

大型軸材の鍛造における内部空隙圧着に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、発電プラントの出力は発電効率におけるスケールメリットを追求して著しく大型化する傾向にあり、それとともに使用されるロータ軸材の胴径も増大してきた。特に最近の改良沸騰水型(A-BWR)原子力発電プラントの出力は、1350MWにも のぼり、使用される一体型低圧タービンロータ軸材は、鍛造打上げ胴径が2900mm、重量で約350tonもの超大型軸材であり、600ton鋼塊を用いて製造される。このように打上げ胴径が大きくなると、鍛造工程での所要荷重が加速的に増大するため、既存の鍛造設備を用いて鋼塊の軸心部まで十分な鍛造効果を浸透させ、内部のザクと呼ばれる不回避的な空隙状欠陥を完全に消滅させることは、プレス容量の制約などから非常に難しい課題となる。したがって、この工程では据込みや鍛伸などの数多くの鍛造作業と再加熱の繰返しが余儀なくされるばかりでなく、未圧着空隙残存の危険性さえも懸念される。また数十日にもおよぶ工期の長期化や加熱費の増加、および材料歩留りの悪化を招くことから製造コストの大幅な上昇が深刻な問題となっていた。

本研究は、このような低圧タービン用ロータ軸材の超大型化に対応するため製品の大きさやプレス設備の容量を考慮して、大型鋼塊に内在する空隙の消滅を効果的に達成できる大型軸材の鍛造方法の開発を目的として実施されたものである。以下に、本研究で得られた結果をまとめて示す。

まず、本研究で解決すべき課題を明らかにするため、近年の大型軸材の背景を紹介するとともに、これまでの大型軸材鍛造についての研究を顧み、本研究の目的と内容を概説した。

本論では、最初に軸材の鍛造工程における大型鋼塊の内部空隙の閉鎖から圧着に至る消滅過程と、それを支配する応力やひずみとの関係を定量的に把握する目的で熱間鍛造実験と有限要素法解析を実施し、以下の結論を得た。

- (1) 実用鋼を用いた種々の形態の熱間鍛造実験と3次元有限要素法解析を行なって、素材内部の球状空隙の体積減少率を、空隙の周りに作用する相当ひずみと静水圧積分とにより直接計算できる空隙閉鎖特性評価式を重回帰分析により導いた。
- (2) 人工空隙を内在させた素材や微小空隙を発生させた小型鋼塊の熱間鍛造実験と有限要素法解析を実施して、空隙閉鎖後の圧着が完了する応力の限界条件として、材料の変形抵抗の約0.8以上の静水圧応力比のレベルを設定した。

前述の結果をもとに、素材の断面形状や金敷の形状といった形状因子の最適化のために、2次元的なモデル実験をはじめとして、熱間鍛造実験および有限要素法解析による直接的な3次元解析を実施し、以下の結論を得た。

- (1) プラスティシンや多孔質焼結銅の平面ひずみ鍛造実験ではV金敷と八角形断面素材の組み合わせの空隙閉鎖効果が優れていることがわかった。また、従来型平金敷と円形断面素材の組み合わせでも圧下率を十分に取ればよいことも明らかにした。
- (2) 有限要素法による3次元解析により各形状因子の素材内部応力やひずみの挙動への影響を明らかにし、空隙閉鎖特性評価式を用いて各鍛伸法の比較を行なった。そ

の結果、広幅の従来型平金敷に替って押込み型平金敷を提案し、この金敷により鍛伸する場合でも比較的低い所要荷重で効果的な空隙閉鎖が可能であることを示した。また、V金敷による強圧下鍛伸は空隙閉鎖に必ずしも有効でないことをも指摘した。

- (3) 押込み型平金敷鍛伸法の有用性を検証するために、新しく開発した等温鍛造試験装置を用いて高い再現精度の熱間鍛造実験を実施した。その結果、押込み型平金敷、すなわち金敷幅比と金敷長さ比がともに0.5の上下対称な平金敷を用いる鍛伸法が超大型軸材の内部空隙閉鎖のために有効であることを実証した。また、この押込み型平金敷鍛伸法では軸方向伸びが抑えられるため据込み工程の省略が期待できることや定荷重負荷試験により圧下の可能性を予測し、この鍛伸法が総合的な観点から最適であると判断した。

