技術資料

Technical Paper

ダイカスト金型用高信頼性熱間ダイス鋼 “DHA1-ES”

井上幸一郎^{*1}, 大藤 孝^{*2}, 市岡雄二^{*3}, 荒木利彦^{*3}

High Reliable Hot Work Die Steel for Die Casting Die “DHA1-ES”

Koichiro Inoue, Takashi Ofuji, Yuji Ichioka, and Toshihiko Araki

Synopsis

Long life die casting die steels have been required to reduce die cast product cost. The main life limiting factor is premature failure. To obtain higher fracture resistance, high reliable hot work die steel, “DHA1-ES”, has been developed. Generally, crack susceptibility is estimated by the Charpy impact value. It is cleared that clean and homogenized steel shows higher Charpy impact value. To improve the toughness the manufacturing process of this steel is optimized such as melting, forging and heat treatment. Though DHA1-ES has the same compositions as those of JIS SKD61, its Charpy impact values, dispersion and anisotropy are improved remarkably. Furthermore, low cycle fatigue life of this grade is longer than JIS-SKD61. It is expected that DHA1-ES is widely used in die casting industry with high reliability.

1. 緒 言

アルミニウム合金ダイカスト金型の寿命要因を分類したものをFig.1に示す¹⁾。主な金型寿命要因はヒートチェックと溶損であるが、1割弱大割れにより寿命に至ることが報告されている。ヒートチェックや溶損は比較的長寿命で

Fig. 1. Factors limiting die casting die life.

発生する損傷であり溶接による金型補修が可能であるのに対して、大割れはヒートチェックや溶損に比して短寿命で発生することがあり、さらに溶接による補修が困難である。このため、ダイカスト製品の製造コスト低減のためには早期の大割れ防止が重要な課題となっている。

近年ではハイサイクル化にともない金型の内部冷却が強化されており、水冷孔表面に発生する熱応力が増大しつつあること、製品の大型化にともない金型も大型化し、金型焼入時の冷却速度を十分に確保することができないため金型自身の靱性が低下していること、などの理由から大割れの危険性はますます増大しつつあり、大割れしにくい金型材料の開発が強く求められている。

金型材料の耐大割れ性を示す指標としては、従来よりシャルピー衝撃値がよく用いられている。Fig.2は実型より切り出した試験片の衝撃値と大割れの有無の関係を示したものである²⁾。大割れは実型より切り出したシャルピー衝撃試験片の衝撃値が20 J/cm²より小さい場合に発生しており、20 J/cm²以上では大割れの発生は認められない。栢原³⁾も同様の報告しており、実型で20 J/cm²以上の衝

2005年8月9日受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所, 工博 (Dr., Eng., Research & Development Lab., Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)渋川工場 (Shibukawa Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

* 3 大同特殊鋼(株)工具鋼技術開発部 (Tool Steel Technology, Planning & Metallurgical Service Department, Daido Steel Co., Ltd.)

Fig. 2. Relationship between gross crack sensitivity and Charpy impact value of die casting die.

衝撃を有していれば大割れ発生の危険性が大幅に減少するという経験則が日本国内ではほぼ一致した見解として得られている。

また、NADCA規格⁴⁾に代表される海外のダイカスト関連協会が作成したダイカスト金型材の受け入れ規格にも衝撃値が規定されていることから、今後日本国内においてもダイカスト金型材の品質保証の一手段として金型材料の衝撃値保証がダイカストメーカーより強く要求されることが予想される。

このような背景から大同特殊鋼(株) (以下、当社という)ではアルミニウム合金ダイカスト用金型に最も多く用いられているJIS-SKD61 (以下SKD61)の製造工程を改善し、組成は同じでありながら従来市販されているSKD61に比べて安定して高い衝撃値が得られる高信頼性熱間ダイス鋼DHA1-ESを開発したのでその特性を紹介する。

2. 型材料の衝撃値低下原因

一般に衝撃値は硬さと相関があり、硬さの増加にともない衝撃値は低下することが知られている。しかし、Fig.2に示したように市販のSKD61は硬さと衝撃値の関係が明確ではなく、同じ硬さでも衝撃値は非常に大きな幅でばらつきを有している。この原因は素材に起因するものと熱処理に起因するものがあるが、実型衝撃値を20 J/cm²以下まで大幅に低下させる主原因は金型材料中に存在するバナジウム炭窒化物 (以下V(C,N))などの晶出炭窒化物や硫化マンガン、アルミナなどの非金属介在物の存在である。Fig.3は実型より切り出した衝撃値試験片で衝撃値が20 J/cm²以下を示したものの光学顕微鏡組織と破面の起点部をSEMで観察した結果である。腐食をせずに観察した低衝撃値品の光学顕微鏡組織にはクラスター状に存在するV(C,N)晶出物が多数確認される。また、破面の起点部に

Fig. 3. a)Optical microstructure and b) fracture surface of low Charpy impact value specimen. [20 J/cm²] The part surrounded by the dashed line shows vanadium carbide.

