UDC 669.14.018.29:621.9.016.3

低合金鋼の冷間鍛造性

渡 辺 輝 夫*

Cold Forging Workability of Low Alloy Steel

Teruo Watanabe

Synopsis

Investigating the cold forging characteristics of low alloy steels with low P, Si and S contents, the authors found that these steels have excellent cold forgeability.

1. 緒 言

冷鍛用鋼に要求される諸特性のうち、主要なものは変形抵抗が小さいことと変形能が大きいことに集約される。これらの対策としては、Cを含めて合金成分を低下すればよいわけであるが、これらの成分は、鋼の最終の使用特性から決定されたものが大部分であり、中間工程である冷間鍛造のために制御できる範囲はきわめて少ない。このため鋼の最終使用特性への影響が小さく、かつ、冷鍛特性を著しく向上するための冶金的な方策が種々検討されてきている。

変形抵抗を小さくするために、マトリックスへの固溶強化が著しく大きく、かつ焼入性への影響が比較的小さいものとしてPおよびSiが注目されている。

PおよびSiの固溶強化については、Bain¹⁾がフェライトへのかたさに著しく影響することを示したのをはじめ、Cacy²⁾はSiが引張強さおよび降伏強さを著しく大きくすることをみだしており、炭素鋼および合金鋼についてもSiが変形抵抗を著しく大きくすることがわかっている^{3) 4) 5)}。

つぎに変形能であるが、これには応力集中によるクラックあるいはボイドの発生源およびクラックの伝播

経路となる非金属介在物が、あらゆる鋼種にとって影響が大きい。特に細長く伸びた状態で存在することの多い硫化物については、変形能への影響が大きく、低合金鋼についてこれの増量によって絞りの低下⁶⁾あるいはアップセット試験における限界ひずみの低下⁷⁾がみられることが確認されている。

以上のように、これらの成分および不純物が、基礎特性すなわち圧縮試験値および引張試験値におよぼす影響を検討した報告はすでになされているが、冷鍛の広範囲な実用特性にまで結びつけたものは少ないようである。このため中炭素鋼とCr-Mo鋼について、P、SおよびSi含有量の低下が、冷鍛の実用特性におよぼす影響を明らかにすることをもちろみた。

2. 供試材および実験方法

2.1 供 試 材

供試材はベースとしてS45CおよびSCM3を用い、これらは実験目的により真空溶解(V)、誘導炉溶解(I)およびアーク炉溶解(A)により溶製し、かつすべて球状化焼鈍を施した。その詳細は各実験項目に記する。

昭和47年3月5日受付

*大同製鋼株式会社 中央研究所

2.2 実験方法

(1) 圧縮試験 直径 6 mm, 高さ 11.5 mm の試験片をアムスラー試験機により, 速度 10 mm/min で圧縮した。端面はモリループによりくり返し潤滑した。

(2) 引張試験 直径 10 mm, 標点距離 50 mm の引張試験片によった。

(3) 押し出し加工 直径 25 および 50 mm のブランクを 600 t, 40c.p.m. のマイプレス (ナックル・ジョイントプレス) により前方, 前後方および後方押し出しを行ない, 加圧力, 割れ発生および押し出し品の品質を測定した。加圧力はテンションロッドにはりつけたワイヤーストレンゲージにより, ストロークは差動トランスにて測定した。ブランクの前処理はボンデライト 421 とボンダリユーベ 235 の被膜と, さらに端面のみモリループを塗布した。使用した工具形状を Fig. 1 に示す。

Fig. 1. Punch and die.

(4) バックリング性 直径 6 mm の線材を両端拘束で圧縮し, バックリングせずに圧縮できる最大据込み比を測定した。試験は 200 t 油圧プレスを用い, 圧縮速度は 38 mm/min である。

(5) 盛りり性 直径 25 mm, 高さ 22 mm のブランクを Fig. 2 に示す工具により, 速度 38 mm/min で圧縮し, 中心孔への盛りりの高さを測定した。

Fig. 2. Open-die extrusion.

