研 究

SKD11 粉末材の機械的諸性質

納 富 完 至**, 古 田 誠 矢**
 畠 本 晃***, 河 合 伸 泰**

Kanji Notomi, Seiya Furuta, Akira Shimamoto and Nobuyasu Kawai: Mechanical Properties of P/M SKD11 Steel.

Steel powders containing 1.5%C-12%Cr have been produced by gas-atomization, and their fully densified P/M steel billets have been made by hot isostatic pressing.

Microstructures and mechanical properties of the P/M steel have been investigated in comparison with the conventional high C-high Cr cold die steel (1.5%C-12%Cr).

In the P/M steel, fine carbides are uniformly distributed, whereas in the conventional steels, large-sized carbides are distributed among fine carbides.

Mechanical properties of the P/M steel are as follows:

- (1) Bend strength, impact strength and wear resistance under unlubricated condition of the P/M steel are superior to those of the conventional steel.
- (2) Compressive yield strength of the P/M steel is equivalent to that of the conventional steel.
- (3) Fracture toughness and wear resistance under lubricated condition of the P/M steel are inferior to those of the conventional steel.

(Received September 27, 1982)

I 緒 言

従来溶製 SKD11材においては、巨大炭化物（一次炭化物）が偏在するために、鋼の機械的特性、熱処理特性を著しく劣化させており、これら一次炭化物のサイズ、形状、分布状態等の制御を目的として、鑄造、鍛造、熱処理工程等で種々の研究がなされてきた。

今回著者らは、ガスアトマイズ-HIP プロセスにより、巨大炭化物を全く含まない SKD11 粉末材を試作し、その機械的特性を、従来溶製 SKD11 材と比較しながら調査したので、本報で報告する。

II 実験方法

II-1 供試材および試験片の製造方法

ガスアトマイズ法により、溶製 SKD11 鋼と同一組成の粉末を試作した。この粉末を、軟鋼製カプセル (90φ×150/mm) 内に充てんし、1050°C で6時間の真空加熱脱気後密封した。つづいて、HIP 成形 (HIP 条件: 1000°C/1000kg/cm²/1hr) にて真密度の供試材を作製した。供試粉末材の製造工程を Fig. 1 に示す。このようにして作製した粉末材と比較用として準備した溶製 SKD11 材の化学組成を Table 1 に示す。

次に、1100°C×2hr 加熱後、熱間鍛造を行ない、粉末材

では鍛造比 1.5St, 4.3S, 17.2S の3種類の鍛造材を、また、溶製材では鍛造比 30S, 95S の2種類の鍛造材を作製した。これらの鍛造材より Table 2 に示す試験片の採取を行なった。なお試験片の採取位置を Fig. 2 に示す。

Fig. 1 Powder-metallurgy processing.

* 昭和54年11月本協会秋季大会にて発表、昭和57年9月27日受理

** (株)神戸製鋼所中央研究所、〒651 神戸市中央区脇浜町1丁目3番18号

*** 日本高周波鋼業(株)富山製造所、〒934 富山県新湊市八幡町3丁目10番15号

† 数字は鍛造比を表わし、アルファベットは鍛造方法を表わしている。詳細については JIS G 0701 を参照のこと。

Table 1 Composition of test materials (%).

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	O
P/M	1.52	0.43	0.34	0.013	0.014	12.17	0.98	0.34	0.002
C/W (Cast & Wrought)	1.50	0.27	0.42	0.025	0.013	12.54	0.94	0.27	0.003

Table 2 Dimension and condition of specimens.

