

技術資料

Technical Data

ダイカスト金型用の高熱伝導率工具鋼 “DHA-Thermo”

河野正道*

High Thermal Conductivity Tool Steel for Die-Casting “DHA-Thermo”

Masamichi Kawano

Synopsis

High thermal conductivity tool steel for die-casting “DHA-Thermo” has developed. (Thermal conductivity: 1.6 times of that of JIS SKD61 (AISI H13)). Application of this improved steel will offer shorter die-casting cycle time, prevent the die from soldering and refined microstructure of product.

It is essential to maintain the die at low /stable temperature during die-casting in order to ensure adequate die life, reduce die-casting cycle time and increase solidification rate of product. In general, cooling capability of tool steel is improved by increase of thermal conductivity. Therefore the commercial interests had been mainly focusing on high thermal conductivity tool steel.

Generally, reduction of alloying elements in steel for higher thermal conductivity leads to lower mechanical properties. For the development of DHA-Thermo, it was very important to ensure both high thermal conductivity and proper toughness/strength at elevated temperature. To balance high thermal conductivity with adequate mechanical properties, the influence of alloying elements on steel properties was fully investigated. Consequently, the optimal composition steel “DHA-Thermo” was developed.

Die-casting test results of DHA-Thermo show that the die temperature is decreased by approximately 140 K compared with that of JIS SKD61 and the microstructure of products is refined. Markedly decrease of die temperature leads to 10 % reduction of die-casting cycle time through increasing solidification rate.

1. はじめに

ダイカスト金型を冷却する目的は、①凝固速度の増大による鑄造時間の短縮と鑄造組織の微細化、②焼付きや熱疲労亀裂の軽減による金型寿命の延長、である。このように、製造原価や鑄造品質に直結するため、金型の冷却は重要な技術と位置付けられてきた。近年では、生産サイクルの短縮や鑄造技術の進歩が型の高温度化を招いたことから¹⁾、金型の冷却は重要性をさらに増している。

金型の冷却能を大きく改善するには、内部冷却回路の増設や意匠面への近接が効果的である。ただし、これらの手法は金型構造の制約を受けやすく、水冷孔割れの危険性も増す²⁾。そこで、内冷方案は変更せず、高熱伝導率のタングステン合金を金型に適用する場合がある。し

かし、タングステン合金は冷却能に優れる反面、強度や韌性に課題を残している。

以上の経緯から、高い熱伝導率と十分な機械的性質を兼備した金型用鋼への潜在ニーズは大きい。そこで、熱間工具鋼の高熱伝導率化を検討した。まず、金型の冷却時間を見積った数値解析結果から、熱伝導率の目標を 37 W/m/K と定めた。そして、合金元素と諸特性の相関から成分を検討し、汎用鋼 JIS SKD61 対比 1.3 ~ 1.6 倍の熱伝導率を確保しつつ、金型に必要な機械的性質も併せ持つ DHA-Thermo を開発した。

DHA-Thermo は「高熱伝導率」という従来に無いコンセプトを有する金型用鋼である。熱交換器としての役割を果たすダイカスト金型において、冷却能の高さは重要な実用性能である。本報では、DHA-Thermo の基礎特性

2010年1月14日受付

*大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

と、ダイカスト試験において確認された冷却効率の改善効果を紹介する。

2. 熱伝導率の目標値

Fig.1は、金型の冷却時間と熱伝導率 λ の関係を有限要素法によって見積った結果である。解析モデルは、 ϕ 8 mmの内冷孔を有する ϕ 80 mm \times 80 mmの金型である。673 K均熱を初期状態とし、表面が473 Kに到達するまでの所要時間を評価した。冷却時間は、JIS SKD61に相当する $\lambda=23.4$ W/m/Kの場合を100%としている。

JIS SKD61から純鉄に金型材を変更すると、冷却時間の短縮効果は28%に達し、これが鉄合金を使用する場合の限界となる。一方、その半分となる14% ($\lambda=37$ W/m/K)でも実用上は大きな効果である。また、合金化による λ の低下を考慮すれば、金型用鋼の上限に近いとも考えられる。以上より、 $\lambda=37$ W/m/Kを目標値とした。

