論文

冷間鍛造金型用超硬合金の圧縮変形特性の簡易推定法

王 志剛* 李 浩杰** 白神 博昭***

A Simple Measurement Method for Compression Behavior of
Cemented Carbide for Cold-Forging Die

Zhigang WANG *, Haojie LI ** and Hiroaki SHIRAGA ***

(Received on May 29, 2012)

The compression behavior of cemented carbide for cold-forging dies is necessary to calculate the prestress in the die insert by an interference fit. In this paper we describe a simple method of obtaining the compression behavior using the Rockwell hardness test. Six kinds of cemented carbide which are the main materials for cold-forging dies were used in this experiment. The compression property of the cemented carbide was measured precisely by the compression test directly and expressed using an accurate approximation equation. It was found that the coefficients of the equation have a good correlation with Rockwell hardness. It was shown that the stress-strain curves generated using Rockwell hardness have good agreement with the measured ones.

Key words: cold forging, die, cemented carbide, compression behavior, HRA, grain size.

1. 緒 言

冷間鍛造金型には超硬合金が多用されており、その大部分が WC 粒に結合材として Co を用いて焼結した単純 2 元系合金である。冷間鍛造金型用超硬合金には機械的特性から Co 含有量が 15~27mass% のものが多く、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、金型は摩耗、疲労破壊および早期の割れで寿命に至る¹⁾。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。超硬合金の疲労破壊については多くの研究成果^{2)~4)}が報告されているが、これらの知見を有効に活用するためには実鍛造時の金型の応力状態

を精確に把握する必要がある。

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⁵⁾。

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。冷間鍛造金型用超硬合金の機械的特性は硬さと抗折力で評価するのが一般的で、圧縮応力の塑性変形特性に関するデータは少ない⁶⁾。

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する。

2. 供試材

供試材は超硬インサートの主流である中粒、粗粒合金の中から、Table 1 に示す WC 粒径と Co 含有量の異なる 6 種を用いた。Fig. 1 に供試材の組織写真の例を示す。

* 岐阜大学工学部 〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1
Department of Mechanical Systems Engineering,
Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan.

** 岐阜大学大学院工学研究科 〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1
Graduate student, Department of Mechanical Systems Engineering,
Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan.

*** NTN 株式会社生産技術研究所 〒438-8501 磐田市東貝塚 1578
Production Engineering R&D Center, NTN Co., Ltd.,
1578 Higashikaizuka, Iwata, Shizuoka 438-8510, Japan.

3. 硬さ試験

試験装置はロックウェル硬さ試験機 ARK-F2000 を用いた。Table 2 に実測した硬さを示す。

Table 1 Cemented carbide alloys

		WC grain size	Co, mass%	Remarks
X	X1	Large	15	Enriched Co by trace elements
	X2		22	
	X3		25	
Y	Y1	Large	25	Pure Co
Z	Z1	Middle	15	Enriched Co by trace elements
	Z2		25

Fig. 1 Microstructure of tested materials

Table 2 Mechanical properties

	X			Y	Z	
	X1	X2	X3	Y1	Z1	Z2
HRA	86.3	84.0	82.8	81.6	87.0	83.5
E/GPa	465	410	380	377	468	389

表中の縦弾性率は後述の圧縮試験による測定値である。Co の量が多いほど、WC 粒が大きいほど硬さが小さくなっている。本実験で用いた 2 成分系超硬合金は WC 粒径と Co 含有量によって組織が決定されるので、この 2 因子と硬さ HRA との関係に着目した。

Fig. 2 に通常の焼結材を対象とした Gurland らの体系的なデータを示す⁷⁾。HRA は WC 平均粒径と線形関係をもっていることがわかる。図にみられるように直線の傾きは Co 含有量に依存せずほぼ一定となっており、切片は Co 含有量と線形関係を持っている。最小二乗法を用いて式近似を行うと式(1)が得られる。ここに、 D_{WC} は WC 平均粒径 (μm) で、 PCo は Co 含有量 (%) である。

