論説

Paper

鍛造用金型の損傷評価技術に関する研究

岡島琢磨^{*1}, 吉田広明^{*2}, 五十川幸宏^{*2}

Development of Die Life Evaluation Method on Forging

Takuma Okajima, Hiroaki Yoshida, and Sachihiro Isogawa

Synopsis

Recently, warm forging process takes the place of hot forging process gradually, for example, in manufacturing CVJ. However, die damage is serious problem in warm forging process with large expansion of surface of work piece, because it is not inquired enough. Though trying to extend die life by means of FEM analysis, it dose not play an enough role, because there is few method to evaluate die damage in warm forging condition. The test of Pin-on-disk and Ogoshi wear out can not be also applied to the method of die damage of warm forging process.

In this study, we have established new test which could systematically evaluate die damage in warm forging process. And we have examined forging condition in warm forging process about quality of die and cooling system of die. This test aims at utilizing for establishment of simulation engineering of die damage prediction and quantitative evaluation method.

1. 緒 言

鍛造加工における精密化指向は、年々高まりを見せており、コストダウンとともに今後の長期的なトレンドとなるものと考えられる。この流れの中で、熱間鍛造から温間鍛造への転換がゆっくりと進んでおり、等速ジョイントやベベルギアでは、温間鍛造化が浸透しつつある。この温間鍛造は、熱間鍛造よりも寸法精度に優れることに加え、低温オーステナイト域で鍛造することによって、微細で延性に富んだフェライト・パーライト組織を得ることができ、鍛造後の焼なましなどの省略が可能となる特徴を有している。

温間鍛造における最大の問題は型材の材料特性から期待される金型寿命が実際の金型において得られていないことである。その理由として、温間鍛造の歴史が熱間鍛造や冷間鍛造に比べて浅いために、金型損傷のメカニズムがほとんど解明されていないことが挙げられる。実際、温間鍛造の型設計においては、温間鍛造に特有の現象を十分理解した上での型設計がなされているとはいいい難く、金型の強度を重視した冷間鍛造と金型の高温化対策を重視した

熱間鍛造の設計思想が交錯しているのが現状である。近年、FEM 解析を用いたシミュレーション技術による金型寿命改善の取組もなされるようになってきたが、温間鍛造のシミュレーションに必要なデータベースが未整備であり、また、シミュレーションによる予測結果を確認するための有効な評価試験もほとんど無いのが現状である^{1)~6)}。

そこで本研究では、温間鍛造における金型損傷を系統的に評価できる試験方法を新たに構築し、温間鍛造に最適の型材、鍛造条件に関する検討を行った。本評価技術は、最終的には、金型損傷予測シミュレーション技術の構築のための活用を目的とし、定量的な評価が可能となる評価手法の基礎技術となるものである。

2. 実験方法

2.1 試験方法

本評価試験では、多段工程の温間鍛造を想定して、Fig.1 に示す大同機械製 NS5-10PL パーツフォーマーによる 2 工程鍛造を行った。パンチ材料にはマトリックスハイス鋼 MH85(0.6C-4.5Cr-3.8Mo-1.5W-1V) と MH86(0.6C-4.2Cr-4.8Mo-2.5W-1V)、さらに熱間工具鋼 SKD61 の改良鋼であ

2005 年 3 月 14 日受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Research & Development Lab., Daido Steel Co., Ltd)

* 2 大同特殊鋼(株)技術開発研究所, 工博 (Dr., Eng., Research and Development Lab., Daido Steel Co., Ltd)

る SKD61* (0.4C-5Cr-1.5Mo-1V) と DH71(0.4C-1Mn-2Mo-1V) の4種類を用意し、型材の違いによる損傷レベルの相違を比較できるようにした。これらの供試材の調質条件とヴィッカース硬さを Table 1 に示す。ワーク材料には S53C を用い、加熱温度 1093 K、鍛造速度 85 spm とした。潤滑剤は硫黄系添加剤を 20 % 含有した粘度 135 mm²/s の鍛造用潤滑油を用い、流量 4.4 L/min で銅パイプ 4 本を用いてパンチのテーパ部から先端にかけて吹きかけられるようにした。この潤滑剤は鍛造時に加熱されたパンチ表面を冷却する役割も持っている。本試験は 100 ショットごとに鍛造材をピックアップしながら 4000 ショット行った。試験後、500 ショットまでは 100 ショットごとに、それ以降は 1000 ショットごとに鍛造材ヘシリコン樹脂埋めを行い、型取りしたパンチ形状のプロファイルから鍛造ショット数の増加に伴うパンチ先端 R 部とテーパ部の摩耗量

Fig.1. Parts former and forging process.

