

氏名（本籍）	李 浩 杰（中華人民共和国）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第 435 号
学位授与日付	平成 25 年 3 月 25 日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	冷間鍛造金型用超硬合金の機械的特性に関する研究 (Mechanical properties of cemented carbide for cold-forging die)
学位論文審査委員	(主査) 教授 服部 敏雄 (副査) 教授 植松 美彦 教授 王 志剛

論文内容の要旨

自動車産業で用いられる各種機能部品は、長い間、鋳造や熱間鍛造で形作り、切削加工により最終形状に仕上げる工程で製造されてきた。最近、冷間鍛造を駆使し、切削加工レスで複雑形状部品の製造が可能となりつつあり、部品製造の大幅な省エネルギーや環境保全に大きく貢献している。冷間鍛造は歩留まりが高く、成形品の寸法精度に優れるほか、材料の加工硬化を利用した高強度かも可能であり、今後各種部品製造の要の技術になると予想される。しかしながら、材料の加工硬化により金型に大きな負荷がかかるため、金型を取り巻く環境は非常に厳しいものとなる。さらに最近の製品設計は、単に精密化のみに留まらず、製品コストを含んだトータルプロセスでの最適な生産方法への追求がなされており、鍛造技術においてはニアネットシェイプ化やネットシェイプ(仕上がり形状)化などの合理的な加工技術の提案が求められている。そのため、金型にかかる負荷はさらに高くなってきており、鍛造品の精密化に伴って、製造品原価に占める金型費の割合もますます大きくなっている。このような状況の中、冷間鍛造法が素形材加工の中で重要な役割を果たしていくためには、高精密化への対応や金型加工費の低減とともに金型寿命向上による金型費の低減が重要課題となっている。

冷間鍛造金型には超硬合金が多く使用されており、特に鍛造成形される製品に接するところの大部分に超硬合金が使われている。超硬合金は、高速度鋼に比べ弾性係数が2~3倍、熱伝導率も数倍程度高く熱膨張係数も低いため、加工力や加工熱による寸法変化が小さい。また高硬度のため、耐摩耗性に優れており焼付きが少なく、さらに圧縮強さが高いといった長所を持っている。一方、引張強さ、靱性が低いという短所を持っている。冷間鍛造においては加工圧力が高く、金型にかかる引張応力もかなり大きくなるため、金型は摩耗、疲労破壊および早期の割れで寿命に至る。早期の割れをなくし、疲労破壊の寿命を伸ばして摩耗モードで寿命を迎えることが理想とされており、現下の業界においては疲労破壊による寿命の向上に精力が注がれている。

本研究は超硬合金の疲労破壊を対象に超硬合金の機械的特性に関して3つの研究を行ってきた。

1. 冷間鍛造工程中の金型にかかる引張応力の大きさを抑えるために、金型を補強する必要がある。補強法としては、超硬インサートを鋼製リングに圧入あるいは焼ばめすることによりインサートに予圧縮応力を与え、鍛造による引張応力の大きさを低下させる手法が最も一般的である。この予圧縮応力の値は一般的には超硬インサートを弾性体として厚肉円筒理論を用いて算出されている。近年、冷間鍛造製品のネットシェイプが求められており、金型にかかる負荷は厳しくなっている。超硬インサートの補強にはより大きいしめ代あるいは多重リングが用いられている。そのため、予圧縮応力によって超硬インサートが塑性変形し、予圧縮応力をより正確に算出するためには超硬合金の圧縮応力による塑性変形特性を把握する必要がある。本研究では、超硬合金の圧縮特性を精度よく求め、圧縮応力下での塑性変形特性を硬さ試験および合金組織により求める手法を提案した。

2. 冷間鍛造金型の破壊部位と量産中の各段階における製品側に転写された模様を観察した結果から判断すると、金型には比較的早期にき裂が生成されており、金型寿命はき裂の進展、合体に支配されている。こうした破壊プロセスには金型材料の破壊じん性が強く関与すると考えられる。超硬合金の破壊じん性については、抗折力の他にビッカース硬さ試験による破壊じん性値がよく用いられるが、比較的軟質の鍛造金型用超硬合金への適用には限界があると思われる。本研究では、予き裂法を用いて、冷間鍛造金型用超硬合金の破壊じん性値を求める手法を提案した。

3. 超硬合金の疲労破壊については引張圧縮疲労試験等を用いて多くの研究成果が報告されている。最近では、こういった疲労試験の結果とFEM解析による金型の応力解析の結果とを組み合わせ、金型寿命の予測方法が提案されている。さらに最大主応力の振幅を最小化する応力低減構造工具を用いることにより工具寿命の伸長が達成されたことが報告されている。また、冷間押し出し用金型の疲労き裂の発生・成長の統一的