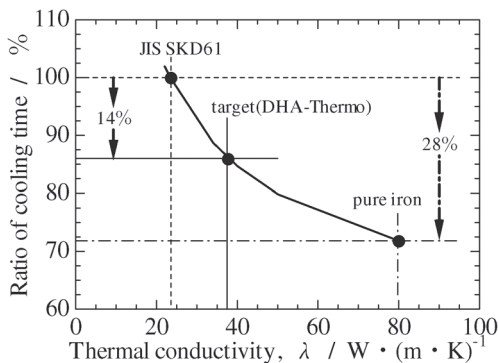


Fig.1. Influence of thermal conductivity on cooling time of die. Geometry of die is 80 mm diameter with 80 mm high and water-cooling inner pipe of 8 mm diameter is given. Cooling time at surface of die from 673 K to 473 K is estimated by FE-analyses.

3. 鋼の諸特性に及ぼす元素の影響

DHA-Thermoの成分を検討するため、0.4% CのSi-Mn-Cr-Mo-V鋼の特性を調査した。これらの鋼を1303 Kから4 K/sの速度で焼入れ、複数回の焼戻しによって所定の硬さに調質した後、評価に用いた。

Fig.2は室温における熱伝導率 λ (W/m/K)を示す。 λ はSi, Mn, Crの増加によって減少する。特にSiの

影響が顕著で、0.1%から0.3%へのSi増量は λ を4ポイント低下させる。一方、MoとVの寄与は非常に小さい。以上より、マトリックス中に固溶し易い元素が λ に悪影響を及ぼすと考えられる。

強度や靱性に大きく影響する焼入れ性は、金型の耐久性を確保するうえで重要な特性である。Fig.3は、マルテンサイト臨界冷却速度に及ぼすMnとCrの影響を示す。従来の知見どおり、これらの元素が増加すると焼入れ性は改善する。また、熱伝導率の場合と同様に、MoとVの寄与は限定的であった。

衝撃値や被削性なども調査した結果、熱伝導率と他特性は背反する場合の多いことが分かった。DHA-Thermoの開発においては、高い熱伝導率と金型に必要な機械的性質を兼備する成分系の選択が最大の課題であった。

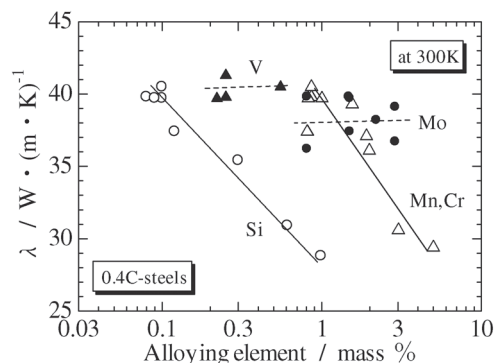


Fig.2. Relation between amount of alloying elements and thermal conductivity. Quenched and tempered steels to approximately 46 HRC are used.

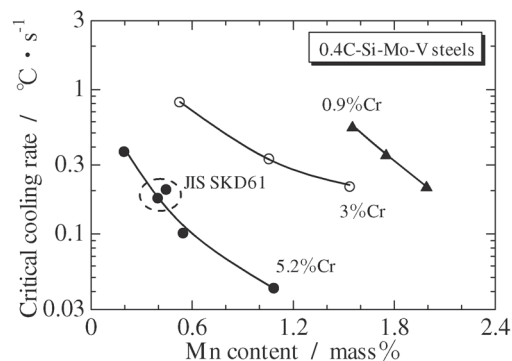


Fig.3. Influence of Mn and Cr on martensitic critical cooling rate. Critical value is evaluated through transformation behaviour on continuous cooling process from 1303 K.