の測定を行った。ここで、樹脂の収縮率による補正も行っている。さらに、パンチの先端部からテーパ部にわたり長手方向に切断したものを鏡面研磨の後にナイトール(エチルアルコール+10%硝酸)にて腐食し、腐食面を光学顕微鏡にて、鍛造により発生したヒートチェック、塑性流動の状態に注目して観察した。

3. 結果と考察

3.1 評価材の基礎特性

鍛造金型の損傷評価を行うためには、金型材質の基礎特性を把握することが必要である。特に、鍛造時の温度を反映した評価材の高温強度は鍛造金型損傷評価を行う上で最も重要である。

そこで、今回使用する金型供試材の高温圧縮降伏強度を Fig.2 に示す。高温圧縮降伏強度は、15 × 22.5 mm の端面拘束圧縮試験片を作製し、熱間加工シミュレータを用いて各測定温度で 60 s 保持した後に端面拘束圧縮を行い、その変形抵抗データから求めた。これによると、全試験温度域に渡って、マトリックスハイス鋼である MH85, MH86 の方が、熱間ダイス鋼である SKD61* や DH71 よりも高強度であることがわかる。MH86 は MH85 に対してほぼ全温度域で高強度であり、軟化抵抗が大きいといえる。一方、DH71 は SKD61* に対して、常温 ~ 473 K までは若干

Fig.2. Compressive yield strength of test steel in high temperature.

Table 1. Hardening and tempering pattern of test pieces.

Steel name	Hardning temperature and cooling	Tempering temperature and coolong	Vickers hardness (HV)
MH85	1423 K × 2.1 ks GC	823 K × 18 ks AC(× 3)	685
MH86	1433 K × 180 s BC	873 K × 3.6ks BC(× 2)	720
SKD61*	1313 K × 180 s BC	833 K × 3.6 ks BC(× 2)	570
DH71	1313 K × 180 s BC	833 K × 3.6 ks BC(× 2)	570

低強度であるが、673 K 以上でこの関係は逆転し、DH71の方が高い高温強度を示すことが確認された。

これらの高温強度の異なるパンチ材料で試験することにより、温間鍛造条件下において、高温強度が金型損傷に及ぼす影響を系統的に調査することが可能となる。

3.2 実験結果

Fig.3 に試験後のパンチ外観を、Fig.4 にパンチの先端部 (Part C)、R 部 (Part R)、テーパ部 (Part T) の切断面観察写真を示す。全ての金型において、パンチ R 部からテーパ部において摩耗が進行していることがわかる。マトリックスハイス鋼である MH85、MH86 と比較して熱間ダ

Fig.3. Photographs of external punch after test.

Fig.4. Micro photograph in punch point after test.

イス鋼である SKD61 * および DH71 はテーパ部の表層付近でヒートチェックの方向が鍛造方向に沿って湾曲していることから塑性流動が大きく発生し摩耗が進行していることが確認された。また同時に、ヒートチェックの本数は、SKD61 * および DH71 において相対的に少ないものの 1 つ 1 つの亀裂が深く進展していることも確認された。この損傷状況は、実機鍛造パンチによく一致したものであり、この試験方法が温間鍛造用金型の鍛造条件をよく再現できたものと考えられる。

Fig.5 に SKD61 * と MH85 の試験終了後のパンチ縦断面におけるヴィッカース硬さ分布を示す。双方ともに、パンチ R 部、テーパ部において、表層から 0.5 mm 程度の深さまで、初期硬さに対して軟化していることが確認された。これは鍛造時にパンチがワークと接触する時に伝達する熱や摩擦による発熱により、パンチ表層が高温化し、こ

Fig.5. Distribution of hardness in punch.

の状態が長時間保持されたために、初期硬さよりも軟化したものと考えられる。また、パンチ TOP 部においては、この軟化挙動がほとんど確認されなかった。軟化挙動が発生した部位は、摩耗や塑性流動が発生した部位と良く一致していることから、パンチの R 部やテーパ部で、最も過酷なワークの変形的作用を受けているものと推測される。

Fig.6 に MH85 と SKD61* のワーク転写部におけるパンチ R 部およびテーパ部の摩耗量の推移を示す。パンチ R 部、テーパ部ともに、SKD61*の方が摩耗を開始するショット数が早く、摩耗量も大きいことが確認された。また、4000 ショット終了時の先端 R 部摩耗量の 4 鋼種別比較を Fig.7 に示す。この結果から、SKD61*および DH71 よりも、MH85、MH86 の方が、摩耗量が小さく金型損傷レベルが優れていることがわかる。また、MH85 よりも MH86 の方がより優れていることがわかる。