	Specimens			
	Dimension (mm)	Hardness (H_{RC})	Forging ratio	
	P/M, C/W	P/M, C/W	P/M	C/W
(1) Metallurgical test	15□×15 /	59	1.5	30
(2) Bend test	5×10×30 /	61	1.5, 4.3, 17.2	95
(3) Impact test	10□×55 /	61	4.3	95
(4) Compressive test	10φ×10 /	62	4.3	95
(5) Wear test	30φ×8 t	63	4.3	95
(6) Fracture toughness test	50□×16 t	59, 61, 63	1.5	30

最後に、これらの試験片に焼入れ焼もどし熱処理 ($1020^{\circ}\text{C}\times 15\text{分AC}\rightarrow T^{\circ}\text{C}\times 90\text{分AC}$, $T=150, 200, 290^{\circ}\text{C}$) を施して Table 2 に示すような硬度レベルの試験片を得た。

II-2 各種試験

① 材質検査

焼もどし硬度 $H_{RC}59$ の試験片を用いて、以下の検査を行なった。

a) 密度測定

アルキメデス法により密度を測定した。

b) 組織観察

ミクロ組織の観察およびオーステナイト結晶粒度の測定を行なった。またX線解析法による残留オーステナイト量の測定と、カンチメット*を用いての炭化物の平均粒径、体積率、粒度分布等の測定を行なった。

② 抗折試験

5×10×30mm の試験片を支点間距離 20mm で、3点曲げ試験を行なうことにより測定した。繰返し数は $n=$

3 とした。

③ 衝撃試験

10R ノッチ付き 10□×55 / の試験片を用い、シャルピー衝撃試験を行なった。繰返し数は $n=3$ とした。

④ 圧縮試験

10φ×10 / の試験片を用い、圧縮降伏強度 (0.2% 歪) を測定した。繰返し数は $n=3$ とした。

⑤ 摩耗試験

摩耗試験には転がりすべり摩耗タイプの西原式摩耗試験機を用いた。試験片の形状を Fig. 3 に示す。試験条件は非潤滑摩耗では、相手材として SUJ2 の焼入れ焼もどし材 ($H_{RC}45$) を用い、負荷荷重 64.7 kg/mm²、回転数 800rpm すべり率 9.1% で行なった。摩耗量は 2~3 時間毎に試験片を取りはずし、重量を化学天秤で測定することにより求めた。なおこの重量測定結果を用いて、外径寸法変化 (μ) を算出した。潤滑摩耗では、相手材として 3.5Cr-0.8C 鋼の焼入れ焼もどし材 ($H_{RC}66$) を用い、負荷荷重を 140 kg/mm²、その他の条件は非潤滑摩耗

Fig. 2 Sampling of specimen.

* 自動映像分析装置の 1 種である。

Fig. 3 Wear test.

と同様とした。潤滑油は、5%エマルジョンを用い、給油方法は試験片に毎分 40cc 滴下して行なった。

⑥ 破壊靱性試験

コンパクトテンション型試験片 (50□×16.5t) を用いて、ASTM E399 に準じ、破壊靱性値を求めた。試験後、同試験片の硬度測定ならびにマクロおよびミクロ破面観察を行なった。

Ⅲ 実験結果および考察

Ⅲ-1 材質検査

Photo. 1 に供試材の焼入れ焼もどし組織を示す。粉末材の炭化物は 1~4 μ と均一微細であるのに対し、溶製材ではこれらの他に最大 10×50(μ) もの巨大な炭化物も認められる。

Table 3 に供試材の密度、結晶粒度、残留オーステナイト量、炭化物量等の測定結果を示す。同 Table より明らかなように、粉末材と溶製材において、密度、オーステナイト結晶粒度、残留オーステナイト量、炭化物平均粒径、同体積率等に顕著な差は認められない。なお炭化物体積率については、これまでのデータ¹⁾ともよく一致していることが確認される。ところが炭化物の粒度分布については、粉末材と溶製材とで顕著な差が認められる。Table 3 では、各サイズの炭化物が全炭化物体積率に占める割合を () 内に示している。粉末材では炭化物の大半が 4 μ 以下であり、6 μ 以上の炭化物は全く認められない。他方溶製材では 6 μ 以上の炭化物が全炭化物体積率の約40%も占めていること、また 15 μ 以上の大きな炭化物も約 6%程度存在していることがわかる。なお溶製材がこのように巨大な炭化物を含むにもかかわらず、平均粒径において、粉末材と差が認められないのは

Photo. 1 Micrographs of specimens.

(a) P/M, (b) C/W

Table 3 Properties of test materials.