は100 μm程度の粗大なV(C,N)晶出物が観察され、これを起点として破壊することにより衝撃値の大幅な低下を招いている。本来、SKD61の組成では製品鍛造時に1473 K以上に加熱することによりV(C,N)は完全に固溶するはずである。しかしながら近年、金型の大型化にともない金型素材も大断面化し、製造時に使用する鋼塊サイズが大きくなってきている。このため、鋼塊中心部ではバナジウムなどの元素が濃化し、さらに緩やかに凝固するため粗大なV(C,N)晶出物を形成する可能性がある。このような粗大なV(C,N)晶出物は比較的短時間の鍛造時の加熱では完全に固溶することなく残留して衝撃値を低下させている。高信頼性熱間ダイス鋼DHA1-ESでは溶解方法を最適化することにより晶出炭窒化物や非金属介在物を極力低減するとともに鍛造方法、熱処理方法も改善し異方性が少なく、安定して高い衝撃値を得ることを可能とした。

3. 高信頼性熱間ダイス鋼 DHA1-ES の諸特性

Fig.4に高信頼性熱間ダイス鋼DHA1-ESの位置づけを示す。SKD61に相当する従来ブランドDHA1に比べ、組成は同じであるため高温強度は同等であるが衝撃値は大幅に向上しており、SKD61系高性能鋼であるDH31-Sと同程度まで向上している。このため、ヒートチェック対策で金型硬さを高く設定したくても従来のSKD61では初期割れ発生の危険性が増加するため金型硬さを低くせざるを得なかった場合など、DHA1-ESを使用することにより高性能鋼であるDH31-Sと同程度まで硬さを高めた使用が可能になる。

3.1 衝撃値

通常熱間ダイス鋼の衝撃値を評価する場合、数本試験した値の平均値または最低値を用いる場合が多い。しかしながら材料の破壊現象が本質的に確率現象であるため、試験値のバラツキが大きい衝撃値の場合には必ずしも材料の特性を評価しているとはいえない場合が多い。そこでここでは衝撃値を確率論的に取り扱いワイブルプロットで整理した⁵⁾。今回評価した材料は素材の断面サイズが 400 ×

Fig. 4. Conceptual diagram of die casting die steels.

Fig. 5. Comparison of Charpy impact value between SKD61 and DHA1-ES.

400 mm でその中心部から JIS3 号のシャルピー衝撃試験片を切り出した後に焼入・焼戻しを行い衝撃試験に供した。衝撃試験は各6本実施し結果をワイブルプロットで整理したものを Fig.5 に示す。

DHA1-ES は市販の SKD61 に比べて衝撃値の平均値は 14 J/cm² 程度高い衝撃値を示すが、両鋼種とも 20 J/cm² 以上の衝撃値を有している。また、衝撃値が 20 J/cm² 以下の値を示したものは SKD61 で 1 本確認されただけであり、試験本数が少ない場合、いずれの鋼種も 20 J/cm² 以上の衝撃値が得られる材料であると誤った判断をする可能性がある。一方、ワイブルプロットで比較すると DHA1-ES は傾きが大きくばらつきが小さいのに比べて SKD61 は傾きが小さくばらつきが大きいことを容易に判断できる。さらに DHA1-ES では衝撃値が 20 J/cm² 以下になる累積破損確率は 1 % 以下であるのに比べ、SKD61 では 18 % であり、およそ 5 本に 1 本は衝撃値が 20 J/cm² 以下になる可能性を有していることがわかる。このように金型材料の衝撃値をワイブルプロットで評価することにより材料の優劣をより明確に評価することが可能になる。

Fig.6 は SKD61 と DHA1-ES で最低衝撃値を示した試験片の破面を SEM で観察した結果である。SKD61 では破面の起点部に粗大な晶出 V(C,N) が存在しこれを起点として破壊したために衝撃値が低下したと考えられる。一方、DHA1-ES では破面の起点部には晶出炭窒化物、非金属介在物などは確認されない。いい換えれば衝撃試験片のノッチ底に晶出炭窒化物、非金属介在物などの破壊起点となりうるものが存在するか否かが衝撃値ばらつきの大きな原因であり、これらを低減することが衝撃値のばらつき低減に非常に有効であることを示唆している。

前述の衝撃値は衝撃試験片で熱処理をした場合、すなわち冷却速度が極めて速い理想的な状態で熱処理された場合の衝撃値比較である。そこで、実型での衝撃値をシミュレーションするため、衝撃値の冷却速度依存性を評価した結果を Fig.7 に示す。冷却パターンは 1303 K から 0.33 K/s

Fig. 6. SEM fractographs taken from the crack origin of Charpy impact value specimen.