$$\text{HRA} = -0.934 D_{WC} - 0.331 PCo + 95.415 \quad (1)$$

Fig. 3 に式(1)による HRA の算出値と Fig. 2 の実測値との

相関を示す。WC 平均粒径と Co 含有量を用いて、HRA を高精度に算出することができると言える。次に、式(1)を本実験の供試材に適用してみる。本実験で用いた供試材の中で、WC と Co との単純 2 元系材料である Y シリーズ材の硬さを式(1)に代入すると、その平均粒径は $5.5\mu\text{m}$ と算出される。X シリーズ材は Y シリーズ材と同一の WC 粒を用いて同一の焼結条件で製作した Co 相強化合金なので、X シリーズの WC 平均粒径を $5.5\mu\text{m}$ とした。X, Z シリーズ材は Co 相強化合金であるため、式(1)の Co 含有量の影響係数を改める必要があると思われる。X シリーズ材の硬さを用いて、Co 含有量の影響係数を算出すると、式(2)が得られる。

$$\text{HRA} = -0.934 D_{WC} - 0.287 PCo + 95.415 \quad (2)$$

式(2)を用いて、Z シリーズ材の WC 平均粒径を算出すると、 $3.8\mu\text{m}$ となる。なお、X, Z シリーズ材の組織写真を用いて、WC 平均粒径を計測する⁸⁾と、X, Y シリーズ材では $5.6 \pm 0.3\mu\text{m}$ 、Z シリーズ材では $3.7 \pm 0.3\mu\text{m}$ となり、上記の算出値と合致している。

Fig. 2 Relationship between Rockwell hardness and WC average grain size

Fig. 3 Correlation between measured and calculated Rockwell hardness

4. 圧縮試験

4.1 実験装置および実験条件

Fig. 4 に圧縮試験用試料の形状を示す。ひずみを測定するために最小断面部に加圧方向に平行にひずみゲージ 2 枚を貼り付けた。Fig. 5 に圧縮試験装置を示す。装置は試験片を下で固定し、パンチにより圧縮する仕組みである。パンチの試験片と接触する部分は偏心を避けるために R 形状とした。試験は室温大気中で、試験速度は 0.25mm/min 一定とした。

Fig. 4 Test piece shape for compression test

- ① Punch ② Punch guide ③ Test piece
- ④ Case ⑤ Test piece supporter
- ⑥ Testing machine bed

Fig. 5 Compression test apparatus

4.2 実験結果

Fig. 6(a), (b) に実測した応力-ひずみ線図を示す。同一条件下での実験回数を 2 回とし、すべてのデータを図示している。ひずみが 3.8% 付近で計測が不安定となったため、ひずみ 3.0% までのデータを採用した。実験精度が高く、実験の繰り返しによるばらつきはほとんど見られない。Co 含有量が多いほど、圧縮強度が低下していることがわかる。X3 材と Y1 材を比べて、X3 材の圧縮強度が大きく、Co 相強化の効果が現れている。X シリーズと Z シリーズを比べて、WC 平均粒径の小さい Z シリーズの圧縮強さが大きいことがわかる。実験結果に基づいて、500MPa を弾性限とし、各材料の圧縮応力 σ と塑性ひずみ ϵ_p の関係を抽出した。その結果を Fig. 7(a), (b) に示す。塑性ひずみ ϵ_p の増加に伴い、圧縮応力は増加した後一定値に漸近している。この変化傾向をできる限り少ない係数で高精度に表現するために、式(3)に示すべき関数と 1 次関数の積で式近似を行った。近似式において、塑性ひずみ $\epsilon_p \geq \epsilon_0$ の領域における圧縮応力

の低下を避けるために、当該領域の圧縮応力を一定とした。ただし、 ϵ_0 は式(4)で表せる。Fig. 7(a), (b) に見られるように式(3)による近似曲線はいずれの材料においても実測曲線と合致している。

$$\sigma = \begin{cases} (A - C \epsilon_p) \epsilon_p^B & \epsilon_p \leq \epsilon_0 \\ \left(\frac{B}{C}\right)^B \times \left(\frac{A}{B+1}\right)^{B+1} & \epsilon_p \geq \epsilon_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\epsilon_0 = \frac{AB}{C(B+1)} \quad (4)$$

5. 圧縮応力-塑性ひずみ曲線の推定

5.1 硬さに基づく推定

式(3)を用いて各供試材に対して式近似を行ったところ、係数 B はほぼ 0.33 であることがわかった。係数 A および C と硬さとの関係を Fig. 8, Fig. 9 に示す。係数 A , C と硬さとの相関関係は 2 次曲線で近似できることがわかる。

$$A = 3.117 \times 10^2 \text{HRA}^2 - 5.123 \times 10^4 \text{HRA} + 2.118 \times 10^6 \quad (5)$$

$$C = 8.652 \times 10^3 \text{HRA}^2 - 1.439 \times 10^6 \text{HRA} + 5.998 \times 10^7 \quad (6)$$