これらの結果より、SKD61*および DH71 は、MH85 や MH86 よりも軟化抵抗が小さいために、摩耗量、塑性流動、ヒートチェック深さともに大きくなり、金型損傷レベ

ルが大きくなったと考えられる。また、MH86 は、MH85 に対して 873 K 以上で高温降伏強度が大きく、その結果、摩耗量が最も小さくなったと考えられる。温間鍛造に最適な型材は、摩耗量の定量的な測定から、高温降伏強度と軟化抵抗に優れた MH86 であると本試験法の結果から結論づけることができる。

以上より、本試験法は、温間鍛造におけるパンチ金型材の摩耗や塑性流動といった主要な損傷を良く再現することが可能であり、金型材の材質による損傷の差異を明確にし、摩耗量の測定から定量的に金型損傷を評価することのできる試験法であることが示された。

4. パンチ冷却方法の検討

これまでの試験において、パンチへの潤滑油の吹き付けは 4 方向から銅パイプ式ノズルを用いてきた。しかしながら、同冷却方法では試験後のパンチ表面部位による摩耗量や塑性流動、ヒートチェックといった損傷度合いのむらやパンチ温度を下げる冷却能力の向上が見込めないことが問題となっていた。そこで、これらの問題を改善するために、Fig.8 に示すようなパンチ冷却方法の変更を行った。

Fig.6. Wear-out transition of punch in work transcript part(MH85, SKD61-modify).

Fig.7. Amount of wear-out in point R part after 4000 shots.

Fig.8. Comparative picture of cooling system of examination machine.

Fig.9. Punch temperature measurement result by difference of cooling system.

Fig.10. Punch externals photograph after 4000 shots by difference of cooling system.

これはパンチの周囲にスライド式ジャケット型の専用治具を取りつけ、バネ仕掛けにより鍛造中のパンチの動きに合わせて常に4方向から一定量の潤滑油を吹き付けることを可能にしたものである。この結果、パンチ温度を下げる冷却能力を向上させ、潤滑剤を均一に吹き付けることで潤滑・冷却むらを低減し、より再現性の高い定量的な評価試験を実施することが可能となった。

本研究では、パンチに MH85 を用いて冷却方法によるパンチの温度、摩耗の相違を調査した。鍛造条件は、前述 2.1 で示したものと同一である。また FEM 解析によって、鍛造工程中のパンチの温度分布を求め、冷却方法改善による冷却効果の比較を行った。

Fig.9 に MH85 のパンチで行った試験後の冷却方法の相

違によるパンチ温度の測定結果を示す。この図からわかるように、定常状態でジャケット型の冷却方法の方が、従来の銅パイプ式のノズル型よりも約 30 K パンチ温度が低下したことから、冷却能力が向上したことが確認された。

Fig.10 に 4000 ショット鍛造後のパンチ外観を、Fig.11 にそのパンチの切断ミクロ観察写真を示す。これらの写真より、冷却方法をジャケット型に変更することにより、パンチ表面のヒートチェック、塑性流動などの損傷が、部位によってバラツキが生じることがなく均一になることが確認された。また、ジャケット型においてテーパ面にヒートチェックが多く発生しているのは、冷却能力の向上により、パンチ表面の温度振幅が大きくなった結果であると考えられる。

Fig.11. Micro photograph in punch point after 4000 shots by difference of cooling system.

Fig.12. Transition of amount of wear-out by difference of cooling method.

Fig.12 に冷却方法の相違によるショット数とパンチ摩耗量の推移を示す。この図からわかるように、冷却方法をジャケット型にすることによって、パンチ先端 R 部では摩耗開始ショット数はおおよそ 3 倍、摩耗量はおおよそ 1/3 となり、テーパ部ではほとんど磨耗しないことがわかった。また、Fig.13 に 4000 ショット鍛造後の冷却方法相違によるパンチ先端 R 部の摩耗量の比較を示す。この結果、ジャケット型の冷却方法では、最終的な摩耗量は従来の銅パイプ式に比べて 64% も低減することがわかった。

Fig.14 にパンチ冷却方法の相違による鍛造工程中のパンチ温度分布の変化を FEM 解析⁷⁾で計算した結果を示す。この解析は、MSC 社の Superform2004 を用い、応力・熱線成弾塑性解析 (軸対称モデル)で行った。パンチ材質は MH85、ワーク材質は S53C のデータベースを用いた。ワー

Fig.13. Amount of wear-out in point R part after 4000 shots by difference of cooling method.

