

金属光造形複合加工法および金型に関する開発研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/26823

氏名	阿部 諭
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第975号
学位授与の日付	平成20年3月22日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	金属光造形複合加工法および金型に関する開発研究
論文審査委員(主査)	米山 猛(自然科学研究科・教授)
論文審査委員(副査)	上田 隆司(自然科学研究科・教授), 山崎 光悦(自然科学研究科・教授), 細川 晃(自然科学研究科・教授), 多田 幸生(自然科学研究科・准教授)

Abstract

In this research, the first system of milling-combined laser metal sintering is developed to reduce a product development period and to build the progressive mold manufacturing system. The characteristic of this process is to repeat the laser-assisted metal sintering process and the high-precision and high-speed milling process.

Using this system, the laser sintering characteristic of the metal powder is evaluated and sintering mechanism is studied. Also, the conditions to mill the sintered part using the end mill with small diameter are decided. Moreover, the sintering and milling technology is reviewed to aim at the high accuracy more. The generation mechanism of the sticking-out sintering part is investigated and the new sintering process is proposed and verified to be able to reduce it. Also, the generation mechanism of the steps in the side surface is specified and the new milling process to reduce the steps is proposed. By using this milling process, surface roughness is improved in less than Rz5 μ m.

By applying this process to the injection mold, it is proved that the high - precision mold can be manufactured in very short lead time. Moreover, the possibility of the improvement of the injection molding accuracy and the molding cycle by using the sintered mold with sophisticated functions is shown.

要 旨

本研究では、我が国の製造業が生き残るために欠くことのできない商品開発期間の大幅短縮を達成するため、特に3D CADデータを活用した一気通貫金型製造システムを構築するため、従来の金属光造形金型の弱点を克服した高精度、かつ短納期生産用金型づくりを狙い、レーザによる金属粉末焼結積層造形プロセス(金属光造形法)と精密高速切削プロセスを組み合わせ、世界初の金属光造形複合加工システムを開発した(図1)。本加工法は、焼結積層工程と切削仕上げ工程を繰り返して高速に高精度な金型を作製する方法である。複数層をレーザ焼結し、その積層高さが切削工具の首下長さに達する直前に切削工程を挿入して表面を仕上げる。

