

付加製造技術における材料の選択と利用

デヴィッド・L・ボーレル、クリストファー・E・ロバート

ある種のポリマー、金属、セラミックはほかよりもAM (Additive Manufacturing：付加製造技術)により適しているが、多くのAMの方法の間に差異がある。結果として生じるAMの部品の機械特性は向上しており、本稿では粒子形態と欠陥構造について概要を述べる。

材料と付加製造技術は不可分な関係にある。同じことは従来の製造法にも当てはまる。例を挙げると、すべての材料が溶接可能かつ鋳造可能というわけではない。処理に適した材料でなければならず、逆もまた然りである。付加製造 (AM、3Dプリンターとしても知られる) についても同様であり、ポリマーか、金属か、セラミックかを、考えなければならない。

販売業者、実践者、研究者は、少なくとも対象の材料システムについて、どの材料がほかよりも容易に処理できるか知っている。しかしながら、一般読者やAMに関心をもとうとする人たちに対して、AM技術の材料をレビューすることは有益だろう。より詳細な情報として、このテーマのレビュー記事が近年発表された⁽¹⁾。

2016年のAM材料の販売額は9億ドルであり⁽²⁾、前年比17%の伸びであった。材料の販売額は2010年以降右肩上がり伸びており、2025年までに年間販売額は50～80億ドルになると見込まれている⁽²⁾⁽³⁾。

AMコミュニティは現在、AM技術を7つのカテゴリに分類している(表)⁽⁴⁾。レーザを使用するのは、粉末床溶融結合、指向性エネルギー堆積、液槽重合の3種類である。

粉末床溶融結合では、粉末の薄い層を広げ、コンピュータ制御するレーザビームで表面を走査する。そして別の

粉末の層を加え、処理が繰り返される。指向性エネルギー堆積では、粉末かワイヤーのいずれかがサイドから供給され、エネルギー源(レーザまたは電子線)に照射される。いずれの方法も、一般には溶融熱のために50～500Wのレーザが使用される。液槽重合では、液体の熱硬化性樹脂材料における光開始架橋のために、適切な波長でmWレベルのレーザが使用される。

AM向けのポリマー材料

ウォーラーズレポート (Wohlers Report)によると、2016年に消費された全AMポリマーの46%が液槽重合と材料堆積の熱硬化性樹脂であった⁽²⁾。材料吐出堆積向けの非晶質ポリマーが市場シェアの24%であり、粉末床溶融結合向けの半結晶の熱可塑性プラスチックが30%であった。

粉末床溶融結合のポリマーは、しばしば半結晶の熱可塑性プラスチック(ポリアミド、PEEK、TPU)である。

非晶質の熱可塑性プラスチックは、一般にはあまり使われない。なぜなら、溶融温度が広く、粘性があるため、処理の温度範囲が狭くなり、それにより粉末床溶融結合には好ましくない高粘性の溶融となるためである。溶融の広い温度範囲は、部分的な過焼結という問題を生じさせる。図1に、非晶質のPLAポリマーをレーザ焼結させた悪例を示した。

粉末床溶融結合で使用される半結晶ポリマーの大きな特徴は、加熱時の(比較的高い)溶融点と、冷却時の(比較的低い)結晶化温度の温度の差にある。この温度窓は大きくすべきである。粉末床溶融結合のビルドチャンバーがポリマーの溶融点のすぐ下の温度で熱せられるため、粉末床が塊とならないよう十分低い温度となる。この温度は、結晶化温度以上、溶融点以下の温度窓でなければならない。

レーザを操作して粉末を溶融するとき、ビルドチャンバーの温度に戻るよう冷却されるが、結晶化温度には到達していないため溶融状態の構造を維持している。そのため、溶融した部分は融けた状態を維持し、通常は複数の層が上に重なったあとで徐々に結晶化する



図1 不適切な材料を用いたもの。非晶質の熱可塑性プラスチックであるポリ乳酸(PLA)を使用した粉末床溶融結合。

る。これは、残留応答と部分損傷の最小化において重要な利点となる。しかしながら、この現象は金属では一般に不可能であり、構築中に損傷しないよう大きなサポート構造が必要となる。

ホプキンソン氏(Hopkinson)は、合金材料を2つの高い溶融点成分に分けるという新しい金属の手法を提案している⁽⁶⁾。レーザー(または電子線)が材料を走査して溶融するとき、溶融したものが混合し、より低い溶融点の金属(共晶混合物様)が生じ、溶融状態が維持される。この手法はポリマーの手法を模倣したものであり、サポートの必要性をなくす。

材料吐出堆積では、吐出と材料配置を制御するのに、高粘性でペースト状のポリマーが最適だ。通常材料ポリマーは非晶質である(PLA、ABS、ポリイミド)。材料吐出堆積において半結晶材料を使用すると、チョコレートから作られた多層パーツ⁽⁷⁾やPEEK⁽⁸⁾の場合のように、一般に低品質の産物となる。

