

粉末冶金法で製造された高炭素高クロム工具鋼の諸性質

河 合 伸 泰*・納 富 完 至**

The Microstructure and Properties of a High-Carbon High-Chromium Powder Metallurgical Tool Steel

Nobuyasu Kawai and Kanji Notomi

The microstructure and properties of a high-carbon high-chromium powder metallurgical (P/M) tool steel (Fe-18%Cr-2%Mo-1%V-2.2%C) were investigated in the as-HIPed and the as-forged (HIP and forged) states and compared with those of a conventionally cast and forged SKD11 (AISI D2) steel. The studies indicated that P/M tool steel contains more carbides and has a finer homogeneous carbide structure than SKD11. The mechanical properties of P/M tool steel are far superior to those of SKD11, except for fracture toughness, because of the finer and more homogeneous microstructure of P/M tool steel.

1. はじめに

高炭素(C)高クロム(Cr)工具鋼は金型、パンチ、刃物などに広く使用されているが、その使用条件はますます過酷になり、それに伴い工具鋼に対する要求が厳しくなっている。しかし、粗大な炭化物が不均一に分布しているために、従来の鉄鋼の製造法では、その機械的性質の改善が難しい。本論文では、急冷凝固されたガスアトマイズ粉末を原料に用いることにより粗大炭化物が皆無となり、機械的特性が改善されると期待されるため、従来の代表的な工具鋼であるSKD11よりもさらに高C高Cr合金の設計を行い、試作した材料の特性を調査したので報告する。

2. 実験方法

実験に供した材料は(株)神戸製鋼所のKHAプロセスで製造した。KHAプロセスはFig.1に示すように、まず、所望の合金成分になるように工具鋼を誘導溶解炉で溶かし、その溶鋼を溶鋼鍋であるタ

* 機械工学科 ** 元(株)神戸製鋼所 鋳鍛鋼事業部

ンディッシュにとり、ガスアトマイズ装置で高純度、高圧N₂ガスジェットにより粉化する。急冷凝固して得られた粉末を原料として、これを軟鋼製のカプセルに充填し、加熱しながら缶内を真空引き、密封の後、熱間等方圧加圧（HIP）処理をして緻密な工具鋼インゴットを製造し、その後、所望形状に鍛造、圧延する。

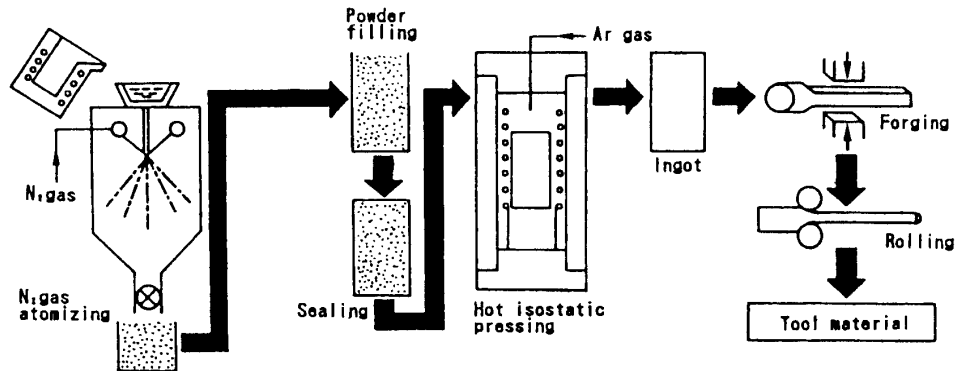


Fig.1 Scheme of the KHA process

Table 1 Compositions and forging ratios of the materials tested

	Chemical Composition wt%							Forging Ratio
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	O	
As HIPed KAD 181	2.24	0.35	0.36	18.13	1.98	1.07	0.010	—
As Forged KAD 181	2.22	0.32	0.35	18.08	2.00	1.07	0.010	7.8
Conventional SKD11	1.46	0.38	0.43	11.94	0.84	0.21	0.002	>10