		P/M	C/W
Density (g/cm ³)		7.71	7.68
Austenitic grain size (μ)		11.9	12.2
Retained austenite (%)		16.5	14.9
Carbide	median size (μ)	1.2	1.2
	content (%)	14.7	15.7
	distribution (%)	0~ 2 μ	10.9(74)
		2~ 4 μ	3.7(25)
		4~ 6 μ	0.1(1)
		6~15 μ	0 (0)
		15 μ <	0 (0)

0~4 μ 程度の微細な炭化物の総数が 4 μ 以上のサイズを有する炭化物の個数に比べ圧倒的に多いためである。

Ⅲ-2 抗折試験

Fig. 4 に抗折試験結果を示す。粉末材の抗折値は鍛造比 1.5s のとき 290kg/mm² であるが、鍛造比の増加につれてほぼ直線的に上昇し、鍛造比 17.2S のときには 340kg/mm² になっている。この値は鍛造比 95S の溶製縦目材、すなわち C/W(P)* と比較すると 25%程度優れた値であり、鍛造比 95S の溶製横目材、C/W(R)* と比較すると実に約2.5倍にもなる。

このように粉末材の抗折値が溶製材に比べて優れているのは、溶製材に見られるような比較的低い荷重にてクラックの発生する巨大炭化物を含んでいないからであり、また溶製横目材の抗折値が極めて低いのは、破壊が炭化物の並んだ面に沿って進行したためと思われる。このような現象の定量的な説明については、横堀²⁾による炭化

Fig. 4 Bend strength.

* (P), (R) は Fig. 2 における試験片の採取方法を示す。

Fig. 5 Impact strength.

Table 4 Compressive yield strength.

	$\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)
P/M	235
C/W	237

物の長軸の長さにて整理する試みがある。

III-3 衝撃試験

Fig. 5 にシャルピー衝撃試験結果を示す。粉末材の衝撃値は、1.87kgm/cm² であり、溶製材は 1.35kgm/cm² である。従って粉末材の衝撃値は、溶製材に比べ約40% 優れているといえる。Fig. 4 と比較することにより、シャルピー衝撃値の方が抗折値よりも、炭化物サイズの影響を受けやすいと思われる。このように、衝撃値においても抗折値の場合と同様に巨大炭化物が存在すると特性を劣化させることがわかる。

III-4 圧縮試験

Table 4 に圧縮試験結果を示す。Photo. 1 に示した様に、溶製材は巨大な炭化物を含むため、この巨大な炭化物の存在が、降伏現象に何らかの影響があるかと思われたが、結果として粉末材と溶製材はほぼ等しい圧縮強度を示した。このことより圧縮強度に対しては、炭化物粒度による影響がほとんどないことが明らかになった。またこの結果は、VC 炭化物について調べた石原等³⁾ の実験結果ともよく一致している。このように圧縮強度については、巨大炭化物が存在していても特性を劣化させないことがわかる。

III-5 摩耗試験

Fig. 6 に非潤滑摩耗試験結果を、また Fig. 7 に潤滑摩耗試験結果を示す。Fig. 6, 7 では横軸に摩耗時間、左縦軸に摩耗量（重量減）、右縦軸に外径寸法変化（寸法減）を示す。

Fig. 6 に示す非潤滑摩耗試験においては、摩耗量は、摩耗時間とともに直線的に増加している。同図より粉末材の耐摩耗性は非潤滑摩耗の場合、溶製材よりも約20% 程度優れていると言えよう。また同一溶製材においても試料採取方法により若干耐摩耗性に差があると思われる。

Fig. 7 に示す潤滑摩耗試験においては、非潤滑摩耗試験に比べ荷重が2倍以上であるにもかかわらず、摩耗量

Fig. 6 Wear under unlubricated condition.

Fig. 7 Wear under lubricated condition.

