金型揺動化圧下方式と潤滑による鍛造荷重低減特性

—— 鍛造型大圧下加工による微細粒鋼創製技術 II ——

三宅 勝* 矢崎 拓郎* 曾谷 保博*

Development of Load Reduction Technology by Swing-Type Forging and Lubrication for Large-Deformation Forging by High-Speed Large-Reduction Forging

—— Production Technology for Fine Grained Steel by Large Deformation Forging II ——

Masaru MIYAKE*, Takuro YAZAKI* and Yasuhiro SODANI*

(Received on August 10, 2011)

To reduce the forging load of the proposed large deformation forging technology, a new type of forging system is proposed. In this forging system, the contact length between forging dies and a work can be reduced by adjusting the swing motion of the dies during forging. This swing motion results in load reduction because contact length is a dominant factor of the load for this type of forging. Also, this forging technology is relatively stable when using lubrication because of its basic up-and-down motion. In this study, load reduction effect with the newly proposed forging system and lubrication are examined by laboratory-scale experiments and FE analysis. It appears that a nearly 30% load reduction can be achieved by the swing-type forging compared with the flying-type forging under the condition of a large thickness reduction. Width spread is also reduced by the swing type forging because contact length has a large influence on a material's lateral flow. Moreover, another 20% to 30% load reduction is confirmed and seizure on the forging dies was prevented by lubrication.

Key words: forging, large deformation, large reduction, fine grained steel, hot strip, lubrication.

1. 緒言

著者らは、鋼板の熱間圧延ラインでの結晶粒微細化や粗加工工程のコンパクト化を目的として、熱間圧延工程の粗加工に圧下量制約のない1パス大圧下を可能とする鍛造型板厚圧下加工技術の導入を提案し、前報¹⁾にてその負荷特性と変形特性について報告した。本加工技術では、材料と金型間の摩擦による圧力上昇、いわゆるフリクションヒルが大きく成長するため、熱間スラブの1パス大圧下では非常に高い加工力が必要である。このため、本加工技術の実用化のためには鍛造荷重の大幅な低減が必要と考えられる。

鍛造方式は金型形状や圧下条件の自由度が高く、圧下パス間の材料送り量を低減することにより鍛造荷重を低減することができる。しかしながら、大量生産ラインである熱間圧延ラインへの導入を前提とすると、生産性を落とさずに鍛造荷重を低減することが重要となる。熱間圧延での荷重低減のため各種潤滑剤が使用されているが²⁾、圧延では圧延材とロール間に作用する摩擦力によって加工が成り立っており、過度の潤滑性はスリップを発生させ、特に先端

部では噛み込み不良が発生しやすくなる³⁾。これに対し、本加工法では、基本動作として材料を上下方向に圧下する方式であることから、潤滑を導入しても安定した大圧下加工が可能である。また、鍛造荷重を低減するとともに金型摩耗抑制や焼付防止等、金型材の耐用度の観点からも潤滑が重要な役割を果たすと思われる⁴⁾。

本報では、鍛造型板厚大圧下による大ひずみ加工の実用化技術として、鍛造荷重低減のための金型揺動化機構を提案し、実験と数値解析によりその負荷特性と幅広がり特性を明らかにする。また、潤滑剤適用による鍛造荷重低減効果と金型焼付き防止効果について検討する。

2. 鍛造型板厚大圧下における荷重低減技術

2.1 圧下方式による荷重低減技術

本板厚大圧下加工法では、基本的に材料を上下方向に圧下することから、圧下死点にて最大荷重が発生する。この際の鍛造荷重 P は、簡易的に式(1)で表わされる。

$$P = Qp \cdot km \cdot l_d \cdot W \quad (1)$$

Qp は摩擦による圧力上昇の影響を表す圧下力関数、 km は材料の平均変形抵抗、 l_d は金型と材料との接触長、そして W は材料の板幅である。式(1)より、鍛造荷重は金型と材料の接触長 l_d に比例するため、 l_d を短縮することにより鍛造

* JFE スチール(株), スチール研究所 〒260-0835 千葉市中央区川崎町1番地
Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation, 1-Kawasaki-cho, Chuo-ku,
Chiba 260-0835, Japan.