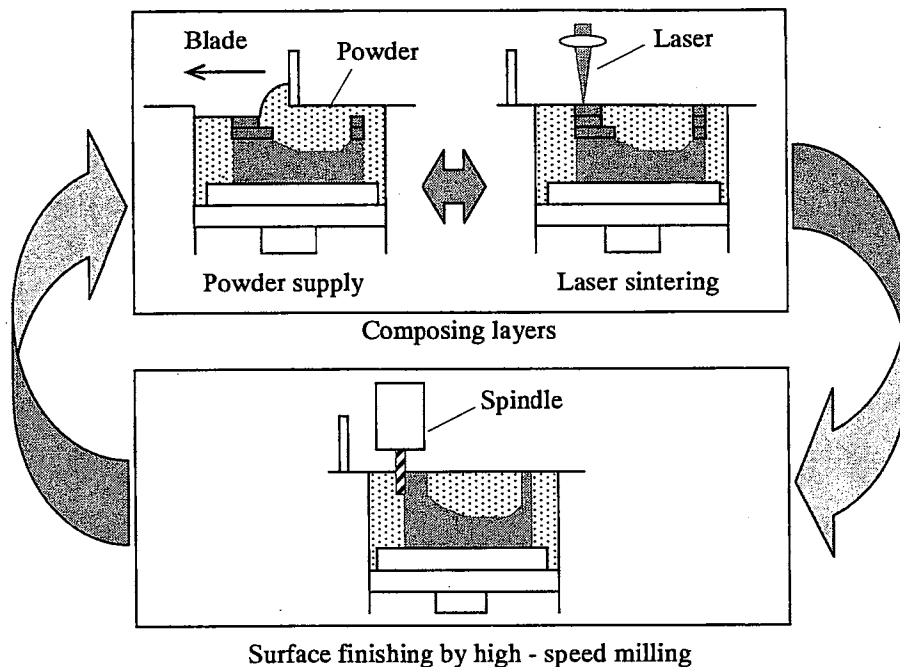


Fig.1 Concept of Milling-Combined Laser Metal Sintering process

このシステムを用いて、レーザによる金属粉末の焼結特性（焼結性、断面密度、強度）を評価して、その焼結メカニズムを考察し、造形条件を決定した。また、小径エンドミルを用いた造形物の切削条件を決定した。また、金属光造形複合加工法の更なる短納期化、高精度化を目指して、金属粉末のレーザ焼結技術・切削工法の検討を行った。具体的には、切削工程での除去領域となる余剰焼結部が形成されるメカニズムを調査し、余剰焼結量を削減する焼結方法を提案・検証した。また、造形物の側面に発生する「段差」が発生する要因を特定し、段差を削減する切削方法を提案・検証した。さらに、射出成形金型へ適用して評価し、本研究の目的である高精度、かつ超短納期生産用金型が実現可能なことを実証したとともに、金属光造形複合加工法の特徴を活かした高機能射出成形金型による、射出成形精度の向上や成形サイクルアップの実現可能性を示した。

以下に、各章における結論を具体的に述べる。

第1章では本研究の背景を示した。

第2章では、本研究の基礎となる積層造形法の原理を紹介し、金属光造形法およびそれを適用した金型に関するこれまでの研究について調査した。

第3章では、本研究の対象となる金属光造形複合加工法の概要と試作開発した金属光造形複合加工システム構成・仕様について述べた。加工面上におけるレーザの最小集光径は0.5mmであった。X軸、Y軸の位置決め精度をレーザ干渉測長器で測定し、位置決め精度は $\pm 2\mu\text{m}$ 以内であった。CCDカメラと画像処理によるレーザ照射位置補正系を開発し、レーザ照射精度は約 $\pm 20\mu\text{m}$ 以内であることを確認した。

第4章では、金型加工を行うための造形条件と切削条件を評価した。その結果、以下の知見を得た。

焼結メカニズムについては、ハッチングピッチが狭い条件または走査速度が遅い条件が造形しやすいこと、レーザのエネルギーを受けたときに粉末材料はボール状の塊を形成し、

冷却過程で塊どうしが溶着すること、そのボール状の塊はレーザーのエネルギー密度が大きくなるにつれて成長すること、さらにエネルギー密度が高い場合は、メルトプールが広がった状態になり完全に熔融されているような造形物が形成されることがわかった。

焼結密度については、ほぼ 50%から 100%の間で制御可能であり、約 $5\text{J}/\text{mm}^2$ 以上のエネルギー密度では、ほぼ 100% (最大 99.8%) となることがわかった。

強度物性については、エネルギー密度 $E_d=1$ から $5\text{J}/\text{mm}^2$ の条件では、エネルギー密度と最大曲げ強さの関係はほぼ比例し、5 から $7\text{J}/\text{mm}^2$ で曲げ強さが最大となり、そのときの曲げ強さはほぼ $1,000\text{MPa}$ であった。

小径エンドミルで焼結体の側面を切削し、金型として良好な仕上げ加工面を得るための切削条件を求め、例えば直径が $D=0.6\text{mm}$ の工具で面粗さを $1\mu\text{m}$ 以下にする場合、一刃あたりの除去量を $<1.0\times 10^{-4}\text{mm}^3/\text{tooth}$ となる切削条件を選択すれば良いことがわかった。

上記、評価した造形条件と切削条件でサンプル加工を行い、寸法精度と面粗さを評価した結果、寸法精度は $\pm 0.03\text{mm}$ 、面粗さは $Rz20\mu\text{m}$ となった。従来の金属光造形法のみ寸法精度、面粗さと比較すると、ともに一桁向上しており、金型加工に適した造形条件、切削条件であることを実証した。

第 5 章では、金属光造形複合加工法における特徴的な課題である余剰焼結部について評価を行い、以下のことがわかった。

1. 余剰焼結部の幅、深さは、切削工程後の 1 層目の焼結で決定され、その後追加積層焼結を行っても余剰焼結部の幅、深さは拡大成長しない。
2. 余剰焼結幅は集光径に比例し、余剰焼結深さは集光径が大きくなるにつれて極端に小さくなる。レーザーのパワー分布と余剰焼結部の密度分布には相関がある。
3. 走査速度を速くすれば余剰焼結幅、余剰焼結深さともに小さくすることができる。
4. レーザ照射範囲を広げれば余剰焼結幅は大きくなる。一方、余剰焼結深さは、レーザーの中心が端面より内側の場合よりも、照射範囲が端面から外側に広がるにつれてより深くなる。