(6) トリミング性 直径 6 mm, 高さ 11.5 mm の試験片を 87% 据込んで厚さ 2 mm にした後, 穴径 8.4

mm, 前傾斜角 3° のトリミングダイスにより, クリアランス 0.2 mm でトリミングし, せん断力および製品のかえり高さを測定した。

(7) ブランクのせん断性 直径 25 mm の棒材を, 半径 12.5 mm, 前傾斜角 1° の半円形カッターにより, クリアランス 0.15 mm でせん断し, せん断力および切口形状を測定した。せん断速度は 20 mm/min である。

(8) 工具摩耗試験 ポンデ処理した直径 6 mm の線材をヘッダーにより Fig. 3 に示す工程で据込みを行ない, その時の仕上パンチの摩耗を測定した。摩耗は葉山式表面粗さ計により, 円周 4 等分上で測定し,

Fig. 3. Heading sequence.

摩耗断面積の平均値を求めた。加工速度は 30 c.p.s で, 潤滑油は使用しない。パンチは材質 SKD11 で, かたさ HRC62~62.3, 表面粗さは 1.5 μ である。

3. 実験結果と考察

3.1 低 P, S, Si 鋼の基礎特性

予備調査により, Si および P の低下により変形抵抗が減少し, S の低下により限界ひずみが向上することを確認したのち, S45C および SCM3 について P, S および Si を低下し, その基礎特性をベース鋼と比較した。

Table 1 に供試材の成分を Table 2 にその製造工程を Photo. 1 にミクロ組織の例を示す。各鋼種の限界ひずみ, 機械的性質および非金属介在物の測定結果を Table 3 に, 圧縮変形抵抗を Fig. 4 に示す。

Table 3 によれば, 限界ひずみは球状化焼鈍材⑩では RK 鋼がベース鋼にくらべやや向上しているが, その後に仕上引拔を与えた材料⑪ではその差は小さくなる。ここで⑩材が⑪材にくらべて著しく小さいのは, 直径 50 mm の棒材の中心から, 直径 6 mm の試験片を切出したため, 中心附近での値を示すことによる。RK

Table 1. Chemical composition of specimens. (in wt %)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
S45C	0.48	0.26	0.67	0.010	0.010	0.10	—
RK 1 ①	0.49	0.06	0.64	0.007	0.007	0.07	—
RK 1 ②	0.42	0.04	0.63	0.007	0.008	0.08	—
SCM3	0.36	0.29	0.68	0.016	0.008	1.02	0.19
RK 2 ①	0.36	0.06	0.65	0.009	0.012	0.96	0.19
RK 2 ②	0.33	0.09	0.64	0.008	0.005	0.98	0.20

Table 2. Manufacturing process of material.

Melting by 1.3t Hot	7.0φ→Annealing→Drawing(6.15φ)→Coating→Drawing(6.0φ)
Arc furnace Ingot Rolling	30φ→Annealing→Drawing(25.7φ)→Coating→Drawing(25φ)
	87sq.→Hot forging(55φ)→Spheroidizing annealing→Machining→Coating

RK 1 ②

RK 2 ②

Photo. 1. Microstructures of RK spheroidizing-annealed.

Table 3. Basic properties of low P, S, Si steel.

