

主論文の要約

論文題目 熱可塑性樹脂の付着特性における
温度依存性の解明
及び付着力制御手法の提案

氏名 村島 基之

論文内容の要約

長繊維の炭素繊維を熱可塑性樹脂内に分散させる製造方法である Long Fiber Thermoplastic – Direct(LFT-D)の開発によって、衝撃強度に優れる炭素繊維強化熱可塑性プラスチック(熱可塑性 CFRP)部品の短時間製造が期待されている。実用化に向けた研究が進められている LFT-D 法であるが、工程の一つであるプレス成形に関する研究として、金型表面温度がガラス転移温度及び融点付近での熱可塑性樹脂の付着特性を明らかにすることが求められている。また、熱可塑性 CFRP の劣化の恐れがあるため、熱可塑性樹脂と金型間の離型剤を使用しない付着力抑制手法の開発が求められている。

そこで、本論文では工業的に使用されているアクリル樹脂、ポリカーボネート及びポリ塩化ビニルの 3 種類の非晶性熱可塑性樹脂及び 6 ナイロン、66 ナイロン及びポリプロピレンの 3 種類の結晶性熱可塑性樹脂の計 6 種類の熱可塑性樹脂を用いて、金属表面温度がガラス転移温度または融点付近における熱可塑性樹脂の金属表面に対する付着強度の特性を明らかにした。得られた結果を本研究で提案した温度指数によって整理することで熱可塑性樹脂が一般的に示す付着特性を定量的に明らかにした。

次にナノテクスチャリングを用いた付着力低減手法の提案を行い、その有効性を検討した。その結果、適切なナノテクスチャリングを用いることで付着強度を低減させることが可能であることが明らかとなった。また、ナノテクスチャリングの幾何学的な寸法が付着強度に影響していることも明らかとなった。

最後に、大面積の金型に対して効率的な付着低減手法として電場を用いた手法の提案を行い、その有効性を検討した。その結果、高周波数の交流電場を用いることで付着強度を低減させることが可能であることが明らかとなった。得られた主な結果を以下にまとめる。

1. 熱可塑性樹脂のガラス転移温度及び融点が熱可塑性樹脂の金属に対する付着強度に与える影響を定量的に明らかにするため、温度指数を定義した。具体的に、非晶性熱可塑性樹脂に対しては実験における金属表面温度をガラス転移温度で除した I_g を結晶性熱可塑性樹脂に対しては金属表面温度を融点で除した I_m を定義した。これにより非晶性熱可塑性樹脂の場合はガラス転移温度近傍、結晶性熱可塑性樹脂においては融点近傍において最大付着強度を示すことを定量的に明らかにした。具体的には、非晶性熱可塑性樹脂における最大付着強度を示す温度指数はアクリル樹脂、ポリカーボネート及びポリ塩化ビニルにおいてそれぞれ 0.98, 1.00 及び 0.99 であることを明らかにした。結晶性熱可塑性樹脂における最大付着強度を示す温度指数は 6 ナイロン、66 ナイロン及びポリプロピレンにおいてそれぞれ 1.00, 0.95 及び 1.00 であることを明らかにした。
2. 金属表面温度が上昇するにつれ、付着試験後の金属表面に残留樹脂が観察されることが明らかとなった。この観察結果より、熱可塑性樹脂の内部強度の低下及び内部破断の発生が金属表面温度の上昇によって付着強度が減少する理由であると考察した。
3. ナノテクスチャリングを用いた熱可塑性樹脂の金属表面に対する付着強度低減効果を検討するために、4つの異なるナノテクスチャリングを用いて付着強度を比較した。結果として、ナノテクスチャリング表面においては単位面積当たりのディンプルの少なさの割合である $R_{contact}$ の増加に比例して付着強度も上昇する傾向が明らかとなった。今回の試験で用いたナノテクスチャリングにおける最小の $R_{contact}$ の値は 0.28 であり、この試験片を用いた場合に最小の付着強度である 0.18 MPa を示した。この値はナノテクスチャリングを施さなかった場合と比較して 66% 小さい値であった。これらの結果から適切なナノテクスチャリングを用いることで熱可塑性樹脂の付着強度の低減が可能であることが明らかとなった。
4. ナノテクスチャリング試験片においては引張力-変位曲線において最大付着力を示した直後に引張力が急激に減少していることが明らかとなった。また、試験後に金属試験片上に観察された残留樹脂の量はナノテクスチャリングを施さなかった場合と比較して非常に少ないことも明らかとなった。これらの観察結果より、ナノテクスチャリング表面における剥離は金属と熱可塑性樹脂の界面で発生していると考察した。
5. 電場を用いることによる熱可塑性樹脂の金属表面に対する付着強度低減効果を検討するために、異なる極性と電圧強度の直流電圧及び異なる周波数と電圧強度の交流電圧を金属試験片に印加した場合のアクリル樹脂の付着強度の比較を行った。結果として、-175 V の直流電圧を金属試験片に印加した場合に最大の付着強度 0.80 MPa を示した。この値は電圧を印加しない場合の 0.46 MPa と比較して 74% 大きな値であった。負の直流電圧を印加する場合には、電圧強度が増加すると付着強度も上昇することが明らかとなった。一方で、正の直流電圧を印加した場合は付着強度の変化が観察されないことも明らかとなった。

6. 交流電圧を印加した場合の最小付着強度は AC 150 V の 1 MHz 印加における 0.3 MPa であった。この付着強度は電圧を印加しない場合と比較して 35% 小さい値であった。また、周波数の増加により付着強度が減少することが明らかとなった。この結果より、適切な交流電場の印加により付着強度を低減させることが可能であることが明らかとなった。
7. 液滴法による表面エネルギーの測定結果より、-175 V の直流電圧を印加した場合の表面エネルギーのマイナス成分が 19.6 mJ/m² であった。この値は電圧無印加時の 44.4 mJ/m² と比較して 56% の低下であった。表面エネルギーのマイナス成分の低下が、-175 V 印加時における付着強度上昇の原因と考察した。また、正の電圧を印加した場合には表面エネルギーの大きな変化は観察されなかった。これが、正の直流電圧を印加した際に付着強度が変化しなかった理由であると考察した。
8. 付着強度試験と同じ温度環境における比誘電率の測定結果より、周波数が大きくなるほど誘電正接が増加することが明らかとなった。この結果は、印加される周波数が大きくなると熱可塑性樹脂内部の分極が電場の位相に対して遅れるということを示していると考えた。位相が遅れるにつれて、熱可塑性樹脂の表面の電荷と電場の反発が強まるため、付着強度が周波数の増加によって減少したと考察した。