以上の評価結果より、余剰焼結深さを削減する造形方法を提案し、従来法と比較して余剰焼結深さを半減した、切削加工時間をシミュレーションした結果、従来よりも約 10% の切削加工時間短縮が見込まれた。

第 6 章では、金属光造形複合加工法における特徴的な課題である、側面の段差について評価し、以下ことがわかった。

1. 側面に発生する段差の主要因は、切削仕上げ工程後、新たに焼結積層した際に発生する収縮応力による側面の変形 (凹み) である。これは、レーザーフォーミング加工における温度勾配メカニズム (TGM : Temperature Gradient Mechanism) と類似したメカニズムであり、冷却過程における収縮の影響が側面に表れるものと考えられる。
2. 段差量はワーク寸法の対数にほぼ比例している。ワークの寸法が小さい場合は収縮率が急激に大きくなっている。
3. 切削工程後の追加積層を重ねることにより焼結による収縮応力が蓄積される。また、焼結面から深くなるにつれて、収縮応力の影響が小さくなる。

以上の評価結果より、段差を低減する切削プロセス (焼結積層による収縮は中仕上げ切削工程で残した仕上げ代の中で引き起こし、上方層の焼結による収縮応力の影響が小さ

くなった領域に対して仕上げ切削工程を施す方法)を提案し、プロセス条件を検討した。その結果、側面の粗さを約 Rz 5 μ m まで改善し、側面の段差をほぼ解消することができた。

第7章では、多数の深いリブを有する金型でも、金型を分割することなく一体で作製でき、放電加工も大幅に削減可能なため、設計時間を約 67%、CAM 処理時間を 90%削減できた。また、加工時間も大きく短縮され、型部の作製期間を従来工法より全体で 62%短縮できることを立証した。

複雑な3次元冷却水管を内蔵することによる金型の冷却促進の効果を検証するため、金型リブ溝間に冷却管を配置して金型リブ部の温度を均一化することにより、成形品のそりを低減して成形精度を向上させることを示した。また、射出成形シミュレーションを活用すると、そり量の変化を予測することができることを示した。また、コーン状の成形品の金型内にらせん状の水管を配置することにより、射出成形の冷却時間を短縮してサイクルタイムを短縮可能であることを示した。

さらに、ガス抜き用の経路として低密度焼結部を任意の箇所に配置したメッシュ状の成形品の金型において、通気性のない高密度造形金型よりも低い射出圧力で容易に充填可能であり、低圧で成形できる特徴をもつことを立証した。

学位論文審査結果の要旨

当該学位論文に関し、平成20年1月29日に第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関連資料について詳細に検討した。2月6日の口頭発表後、第2回審査委員会を開催し、慎重に審議した結果以下の通り判定した。

本論文は、金属粉体層にレーザを照射して焼結積層させる工程と、その途中で切削加工を施す工程を組み合わせた複合加工法を開発し、その加工現象を明らかにして改善を図るとともに、射出成形金型への適用を図ったものである。まず従来レーザの焼結積層だけでは、十分な表面仕上げを得られなかったものに切削工程を導入することで複雑な形状のもので良質な表面仕上げを得られる画期的な手法を開発している。レーザによる焼結条件を明らかにするとともに、積層時の余剰焼結部形成メカニズムを分析し、余剰焼結量を減らして切削時間を短縮する方法を考案している。また切削後の積層側面に段差が生じる問題の原因を分析し、段差を解消する新しい切削プロセスを考案している。さらにこの金属光造形法を射出成形金型に適用して、金型内に任意の冷却水路を配置し、成形精度の向上と冷却時間の短縮を実現している。

以上より本論文は金属光造形複合加工法を生み出すとともに、その現象解明と加工技術の改善を図り、有用な適用を実証しており、博士(工学)の学位に値するものと判定した。