金属光造形の開発と金型への応用

Production of Injection Mold by Laser Sintering Technology

不 破 勲*

Isao FUWA

(Received January 15, 2004)

An innovative laser-beam forming technology and the steel-based-powder material have been developed by combining a conventional laser sintering and a high-speed milling method, for the purpose of the fabrication of low-cost injection molds with short lead-time. Mold fabrication, which substantially affects product development cost and lead-time, has been the subject of intense experimentation, centering around different approaches, such as rapid prototyping by solidifying liquid resin using laser light. However, none of these methods have been applicable to production processes due to insufficient accuracy and service life. The newly developed laser-beam forming technology enabled the one-process quick fabrication of low-cost injection molds.

Key Words: Rapid Production, Laser Sintering, High-Speed Milling, Steel-Based-Powder, Injection Mold

1. はじめに

今日、パソコンの出荷台数はカラーTVのそれを超え、携帯電話の所有者は6,000万人を超える等、情報関連商品は加速的に普及している。また、従来からの家電商品においても、市場の多様化したニーズに対応するために、最新の技術を盛り込んだ新製品が次々と開発されている。これらの商品の特徴は、ライフサイクルが非常に短いことと、生産ロット数が少ないことである。したがって、開発スピードが重要となり、従来よりも短期間で設計品質を確保し、生産体制を立ち上げるとともに、それらに関わるコストも最小限に抑えることが望まれている。

そこで、商品開発部門においては、開発期間の短縮とコストの削減を実現するために、3次元CAD/CAM/CAEなどを活用する、いわゆるデジタルエンジニアリングによるCE(コンカレントエンジニアリング)の取り組みが行われている。CEツールの一つとして、1990年代に開発されたRP(ラピッドプロトタイピング)としての光造形法¹⁾がある。この光造形法は、3次元CADで設計されたモデル形状を短期間で試作評価できることから新商品の開発期間の大幅な短縮が期待された。しかし、この方法では紫外線で硬化する特定の樹脂材料しか使用することができず、製品で実際に使用される材質で行う製品の諸機能・諸性能の評価(寿命、耐熱および強度評価など)には使用できないという欠点があった。そのため、現在も製品の実際的な評価を

るため、製品試作段階での金型製作コストおよび期間の短縮効果はなかった。

後に、高強度・高耐熱の光硬化性樹脂が開発され、ダイレクトに樹脂型が製作できるようになったが、金型強度が金属を素材とする金型に及ばず、数100個程度しか成形できないため、試作段階での適用にとどまっている。また、金属粉末をレーザーで焼結・積層して立体形状を造形する金属光造形法が開発され、金属の金型が一応製作できるようになったが、加工精度の問題から普及には至っていない。

これらの課題を解決する方法として、短納期・低コストの金型づくりを目的に、レーザー焼結技術と精密切削技術を組合せた金属光造形複合加工技術およびその素材に用いる鉄系粉末材料の開発を行った。金属光造形複合加工技術は、科学技術振興事業団と福井県地域結集型共同研究事業(福井県産業支援センター、大阪大学、松下電工、松浦機械製作所の共同研究チーム)において開発を推進してきたもので、1世紀に亘って確立されてきた切削、研削、放電加工などのいわゆる「金属除去加工法」に対して、全く正反対の「金属粉末付加加工法」を採用しており、金型加工に適用すると、従来の方法では不可能なワン・プロセス(工程)加工が実現し、超短納期・低コストの金型製作が期待できる。Fig. 1に経済産業省の平成13年度補正予算「新規産業創造技術開発費補助金」により松浦機械製作所が開発した金属光造形複合加工装置の外観を示す。

ここでは、本技術の概要と射出成形金型加工への適用事

* 松下電工株式会社 先行融合技術研究所(〒571-8686 大阪府門真市大字門真1048番地)

Advanced Technology Fusion Laboratory, Matsushita Electric Works, Ltd. (1048 Kadoma, Osaka 571-8686, Japan)

Fig. 1 Metal laser sintering machine with milling system.

