

氏 名	く ば き たかし 久 保 木 孝
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	論 工 博 第 3588 号
学位授与の日付	平 成 13 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学 位 論 文 題 目	金属の冷間抽伸加工における残留応力抑制パスとダイス設計に関する研究

論文調査委員	(主 査) 教 授 久 保 愛 三	教 授 島	進	教 授 井 上 達 雄
--------	----------------------	-------	---	-------------

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、産業上活用範囲の広い金属の冷間抽伸加工を対象にとりあげて、加工後の寸法精度に影響を及ぼす残留応力の発生メカニズムを、数値解析と実験とによって明らかにし、その抑制方法を加工工程および工具デザインの形で提案した研究開発の結果をまとめたものであり、次の10章からなっている。

第1章は序論であり、金属材の冷間抽伸技術の産業上の位置づけ、残留応力のもたらす問題点、これらに関する従来の研究、本論文の全体構成について述べている。

第2章では、従来の研究では検討されていない多パス抽伸において、抽伸条件が残留応力分布に及ぼす影響を抽伸実験と残留応力測定によって調査している。抽伸加工工程の最終パスにおける塑性加工断面積減少率（以下、減面率）が同じであれば、最終パス以前の履歴には関係なく残留応力分布は等しくなり、残留応力を決定する第1要因は最終パスの減面率にあることを見いだして、最終パス減面率が小さくなると残留応力が低減する傾向にあることを示している。

第3章では、有限要素法を用いた数値解析により、第2章の抽伸実験結果の妥当性を確認している。さらに、応力—ひずみ状態の遷移図を用いて残留応力が発生するメカニズムを明らかにし、その上に立って、加工最終段に軽減面率抽伸工程を付与することによって残留応力が低減することを発見し、この原理に基づく残留応力制御加工のメカニズムを提唱している。この加工法の原理は、工具から被加工材の内側に変形が伝播する他の冷間加工にも適用可能と考えられるものである。

第4章では、第3章で提案した残留応力を低減するためのパス設計に関する基本的考え方に基づき、最終段に極低減面率パスを配置する「スキンプス抽伸技術」を提案し、数値解析を用いて最終スキンプス減面率の適正な範囲を定量的に特定している。その最適範囲は、極限加工の領域に属し、例えば、中炭素鋼 S45C を対象とする場合には、減面率で0.5—2%である。さらに、実験によってスキンプス抽伸が残留応力低減に有効であることを実証している。この残留応力低減効果は、軸方向残留応力だけではなく、他の残留応力成分の低減にも有効である。

第5章では、スキンプス抽伸技術を組み込んだ工程設計を実施するために、被加工材に働く後方張力が残留応力に及ぼす影響について検討している。後方張力が残留応力に及ぼす影響は極めて小さいことを明らかにし、「スキンプス抽伸技術の適用法は自由で、例えば、多パス抽伸後に独立でスキンプスしても良い。また、パス間に張力が発生するタンデムパスとしても良い。」との結論を得、工程設計を最適化するためのスキンプス活用法の指針を示している。

第6章では、スキンプス抽伸技術の基本的考え方、すなわち、「塑性変形の最終段で極軽微な加工を加えることによって、残留応力を低減できる。」をダイス設計に反映し、ダイスの後半に単位長さ当たりの加工量が極軽微となる2段テーパダイスを提案している。ダイス長さを実用化可能な範囲に設定することを念頭に、弾塑性有限要素解析を用いて、残留応力低減可能な2段テーパダイスの形状を最適設計している。中炭素鋼 S45C を対象とする場合、最適形状は2段目テーパ角度 $\theta_b = 0.5^\circ$ 、2段目テーパ部減面率 $R_{db} = 1.3\%$ である。

第7章では、中炭素鋼以外の材料に対しても、開発した残留応力低減技術を適用できるようにするため、被加工材の機械特性が残留応力に及ぼす影響を検討し、被加工材の残留応力レベルは、初期降伏応力と加工硬化とを考慮した変形抵抗に依

