工具鋼系合金設計手法の確立による 新冷間ダイス鋼 ARK1® の開発

久保田邦親¹⁾ 田村 庸²⁾ 内田 憲正³⁾
福元志保⁴⁾ 阿部行雄⁵⁾

1. はじめに

工具鋼は多様な製品形状を有する金型の基材として使用される。このなかでも、各種金属プレス金型、エンジニアリングプラスチック成型用金型等の比較的温度の低い条件で成型する金型には冷間ダイス鋼の JIS SKD11 (Fe-1.5C-12Cr-1Mo) を使用するのが一般的である。SKD11 は耐摩耗性、熱処理条件に対する安定性に優れているため汎用鋼として位置付けられているが、被削性が乏しいため SKS3 (Fe-1C-0.5Cr-1Mn) 等の特殊工具鋼の使用や、さらには 1980 年代後半より SKD11 の被削性を改善した改良鋼が各社で開発されてきた⁽¹⁾。特に最近では製造業のコアスキルである金型産業さえも国際競争にさらされ、コスト低減やリードタイム短縮化が必須とされるなか⁽²⁾、切削工具、加工機等の開発と並行して冷間ダイス鋼の被削性の改善は急務となっていた。

このような背景から、被削性を冷間ダイス鋼の中で最も高めるとともに、熱処理特性を SKD11 に極力近づけることで、被削性と汎用性、さらには強靱性を兼ね備えた新冷間ダイス鋼 ARK1® を開発した。この ARK1® の合金設計の考え方と諸特性について紹介する。

2. 新冷間ダイス鋼 ARK1® の合金設計の考え方

汎用性には使いやすさ・作りやすさがまず重要であり、この点から見た冷間ダイス鋼の合金設計手法を述べる。もともと工具鋼は複数の炭化物相を形成し、添加成分がそのままマトリックスへの固溶成分とはならないことや、多元系で多相系の複雑な状態図となるため理論的予測が難しく、膨大な成

分実験が行われてきた⁽³⁾。しかし、我々は最近の状態図計算ソフトの精度や機能から見て、マトリックスの固溶成分予測に十分な精度があることを確認してきた。図 1 には状態図計算ソフト「サーモカルク」⁽⁴⁾ により計算した固溶 C 量と焼き入れ硬さの関係を十数種類の冷間工具鋼を対象に整理したものである。硬さは固溶 C 量によって放物線則で整理される。これは低固溶 C 域では C の固溶強化のため硬さは増加傾向を示し、高固溶 C 量の領域では残留オーステナイトの生成により減少傾向を示すため放物線則で整理され⁽⁵⁾、固溶 C 量が 0.6 mass% 付近で硬さが最大値になる。たとえば SKD11 は標準焼き入れ温度の 1030℃ で固溶 C 量が 0.6 mass% となるのが計算され、合理的に硬さを出す成分設定になっていることが分かる。

この 1030℃ という温度は市中の工具鋼熱処理の標準焼き入れ温度であり汎用熱間ダイス鋼の SKD61 などこの温度で処理されている。そこで、合金設計の基本に焼き入れ温度 1030℃ という条件を据えた。図 2 には、サーモカルクで得られた 1030℃ での C-Cr 等温状態図を模式的に示す。C や Cr が増加すると (A) 線より右上では M_7C_3 型の炭化物が存在する領域である。その中に SKD11 の成分が位置する。(B) 線は SKD11 の固溶 C 量と等しくなる C-Cr 添加量を、(C) 線は固溶 Cr 量が等しくなる C-Cr 添加量を示している。(B)、(C) の両固溶線が (A) 線を境に折れ曲がっている。これ

図 1 冷間工具鋼の焼き入れ時の硬さと計算固溶 C 量。

* 日立金属株式会社
冶金研究所：1), 2) 主任研究員 3) 所長
安来工場製品企画センター：4) 技師
本社特殊鋼カンパニー技術部：5) 部員
Development of New Cold Working Tool Steel “ARK1®” by Using New Alloy Design Methodology for Tool Steel; Kunichika Kubota, Yasusi Tamura, Norimasa Uchida, Shiho Fukumoto, Yukio Abe (Hitachi Metals, Ltd.)
2002年 1 月 14 日受理

は(B)線で説明すると、 γ 単相域では添加C量=固溶C量となるので垂直な線で示されるが、 $\gamma + M_7C_3$ 二相域では添加したCの一部が炭化物を形成するため、過剰にCを添加しないといけなくて高C側へと折れ曲がっている。

この図から、固溶C、Cr量とも完全にSKD11と一致するC-Cr添加量は存在しないことが分かる。しかし、(A)線より高C、Cr量の領域では固溶線(B)、(C)が近接しているため、斜線で示す範囲は、SKD11に近似されたマトリックス組成になりやすいことが分かる。また、従来のSKD11改良鋼A、Bもこの両固溶線が近接している領域に入っていることは興味深い。ARK1®は被削性を阻害する粗大 M_7C_3 炭化物を極力減らすために斜線範囲内で一番(A)線より設定した。

次にこの冷間ダイス鋼として有望な組成域上の(M)線に沿って切断した状態図を図3に示す。従来改良鋼A、Bの組成は γ 単相域が狭いかあるいは存在しないので加工熱処理が適用できないが、ARK1®ではそれを可能にする組成でもある。さらに、A、B組成は固液共存温度幅が大きいため、インゴットの大型化をして行くと凝固欠陥が発生しやすく、製造性も良くない。逆にARK1®より更にC、Cr量を減らすと、

図2 1030°Cにおける等温状態図と等固溶線。

図3 図2の(M)線上で切断した状態図 (W(C); 添加C量, W(Cr); 添加Cr量, Cr添加量はC添加量と連動して変化しその関係は $W(Cr) = 5.67 \times W(C) + 3.5$, となっている)。