Steel		S45C	RK 1 ①	RK 1 ②	SCM3	RK 2 ①	RK 2 ②
Item	Critical compression strain	①25φ ②50φ	2.39 1.71	2.34 1.78	2.55 1.82	2.51 1.97	2.52 2.10
	Hardness (Hv)	①6φ ①25φ ②50φ	206~197 182~172 142	167~162 175~161 130	157~147 162~144 118	210~201 203~182 164	176~168 176~168 148
Inclusion	d	0.12	0.08	0.04	0.08	0.11	0.02
	d A	0.11	0.01	0.01	0.05	0.04	0.01
	d B	0	0.05	0	0	0.04	0
	d C	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01
Mechanical properties ①6φ	σ _P	55.3	44.1	43.8	53.4	46.8	48.1
	σ _B	61.9	51.7	51.9	59.7	54.1	54.2
	E	32.5	39.4	39.0	33.9	40.5	38.9
	R A	62.1	66.5	66.8	72.9	72.0	70.3
Mechanical properties ①25φ	σ _P	45.4	42.8	40.6	49.9	46.7	46.6
	σ _B	51.3	49.1	46.9	55.8	51.8	52.0
	E	32.8	34.1	35.1	32.3	33.6	32.9
	R A	67.1	68.1	66.8	72.7	75.5	74.7
Mechanical properties ②25φ	σ _P	33.9	34.9	33.4	35.0	34.7	34.3
	σ _B	52.0	48.3	47.1	52.8	49.4	49.9
	E	33.8	35.0	35.6	33.5	34.3	34.5
	R A	64.4	63.4	64.8	75.9	77.4	77.4

① Drawing with reduction of 5 %

② Spheroidizing-annealed

Fig. 4. Stress-strain properties in compression.

1②が特に大きいのは、むしろC量の影響と思われる。かたさは②材ではC、SiおよびP量から推定される値よりも1.5~1.9倍低下しており、①材ではこの差はさらに大きくなっている。介在物は、硫化物がベース鋼よりやや少なくなっているが、B系およびC系はベース鋼と同じかあるいはむしろ増加しているものもあり、Al量が多くなったことによる。耐力および引張強さは、RK鋼がベース鋼より低下してかたさと同じ傾向を示し、伸びおよび絞りは限界ひずみと同じく、その差が小さくなっている。

Fig. 4によると圧縮変形抵抗は 材および②材ともベース鋼より6~12kg/mm² 低下しており、かつその低下量は全ひずみ範囲にわたってほぼ一定である。

3.2 低P、S、Si鋼の実用特性

(1) 押し出し加工特性 ②材の50φおよび5%の仕上引拔を与えた25φブランクを用いて、後方、前後方および前方押し出し加工を行ない、加工圧力-ストローク線図および最大加工圧力を測定した結果を Fig. 5 ~ 8 に示す。

押し出し圧力は後方、前後方および前方いずれもRK

Fig. 5. Extrusion pressure-stroke diagrams in backward extrusion.

Fig. 6. Extrusion pressure and stroke diagrams in combined extrusion.

鋼がベース鋼より $6 \sim 20 \text{ kg/mm}^2$ 低くなっており、かつその低下量は、ストロークの全域ではほぼ一定である。寸法の影響は、 50ϕ ブランクでは、 $\textcircled{2}25\phi$ ブランクにくらべ後方および前後方押出しの50～60%減面率で高くなっている。減面率の影響はいずれの押出しでも50～60%では、加工圧力はほぼ一定となるが、80%減面率では著しく高くなり、かつその程度は $\textcircled{2}25\phi$ 材の方が、かつ後方押出しの方が著しい。さらに80%後方押出しでは極端なピークの発生がみられる。

押出し圧力 P は、工具と材料間の摩擦を無視すると、加工条件が同一の場合には、加工材の変形抵抗に比例することになる。したがってベース鋼の押出し圧力 P_2 と RK 鋼の押出し圧力 P_1 の比は、 $P_2/P_1 = 2k_1/2k_2$ となり、これは工具圧力についても同じである。 $2k$ としては押出し変形中の材料の平均値

Fig. 7. Extrusion pressure-stroke diagrams in forward extrusion.

として $\epsilon = 0 \sim \epsilon_0 = (2/\sqrt{3})P/2k$ での平均値を用いる⁸⁾。変形抵抗が $\sigma = C\epsilon^n$ で表わせるとすると、押出し圧力比は次式となる。

$$P_1/P_2 = \int_0^{\epsilon_0} \sigma_1 d\epsilon / \int_0^{\epsilon_0} \sigma_2 d\epsilon = (C_1/C_2) \{ (n_2+1) / (n_1+1) \} \epsilon_0^{n_1-n_2} \dots \dots \dots (1)$$

$P/2k$ としては、後方および前方押出しに対しておのおの(2)および(3)式を用い、かつ Fig. 4 の結果からひずみ 0.1～1.0 での C および n 値を最少自乗法で求め、押出し圧力の比を計算および実測した結果を Table 4 および Fig. 9 に示す。

Table 4. C and n value.