存することを明らかにしている。さらに、材料に応じた残留応力低減技術の適用法を検討し、数値実験式を用いて、スキンプラス抽伸時の減面率、および、2段テーパダイスの2段目テーパ部減面率の最適値を材料特性から算出する方法を提案している。

第8章では、スキンプラス抽伸法、2段テーパダイス法の特徴、実工程に適用する場合の技術的課題、それら課題に対する対策について述べ、その検討の上で、本研究で開発した残留応力低減技術を実工程に適用する状況、ならびに、工具のデザイン法との関係をフローチャートに示している。

第9章では、スキンプラス抽伸法、2段テーパダイス法による残留応力低減の効果を確認するため、実製品を想定した機械加工を抽伸加工した材料に施し、その時、付随的に発生する曲げ変形を測定して、開発した残留応力低減のためのスキンプラス法のもたらす曲がり抑制効果を実証している。また、抽伸加工時の総減面率が等しい条件下で減面率配分を変更することによって、残留応力を制御し、抽伸加工後の成品の機械特性を変化させ得ることを示している。

第10章は結論であり、本論文で得られた結果について要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、金属冷間加工分野における成品の寸法精度、ならびに、冷間加工素材を機械加工して作られる製品の寸法・形状精度への厳しい要求に対処する技術を開発するため、多くの製品の素材となる棒鋼・線材の冷間抽伸加工を取りあげて、寸法・形状精度に極めて大きな影響を及ぼす冷間加工時残留応力の抑制方法を検討し、その結果を加工工程と工具のデザインに反映する研究開発の成果としてまとめたものである。すなわち、

1. 塑性加工断面積減少率（以下、減面率）が同じであれば、冷間抽伸加工の最終パス以前の履歴には関係なく残留応力分布はほぼ等しくなり、また、加工最終段に軽減面率抽伸工程を付与することによって残留応力が低減することを解析的、実験的に見いだした。
2. この原理に基づく残留応力制御加工のメカニズム「スキンプラス抽伸技術」を提案し、それを工業的実用生産に結びつける加工工程を構築し、さらに、金属冷間抽伸加工工程設計を最適化するためのスキンプラス活用法の指針を与えた。
3. これらの知見をダイス設計に反映して、ダイスの後半に単位長さ当たりの加工量が極軽微となる2段テーパダイスを提案した。
4. また、被加工材の機械的特性が残留応力に及ぼす影響は、初期降伏応力と加工硬化とを考慮した変形抵抗に依存することを示し、材料に応じた残留応力低減技術の適用法を検討して、スキンプラス抽伸の減面率、および、2段テーパダイスの2段目テーパ部減面率の最適値を材料特性から算出する方法を提案した。

すなわち、従来は問題とされていなかった極低減面率の領域までを含めて冷間抽伸加工の解析を行い、残留応力発生メカニズムを解明して、極限加工の領域に属する範囲に残留応力低減のための最適解の存在することを定量的に明確化し、それを実験的に検証した。また、多様な製造工程に応じて、残留応力低減のためのデザインの基本コンセプトに複数の選択肢と、そのおのおのについての限界のあることを明らかにし、工程設計と工具幾何形状設計の具体的指針を示した。

冷間抽伸を例に取って残留応力発生と抑制のメカニズムを解明したこの考え方は、複雑な加工経路をたどりながら行われる、他の冷間加工における残留応力抑制問題にも応用可能であり、産業上の展開の可能性は極めて広いと考えられる。

以上要するに本論文は、産業上活用範囲の広い金属冷間抽伸加工を対象に、加工後の寸法精度に影響を及ぼす残留応力の挙動と発生メカニズムを数値解析と実験によって明らかにし、その抑制方法を工程および工具デザインの形で提案したものであり、その成果は、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成13年2月14日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。