荷重の低減が可能である。そこで、材料の送りピッチ f を変更せずに l_d を短縮する技術として、金型を回転させながら圧下する方式を考案した。Fig.1 に、前報で検討した上下方向の圧下方式（平行圧下方式あるいは Flying type）と、新たに考案した圧下方式（金型揺動化圧下方式あるいは Swing type）の基本動作を示す。平行圧下方式では、圧下下死点での接触領域長 l_d は $L_f + L_s$ であるのに対し、金型揺動化圧下方式では圧下中に金型の自転運動（回転角度 φ ）により金型傾斜部を材料から離すことにより、圧下下死点での接触領域長は L_f のみとなる。このように、本技術では圧下下死点での接触長 l_d が縮小することから、鍛造荷重 P を低減することが可能である。

Fig.1 Basic concept of swing type forging

Fig.2 は、板厚大圧下加工にて生じる板幅変形の模式図である。前報¹⁾にて、平行圧下方式における材料の最小幅広がり量 $\Delta W (=W_1-W_0)$ は圧下下死点における幾何学的傾斜部接触長さ L_s にて整理できることを示した。金型揺動化圧下方式では、圧下初期に金型傾斜部が材料と離れて接触長が低減することから、幅広がり量が低減することが期待できる。

Fig.2 Parameters to explain width spread behavior

以上，金型揺動化圧下方式では金型と材料の接触長が短くなることにより，鍛造荷重と幅広がりの低減効果が期待できる．そこで，試験片全長の断続加工が可能な鍛造試験装置を製作し，検証実験を行った．

2.2 試験装置の概要

Fig.3 に、製作した試験装置の圧下機構の原理と金型軌跡、そして金型形状を示す。(a)の平行圧下方式は、上下各々のスライダに取り付けた各 2 本のクランク軸を同位相にて回転させることにより、上下の金型圧下面の平行部が水平方向を保ったまま円軌道を描いて圧下を行う。本装置のクランク半径 R は 13.5mm である。また、(b)の金型揺動化圧下方式はピンにて結合された 2 つのスライダの各々にとりつけたクランク軸の位相をずらして回転させることにより、大きな楕円公転軌道を描きながら金型が所定の角度だけ自転する機構とした。本装置の金型自転の回転角度 φ は 9.2° である。金型揺動化圧下方式では、圧下後の材料の板厚凹凸が最小となるように、金型の回転挙動を考慮して圧下面平行部に 4 段階の傾斜を付与した。圧下パス間の材料の送りは、金型前後に設置したピンチロール制御にて実施する。平行圧下方式と金型揺動化圧下方式は圧下機構以外の部分は共通であり、最大荷重 1.5MN 、モータ動力 75kW 、そして毎分 100 サイクルの高速鍛造加工を行う。

Fig.3 Schematics of employed forging equipment

2.3 実験条件

金型揺動化圧下方式による荷重低減挙動を検証するため、供試材として硬質鉛(0.9at%アンチモン含有)を使用した鍛造実験を行った。金型材質はSKD61で圧下面はフライス加工のままである。供試材寸法は厚み 25.4mm×幅幅 100mm×長さ 1000mm(実機想定に対するモデル比 1/10 相当)である。設定圧下率 r_s を 50%, 70% の条件としたが、鍛造装置と金型の弾性変形により実績圧下率 r_a は各々 43%, 65% となった。パス間送り f は 25~50mm の範囲で無潤滑条件である。

2.4 実験結果と考察

(1) 鍛造荷重低減効果 Fig.4 に各々の圧下方式における送りピッチ 40mm の条件での鍛造荷重の推移を示す. 各圧下パスでの最大荷重に若干のばらつきが見られるものの, 供試材として硬質鉛を使用していることから先端から尾端にかけての鍛造荷重の変動は少なく, 各圧下パスでの最大荷