は約15時間試験後においても約 2mg と非常に少なく、潤滑の効果が顕著に認められる。潤滑摩耗の場合には、粉末材は溶製材に比べ耐摩耗性が若干劣るようである。

これらの試験結果について以下に若干の考察を加える。試験片の外径寸法は Fig. 6, 7 に示すように、非潤滑摩耗試験では6時間試験後に約 120~160μ 程度摩耗しているが、潤滑摩耗試験では15時間試験後でも 1~2μ 程度しか摩耗していない。

潤滑摩耗試験では摩耗層が 0.5~1μ 程度であるので、溶製材中の巨大炭化物の脱落は起こりにくく、逆に耐摩耗性に寄与するものと思われる。一方粉末材中の炭化物はその大半が 2μ 以下の微細炭化物であるため容易に脱落し、その結果として、粉末材は溶製材に比べ摩耗量が多くなったものと思われる。

他方、非潤滑摩耗試験では摩耗層が 60~80μ にも達しており、この場合には 20~50μ 程度の巨大炭化物の脱落も容易に起こるものと思われる。また非潤滑摩耗条件下では、小柴等⁴⁾ が指摘しているように、試験片の線接触で局部的に著しい温度上昇と強加工が起こり、それに伴ない溶製材では巨大炭化物の割れ、脱落現象が容易に進行すると言われている。このような理由により、溶製材の摩耗量は粉末材に比べ多くなったものと考えられる。

Fig. 8 Fracture toughness.

III-6 破壊靱性試験

破壊靱性試験結果を Fig. 8 に示す。同図では横軸に焼もどし硬度、縦軸に破壊靱性値 (K_{1c}) を示す。Fig. 8 より明らかなように、粉末材の破壊靱性値は同一硬度の溶製材に比べ約20~25%程度低い値になっている。

Photo. 2 に破壊靱性試験片のマクロ破面写真を示す。写真より明らかなように粉末材の破面は全くフラットである。これに対して、溶製材の破面の表面は非常に凸凹しているのが認められる。このことより、溶製材においてはクラックの伝播が巨大炭化物により曲げられているものと思われる。

Photo. 3 に破壊靱性試験片のミクロ破面写真を示す。写真は疲労破面部の組織である。同写真より溶製材中に含まれる巨大炭化物は非常に割れやすく、これに対して、粉末材中の微小炭化物は割れにくいことが認められる。

以上に述べた2件の破面観察結果より、粉末材の破壊靱性値が溶製材に比べ約20%程度劣っている理由は以下

Photo. 2 Fractographs of fracture toughness specimens.

Photo. 3 Fractographs of fracture toughness specimens.

Fig. 9 Branched crack.

のように考えることができる。即ち、溶製材は巨大炭化物を有しているが、この巨大炭化物が非常に割れやすいため、破壊靱性試験時にクラックの先端が Fig. 9 に示すように屈折または分岐する。ところでき裂先端が分岐すれば、き裂先端部における応力拡大係数が減少⁹⁾ するため、その分だけ試験片の破断荷重（厳密には ASTM E399-72 において規定される P_Q 値）が上昇し、このような現象の認められない粉末材（直線き裂）に比べ、破壊靱性値が向上したものと考えられる。

IV 結 言

ガスアトマイズ-HIP プロセスにより粉末 SKD11 材を試作し、そのミクロ組織および機械的特性につき、従来溶製 SKD11 材と比較検討した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 粉末 SKD11 材に含まれる炭化物は $1\sim4\mu$ と均一微細であるのに対し、溶製 SKD11 材には最大 $10\times50\mu$ もの巨大炭化物が含まれていた。
- (2) その結果、粉末材は溶製材に比べ、抗折値、耐衝撃性、非潤滑摩耗特性に優れており、圧縮特性は同等であった。他方、破壊靱性値、潤滑摩耗特性では溶製材に比べ若干劣っていた。

文 献

- 1) —: 特殊鋼, 27[2] (1978), 10.
- 2) 横堀: 機械学会誌, 165 (1962), 523, 1076.
- 3) 石原, 永井, 椿原: 鉄と鋼, 65 (1979), 1440.
- 4) 小柴, 清永: 鉄と鋼, 46 (1960), 561.
- 5) 北川, 結城: 機論, 41 (1975), 346, 1641.