Fig. 2 Scheme of metal laser sintering.

Sintering parts

Surface of sintering parts

Fig. 3 Example of only laser sintering.

例を紹介する。

2. 金属光造形法

金属光造形法は、金属の粉末材料をYAGレーザやCO₂レーザなどの熱加工で一層一層焼結させて積み上げ、立体形状を形成する工法である。Fig. 2に金属光造形システムの概要を示す。付加加工である金属光造形法は、3次元CADにより設計された金型形状をそのまま作成できる特徴を有し、複雑な形状加工が可能である。しかし、レーザの走査精度や金属粉末の焼結加工精度の問題から寸法精度は±数100 μmとなり、さらにレーザ焼結時に金属粉末が表面に付着するためFig. 3のように表面粗さはRy数100 μmしか得られない。このままでは金型として使用できないため切削加工や放電加工などの後加工が必要となる。

3. 金属光造形複合加工法

金属光造形複合加工法は、金属粉末のレーザ焼結積層と

Fig. 4 Metal laser sintering method with high-speed-milling system.

小径エンドミルによる切削仕上げを同一装置内で行う複合加工法である。Fig. 4に加工方法を示す。

- (1) 材料を造形プレート上に50 μmの厚さに積層し、CO₂レーザやYAGレーザなどを照射し選択的に焼結させてプレートに接合する。
- (2) 順次金属粉末材料を厚さ50 μm供給し、レーザで焼結させて積層する。
- (3) 切削工具の有効刃長以下の一定厚さ積層した時点で、

Fig. 5 Mold production process by metal laser sintering with milling.

表面の金属粉末付着部を小径エンドミルにて切削仕上げを行う。

(4) (2)と(3)を繰返して、積層造形を行う。(レーザ焼結と切削仕上げの繰返し)

以上の加工により、マシニングセンター並の寸法精度と表面粗さが確保できる。

4. 金属光造形複合加工による金型製作

従来の除去加工法では、複雑な形状を有する金型、例えば深いリブ構造をもつ金型は、一体物として加工できないため、分割して加工したブロックを組立てたり、放電による後加工を施すことを前提とした金型設計を行ってきた。金属光造形複合加工法は金型を分割することなくその形状を一体で製作することができることや、放電加工も不要となるため、設計を含む金型製作期間の大幅な短縮が期待できる。Fig. 5に本工法を用いた金型製作工程を示す。

工程は以下の4つからなる。

- (1) 3次元CADによるモデリング
- (2) CAM処理 (等高線スライス処理およびレーザ照射パス、切削パス生成)
- (3) レーザ焼結による造形および切削仕上げ
- (4) 仕上げ処理 (6面体加工、ロックアウトピン孔加工など)

3次元CADに商品形状を入力し、形状を反転させることにより金型形状を得る。金型形状に抜き勾配を付加し、ロックアウトピンの配置などを行うことにより型設計が完了する。この金型の3次元モデルをSTLデータに変換した後、CAM処理にて等高線でスライスした断面形状から造形データが作成される。さらに、工具の有効刃長以下に分割された切削仕上げのパスデータが作成される。金属光造形複合加工システムは、Fig. 3で述べた原理に基づき金型形状を形成する。造形および切削仕上げされた立体形状は、6面体加工 (造形プレートの外形加工など)、ロックアウトピン孔加工などが施されて金型として完成する。

5. 鉄系金属粉末材料

金属光造形金型を試作金型から量産金型にまで拡大する

Fig. 6 SEM of steel-based-powder.