(a) Flying type experiment

Fig.4 Example of forging load behavior ($r_a=65\%$, $f=40\text{mm}$)

重の平均値を評価値とした。金型揺動化圧下方式は平行圧下方式に対し鍛造荷重が約 30%低減(590kN→390kN)しており、大きな荷重低減効果が得られている。

Fig.5 は 1 回の圧下動作中の代表的な荷重推移であるが、平行圧下方式では金型と材料が接触した後はほぼ時間に比例して接触長が増加することから、圧下下死点に至るまで鍛造荷重もほぼ線形に増加し、その後、金型の上昇とともに急速に荷重が低減する。これに対し、金型揺動化圧下方式では荷重の立ち上がりは緩く、かつ最大荷重点を過ぎた後も金型の自転により緩やかに荷重が減少している。

Fig.5 Behavior of forging load history of flying type forging and swing type forging ($r_a=43\%$, 65% , $f=40\text{mm}$)

Fig.6 は、鍛造荷重に及ぼす送りピッチの影響である(実績圧下率 $r_a=65\%$)。△及び▲印が実験結果であり、実線は数値解析による計算結果である。数値解析には有限要素解析ソフト Abaqus-explicit を用いた。Table1 に示す物性値を用い、試験機のカ型運動軌跡を忠実に再現した。理論計算で設定する金型-材料間の摩擦係数を 0.22 とすると、実測荷重と計算荷重は Fig.6 に見られるように良好な一致を示し、平行圧下方式と比較して金型揺動化圧下方式にて大きな荷重低減効果が得られている。数値解析結果では、送りピッチが大きい領域で荷重低減効果が若干縮小しているが、

この傾向は Fig.1 で示した接触領域の大小関係で説明できる。すなわち、送りピッチ $f(=L_f)$ が大きくなるほど全体接触領域 L_f+L_s に対する金型傾斜部の接触領域 L_s の割合が低下するため、荷重低減の割合も低下するものと考えられる。

Fig.6 Comparison of forging load between flying type forging and swing type forging versus feed per pass

(2) 幅広がり挙動 Fig.7 は、最小幅広がり量 ΔW に対する送りピッチの影響である。金型揺動化圧下方式では平行圧下方式に比較して幅広がり量が低減しており、送りピッチが大きくなるほどその効果が大きくなっている。これは、圧下中の幅広がり変形量は変形域前後の非変形領域から受ける拘束にて抑制されることから、材料と金型の接触長 l_d が短いほど幅方向変形が小さくなるためである。平行圧下方式では送りピッチ f に比例して接触長 l_d が増大するのに対し、金型揺動化圧下方式では金型の自転運動により接触領域が短い状態を保ちながら緩やかに下流側に移動するため、接触長 l_d に対する送りピッチ f の影響が小さいものと考えられる。

Fig.7 Comparison of width spread between flying type forging and swing type forging versus feed per pass

Table1 Analytical conditions

Die	Young's modulus/ GPa	206
	Poisson's ratio	0.3
Work	Young's modulus/ GPa	25
	Poisson's ratio	0.44
	Flow stress / MPa	$37\varepsilon^{0.15} \varepsilon^{0.042}$

3. 熱間潤滑適用による荷重低減特性

3.1 実験方法

金型揺動化圧下方式での更なる荷重低減を図るため、熱間鋼を用いた潤滑実験を行った。Fig.8 に実験手順の概略を示す。供試材の温度は、長手方向中央位置にて熱電対を側

面板厚中心部から板幅中央付近まで挿入して測定した。供試材を電気式加熱炉で 1473K まで加熱後に抽出し、約 1 分の放冷の後、熱電対指示値が 1323K となった時点より鍛造を開始して全長にわたり板厚圧下を行った。この条件では、供試材の長手方向中央位置での圧下時温度が約 1273K となる。潤滑剤の塗布は、上下各々の金型圧下面に対し、金型下流側直近より供試材の幅より広い領域に向けてエアートマイズ方式(圧力 0.4MPa)にて常時吹き付けた。