Steel	$\textcircled{2}25\phi$		50ϕ	
	C	n	C	n
S45C	94.0	0.236	97.8	0.214
RK1①	89.5	0.238	93.0	0.224
RK1②	84.0	0.239	87.0	0.214
SCM3	98.5	0.232	103.0	0.193
RK2①	91.8	0.248	97.0	0.201
RK2②	85.7	0.241	97.0	0.196

Fig. 8. Maximum extrusion pressure.

後方押し $P/2k = 2\sqrt{(1-r)/r} + (7/8)\sqrt{r/(1-r)}$ ⁹⁾(2)

前方押し $P/2k = 1.2(\alpha/90) + \{0.74 + 0.22(\alpha/90)\} \ell_n R$ ¹⁰⁾(3)

Fig. 9. Extrusion pressure ratio.

$r = d/D$, $R = (1/r^2) - 1$, D : コンテナ直径,
 d : 前方押しではダイス直径, 後方押しではポン
 チ直径, α : ダイス半角

Table 4 によると, n 値は RK 鋼とベース鋼はほ
 ぼ同じかあるいはわずかに前者が大きくなっており,

C 値は RK 鋼が小さくなっている。また仕上引拔を与
 えた材料では, n 値が大きくなり, パウシンガー効果
 によるものと思われる。Fig. 9 によると押し圧力
 の低下の実測値は計算値よりやや小さくなっている。

つぎに押し加工時の加工割れの発生であるが, こ
 れは 50φ 材の前後方押し加工時に, その表面に,
 円周方向に伸び, かつ表面から約 45° 方向に内部に進
 む表面割れが認められた。この割れが発生したときの

Fig. 10. Critical base thickness in combined extrusion.

Fig. 11. Distribution of vickers hardness in backward extruded parts.

底厚の測定結果を Fig. 10 に示す。この割れの発生限度は、RK鋼がベース鋼にくらべて大きく、Table 3 の限界ひずみと同じ傾向を示す。このように表面拘束を受けた状態での割れ発生のしやすさについても、圧縮試験における限界ひずみから定性的に推定できる。

押し出し加工品のかたさは、その一例を Fig. 11 に示すように、いずれも RK鋼がベース鋼にくらべてビッカースで10~20低くなっており、ブランクでのかたさの差とはほぼ同じ差をもっている。また、かたさ分布の様式は鋼種による差はみられない。

メタルフローの例を Photo. 2 に示すが、いずれの鋼種でもほぼ同様のフローを示す。

前方押し出し材から削り出した試験片によって、引張試験した結果の一例を Fig. 12 に示す。引張強さおよび耐力はRK鋼がベース鋼より4~15kg/mm² 低くなっており、ブランクでの値よりもその差は大きい。

Fig. 12. Mechanical properties in forward extruded parts.

Photo. 2. Plastic flow in backward extruded part.

伸びおよび絞りについては大きな差はない。

(2) バックリング性 後5%の仕上引拔を与えた直径6mmの線材について、両端拘束での限界据込み比を測定した結果を Fig. 13 に示す。限界据込み比はRK鋼はいずれもベース鋼より大きくなっており、その程度はn値に比例している。

(3) 盛りり性 ①25φのブランクを、Fig. 2のポンチにより60%圧縮したときの、中心穴への材料の盛りり高さを測定した結果を Fig. 14 に示す。いずれもかたさの低いRK1およびRK2がベース鋼にくらべて盛りりがわずかによくなっている。

(4) トリミング性 ①6φの材料を87%据込んだ後、トリミングしたときのせん断応力および製品のかえり高さの測定結果を Fig. 15 に示す。RK鋼はいずれもベース鋼よりせん断応力で6.5~9.5%小さくな

Fig. 13. Critical upsetting ratio.