4. DHA-Thermoの基礎特性

DHA-Thermoの諸特性を、ダイカスト金型用鋼の代表であるJIS SKD61と比較した。Fig.4は、熱伝導率の温度依存性を示す。金型の断面内温度範囲である673 K以下において、目標値の37 W/m/Kを達成した。室温では、DHA-ThermoはJIS SKD61の1.6倍である。

Fig.5は、1303 Kから等速冷却した場合の相変態特性を示す。DHA-Thermoのマルテンサイト臨界冷却速度はJIS SKD61の1.2～1.9倍と比較的に小さく、熱間工具鋼として必要な焼入れ性は確保している。Fig.6は4 K/sの急冷後に44 HRCに焼戻した状態の金属組織である。Ms点が同等である両鋼の組織に、顕著な差は認められない。一方で、ベイナイト変態開始温度が高いDHA-Thermoは、緩速焼入れ時の組織が粗大化しやすい。

Fig.7は、焼入れ速度に対する衝撃値の変化を示す。DHA-Thermoが通常製法のJIS SKD61より高位な理由は、破壊の起点となる粗大な晶出炭化物が少ないためである。一方、クリーンな状態では焼入れ性の影響が顕著となるため、特殊な溶解方法が適用されるJIS SKD61プレミアム材よりは低位である。

Fig.8は、急冷材を3.6 ks焼戻した場合の硬さを示す。JIS SKD61対比、最高硬さは約7ポイント低い50 HRC程度であるが、最高硬さを与える温度は75 K高い873 Kとなった。一方で、Fig.9に示すとおり、高温引張強さには顕著な差が認められない。高温における伸びや絞りにはJIS SKD61と同等であった。

機械疲労強度、遅れ破壊強度、被削性、耐溶損性、溶接性については、JIS SKD61プレミアム材と大差が無いことを確認している。

なお、DHA-Thermoの使用においては、焼入れ、サイズ、窒化、の3点に注意が必要である。まず、雰囲気によってはJIS SKD61よりも顕著に脱炭するため、焼入れ加熱は真空中が望ましい。焼入れ性がダイス鋼ほど高くないため、冷却には4 Bar以上の加圧ガス雰囲気推奨する。冷却の制約に加え、適用サイズは40 kg未満に限定である。また、DHA-Thermoの窒化層は「軟らかく・深く」なる。Fig.10は、823 Kで10.8 ksの塩浴窒化処理を受けた素材の硬さ分布を示す。JIS SKD61対比、表面硬さは約250 HV低い800～900 HV、窒化層の深さは約1.4倍となる0.2 mm程度である。

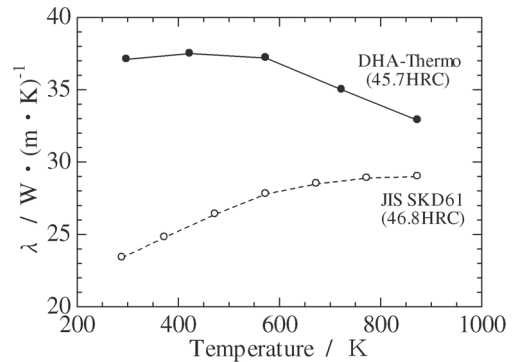


Fig.4. Temperature dependence of thermal conductivity.

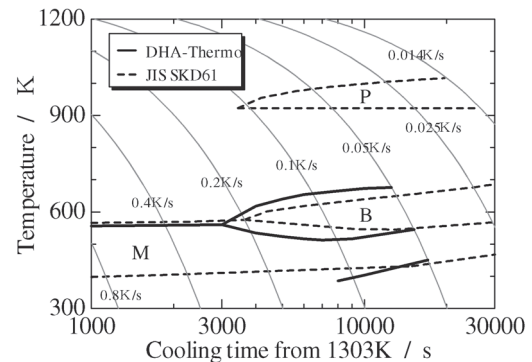
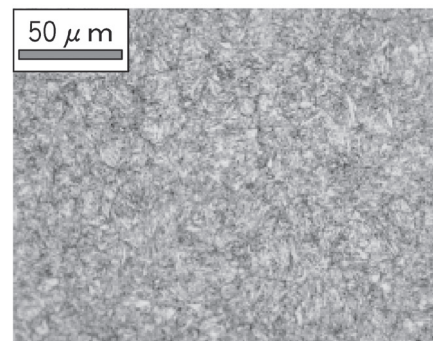
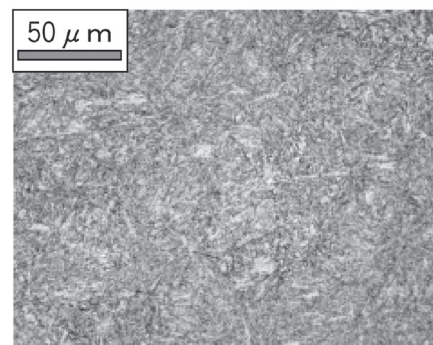


Fig.5. Transformation temperature on continuous cooling from 1303 K.