Fig.8 Schematics of experimental flow

耐焼付性や耐摩耗性等の金型耐用度の観点から、金型温度上昇に対する潤滑剤の影響も調査した。圧下中の金型温度を測定するため、Fig.9 に示すように上金型の金型傾斜部と平行部の交点より下流側 20mm の位置にて、金型裏面より幅方向 5mm ピッチで圧下面からの深さが 2,6,11mm となる位置まで $\phi 1.2$ mm の穴をあけ、 $\phi 1$ mm の熱電対を挿入してセラミクス系ボンドにて固定した。

Fig.9 Schematics of the die with thermo-couple to measure die internal temperature

3.2 実験条件

本研究では、単純組成鋼の組織微細化による高強度化を目的としていることから、供試材として合金成分を含まない Si-Mn 鋼(0.14%C-0.64%Mn)を使用した。供試材の寸法は、厚み 25.4mm×板幅 60mm×長さ 1000mm、実績圧下率 $r_a = 43 \sim 82\%$ 、そして送りピッチ $f = 35$ mm の条件である。なお、潤滑剤による荷重低減効果を摩擦係数の変化として定量表現するため、前章と同様に有限要素法による数値解析を行った。変形抵抗式には美坂・吉本の式⁵⁾を使用した。

使用した潤滑剤は非黒鉛系であり、グリース系(市販熱間圧延油、基油 85%+添加剤)と水溶性(市販熱間鍛造油、水 50%+添加剤)の 2 系統を選択した。グリース系潤滑剤は吐出量 100cc/min、水溶性潤滑剤は濃度 10%と 50%の 2 水準で吐出量 160cc/min の条件にて評価した。

3.3 実験結果と考察

(1) 鍛造荷重低減効果 Fig.10 に、実績圧下率 $r_a = 72\%$ での鍛造荷重推移例(潤滑剤不使用)を示す。熱間鋼を使用した鍛造実験では、試験片先端の圧下開始後、尾端にいくほど圧下前の待機時間が長いことから温度低下量が大きく、鍛造荷重が徐々に増加している。このため、鍛造荷重の評価は、熱電対による温度モニタ位置である長手中央位置での値にて行った(圧下時材料温度は約 1273K)。Fig.11 は、摩擦係数をパラメータとした数値解析結果と実測鍛造荷重

との比較であり、無潤滑鍛造実験での荷重(1060kN)は摩擦係数 0.24 程度に相当している。以後、潤滑剤使用時の摩擦低減作用による荷重低減挙動について、摩擦係数 0.24 での計算荷重 P_0 からの荷重低減率 $R_p (= (P_0 - P)/P_0 \times 100\%)$ を定義して評価する。

Fig.10 Example of forging load behavior in hot forging experiment ($r_a = 72\%$, $f = 35$ mm)

Fig.11 Comparison between experimental forging load and calculated results ($r_a = 72\%$, $f = 35$ mm)

Fig.12 は、各潤滑剤使用時の鍛造荷重 P と潤滑剤不使用時の鍛造荷重 P_0 から算出した荷重低減割合である。実験結果、数値解析結果とも、圧下率が大きいほど荷重低減率が大きくなっている。これは、圧下率が大きいほど摩擦による圧力上昇が大きくなるため、潤滑による摩擦力の低減効果が鍛造荷重の低減に大きく作用するためと考えられる。荷重低減効果はグリース系の方が優れ、高圧下率領域にて約 30%と大きな荷重低減率が得られており、摩擦係数にして 0.12 程度と大きく低減している。水溶性潤滑剤では濃度の影響はそれほど認められず、濃度 10%でも高圧下率領域