この 2 次曲線と硬さの実測値を用いて、係数 A , C を求め、式(3)に基づいて生成した応力 σ -塑性ひずみ ϵ_p 線図を Fig. 10(a), (b) に示す。

(a) X and Y series

(b) Z series

Fig. 6 Stress-strain curves by compression test

(a) X and Y series

(b) Z series

Fig. 7 Measured and fitted stress-plastic strain curves

生成した曲線と実測した曲線とは精度よく一致しない場合が生じる。すなわち、硬質超硬合金では精度が低く、軟質超硬合金では精度よく一致している。

硬質超硬合金で生成した曲線の精度が低いのは、Fig. 8, 9 に示すように HRA が 85 以上の領域において係数 A , C は急増しており、式(5), (6)の近似精度が不十分であることに起因していると思われる。実際の超硬インサートの予圧縮応力の大きさは最大で 2500MPa 程度までであることを考えると、硬さによる推定曲線の誤差は X1 材で最大 3.8% で、Z1 材で最大 5.6% であり、許容できるものと思われる。

5.2 WC 平均粒径と Co 含有量に基づく推定

X, Y シリーズの WC 平均粒径 $5.5\mu\text{m}$, Z シリーズの WC 平均粒径を $3.8\mu\text{m}$ とし、式(1), (2)を用いてロックウェル硬さ HRA を算出した。

Table 3 に HRA の実測値および算出値を示したもので、WC 平均粒径と Co 含有量からロックウェル硬さ HRA を精度よく算出できていることがわかる。算出したロックウェ

ル硬さ HRA を用いて、係数 A , C を求め、式(3)に基づいて生成した曲線 Fig. 11 に示す。

近似精度は硬さに基づく推定に比べるとかなり劣っている。応力 2500MPa では、推定誤差は X シリーズで最大 4.8% で、Z1 材では 8.3% である。

Fig. 8 Relationship between coefficient A and HRA Fig. 9 Relationship between coefficient C and HRA

Table 3 Measured and calculated Rockwell hardness

		Measured Rockwell Hardness /HRA	Calculated Rockwell Hardness /HRA
X	X1	86.3	86.0
	X2	84.0	83.9
	X3	82.8	83.1
Y	Y1	81.6	82.0
Z	Z1	87.0	86.9
	Z2	83.5	83.6

Fig. 10 Comparison between measured curves and generated curves by using measured HRA

Fig. 11 Comparison between measured curves and calculated curves based on microstructure

6. 結 言

冷間鍛造金型用超硬合金の圧縮特性について検討した結果、以下のことがわかった。

- 1) 圧縮強度は、WC 平均粒径が大きいほど、Co 含有量が多いほど小さく、Co 相の強化によって若干大きくなる。
- 2) ロックウェル硬さ HRA は、WC 平均粒径 D_{WC} と Co 含有量 PCo の 1 次関数式 $HRA = -0.934 D_{WC} - f PCo + 95.415$ で算出でき、係数 f は Co 合金で 0.331、Co 相強化合金で 0.287 となる。
- 3) 圧縮応力 σ と塑性ひずみ ϵ_p の関係は $\sigma = (A - C \epsilon_p) \epsilon_p^B$ 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。
- 4) 圧縮応力-塑性ひずみ曲線はロックウェル硬さあるいは合金組織から推定することができる。

参 考 文 献

- 1) 山田通・北島宣誠・松波宗治: 塑性と加工, **12**-122(1971), 197-204
- 2) 大塚昭夫・東郷敬一郎・菅原宏人・植田文洋: 材料, **36**-401(1987), 135-140.
- 3) 大塚昭夫・東郷敬一郎・菅原宏人・北条浩・植田文洋: 材料, **36**-411(1987), 1361-1367.
- 4) 金炫秀・吉川昌範・戸倉和: 塑性と加工, **30**-343(1989), 1147-1152.
- 5) 清家政一郎: 材料力学, (1997), 145-148, 共立出版.
- 6) 鈴木寿: 超硬合金と焼結硬質材料, (1986), 61-62, 丸善.
- 7) Gurland, J. & Bardzil, P.: J. Met. Trans. AIME, **7**(1995), 311-315.
- 8) 鈴木寿: 超硬合金と焼結硬質材料, (1986), 64-68, 丸善.