの赤外線波長であっても加熱効率の大差はない。加熱効率以外のポイントからヒーターを選択すべきと考える。ヘレウスでは多くの CFRP 素材で実験してきたが、短波長赤外線ヒーターが最適であると考えている。 以下にその理由と赤外線プロセスでの注意点を述べる。

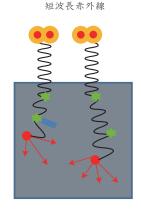
- √ 急速加熱
- √ 面内均一温度
- √ 表裏温度差(内部との温度差)
- √ 過加熱による樹脂表面劣化を防ぐ

6.1 動きの速いヒーターが必須

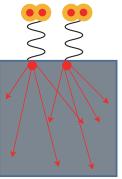
プレス成型はタクトプロセスのため、必然的に加熱プロセスもタクト運転となる。タクト時間はさまざまであるが、1分以内のプロセスが主流である。そうなると、遠赤外線ヒーターや中波長赤外線ヒーターでは立ち上がり速度が遅いために、常時立ち上げた状態でオペレーティングする事になるが、エネルギーの無駄が多い。また、急速加熱を求める場合には、エネルギー密度が十分ではない。さらに、後に述べるが2段(多段)ステップ運転を採用できなくなる。秒単位で立ち上がるタイプの赤外線ヒーターを採用すべきである。

6.2 波長は透過性で選ぶ

赤外線ヒーターを選ぶときには吸収率を重視する傾向が強い。しかし、ヘレウスは実験を通して、CFRTP 加熱では透過性の大きい短波長赤外線の方が、目的に沿った加熱がしやすいと判断している。ヘレウスには動きの速いヒーターとして、カーボンヒーター(中波長)と短波長ヒーターを持っており、比較実験をしてきた。どちらも加熱能力・速度には差は見られないが、カーボンヒーターの場合は吸収率が良い為に、表面の熱劣化が早い傾向がある。中波長は含浸樹脂に対しても吸収率が高く、表面樹脂自体も加熱される。それに対し、短波長赤外線は透過力が大きいので樹脂層を透過し、カーボンファイバーに光が届いているのだろうと推測される。このため、表面樹脂の劣化を防ぐには短波長赤外線の方が有利である。







余談であるが、GFRTPでの比較実験では、短波長赤外線が中波長赤外線より加熱効率の点で優れていた。もし、同プロセスで GFRTP の成型も検討されている場合は、短波長赤外線が断然有利と言える。

6.3 風を利用する、排気は必須



プレプレグ加熱で要望される温度まで加熱すると、機材から蒸発分(煙)が多く発生する。急速加熱をすれば一気に発生するために、その発煙量は強く感じるはずである。この煙処理として、実機ラインでは排気が重要なポイントとなる。熱損失ばかりを気にして密閉型の加熱プロセスにすると大きな失敗となる。写真をご覧頂きたい。短波長赤外線ヒーターを用いた片側加熱のシステムであるが、側面に排気ダクトが設置されている事が分かる。ヘレウスでは吸気型の空冷式モジュールを採用している。反射板側から赤外線ヒーターに向けて風を送り出

すことにより、適正なシステムの冷却と煙処理を施し、安全でクリーンなシステム設計を実現している。もちろん、その冷却風に見合った排気をしなければ工場内に熱と煙をバラまいてしまう事になる。これからの設備は作業環境にも考慮した設計が求められるべきであろう。

少例ではあるが、赤外線照射面に積極的に冷却風を当てて樹脂表面の熱劣化を減少させることも試されている。石英製赤外線ヒーターは風の影響を受けないので出来るのであるが、ただし風を増やすと対象物からの熱ロスが大きくなるので、高温タイプの樹脂では注意が必要である。

6.4 両面加熱とステップ加熱

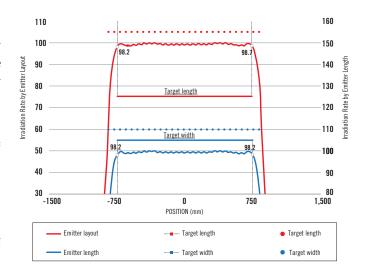
急速加熱をすれば、表裏の温度差が大きくなる。厚み方向の温度差を小さくするためには、両面加熱は有効な手段である。 一般に 2mm を越える厚みの場合、両面加熱をお勧めしている。またステップ加熱も重要となる。表面(照射面)を耐熱温度近くまで急速加熱し、表面が過加熱にならないように照射エネルギーを下げたステップ運転を組むのがポイントである。通常は 2 ステップで良いと思うが、多段ステップを採用されるケースもある。