解析においても、き裂は引張主応力に支配されることが明らかとなっている。本研究では、押出し一据込み加工用金型を対象に、実鍛造による金型の疲労試験を行い、多軸応力下での金型の疲労挙動を検討した、冷間鍛造金型の寿命予測に新たな手法を試みた。

論文審査結果の要旨

冷間鍛造は、各種精密機能部品の製造技術として広く用いられている。冷間鍛造用金型は鍛造荷重の最小化を基準に設計されている。しかし、鍛造荷重は金型構造・形状に鈍感で、最小荷重基準のみでは金型構造・形状の最適化はできない。現状では経験に基づく設計は一般的である。一方、有限要素解析法の発達に伴い、鍛造時の金型応力状態が算出できるようになり、金型応力の最小値を設計基準に用いる事例は増えている。しかし、実際の鍛造用金型の製造工程および鍛造工程は複雑で、有限要素解析法の計算結果と実加工における金型応力との相関は不明なため、成形因子、金型構造・形状因子の影響を定量的に見積もることが不可能で、金型寿命を予測できない状況が続いている。

冷間鍛造金型には超硬合金が多用されている。超硬合金は、鋼系の金型材料に比べて圧縮強度や耐摩耗性が高く、ヤング率が2倍以上、熱伝導率が約2倍、熱膨張係数が約1/2程度となっているため、加工力や温度上昇による金型の弾性変形が小さく、鍛造品の形状精度が得られやすい利点を持っている。しかし、超硬合金は他の工具材料に比べてじん性が低く、圧縮強度に比べて引張強さが低いという短所を持っている。

冷間鍛造においては加工圧力が高く、金型にかかる引張応力もかなり大きくなるため、金型は主に疲労破壊で寿命に至る。

本研究は、超硬金型のき裂起点位置における応力を実測し、その実測値と有限要素解析法の解析値との相関及び疲労破壊の $S-N$ 線図を解明し、金型設計基準の基盤となる知見を得ることを目的とした。

有限要素解析法を用いて、補強リングによる金型の予圧縮応力が精確に算出するために、超硬合金の圧縮応力による塑性変形特性を把握する必要がある。本研究では、超硬合金の圧縮特性を精度よく求め、圧縮応力下での塑性変形特性を硬さ試験および合金組織により求める手法を提案した。その結果、圧縮応力 σ と塑性ひずみ ε_p の関係は $\sigma = (A - C\varepsilon_p)\varepsilon_p^B$ で表現でき、係数 A 、 C はロックウェル硬さ HRA の2次関数で算出でき、係数 B は0.33であることがわかった。

次に金型の疲労寿命を支配する超硬合金の破壊じん性の測定法を検討した。その結果、ロックウェル硬さ HRA が86以下を主流とする冷間鍛造金型用超硬材の破壊じん性値の測定法としては、従来のビッカース硬さ試験法では精度が不十分で、新たに提案した予き裂法が精確であることがわかった。破壊じん性値 K_{IC} は硬さ HRA との間に以下の相関関係が認められ、硬さ HRA から破壊じん性を求める方法を明らかにした。

$$K_{IC} \times \exp[(HRA - 81.17)^2 / 86.86] = 23.13 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

超硬合金の破壊じん性を検討した結果、超硬合金金型の巨視破壊を引き起こす引張応力の限界は160MPa程度であり、この限界応力は超硬合金の引張強さが大きいほど低下することがわかった。

さらに、実鍛造加工による超硬合金金型の疲労特性を調べた。その結果、有限要素法解析によって、実加工中における金型の疲労き裂起点の応力-ひずみ状況を予測することは可能であること、金型の疲労破壊起点は最大主応力の集中するところにあること、多軸応力状態にある金型の寿命予測には、応力振幅で整理したカーブに比べ、応力集中する部位のひずみ振幅を用いて整理したカーブの方が適切であることがわかった。

本研究は、冷間鍛造金型用超硬合金の機械的特性を検討したものであり、圧縮応力下での塑性変形特性、破壊じん性、疲労挙動について貴重なデータを提供すると同時に、これらの特性を明らかにするための簡便で実用的な試験法を提案している。さらに、冷間鍛造における超硬合金製金型の疲労挙動を検討し、疲労特性を明らかにしている。これらの成果は学術的、工学的に優れており、学位論文に値するものであると判定された。

最終試験結果の要旨

学位論文の内容および関連する専門分野に関する口頭試問を行った結果、学位申請者は学位授与に相応した高い学力を有することが認められたので、最終試験を合格と判定した。