次に、空隙の閉鎖後の圧着成立に焦点を絞り、つねに安定した圧着効果を得るため静水圧応力の向上策について熱間鍛造実験および有限要素法解析により行なった。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 提案した押込み型平金敷の空隙圧着効果が必ずしも十分でないことを熱間鍛造した素材の人工空隙圧着部の引張試験により確認した。そこで、金敷の摩擦により素材の変形を拘束するため下金敷のみを大きくした上下非対称金敷を用いて軸心部での圧縮静水圧応力の増大効果を探ったが、素材内部の相当ひずみは大きく変化するものの、静水圧応力比はいずれの鍛伸法でも圧着限界応力条件を満足せず、安定した空隙圧着が得られないことを指摘した。
- (2) 温間鍛錬法の空隙圧着効果を定量的に明らかにするため、予冷却により温度勾配を付与した素材の鍛伸の有限要素法解析を実施し、この鍛伸法では素材予冷却時間の増加による軸心部でのひずみの増大は小さいが、静水圧応力比が大幅に上昇するため、低い圧下率でも空隙閉鎖を著しく促進するのはもとより、空隙圧着条件を満足できる可能性が高いことも示唆された。
- (3) 予冷却素材鍛造法において形状因子の最適化により安定した空隙圧着効果を得るための検討を行ない、正方形断面素材では円形断面素材より10%程度高い静水圧応力比が得られることを確認した。
- (4) 素材断面形状を正方形から矩形化させることにより、押込み型平金敷特有のマンネスマン応力打消し効果が増大するため、軸心部静水圧応力比が飛躍的に上昇するという極めて重要な知見を見出した。また、このように素材高さを一定にして縦横比を増加させるといった断面矩形化は、素材断面積の大幅な増加を可能とすることから、予冷却素材鍛造法の超大型軸材への適用が容易になることも示した。
- (5) 有限要素法解析で得られた以上のような予冷却素材鍛造法の空隙圧着効果の高さを実用鋼による熱間鍛造実験により実証するとともに、安定した空隙圧着が得られるための条件を見直し、静水圧応力比0.9以上の応力条件にひずみ効果を加え再設定した。

最後に、これらの知見をもとに軸材の最適な鍛造工程を設計するための方法を示した。また、本研究の成果を実際の超大型の一体型低圧タービン用ロータ軸材の鍛造工程に適用した事例と、他の大型軸材の鍛造工程への波及効果を紹介した。

以上、本研究の成果である押込み型平金敷鍛伸法や矩形断面素材の予冷却鍛造法は、600ton鋼塊を用いた超大型の一体型低圧ロータ軸材の鍛造工程における内部空隙の確実な圧着を可能にし、安定した超大型軸材の供給体制の確立のために重要な一役を担っている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 石 川 博 將
副 査 教 授 鶴 飼 隆 好
副 査 教 授 野 口 徹
副 査 教 授 工 藤 昌 行

学位論文題名

大型軸材の鍛造における内部空隙圧着に関する研究

近年、火力および原子力発電プラントの発電機や蒸気タービンに用いられる軸材は、最高毎分3000または3600回転の厳しい条件で使用されることから、これに対応できる高強度および高靱性などの優れた内部品質が要求されている。しかも、近年の発電プラントは発電効率におけるスケールメリットを追求して著しく大型化する傾向にあり、それとともに使用されるロータ軸材の胴径も増大してきている。このように打上げ胴径が大きくなると、鍛造工程での所要荷重が加速的に増大するため、既存の鍛造設備を用いて鋼塊の軸心部まで十分な鍛造効果を浸透させ、内部のザクと呼ばれる不回避的な空隙状欠陥を完全に消滅させることは、プレス容量の制約などから非常に難しい課題となっている。もし、これらの微小空隙が製品に残留すると使用中に致命的な破壊事故を引き起こす原因となる。そのため軸材の鍛錬行程において鋼塊の軸心部まで十分なひずみや圧縮応力を付与することにより、粗大な鑄造組織を緻密化するとともに、この空隙欠陥を確実に閉鎖圧着させ、健全な内部性状を得ることが絶対的必要条件である。