クの初期温度は 1093 K、ワークとパンチの接触熱コンダクタンスは $120 \text{ kW/m}^2\text{K}$ 、せん断摩擦係数は 0.4 とした。また、冷却時の接触熱コンダクタンスは銅パイプ式で $6.3 \text{ kW/m}^2\text{K}$ 、ジャケット型で $9.5 \text{ kW/m}^2\text{K}$ とした。この FEM 解析の結果、鍛造中の下死点においてパンチの温度は、銅パイプ式ノズル型冷却法では最高温度部位 1003 K まで到達するが、ジャケット型の冷却法では 973 K であった。さらに、油冷終了後は、銅パイプ式ノズル型冷却法では最高温度部位 687 K であるのに対し、ジャケット型の冷却法では 625 K となった。このことから、ジャケット型冷却法による冷却能力の向上の結果、パンチの最高温度を従来の銅パイプ式ノズル冷却法よりも 30 K 低下させることができ、それによってパンチの温度上昇による降伏強度の低下の抑制および軟化を低減することから、パンチの摩耗を低減させることができたと考えられる。一方、鍛造時の

Fig.14. Punch temperature distribution by FEM analysis by difference of cooling method.

Fig.15. Punch temperature distribution when water-cooled.

パンチ温度の振幅は、銅パイプ式ノズル冷却法では589 K、ジャケット型の冷却法では621 Kとなった。この温度振幅が大きいほど、熱応力起因によるヒートチェックを発生させることから、ジャケット型の冷却法の方がヒートチェックを発生させる傾向がやや高いことも確認された。

以上より、パンチの温度を下げるために金型の冷却を向上させるプロセスを適用することは、温間鍛造における金型寿命の改善に効果があることがわかる。

Fig.15 に、初期鍛造時のパンチ表面の表面粗さ測定から算出したヒートチェックの発生とその成長を時系列にまとめた結果を示す。ヒートチェックは、鍛造初期である100ショット目から発生することが確認でき、それ以降の鍛造でさらにヒートチェックの深さが増大することが確

認できた。これは、鍛造時のパンチ金型表面におけるヒートチェック発生メカニズムを解明する重要な知見となることが期待される。

以上より、本試験法は、温間鍛造時におけるパンチ金型の摩耗、塑性流動、ヒートチェックといった金型損傷について実機鍛造を模擬した条件で再現し、それらの損傷を定量的に調査することが可能であることが示された。また、金型材質を変化させて試験を行うことにより、それらの金型損傷レベルを同時に比較することができ、最適な金型材質を選択することを可能になった。

5. まとめ

- ・本試験法は、温間鍛造におけるパンチ金型の摩耗、塑性流動、ヒートチェックといった損傷を2工程鍛造により良く再現し、パンチ摩耗量を測定することによって、パンチ材質による定量的な摩耗損傷の評価が可能となった。
- ・高温圧縮降伏強度が高い鍛造金型材ほど、塑性流動や摩耗に対する抵抗が高いことから金型損傷レベルが小さくなることが確認でき、型材の基礎特性を反映できる評価が得られた。
- ・パンチへの潤滑油吹き付け方法を従来の銅パイプ式ノズルからスライド式ジャケット型に変更した結果、パンチ温度の冷却能力が向上し、鍛造によるパンチ摩耗量を64%も低減させることが可能となった。この結果は、FEM解析により裏付けできた。
- ・本試験法は、鍛造時の冷却方法によるパンチの損傷の差異、パンチ表面の粗さの測定から鍛造時のヒートチェック生成から成長まで定量的に評価できることが可能となった。

(文 献)

- 1)小島久義,藤川真一郎,石原章:塑性と加工,43(2002),
495,331.
- 2)早川邦夫,中村保,田中繁一:塑性と加工,43(2002),
497,546.
- 3)松井宗久,田中利秋,土屋能成,中西広吉,鈴木寿之,野
上芳和,鈴木敏孝:平成13年度塑性加工学会春季講演会
講演論文集(2001),73.
- 4)土屋能成,中西広吉,田中利秋,松井宗久,明石忠雄,鈴
木寿之,野上芳和:平成13年度塑性加工学会春季講演会
講演論文集(2001),75.
- 5)鈴木寿之,野上芳和,鈴木敏孝,中西広吉,土屋能成,田
中利秋,松井宗久:平成13年度塑性加工学会春季講演会
講演論文集(2001),77.
- 6)田中利秋,土屋能成,松井宗久,中西広吉,鈴木寿之,野
上芳和,明石忠雄:第52回塑性加工連合講演会講演論文
集,259.
- 7)中西広吉,野々山史男,澤村政敏,田野敦:塑性と加工,
37(1996)421,207.