今回使用した材料は3種類で、その合金成分と鍛造比をTable 1に示す。KAD181という名称を付けたものが今回KHAプロセスで製造された工具鋼であり、比較のために用いたSKD11は従来の鉄鋼製造法により鋳造、鍛造をして製造した工具鋼である。As HIPedはHIP処理をしたままの材料、As ForgedはHIP後のインゴットを鍛造した材料である。鍛造したKAD181とSKD11の試験片はFig.2に示すように鍛造方向に平行と直角の両方向から採取し、それぞれL方向、T方向とした。3種類の工具鋼ともに1020℃から焼入れし、Table 2に示す条件で2回焼もどしを行った。これらの熱処理の後、全ての試験片は研磨して試験に供した。

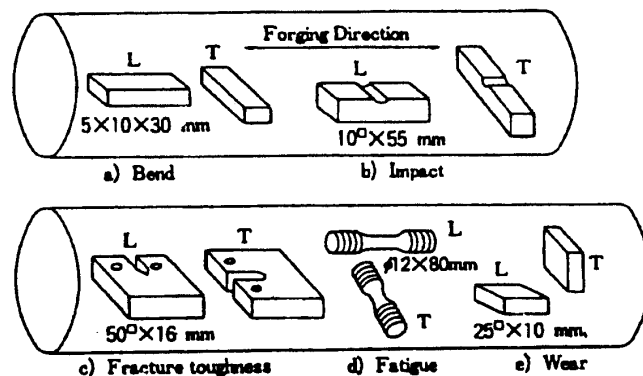


Fig.2 Sampling of specimens

Table 2 Tempering temperatures used in the experiments

Alloy	KAD 181	SKD 11
Specimen		
Metallurgical test	100~600°C	100~600°C
Bend test		
Impact test	500, 550, 600°C	100, 500, 550°C
Fracture toughness test		
Fatigue test	550°C	200°C
Wear test		

3種類の工具鋼の金属組織、熱処理特性、曲げ試験、衝撃試験、破壊靱性試験、疲れ試験、磨耗試験、実用化試験を行った。

金属組織試験では炭化物サイズ、炭化物量、炭化物の形態、残留オーステナイト量を金属顕微鏡、走査型電子顕微鏡（SEM）、X線回折を用いて、また、熱処理特性は焼もどし温度による硬さ変化を求めた。曲げ試験は3点曲げ試験法により行い、破壊靱性値（ K_{IC} ）はASTM E399に規定されるコンパクトテンション試験片を用いて求めた。疲れ試験は60HRCの硬さレベルの試験片で回転曲げ試験により、磨耗試験は60HRCの硬さレベルの試験片で大越式磨耗試験により行った。

実用化試験は樹脂成形モールドへの適用試験を金型ユーザに依頼して寿命試験を行った。

3. 結果および考察

3.1 金属組織

3種類の工具鋼の金属顕微鏡写真をFig.3に示す。a の As HIPed KAD181と bの As Forged KAD181には数 μm の非常に微細な炭化物が均一に分布しており、b の As Forgedでは0.5 μm 以下のより微細な炭化物が観察される。これに対して c の SKD11では30~50 μm の粗大炭化物が微細炭化物の中に偏析しているのが見られる。