Fig. 7. Influence of cooling rate on Charpy impact value.

Fig. 8. Change in the microstructure of quenched DHA1-ES with high and low cooling rate.

で623～673 Kまで冷却後、それ以下は冷却速度を0.0083～0.33 K/sの間で変化させた供試材を各3本試験した。低温域の冷却速度のみ変化させたのは、熱間ダイス鋼の衝撃値が主としてベイナイト変態温度域の冷却速度に大きな影響を受けるためである⁶⁾。測定した衝撃値のばらつきはエラーバーで示した。素材および試験片の採取方法は前述のワイブルプロットを作成したものと同様である。また、1303 Kから1.67 K/sで冷却したデータはFig.5に示したデータである。

SKD61では1.67 K/sで冷却した場合の平均衝撃値は20 J/cm²を超えているが、冷却速度0.33 K/s以下では平均衝撃

Fig. 9. Fracture surface of DHA1-ES cooled at 0.0083 K/s.

値が20 J/cm²を下回っている。一方、DHA1-ESも冷却速度の低下にともない平均衝撃値は徐々に低下するが、0.017 K/sまでは20 J/cm²以上を確保可能である。また、ばらつきもSKD61に比べて小さい。しかしながら冷却速度が0.0083 K/sまで低下すると平均衝撃値は著しく低下する。これは焼入冷却速度の低下により焼入組織のベイナイトラスが粗大化し、この粗大なベイナイトラスを起点として破壊が生じたためである。Fig.8はDHA1-ESの冷却速度による光学顕微鏡組織の変化を示したものである。衝撃値が急激に低下した0.0083 K/s冷却材では1.67 K/s冷却材に比べてベイナイトラスが著しく粗大化している。Fig.9は0.0083 K/s冷却材の衝撃試験片破面の起点部をSEMで観察した結果である。粗大で平坦なへき開破面を起点として破壊に至っており、起点部に晶出炭窒化物や非金属介在物などは認められない。これらのことも0.0083 K/s冷却材の衝撃値低下が冷却速度の低下により生じた粗大なベイナイトラスを起点として破壊したことを示唆している。このことからSKD61の組成では1303 Kから623～673 Kまでを0.33 K/s一定で冷却した場合、20 J/cm²以上の衝撃値を得るためには0.017 K/s以上の冷却速度が必要であることがわかる。623～673 K以下の冷却速度が0.017 K/s以下で20 J/cm²以上の衝撃値を確保する場合にはSKD61より焼入性を高めた鋼種を選択する必要がある。

3.2 衝撃値の異方性

Fig.10に320×740 mmの断面を有する素材の中心からL,T,ST方向のノッチを有するJIS3号衝撃試験片をTopからBotにかけて鍛伸方向に異なる数箇所より採取して42～44 HRCに調質後、衝撃試験した結果をワイブルプロットで示す。SKD61はL方向の衝撃値が最も高くT方向、ST方向の順に衝撃値は低下し、衝撃値が異方性を有していることがわかる。また、L方向に比べてT,ST方向はワイブルプロットの傾きも小さく、ばらつきが大きい。最も

Fig. 10. Influence of notch direction on Charpy impact value of SKD61 and DHA1-ES.

衝撃値が低くばらつきも大きいST方向では 20 J/cm^2 以下になる累積破損確率は 8 % 程度である。一方、DHA1-ES はノッチ方向によらず、ほぼ同じワイブルプロットを示しており、衝撃値の異方性はきわめて小さい。SKD61 で最も衝撃値の低いST方向でも DHA1-ES では 20 J/cm^2 を下回る累積破損確率は 1 % 以下である。

3.3 衝撃値のロット間ばらつき

2005年1月から5月までに製造したDHA1-ESの36ロットについて各素材中心部より従来経験的に最も衝撃値の低くなるST方向の衝撃試験片を数本切り出し調質後、衝撃試験を実施した結果をワイブルプロットしたものを Fig.11 に示す。これまで示した同じロット内で調査した結果に比べて傾きは小さくなる傾向にあり、ばらつきは拡大していることがわかる。これは調査した製品の厚さが $100 \sim 475 \text{ mm}$ で変化しており、鍛造時の鍛錬比や熱処理時の質量効果が影響しているためと考えられる。しかしながら 114 点調査した中で 20 J/cm^2 を下回るサンプルは 1 本も認められなかった。また、衝撃値が 20 J/cm^2 を下回る累積破損確率も 1 % 以下であり、 30 J/cm^2 でも 2 % 弱に抑えられ

Fig. 11. Charpy impact values dispersion of DHA1-ES manufactured Daido Shibukawa plant.