ため、高硬度・高強度な金属粉末材料の開発を行った。金属光造形用粉末材料の機能として、次の項目が求められる。

- (1) 50 μm程度の薄い層に積層するため、凝集を起こさない程度の細かい粒径である。
- (2) 粉末を高密度かつ均一に積層させるため、粉末形状ができるだけ球形であり、粒度ばらつきが小さい。
- (3) レーザ焼結後に滑らかな表面を得るために、熔融時の濡れ性が良く、隣接する焼結層との接合強度が高い。
- (4) 金型として用いるには、むくの金属を素材とする金型と同程度の硬度および強度を有し、かつ各種加工性にも優れる。

上記の観点から、鉄系材料を主成分とするSCM440 (クロムモリブデン鋼)-Ni-CuP (リン銅) 系混合粉末を開発した。Fig. 6にその外観SEM写真を示す。

薄く均一な厚みの粉末層を形成するためには、粉末粒子の形状はできるだけ球状に近く、かつ、凝集を起こさないように細かくする必要がある。用いた粉末の粒子形状は、ほぼ球形であり、粒度分布が20~45 μm、平均粒径が約30 μmの仕様とした。また、レーザ焼結性、すなわち、レーザの熱により熔融した時の濡れ性を向上させるために、リン銅 (CuP) 粉末を混合している。各粉末の機能を下記に示す。

- (1) SCM440：クロムモリブデン鋼。一般に射出成形金型に使われる材料で、高硬度・高強度である。
- (2) Ni：硬度・靱性・機械加工性を調整する。
- (3) CuP：鉄系材料と相性がよく、また融点が鉄よりも400℃以上低いためレーザ照射時にまず熔融して鉄系材料と合金を形成し、また熔融時の粘度も低いため焼結層が膨らむを防ぐ。

上記鉄系粉末材料を用いて直方体ブロックを鉄製の造形用プレート上に造形した。この直方体ブロックから数本の曲げ強度試験片をワイヤカットで切出した。試験片サイズ等をFig. 7に示す。この試験片を用いて3点曲げ試験および硬度の評価を行った。3点曲げ試験の標点間距離は20mmとした (Fig. 8参照)。この造形は材料の全成分を熔融させるレーザ条件下で行った。

レーザ焼結品の断面組織をFig. 9に示す。各粉末組成の

Fig. 7 Bending test piece size.

Fig. 8 Bending test.

Fig. 9 Cross section of melted state.

Table 1 Mechanical property

Vickers Hardness	Hv 200
Bending strength	700 MPa

全成分が溶融していることがわかる。組織としては、溶融状態から急冷凝固された鑄造組織に近い組織となっている。造形密度は、ほぼ100%であり、大きな気孔は見られない。しかし、積層方向の所々にクラックが見られる。この原因は、造形(溶融)・冷却時の熱収縮による凝固割れと考えられる。このクラックをなくすことが課題の一つである。

試験片のビッカース硬度、および曲げ強度をTable 1に示す。硬度および強度とも、プラスチック射出成形用金型として十分な機械特性を有することが確認できた。硬度はレーザ焼結時に急冷され比較的高いが、Ni粉末の混合割合により調整することが可能である。

前述の鉄系粉末材料を金型に適用するために以下の点に

留意して造形工法開発を行った。

6. レーザ焼結

- (1) エポキシ樹脂や低融点金属などの含浸処理を避けるために造形物表面をできるだけ高密度に焼結する。
- (2) 反りが少なく高精度に造形する。
- (3) 金型として成形に耐える強度を有する。

金型寿命を長くし、金型表面を滑らかに仕上げるためには、いかに高密度に造形できるかがポイントとなる一方、レーザの入熱が大きすぎると、収縮などによる反り変形が発生する。そのため、造形密度の制御が必要となる。

レーザの照射エネルギーと造形密度の関係を把握するために、レーザパワー、レーザ走査速度、レーザの走査ピッチを変えて実験を行った。

レーザのエネルギー密度は、(1)式で表される。

$$E_p = \frac{P}{V \cdot d} \quad (1)$$

ここで、 E_p はエネルギー密度、 P はレーザパワー、 v はレーザ走査速度、 d はレーザの走査ピッチである。エネルギー密度は0.73から40.0 (J/mm²)まで変化させて10×10×10 (mm)の造形サンプルを試作した。