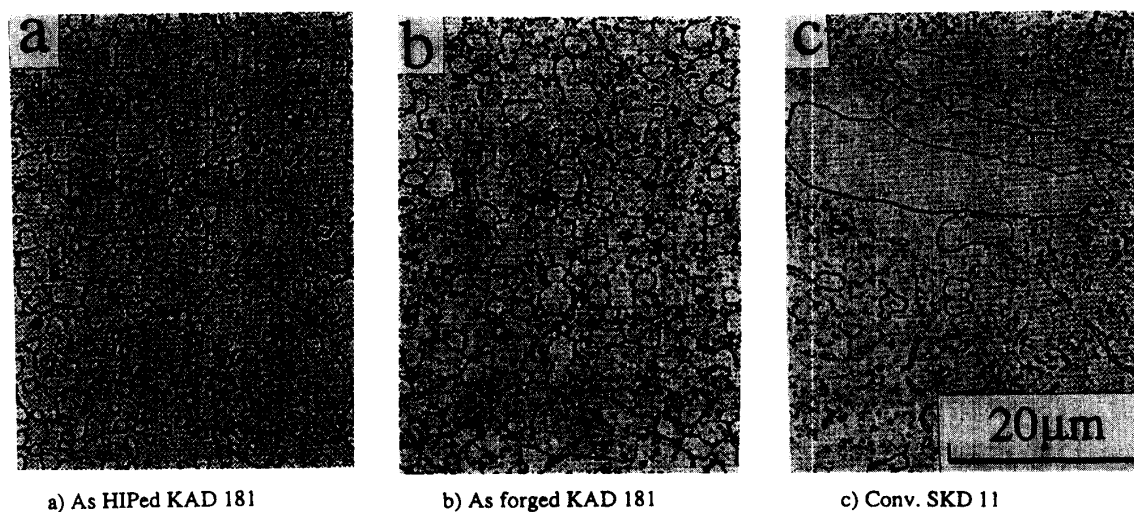


Fig.3 Micrographs of specimens

Table 3は試験片中の炭化物の形態とサイズ毎の量を示している。いずれの試験片の炭化物も M_7C_3 であるが、C、Cr、Mo、V含有量が少ない分だけSKD11は炭化物量がKAD181の27~28%に較べて約17%と少ない。KAD181の炭化物は $8\mu m$ 以上が存在しないのに対して、SKD11では $15\mu m$ 以上、 $50\mu m$ にも及ぶ粗大炭化物が存在する。

Table 3 Type and contents of carbide in materials tested

		As HIPed KAD 181	As Forged KAD 181	Conventional SKD 11
Type		M_7C_3	M_7C_3	M_7C_3
Content vol%	Total	26.6(100)	28.5(100)	16.8(100)
	$0\sim 2\mu m$	2.6(10)	6.2(22)	5.4(32)
	$2\sim 4\mu m$	14.3(54)	12.9(45)	2.8(17)
	$4\sim 6\mu m$	7.8(29)	7.2(25)	2.4(14)
	$6\sim 8\mu m$	1.9(7)	2.2(8)	2.5(15)
	$8\sim 15\mu m$	0(0)	0(0)	2.0(12)
	$15\mu m <$	0(0)	0(0)	1.7(10)

3.2 熱処理特性

Fig.4は焼もどし温度を変化させた時の硬さ変化を示したものである。焼入硬さはKAD181とSKD11の両者でほとんど差はない。焼もどし温度を上昇させると硬さは徐々に低下するが、 $400^{\circ}C$ 以上になると上昇し始める。この上昇は残留オーステナイトのマルテンサイトへの変態、微細な二次炭化物の生成によるものである。 $400^{\circ}C$ 以上での最高硬さはKAD181で64HRC、SKD11で58HRCとKAD181は6ポイント高い。

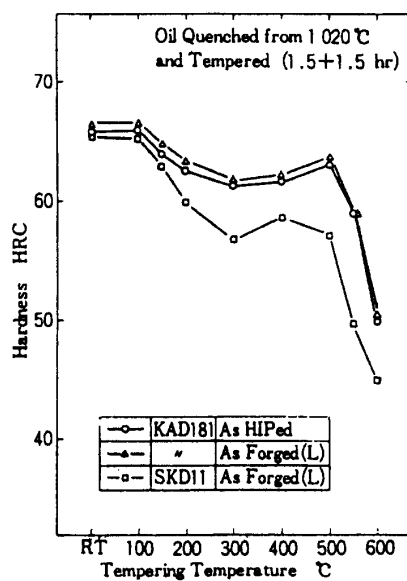


Fig.4 Tempered hardness

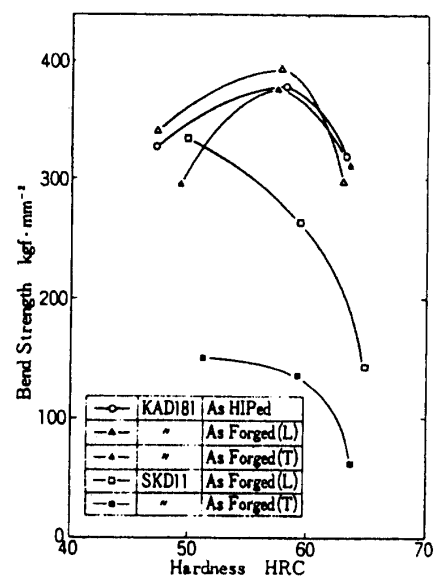


Fig.5 Bend strength

3.3 曲げ試験

Fig.5は曲げ強さを硬さに対してプロットした図である。KAD181の曲げ強さはSKD11のそれよりもはるかに高く、As HIPed KAD181でさえ高い値を示すのは均一微細に分布した炭化物のためである。