本研究は、大型鋼塊に内在する空隙の消滅を効果的に達成できる大型軸材の鍛造方法の開発を目的として実施されたものである。本研究で得られた成果は多くの大型ロータ軸材の鍛造行程に適用され、工期短縮や材料歩留まりの改善に効果をあげている。特に、新しく提案している正方形押し込み型平金敷による鍛伸法は600ton鋼塊を用いた超大型低圧ロータ軸材の鍛錬行程において大きな改善をもたらした。また、提案した空隙閉鎖特性評価式を用いた鍛造行程の最適化技術も広範囲なサイズの軸材の製造コストの低減や省エネに貢献している。本論文は全6章から構成されている。

第1章は序論であり、これまでの大型軸材鍛造についての研究を顧み、本研究の意義を述べている。

第2章では、空隙の閉鎖圧着と応力ひずみの関係に定量的解明を試みるため、熱間鍛造実験と有限要素法解析を行っている。素材内部の球状空隙の体積減少率を、空隙の周りに作用する相当ひずみと静水圧積分とにより直接計算できる空隙閉鎖特性評価式を重回帰分析により導き、空隙閉鎖後の圧着が完了する応力の限界条件とし

て、材料の変形抵抗の約0.8以上の静水圧応力比のレベルを設定できることを明らかにしている。

第3章では、素材の断面形状や金敷の形状といった形状因子の最適化をするため、プラスチックや多孔質焼結銅の平面ひずみ鍛造実験を行うとともに有限要素法による3次元解析により各形状因子の素材内部応力やひずみの挙動への影響を明らかにし、空隙閉鎖特性評価式を用いて各鍛伸法の比較を行なっている。その結果、広幅の従来型平金敷に替って押し込み型平金敷を提案し、この金敷により鍛伸する場合でも比較的低い所要荷重で効果的な空隙閉鎖が可能であることを示している。さらに、押し込み型平金敷鍛伸法の有用性を検証するために、新しく開発した等温鍛造試験装置を用いて高い再現精度の熱間鍛造実験を行っている。その結果、押し込み型平金敷が超大型軸材の内部空隙閉鎖のために有効であることを実証している。

第4章では、空隙の閉鎖後の圧着成立に焦点を絞り、つねに安定した圧着効果を得るため静水圧応力の向上策について熱間鍛造実験および有限要素法解析により行なっている。すなわち、温間鍛錬法の空隙圧着効果を定量的に明らかにするため、予冷却により温度勾配を付与した素材の鍛伸の有限要素法解析を実施し、この鍛伸法では素材予冷却時間の増加による軸心部でのひずみの増大は小さいが、静水圧応力比が大幅に上昇するため、低い圧下率でも空隙閉鎖を著しく促進することを明らかにしている。また、予冷却素材鍛造法において形状因子の最適化により安定した空隙圧着効果を得るための検討を行い、素材断面形状を正方形から矩形化させることにより、押し込み型平金敷特有のマンネスマン応力打消し効果が増大し、軸心部静水圧応力比が飛躍的に上昇するという極めて重要な知見を見出している。また、このような断面矩形化は、素材断面積の大幅な増加を可能とすることから、予冷却素材鍛造法の超大型軸材への適用が容易になることも示している。有限要素法解析で得られた以上のような予冷却素材鍛造法の空隙圧着効果の高さを実用鋼による熱間鍛造実験により実証するとともに、安定した空隙圧着が得られるための条件を見直し、静水圧応力比0.9以上の応力条件にひずみ効果を加え再設定している。

第5章では、本研究の成果を実際の超大型の一体型低圧タービン用ロータ軸材の鍛造工程に適用している。

第6章は、結論であり、本研究で得られた主要な新知見と成果をまとめ、その展望が述べられている。

これを要するに著者は、超大型一体型低圧タービンロータ軸材の鍛造における内部空隙圧着挙動に関する有益な新知見に基づいて、押し込み型平金敷き鍛造法や矩形断面素材の予冷却鍛造法などの新たな提案をしており、塑性加工学の進歩に寄与するところ大なるものがある。

よって、著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。