1030°Cでの焼き入れ時に未固溶炭化物が消失してしまい旧オーステナイト粒が粗大化し靱性が低下する。以上説明した観点から、開発鋼ARK1®のC、Cr添加量が最も実用性の高い合理的な組成であると判断した。これをベースにMo、Si、V、S等の最適化を行いSKD11と極力近似した熱処理特性、SKS3と同等の被削性を有するARK1®の開発を終えた。

3. ARK1®の諸特性

図4はARK1®を含む冷間工具鋼の被削性試験結果である。冷間ダイス鋼であるSKD11、改良鋼AはSKS3に比べて、被削性が悪い。原因はSKS3の含有炭化物は比較的軟質の M_3C (1600 HV)であるのに対し、両鋼中の炭化物が硬質な M_7C_3 (2400 HV)であることによる。一方ARK1®は冷間ダイス鋼系であるにもかかわらずSKS3と同等の被削性を有している。これは前述したように粗大な M_7C_3 炭化物を極力低減する合金設計に加えて、Sによるマイクロアロイングを行ったためである。この結果、現状の冷間ダイス鋼では最も被削性が良いものとなっている。

図5にはシャルピー衝撃試験結果を示している。Sの添加で最も懸念されるのが、靱性の低下であるが、ARK1®では炭化物の組織制御が可能のため、現状の冷間ダイス鋼では最も強靱な材料となっている。

図6は焼き戻し温度と硬さの関係を示している。大幅な組成変更にもかかわらず、マトリックス成分をSKD11に近似化しているために同じような硬さの挙動を示しており、SKD11と同一条件での熱処理が可能である。当然ながら焼き入れ性もSKD11と同等でSKS3のような急冷をしなくても良いため焼き入れ冷却時の曲がり、変形を防止できる。

図7には精密金型で問題になる熱処理変寸の変化を示す。熱処理変寸は、(1)マルテンサイト変態による膨張、(2)残留オーステナイトの分解による膨張、(3)炭化物析出による収縮、(4)炭化物のマトリックス拘束効果が複雑に絡み合っているので制御が難しいが、基本的にはARK1®はSKD11のマトリックス組成への近似により同等の挙動を示す。既存鋼A等はSKD11のマトリックス組成への近似が完全でないため、

図4 各材料の切削寿命(逃げ面摩耗0.3 mmを寿命とした)。

図5 各材料のシャルピー衝撃値(L; 圧延方向, T; 圧延直角方向)。

図6 焼き戻し軟化挙動(鋼種名併記の数字は焼き入れ温度)。

520℃付近で大幅な膨張が発生し金型製作時に問題となる場合がある。

表1はARK1®とJIS鋼種との主要特性の優劣比較の全体像を定性的に示したものであるがARK1®は各特性ともバランス良く達成されていることが分かる。SKS3より耐摩耗性が優れているのはARK1®には M_7C_3 炭化物が適量存在しているためである⁽⁶⁾。現在適用が進みつつある様々な表面処理性も考慮しているのでSKD11対比で不足気味の耐摩耗性も十分補うことができ⁽⁶⁾、より高機能な耐摩耗部材を提供できる可能性が広がっている。

4. 実施状況および特許

実作業面では従来鋼(SKD11およびA, B鋼)対比で20～40%の加工効率向上が認められている⁽⁶⁾。また金型使用時の寿命状況も従来鋼と遜色ない、あるいは破損寿命の向上が認められている⁽⁶⁾。最近の切削技術の高度化を背景に、金型メーカーの一部では精度追求のために、60HRCに調質したARK1®を切削するところも出てきている。

また、ARK1®は発売から2年が経過しており1000トン/年程度販売しているが、工具鋼の市場の性質から考えると顕著な販売量の増加を示している。特許に関しては、7件出願

図7 焼き戻し時の寸法変化率(鋼種名併記の数字は焼き入れ温度)。

表1 各材料の特性比較。 優 ← 劣
◎ ○ △ ×

	被削性	靱性	熱処理容易性	耐摩耗性
ARK1	◎	◎	◎	○
SKD11	×	×	◎	◎
SKS3	◎	△	×	×

している⁽⁷⁾。

5. おわりに

SKD11改良鋼は各社各様の仕様を提示しているので、顧客に混乱を引き起こしてきたことも否定できない。工具鋼は流通を通じて徐々にロットが細くなり顧客へ届けられ、少ロットの熱処理、加工が各所で行われるため、汎用性の高いことが重要である。この観点では主性能と関連しない仕様は汎用鋼とあわせるべきであるが、今まではなかなか難しかった。しかし、本報告のような合金設計の高度化により、より汎用性を持たせ、製造面でもシナジー効果の高い合金開発が出来るものと思われる。ひるがえって考えてみると、前述した販売量の急増は、新たな汎用鋼になる予兆とも考えられる。

文 献

- (1) 内田憲正：熱処理，41(2001)，p. 204.
- (2) http://www.hello-web.co.jp/JSDMT/katudou/sokeig/wg_hokok.ht#w1 型技術協会型技術WG報告書，(2000)。
- (3) 松田幸紀，須藤興一，常陸美朝：電気製鋼，60(1989)，p. 311.
- (4) B. Sundman, B. Jansson and J. O. Andersson: Calphad, 9(1985), 2, 153.
- (5) 藤田利夫ら訳 F. B. Pickering 著：「鉄鋼材料の理論と設計」丸善，(1981)
- (6) 阿部行雄，久保田邦親，田村 庸他：日立金属技報，17(2001)，87.
- (7) 例えば特開2001-107181.