例えば、60 HRCの硬さで較べると、KAD181 (L) は SKD11 (L) よりも1.4倍、KAD181 (T) はSKD11 (T) よりも2.8倍高い値を示す。KAD181はSKD11よりも強さの方向依存性は少ない。

3.4 衝撃試験

シャルピー衝撃値と硬さの関係をFig.6に示す。SKD11は、炭化物がバンド状に並んでいるので、常にL方向がT方向よりも高い値を持っている。KAD181は炭化物が均一分布しているの、L方向とT方向の差が小さい。

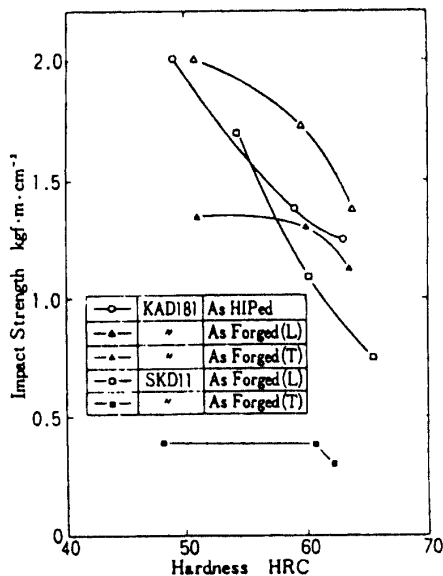


Fig.6 Impact strength

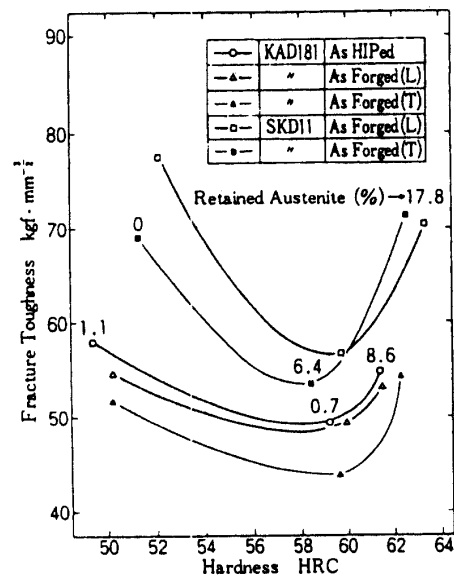


Fig.7 Fracture toughness

3.5 破壊靱性値

Fig.7は破壊靱性値と硬さの関係を示している。図から明らかなように、KAD181はSKD11よりも低い値を示す。SKD11では粗大炭化物が存在するので、亀裂の先端がこれらの炭化物に到るとそこで曲がったり、分岐したりして、亀裂の先端での応力拡大係数を低下させる¹⁾。これがSKD11の破壊靱性値を高めた1つの原因と考えられる。

通常、硬さが上昇するほど破壊靱性値は低下する。しかしながらこの場合は硬さが60 HRC付近で極小値を示すが、これは残留オーステナイトが原因である²⁾。

3.6 疲れ試験

硬さを60 HRCに熱処理で調整をして回転曲げ疲れ試験で得た結果をFig.8に示す。KAD181はSKD11

よりもはるかに均質な組織を有しているので、KAD181の疲れ特性はSKD11のそれよりも良好である。図中の②と④、③と⑤を比較するとこのことがよく理解できる。

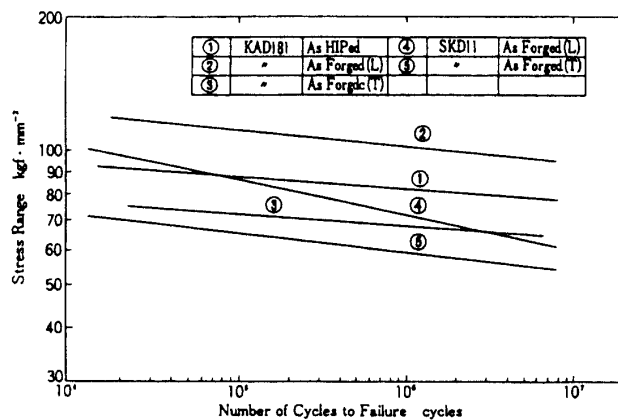


Fig.8 Fatigue properties of specimens (60 HRC)