Target size																																														
Target size		Widt	h			1,5	00n	ım	Length						1,500mm				Graph size				3,000mm				IF	R ene	ergy (density on target					94kW/m2											
Main IR Emitter Zone																																														
IR emitter	Heated length				1,7	'00m	ım		Total wattage				150.0kW					Dist	ance	e to t	target				100mm				IR aera length					1,680mm												
Ir emitter layout	1 1	2	3	4	5	6	7	8	3 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28						28	29	29 30 31 32 33 34						36	37	38	39	40																			
IR power (%)	100		_	100	_	100	100	100	_	100		97	97	97	97	97	97	97	97	97	$\overline{}$	_	_	$\overline{}$	_	_	_	_	100	_		-	-	<u> </u>	35	_	_		$\overline{}$	\dashv						
Distance (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100					М	П	М			\Box						
PITCH (mm)	**	50	50	50	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	50	50	50					П		П		П	\Box						
	Las	40	40		45	40	47	40	40					F.4						-00	0.1	00	00	0.4	٥٢	00	0.7		00	70		70	70	7.4	7.5	70		70	70	-00						
Ir emitter layout	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	/1	72	73	74	75	76	//	78	79	80						
IR power (%) Distance (mm)	⊢									_											_		_	_									H	<u> </u>	Н	\vdash	Н	Н	_	\dashv						
PITCH (mm)	⊢													_									_										Н	Н	Н	\vdash	Н	Н	-	\dashv						
	_																																_		_	_	_	_		_						
Sub IR Emitter	Zon	е																																												
IR emitter	IR emitter Heated length						'00m	ım		To	tal v	vatta	ige		150.	0kW			Dist	ance	e to t	arge	t			100	mm			IR :	aera	leng	th			1	1,680	0mm								
Ir emitter layout	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40						
IR power (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100			\Box		П	П	П	П		П						
Distance (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100					П	П	П	П		\neg						
PITCH (mm)	**	50	50	50	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	50	50	50																
Ir emitter layout	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80						
IR power (%)	71	72	70	77	70	70	7,	70	73	00	01	U.L	- 55	0-7	55	00	0,	00	0.0	00	01	UL	00	0-7	00	00	0,	00	0.0	,,,	/ 1	12	, 0	, -	,,,	,,,		,,,	, 5	30						
Distance (mm)	\vdash																																	\vdash	Н	П	Н	\vdash		\dashv						
PITCH (mm)																																	М	М	H	П	H	H		\exists						

6.5 面内均熱について

プレス成形には、プレプレグの均一温度が求めら れる。どの程度の温度差が許容されるのかは材料 や目的成形レベルによって違ってくる。均一加熱 で重要なポイントは、「プロセス内の換気」と照射 分布を考慮した「ヒーター配置」である。

排気の重要性は先に述べているが、プロセス内の換 気は均熱性についても影響してくる。特に、大きな サイズになってくると、中央部分に熱い空気が溜ま り、反対に端は外気が入り込んでくる傾向があるの で、加熱ゾーン内の空気温度差が大きくなってくる。 均一加熱を重視するのであれば、余った熱を取り除 く排気プロセスをキチンと考えるべきである。



ヒーター配置も重要である。均等ピッチで赤外線ヒーターを配置すると、理論的に中央部の照射エネルギーが高くなる。 並行照射型の反射板を採用したとしても、この傾向は同じである。ヘレウスでは照射分布シミュレーションにより、偏ピッ チ方式を採用して均一加熱をサポートしている。両面加熱であれば、上下モジュールでヒーターを直行配列に採用すれば、 更に優れた制御が可能となる。

7 まとめ

新しい CRFP の素材が開発され、今後は目的温度が上がっていくと予想される。また、厚みも大きくなっていくことで あろう。自動車分野での検討が進む中、加熱プロセスに課せられる要望はさらに高くなっていくと考えている。ヘレウ スではユーザーの要望に合わせ加熱ソリューションを提供していくつもりである。

ヘレウス株式会社

ノーブルライト・フュージョン事業部

本社

±112-0012 東京都文京区大塚2-9-3 住友不動産音羽ビル2F Tel: (03) 6902-6601 Fax: (03) 6902-6613 ip.hkk@heraeus.com www.heraeus.co.jp

名古屋営業所

T465-0095 愛知県名古屋市名東区 高社一丁目89 第二東昭ビル3階B Tel: (052)725-9120

Fax: (052)725-9121

大阪オフィス

T562-0045 大阪府箕面市瀬川4-14-2 Tel: (072)721-4400 Fax: (072)721-4491

福岡堂業所

Tel: (092)558-8010 Fax: (092)501-3839