(a) JIS SKD61



(b) DHA-Thermo

Fig.6. Microstructure given by quenched process. Materials are heated to 1303 K and held 3.6 ks then cooled down to room temperature with cooling rate of 4 K/s. Finally, work pieces are tempered to 44 HRC.

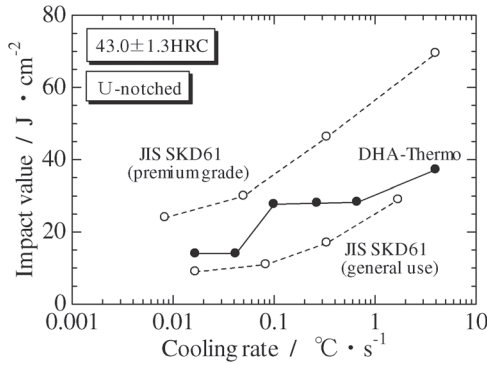


Fig.7. Cooling rate dependence of impact value at 300 K.

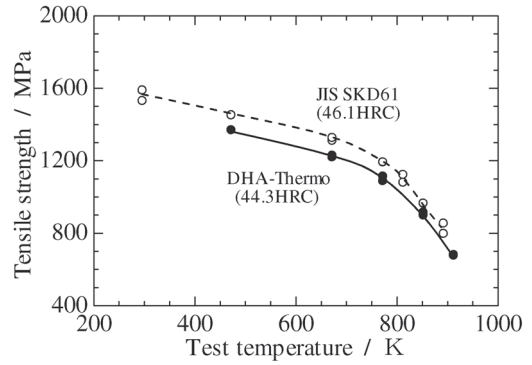


Fig.9. Tensile strength at elevated temperature.

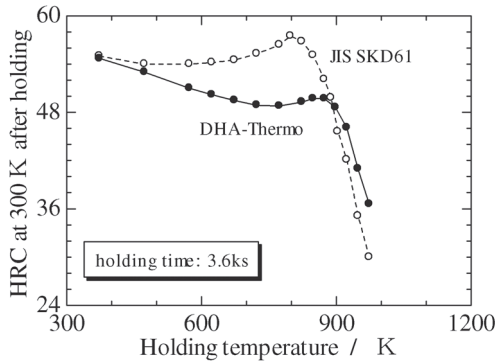


Fig.8. Hardness at 300 K after tempering.

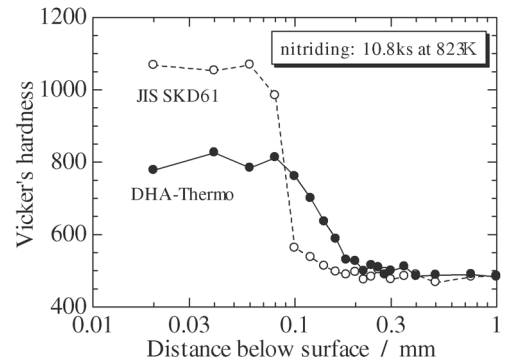


Fig.10. Hardness profile around nitrocarburized surface. Materials are 10.8 ks dipped in salt-bath at 823 K.