Fig. 14. Open-die extrusion.

Fig. 15. Trimming.

っているが、かえり高さについてはベース鋼とほぼ同じかむしろ大きくなっている。

(5) せん断性 ②25φの棒材について、半円形カッターによりせん断したときのせん断応力および切口形状を Fig. 16 に示す。せん断応力はトリミングの場合と同様に、RK 鋼がベース鋼よりも 5.5~10%低くなっている。切口形状については、だれはダイス側切口では RK 鋼の方が小さくなっているが、カッター側切口では大差がない。せん断面長さは、カッター側で RK 鋼の方が小さい。破断面角度は RK 鋼がベース鋼よりやや大きくなっている。

(6) 工具摩耗試験 6φの線材を2段ヘッダーにより、圧下率78%で据込み、そのときのポンチ摩耗を測定した結果を Fig. 17 に示す。S45C 系では加工

Fig. 16. Blanking.

数 4,000~5,000 までは初期摩耗で摩耗速度は早い、その後は定常摩耗となり、一定の摩耗速度に落着く。SCM3 系は加工数3,000~5,000で定常摩耗となる。これらの定常摩耗はRK 1はS45Cの 1/1.4~1/2.5, RK 2はSCM3の 1/1.5と著しく少なくなっており、かつSCM3系はS45C系よりも工具摩耗を著しく大きくする。

Fig. 17. Wear of punch.

4. 結 言

以上、S45CおよびSCM3について、P、SおよびSi含有量の低下が、実用冷鍛特性におよぼす影響を調査した結果

(1) PおよびSiの低下により、変形抵抗曲線のC値は著しく低下し、n値はごくわずかに増加する。Sの低下はA系介在物を減じて限界ひずみを向上するが、引抜き加工を与えた材料の圧縮では、この効果は減じられる。

(2) 押し出し加工では、前方、後方および前後方押し出しとも、RK鋼の加工圧力は、変形抵抗曲線から推定できるだけの減少を示し、また加工割れについては、前後方押し出しで、限界ひずみと同じ傾向の割れやすさを示す。

押し出し加工材の機械的性質において、かたさはほぼ加工前での差と同じ差をもち、耐力および引張強さは、加工前での差より大きくなる傾向がある。

(3) 据込みにおける限界据込み比は、RK鋼がやや大きく、n値に比例している。

(4) 盛りり性は、RK鋼が盛りり高さで0.1~0.4mmとわずかに大きい。

(5) トリミング性は、RK鋼はせん断応力は著しく小さくなるが、かえりについては差がない。

(6) せん断性は、せん断応力はRK鋼が著しく小さくなるが、切口の形状についてはほとんど差がない。

(7) ヘッダー加工における工具摩耗は、RK鋼が著しく小さく、ベース鋼の1/1.4~1/2.5である。

なお本研究は、冷鍛用鋼研究グループ内のテーマの一つとして実施したものであり、研究第1部長伊藤哲朗氏の指導と藤倉リーダー他メンバーの協力に謝意を表します。

(文 献)

- 1) E. C. Bain 著、梶山訳；鋼中の合金元素の機能、(1942) 87, 科学主義工業社
- 2) C. E. Cacy and M. Gensamer; Trans. AS M, 32 (1944), 88
- 3) D. J. Blickwede; Metal Progress, 97 (1970) 5, 76
- 4) J. L. Hurley, A. L. Kitchin and R. R. Crawford; Metal Engng. Quarterly, 11 (1971) 3, 36
- 5) J. A. Rinebolt; Metal Progress, 96 (1969) 3, 117
- 6) 武田、大野；住友金属, 22 (1970) 3, 284
- 7) 大野；鉄と鋼, 56 (1970) 4, 204
- 8) 工藤他；日本機械学会誌, 67 (1964) 542, 392
- 9) H. Kudo; Intern. J. Mech. Sci. 1 (1960), 57
- 10) 室田他；日本機械学会誌, 73 (1970) 614, 371