Fig.12 Behavior of load reduction ratio with lubrication

にて 20% 程度の荷重低減効果を発揮している。グリース系潤滑剤が圧下中も接触界面に薄膜として存在するのにに対し、水溶性潤滑剤は高温の金型表面に付着した直後に水分が蒸発した後、乾燥した添加剤成分が皮膜を形成しており、この皮膜が固体潤滑剤として作用しているものと考えられる。

(2) 金型温度上昇抑制効果 Fig.13 は、グリース系潤滑剤と水溶性潤滑剤濃度 10% の金型温度測定結果例である ($r_a=72\%$)。グリース系潤滑剤使用時の金型内部温度は無潤滑条件とほぼ一致しているのに対し、水溶性潤滑剤使用時は深さ 2mm 位置にて最高到達温度が 70K 程度低減している。両者の対比から、いずれの潤滑剤でも潤滑作用による摩擦発熱の軽減効果は非常に小さく、水溶性潤滑剤では含有水分の冷却作用により金型温度上昇が大きく抑制されているものと考えられる。

(a) With grease type lubrication

(b) With soluble type lubrication (10% concentration)

Fig.13 Die temperature history with- and without- lubrication

(3) 焼付防止効果 Fig.14 は、無潤滑、グリース系潤滑剤、そして水溶性潤滑剤濃度 10% の金型圧下面の状況と接触式表面粗さ計にて測定した表面プロフィールであり、試験前の機械加工のままと供試材 1 本を全長圧下した後の測定結果である。熱間鋼の無潤滑実験では、高圧下率条件では直ちに金型平行部に酷い焼付が発生するのに対し、潤滑剤使用時はほとんど焼付が発生しなかった。潤滑剤適用により接触圧力が低減するとともに、グリース系潤滑剤では強固な薄膜が焼付を防止しているものと考えられる。また、比較として圧下面に水のみを噴霧した実験でも焼付が若干軽

減したことから、水溶性潤滑剤では添加剤成分が形成した固体潤滑膜による効果と、冷却による金型温度上昇抑制効果が焼付防止に作用しているものと考えられる。

Fig.14 Comparison of seizure on die surface ($r_a=72\%$)

4. 結 言

鍛造型板厚大圧下加工での鍛造荷重低減技術として、新たに考案した金型揺動化圧下方式の効果と熱間潤滑適用効果について検討した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 金型揺動化圧下方式では、平行圧下方式に比べ高圧下率領域にて 20~30% の荷重低減効果が得られた。また、板厚圧下によって生じる幅広がり量も低減する。
- 2) グリース系潤滑剤の適用により高圧下率領域にて 25% 以上の鍛造荷重低減効果が得られ、金型揺動化効果 30% と組み合わせると 45% 以上の荷重低減効果となる。
- 3) 水溶性潤滑剤は 10% の低濃度でも高圧下率領域にて 20% 程度の荷重低減効果が得られ、金型揺動化効果 30% と組み合わせると 40% 以上の荷重低減効果となる。
- 4) 金型潤滑剤の適用により焼付きが大幅に低減する。また、水溶性潤滑剤適用により金型温度上昇を大きく抑制できる。

今後、鍛造型板厚大圧下加工でのオーステナイト組織の微細化挙動について報告を行う予定である。

謝 辞

鍛造試験装置の設計にあたり、株式会社 IHI の西井崇・百々泰 両氏より多大な協力を得た。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 三宅勝・矢崎拓郎・曾谷保博：塑性と加工，**52**-610 (2011)，1208-1212.
- 2) 小豆島明・薛衛東・吉田良明：鉄と鋼，**93**-11(2007)，681-686.
- 3) 小豆島明・薛衛東・吉田良明：鉄と鋼，**93**-5(2007)，367-372.
- 4) 鳥海貴大・小豆島明：鉄と鋼，**97**-7 (2011)，388-392.
- 5) 美坂佳助・吉本友吉：塑性と加工，**8**-79(1967)，414-422.