液槽重合と材料噴射堆積で使用されるポリマーは、与えられた波長光の存在下で架橋結合可能な光開始剤(通常はベンゾイン、アセトフェノン、ベンジルケタール、シクロヘキシルフェニルケトン)をもつ熱硬化性樹脂である。初期の商業用材料はアクリレートをベースにしていたが、大きな収縮と有害な酸素効果があったため、エポキシ樹脂が導入された。

AM向けの金属材料

AMに向く金属の一般的な役割は、金属がうまく溶接、鋳造できるか、そしてAMでうまく処理できるかどうかである。機械加工に先行して固相接合の金属箔にソイトノードを使用するシート積層処理(音速AM)と、接合剤を

付加製造技術

処理	レーザーベースか?	材料
粉末床溶融結合	はい	金属、ポリマー、*セラミック
指向性エネルギー堆積	はい	金属
液槽重合	はい	ポリマー、*金属、*セラミック
シート積層	**	金属、ポリマー、*セラミック
結合剤噴射	いいえ	ポリマー、金属、*セラミック
材料噴射堆積	いいえ	ポリマー
材料吐出堆積	いいえ	ポリマー

*間接アプローチ

**シート積層は、以前はレーザーを使用していたが、現在の技術では切断刃が使われている。

金属粉末床に噴射させる金属結合剤噴射を除いて、金属のAM技術は溶融に依存する。

通常金属AM合金は当然、溶接可能、鋳造可能である。たとえば、Ti-6Al-4V、AlSi₁₀Mg、316Lステンレス、CoNiCrだ。限定的に溶接性、鋳造性がある金属でもAM処理できるが、通常は一部が大きく破損してしまう。図2aに、アルミニウム合金6061を示す。材料は、アルミニウム6061で合金化されたAlMgSi合金である。凝固における大きな温度幅と、熱膨張係数の大きさが合わさり、凝固中に垂直方向(z方向)の粒界破壊が生じる。アルミニウム6061に適切な特性で混合されたMg₂Si粒子と純アルミニウム粉末とい

う材料に変えることで、クラッキングせずにAM処理を行うことができる。

この場合における溶融・凝固特性は、純アルミニウムによるものだ。なぜなら、Mg₂Siはレーザー走査中に溶融しないからだ。純アルミニウムは、温度幅のない熱捕獲で溶融・凝固する。図2bで示すように、溶融性のある純アルミニウムにはクラッキングがない。さらに、合金をAM処理できることによって、溶融と鋳造に近い状態になり、しばしば一定の条件と装置において可能となる。たとえば、合金化されたアルミニウム6061はEOSシリーズのDMLS機器ではクラッキングなしに処理できないが、アルミニウム6061は英レニショー社(Renishaw)のAM機器を用いること

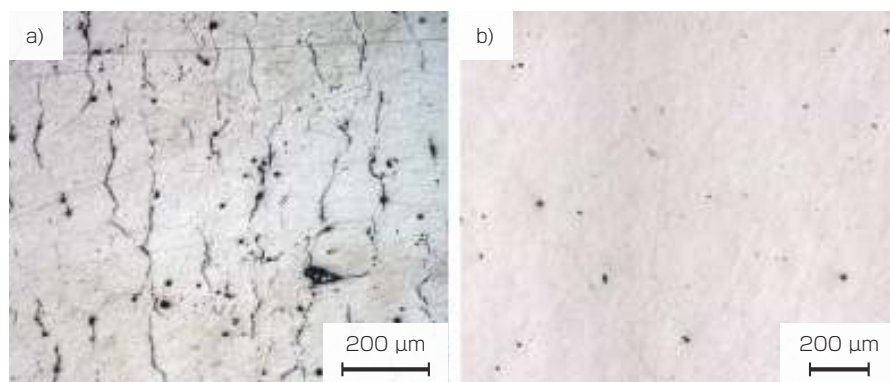


図2 垂直方向の構築でEOSのDMLS機器を用いたアルミニウム粉末床溶融結合。(a)合金化されたアルミニウム6061の粉末材料⁽⁹⁾。(b)純アルミニウムの粉末材料⁽¹⁰⁾。

で処理できるという報告がある⁽¹¹⁾。

AM技術におけるセラミックス

溶融手法を用いるセラミックスAMには、いくつかの困難がある。ほとんどの場合、セラミックスの融点は非常に高く、極端に靱性が低い。そのため、冷却時にクラッキングが生じる。少数のグループが、酸化物セラミックスを処理することに成功したと報告している^{(12)~(14)}。

レーザーベースのセラミックス処理のより一般的な方法は、ポリマー結合剤とセラミックス粉末を混合するという間接的な方法である。この材料を、ポリマー粉末床溶融結合または結合剤噴射で処理する。その後、結合材を燃焼、変質させ、従来方式で部分焼結させる。セラミックスの間接的なAMは、結合剤のセラミックスの射出鑄造に似ている。ただし、AMでは混合物を流す必要がないため、結合剤の割合がより小さいという違いはある。