5. 高熱伝導率の効果検証

5. 1 金型温度と鑄造組織

型締力が135トンのダイカストマシンを用い、Fig.11 および Table 1 に示す鑄造試験を実施した。JIS SKD61 と DHA-Thermo の適用箇所は、ビスケット部を加圧・冷却するスプールコアとプランジャーチップである。以下では、スプールコアに関して結果を紹介する。

サーモビューアーで測定した温度を Fig.12 に示す。JIS SKD61 対比、製品取り出し直後におけるスプールコアの温度は140 K 低下し、DHA-Thermo の冷却能が高いことを確認した。また、Fig.13 に示すとおり、ビスケット部の表層では鑄造組織が微細化していた。スプールコアの大幅な温度低下によって、凝固速度が増大したためと考えられる。

5. 2 鑄造時間の短縮(ハイサイクル化)

ダイタイマーを短縮してハイサイクル化すると、最終凝固位置となるビスケット部の表面に、Fig.14 に示す

ような「ふくれ」が発生する。これは、巻き込まれた空気が急減圧によって膨張し、凝固未完了の部位を変形させる現象である。ダイタイマー、加圧量、巻き込まれた空気量、などによっては、溶湯が爆発的に飛散することもある。

鑄造時間を律速するビスケット部の凝固速度は、スプールコアの温度に支配される。そこで、「ふくれ」が未発生の場合を凝固完了と定義し、鑄造時間の短縮効果を検証した。Fig.15 に示すとおり、ビスケット部に「ふくれ」が発生しない最短のダイタイマーは、スプールコアが JIS SKD61 の場合は 10 s、DHA-Thermo については 7 s であった。「ふくれ」が発生すると、ダイタイマーの短縮に対するスプールコアの温度上昇は飽和し、鑄造品からの抜熱が不十分になることを示している。

DHA-Thermo の適用による時間短縮効果は 10 % と大きい。86.4 ks (24 h) の連続操業を仮定すれば、1 サイクルが 30 s から 27 s に 10 % 短縮されると、製品数に 320 個の差を生じることになる。ビスケット部の凝固促進によるハイサイクル化に対し、スプールコアとプランジャーチップへの DHA-Thermo の適用は効果的である。

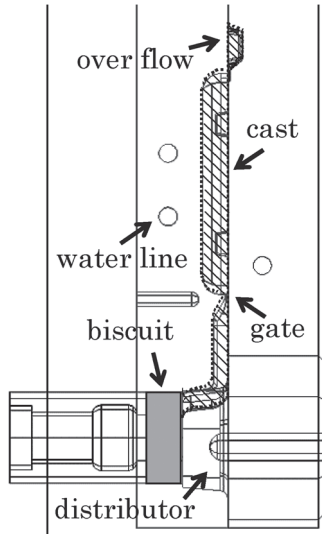
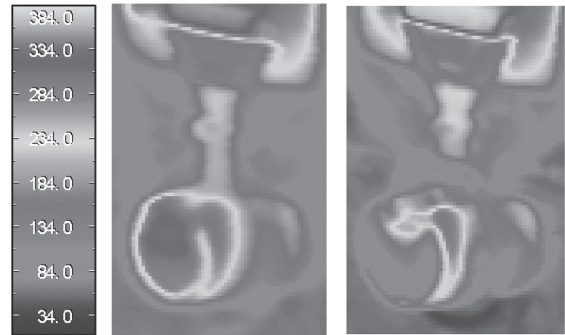


Fig.11. Apparatus of die-casting test. DHA-Thermo and JIS SKD61 are applied to distributor. Inter cooling water is given for distributor.

Table 1. Conditions of die-casting test.

Molten alloy	Material code	ADC 12
	Temperature	973 K
Casting	Weight of cast	600 g
	Injection speed	1600 mm/s
	Pressure	65 MPa
	Biscuit's diameter	50 mm
Time	Die-timer	7~12 s
	One cycle	29~34 s
	Spray of lubricant	3 s
Cooling water	die	0.03 l/s
	sleeve	0.03 l/s
	plunger-chip	0.03 l/s
	distributor	0.03 l/s



(a) JIS SKD61 (b) DHA-Thermo

Fig.12. Temperature of distributor before spray cooling. Die-timer is 10 s for JIS SKD61 and 9 s for DHA-Thermo. Temperature of contact surface to biscuit is decreased by 140 K compared with that of JIS SKD61. Unit of temperature is given in Celsius.