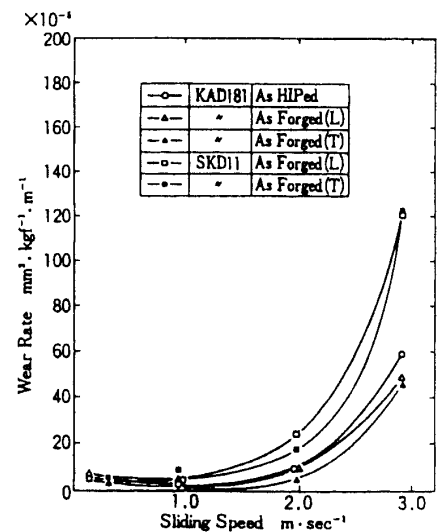


Fig.9 Wear resistance of specimens (60 HRC) rubbed against SCM420

3.7 磨耗試験

熱処理で硬さを60 HRCに調整した試験片を用いて大越式磨耗試験を行った結果をFig.9に示す。図からわかるように、KAD181はSKD11よりも耐磨耗性が良好である。とくに1.96m/sを越える速度領域、すなわち、凝着磨耗領域において顕著である。これについては、KAD181がSKD11よりも硬さが高いことと炭化物量が多いことに原因がある。

3.8 実用化試験

KAD181の利用範囲は樹脂成形金型、パンチ、スリッターや切断機の刃物、料理用ナイフや刃物、金属製品の冷間鍛造用あるいはファインブランキング用金型、圧延ロールなどである。今回はKAD181の利点が発揮されやすい樹脂成形金型への実用化試験を行った。最近樹脂中にシリカやガラスなどの金型磨耗にとっては厳しいフィラーを添加して強度、耐熱性、難燃性を高めることが多いが、KAD181はこのような樹脂の成形に最適と考え、行った実用化試験結果がTable 4である。

ICパッケージの樹脂封止用金型ではシリカを60%含有するEP樹脂で16万ショット以上と従来のSKD11よりも3倍以上、電磁リレー部品用金型ではガラスを30%含むPBT樹脂を成形したが、KAD181はSKD11の5倍、マイクロスイッチのプランジャー用金型では1.3倍以上、電磁リレーコイルのスプール、ソケット用金型では約2倍の金型寿命を示した。これらの対象では金型寿命は1.3~5倍に伸びているばかりでなく、KAD181は熱処理時の寸法安定性が高く、歪みが小さいので、金型加工コストも低くなるメリットがあることが判った。

Table 4 Applications of KAD181 in molds for plastics with abrasive fillers

No.	Mold Parts	Resin	Conv. (SKD11)		KAD181	
			Hardness	Life/Shot	Hardness	Life/Shot
1	IC Package	EP+60%Silica	58HRC	50,000	62HRC	160,000 (Continued)
2	Electromagnet Relay Parts	PBT+30%Glass	60HRC	100,000	62HRC	500,000
3	Plunger of Micro Switch	MF+Glass	59HRC	1,500,000	62HRC	2,000,000 (Continued)
4	Spool and Socket of Electromagnet Relay Coil	PBT+30%Glass	60HRC	800,000	63HRC	1,500,000

4. おわりに

ガスアトマイズ粉末を用いてHIP処理により固化した高C高Cr工具鋼は高い靱性と耐磨耗性が要求される用途に開発されたが、研究室での機械的特性試験では破壊靱性値を除いてこのKAD181は従来鋼材のSKD11よりも高い靱性と耐磨耗性を有することが確認された。また、実用化試験でも予想されたとおり樹脂成形分野で良好な結果が得られた。料理用刃物でも良好な結果が得られ、さらに金属成形用や切断用に試験を行っている。

参考文献

- 1) H.Kitagawa and Y.Yuuki ; Trans.Jpn. Soc. Mech. Eng. 41 (1975), 1641
- 2) C. Kim, A. R. Johnson and W. F. Hosford ; Metall. Trans. 13A (1982), 1595

(平成10年12月 1 日受理)