セラミックスの力学的特性は、内在する材料の性質、サイズ、欠陥分布による。セラミックスの強度は通常、ワイブル分布によって描写される⁽¹⁵⁾。最も影響のあるものは、脆性破壊が起こりうるストレスの範囲を示す指標であるワイブル係数だ。ワイブル係数の低さと脆性破壊の範囲の広さとは相関があり、特定の部分における破壊ストレスの予測を困難にしている。ワイブル係数が高いほど理想的である。なぜなら、破壊ストレスの範囲が狭まり、特定の部分における破壊ストレスを予測しやすくなるためだ。

ほとんどの場合、AMセラミックスの部分は、従来の加圧焼結したセラミックスの鑄込み成型と比較してワイブル係数が低い^{(1) (16)}。しかしながら、大きな欠損が除去されるほど、ワイブル

ル係数が大きくなる⁽¹⁷⁾。

AM材料の一般的な力学的特性

適正な基準を用いたAMポリマーや金属構築では、従来の製造技術と比較して幅広い一般的な傾向がある。鑄込み成型、鑄造、鍛造処理だ⁽¹⁾。AM部品は一般的に従来の材料と同程度あるいは従来以上の強さ・固さをもつ。これは通常、AMと関連する優れた微細構造と関係する。

AM部品の弾性係数は一般的に、ハンドブック値と同一か、わずかに低い。これは、係数を低下させる残留気孔率が原因である。耐疲労性限界と破壊靱

性である延性は通常、AM部品ではより低い。欠陥構造の度合いと相関があるようにみえる。AM部品で欠陥を除去する、たとえば金属に対して熱間等静圧圧縮成形を行うことで、通常はこれらの力学的特性をハンドブック値にまで回復できる。

例外は、粉末床溶融結合の延性である。長鎖ポリマーは、AMで材料粒子の境界を越えて混合しない。一方、鑄込み成型ではせん断により、ポリマーの長鎖は完全に混合する。たとえば、AMポリアミド(ナイロン)の伸長は50%未満だが、鑄込み成型されたポリアミドは200~400%伸長する⁽¹⁸⁾。

参考文献

- (1) D. Bourell et al., CIRP Annals, 66, 2, 657-680 (Aug. 2017).
- (2) T. Wohlers, Wohlers Report 2017, Wohlers Associates, Ft. Collins CO (2017).
- (3) See <https://goo.gl/xibihj>.
- (4) ISO/ASTM 52900, "Standard Terminology for Additive Manufacturing - General Principles - Part 1: Terminology," available from ASTM Intl., West Conshohocken, PA (2015).
- (5) J. Wei and Y. Guo, Northeast Forestry University, Harbin, China, priv. comm. (2015)
- (6) K. Mumtaz, P. Vora, and N. Hopkinson, "A method to eliminate anchors/supports from directly laser melted metal powder bed processes," Proc. SFF Symposium, Austin, TX, 55-64 (2011).
- (7) See <https://goo.gl/UH7Cxb>.
- (8) See <https://goo.gl/XRrscg>.
- (9) C. E. Roberts, "Selective laser melting of elemental aluminum silicon mixtures," Master's Thesis, University of Texas at Austin, 32 (2016).
- (10) C. E. Roberts and D. L. Bourell, unpublished research (2017).
- (11) B. Ahuja, M. Karg, K. Nagulin, and M. Schmidt, "Laser beam melting of high strength aluminum alloys EN AW-6061 and EN AW-6082," Proc. 5th Int. Conf. Additive Technol., Ljubljana, Slovenia, 153-158 (2014).
- (12) Y.-C. Hagedorn, N. Balachandran, W. Meiners, K. Wissenbach, and R. Poprawe, "SLM of net-shaped high strength ceramics: new opportunities for producing dental restorations," Proc. SFF Symposium, Austin, TX, 536-546 (2011).
- (13) J. Wilkes, Y.-C. Hagedorn, W. Meiners, and K. Wissenbach, Rapid Prototyp. J., 19, 1, 51-57 (2013).
- (14) F. Y. Niu, D. J. Wu, S. Yan, G. Y. Ma, and B. Zhang, JOM, 69, 3, 557-562 (2017).
- (15) W. Weibull, J. Appl. Mech., 18, 3, 293-297 (1951).
- (16) E. Ferraris et al., CIRP Annals, 65, 2, 761-784 (2016).
- (17) R. Clancy et al., "Fused deposition of ceramics: Progress towards a robust and controlled process for commercialization," Proc. SFF Symposium, Austin, TX, 185-194 (1997).
- (18) D. Bourell, "The evolution of materials for additive manufacturing," 4th International Conference on Additive Technologies, Maribor, Slovenia (2012).

著者紹介

デヴィッド・L・ボーレルは米テキサス大(University of Texas)の機械工学・材料工学教授および自由形状製作研究所長および原料分野エリアコーディネーター、クリストファー・E・ロバートは同大の大学院生である。

e-mails: dbourell@mail.utexas.edu cer0009@utexas.edu URL: www.me.utexas.edu

LPWJ