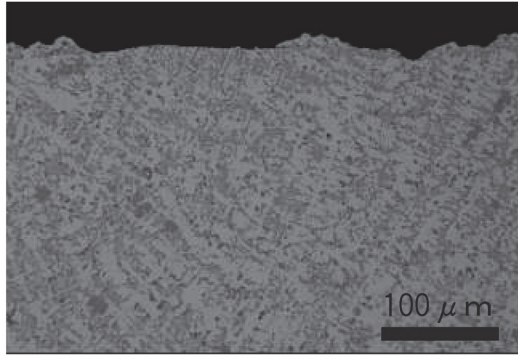
6. まとめ

- (1) DHA-Thermoは、35~37 W/m/Kの高い熱伝導率と金型に必要な機械的性質を兼備したダイカスト金型用鋼である。冷却能が高い DHA-Thermoは、焼付きの軽減や凝固速度の増大が求められる箇所に好適である。
- (2) JIS SKD61対比、DHA-Thermoのスパールコアの温度は140 K低下した。スパールコアと接触するビスケット部の表層は鑄造組織が微細化しており、凝固速度の増大が示唆された。
- (3) ビスケット部の凝固促進による鑄造時間短縮の効果は、ダイタイマーで30%、鑄造時間全体で10%に達した。スパールコアとプランジャーチップへのDHA-Thermoの適用は、ハイサイクル化に対して効果的である。
- (4) DHA-Thermoの使用においては、焼入れ、サイズ、窒化、の3点に注意を要する。脱炭の問題から、焼入れ加熱は真空中が望ましい。焼き入れ性が高くないため、適用範囲は40 kg未満の小物に限定とし、焼入れ

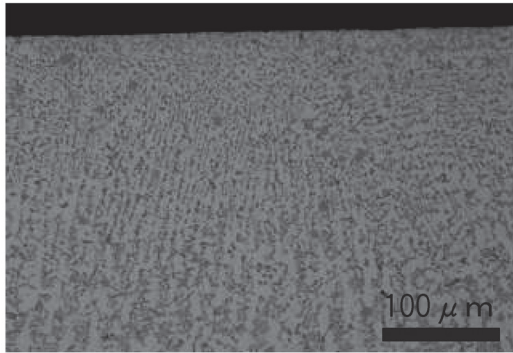
の冷却には4 Bar以上の加圧ガス雰囲気を推奨する。また、窒化層はJIS SKD61よりも軟らかく深くなる。

(文献)

- 1) 西直美: 型技術, 24(2009), 4, 40.
- 2) ダイカストの型割れ対策の研究・研究調査報告, (社)日本ダイカスト協会・(助)素形材センター, 541(2000), 33.



(a) distributor : JIS SKD61



(b) distributor : DHA-Thermo

Fig.13. Difference of microstructure around surface of biscuit caused by difference of contact die temperature. Reference back to Fig.11 and Fig.12, markedly temperature decrease of die surface could be seen.

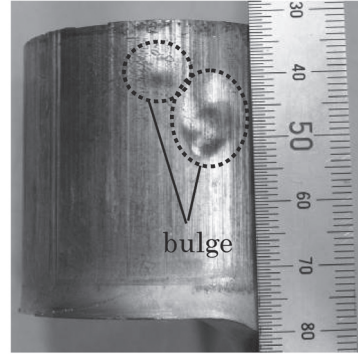


Fig.14. Surface bulge of biscuit caused by expansion of included air. Die open before finish of solidification leads to bulging.

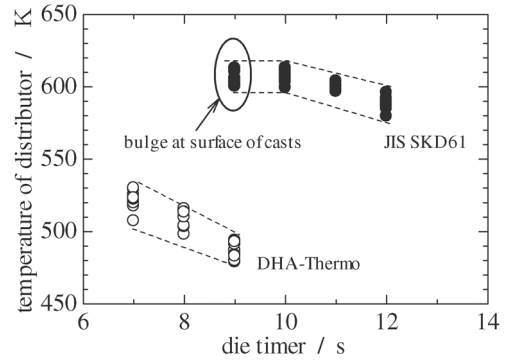


Fig.15. Temperature of distributor for die timer. No bulge of cast surface could be seen for DHA-Thermo.