

# Abstract

Additive manufacturing (AM) has become a new option for the fabrication of metallic parts in industry. However, there are still some limitations for this application, especially the unfavourable final shape and undesired macroscopic properties of metallic parts built in AM systems. The distortion or crack due to the residual stress of these parts leads usually to severe problems for some kinds of metal AM technology. In an AM system, the final quality of a metallic part depends on many process parameters, which are normally optimized by a series of experiments on AM machines. In order to reduce the considerable time consumption and financial expense of AM experiments, the numerical simulation dedicated to AM process is a prospective alternative for metallic part fabricated by additive manufacturing. Because of the multi-scale character in AM process and the complex geometrical structures of parts, most of the academic researches in AM simulation concentrated on the microscopic melting pool. Consequently, the macroscopic simulation for the AM process of a metallic part becomes a current focus in this domain.

In this thesis, we first study the pre-processing of AM simulation on Finite Element Method (FEM). The process of additive manufacturing is a multi-physics problem of coupled fields (thermal, mechanical, and metallurgical fields). The macroscopic simulation is conducted in two different levels with some special pre-processing work. For the layer level, the reconstruction of 3D model is conducted from the scan path file of AM machine, based on the inverse manipulation of offsetting-clipping algorithm. For the part level, the 3D model from CAD is reconstructed into a voxel-based mesh, which is convenient for a part with complex geometry. The residual stress of a part is analysed under different preheat temperatures and different process parameters. These simulations imply the potential technique of reducing residual stress by the optimisation of process parameters, instead of the traditional way by increasing preheat temperature.

Based on the FEM simulation platform above, two simulations at line level are also studied in this thesis, aiming at the relation between the AM process and part's final quality. These examples demonstrate the feasibility of using macroscopic simulations to improve the quality control during the AM process. In the first task, dataset of heating parameters and residual stress are generated by AM simulation. The correlation between them is studied by using some regression algorithm, such as artificial neural network. In the second task, a PID controller for power-temperature feedback loop is integrated into AM process simulation and the PID auto-tuning is numerically investigated instead of using AM machine. Both of the two tasks show the important role of AM macroscopic process simulation, which may replace or combine with the numerous trial and error of experiments in metal additive manufacturing.

**KEYWORDS:** Additive manufacturing, Numerical simulation, Finite element method, Multiphysics, Residual stress, Voxelization, PID controller, Regression, Artificial neural network

# Résumé

La fabrication additive (FA) est devenue une nouvelle alternative pour la fabrication des pièces dans l'industrie. Cependant, il existe encore des limites pour ce procédé, en particulier la forme finale défavorable et les propriétés macroscopiques indésirables des pièces métalliques construites dans les systèmes de FA. La distorsion ou la fissure due à la contrainte résiduelle de ces pièces pose généralement de graves problèmes pour certains types de technologie de la FA métallique. Dans un système de FA, la qualité finale d'une pièce métallique dépend de nombreux paramètres de procédé, qui sont normalement optimisés par une série d'expériences sur des machines de FA. Afin de réduire la consommation de temps et le coût financier qui sont considérables dans des expériences de FA, la simulation numérique dédiée au procédé de FA est une alternative potentielle pour les pièces métalliques fabriquées par la fabrication additive. En raison du caractère multi-échelle des procédés de FA et des structures géométriquement complexes, la plupart des recherches académiques qui travaillent sur la simulation de FA se sont concentrées sur le bain de fusion microscopique. Par conséquent, la simulation macroscopique pour le procédé de FA d'une pièce métallique devient actuellement une priorité dans ce domaine.

Dans cette thèse, nous étudions d'abord le pré-processing de la simulation de FA par la méthode des éléments finis (FEM). Le procédé de fabrication additive est un phénomène multi-physique des champs couplés (champs thermique, mécanique et métallurgique). La simulation macroscopique est réalisée à deux niveaux différents. Au niveau de la couche, la reconstruction du modèle 3D est effectuée à partir du fichier de chemin de balayage de la machine de FA, basée sur la manipulation inverse de l'algorithme d'offsetting-clipping. Au niveau de la pièce, le modèle 3D de CAO est reconstruit dans un maillage des voxels, ce qui est pratique pour une pièce avec une géométrie complexe. Avec les températures de préchauffage différentes et les paramètres du procédé différents, la contrainte résiduelle d'une pièce est analysée. Ces simulations impliquent la technique potentielle pour réduire la contrainte résiduelle par l'optimisation des paramètres du procédé, au lieu de moyens traditionnels par augmenter la température de préchauffage.

Basées sur la plateforme de simulation de FEM ci-dessus, deux simulations au niveau de ligne sont également étudiées dans cette thèse, visant à la relation entre le procédé de FA et la qualité finale de la pièce. Ces exemples démontrent la possibilité d'utiliser des simulations macroscopiques pour améliorer le contrôle de la qualité pendant le procédé de FA. Dans la première tâche, l'ensemble de données des paramètres de chauffage et la contrainte résiduelle sont générés par la simulation de FA. La corrélation entre eux est étudiée en utilisant des algorithmes de régression, tel que le réseau neuronal artificiel. Dans la deuxième tâche, un contrôleur de PID pour la boucle de rétroaction puissance-température est intégré dans la simulation de procédé de FA et l'auto-réglage de PID est numériquement étudié au lieu d'utiliser la machine de FA. Les deux tâches montrent le rôle important de la simulation de procédé macroscopique de FA, qui peut remplacer ou combiner les nombreuses expériences essai-erreur dans la fabrication additive métallique.

---

**MOTS CLÉS:** Fabrication additive, simulation numérique, méthode des éléments finis, Multiphysique, Contrainte résiduelle, Voxélisation, Régulateur PID, Régression, Réseau neuronal artificiel