造形物の断面写真を画像処理することにより造形密度(金属材料の占有率)を計測した。Fig. 10にエネルギー密度と造形密度の関係を示す。

開発した鉄系材料において、造形密度は85%から99.5%の間で制御可能であり、レーザエネルギー密度40.0J/cm²において最大99.5%の造形密度が得られた。断面には気孔が点在しているが、その大きさはφ0.1mm以下であった。この気孔は造形物内部に発生するので、基本的に問題ない。最大密度が得られた条件において、仕上げ後表面粗さは R_y は2~6 μmであり、樹脂または低融点金属等を含浸処理することなく金型として適用可能である。

大きなエネルギーを与えれば密度は向上するが、これに反して収縮による造形物の反りや変形が発生するため、必要な部分のみを高密度にするような構造にすることが重要となる。そこで、造形物のモデル構造をFig. 11に示すよう

Fig. 10 Relations between laser energy density and parts density.

Fig. 11 Structure of laser sintering parts.

Fig. 12 Laser sintering mold for life-time evaluation.

Fig. 13 Transition of surface roughness of moldings.

な3層構造とした。造形物の表面部は、高密度造形条件で焼結し、中心部は、モデル形状を維持する程度の密度で焼結を行う。反りや変形を極力小さくするために高密度部は薄くし、また、強度を持たせるために中間部を設けた。

7. 金型評価

鉄系粉末材料と前記造形工法によって、Fig. 12に示す金型を製作した。製作した金型でABS/30GF樹脂の射出成形を10,000ショットまで行い、成形品の表面粗さの推移を測定した。Fig. 13にその測定結果を示す。10,000ショットまでの成形品の表面粗さはRy 15 μm, Ra 3 μmであり、ショット数による大きな変化はなかった。この結果から、開発した鉄系粉末材料による造形金型は、10,000ショット以上の成形寿命があることが確認できた。

実用金型への適用事例をFig. 14に、その成形品をFig. 15に示す。深いリブ構造を有する本金型は、従来工法では分割かつ数多くの放電用の電極を作成して加工を行っていたが、金属光造形複合加工により、型部の製作期間が従来比1/3となり、コスト削減にも大きく貢献した。

Fig. 14 Mold by metal laser sintering with milling system.

Fig. 15 Outlook of molding.

8. 今後の課題

試作型や小ロットの金型ではあるが、金属光造形複合加工により射出成形金型の製作期間の大幅短縮とコスト削減の可能性が確認できた。

今後、さらに適用できる金型を拡大するために

- (1) 量産金型への対応 (金型寿命向上)
- (2) キャビティ型への対応 (表面粗さの向上)
- (3) 機能部品への対応 (加工寸法精度の向上)
- (4) スキルレス化 (加工ノウハウのCAM化)
- (5) 高機能金型の開発 (最適な冷却構造による高精度、ハイサイクル成形)

などの開発を行い、ワン・プロセスで仕上げを必要としない加工技術の確立を図るとともに、3次元CADとこの金属光造形技術の結合により、デザイン、設計から試作、生産にいたるまでのコンカレントエンジニアリングシステムを構築し、ドラステックな商品開発期間の短縮を実現する予定である。

引用文献

- 1) Paul F Jacobs: 高速3次元成形の基礎, 日経BP出版センター (1993).
- 2) 坂元陽介, 青野竜也, 志波義勝, 檜原弘之, 鈴木 裕: 品質工学を用いた光造形品の再現性向上に関する研究, 型技術, 14-12 (1999) 58-59.
- 3) 小畑外嗣, 阿部 諭, 東 喜万, 峠山裕彦: 型加工の技術動向, 素形材センター, 42-3 (2001) 26-30.
- 4) 東喜万, 阿部諭, 峠山裕彦, 吉田徳雄, 不破勲: 金属光造形法の開発と金型への応用, 松下電工技報, 78 (2002) 57-63.