Fig. 12. Charpy impact values of DHA1-ES. Impact specimens taken from heat treated die casting die. Dashed line shows impact values of quenched $10 \times 10 \text{ mm}$ square bar. (Notch direction: ST)

ている。以上のことから現在 DHA1-ES は当社工場にて安定した品質で製造されていることがわかる。

3.4 実型の衝撃値

Fig.12 に DHA1-ES を用いて加工した金型または模擬金型を用い大同アミスター(株)のダイカスト金型用高靱性熱処理 HIT 法で熱処理したものから JIS 3 号の衝撃試験片を切り出し調査した結果を示す。調査型数は 15 型でいずれも 1 金型より衝撃試験片 1 本を切り出しワイブルプロットを作成した。また、比較のため Fig.10 で示した衝撃試験片で熱処理した結果もあわせて示した。試験片で熱処理したものに比べて実型熱処理品の衝撃値は $15 \sim 25 \text{ J/cm}^2$ 程度衝撃値が低下している。これは実型では焼入時の冷却速度が試験片で熱処理した場合に比べて低下するためである。耐大割れ性の直接的な指標である実型の衝撃値は今回の調査した 15 型では 20 J/cm^2 を下回るものは確認されなかつ

た.しかしながらワイブルプロットより大割れの基準値である 20 J/cm^2 を下回る可能性が3%程度ある.この値は市販のSKD61に比べるとはるかに低い値であるが,金型ユーザーにとっては十分に安心できる値であるとはいえない.素材自体の衝撃値は十分なポテンシャルを有しているため今後熱処理方案の改善で更なる衝撃改善を図りたい.

3.5 低サイクル疲労特性

本来,金型の割れは疲労現象であり疲労強度が高いほうが同じ環境で使用された場合に金型寿命が長くなると考えられる.そこでSKD61とDHA1-ESで低サイクル疲労試験を実施し疲労強度を調査した結果をFig.13に示す.供試材は3.1節で衝撃値を調査したものと同一の素材中心から切り出した.試験片採取方向はT方向で平行部径8の平滑疲労試験片を加工したのち45HRCに調質して試験に供した.同一全ひずみ幅でDHA1-ESはSKD61に対して約1.5倍の寿命を有しており,DHA1-ESは衝撃値だけではなく疲労強度も向上していることがわかる.Fig.14に全ひずみ幅1%で試験した疲労試験片の破面をSEMで観

Fig. 13. S-N Curves of low cycle fatigue test.

察した結果を示す. DHA1-ESの破壊起点は表面起点である.一方,SKD61の起点部にはアルミニウム,カルシウムの酸化物が起点部に確認され,これらを疲労破壊起点として疲労き裂が発生したために同じ硬さのSKD61に比べて疲労寿命が短くなったと考えられる.以上のことから疲労起点となりうる炭化物や非金属介在物を製造工程の改善により極力低減したDHA1-ESはSKD61対比疲労強度も高く,早期割れ対策だけではなく金型寿命も改善する可能性を有する.

4. まとめ

溶解,鍛造,熱処理条件などの製造工程を改善することにより従来のSKD61と同一組成でありながらSKD61対比,高衝撃値で部位によるばらつき,異方性の少ない高信頼性熱間ダイス鋼DHA1-ESを開発した.高信頼性熱間ダイス鋼DHA1-ESは実型での衝撃値が従来材対比高く,ばらつきが小さいためダイカスト金型の早期割れ対策に有効な材料である.また,DHA1-ESで開発された製造工程はDH31-Sなどの高性能鋼にも適用されており,DH31-Sのさらなる信頼性向上にも寄与している.

(文 献)

- 1) 日本金型工業会:ダイカスト金型寿命報告書(1980)
- 2) 大同特殊鋼株式会社内資料.
- 3) 栢原芳郎:特殊鋼, 53(2004), 11, 12.
- 4) North American Die Casting Association: NADCA Product #207, 1990.
- 5) 塩見 弘:信頼性工学講座1 信頼性概論, 東京電機大学出版局(1972), 37.
- 6) 阿部行雄:熱処理, 41(2001), 346.

Fig. 14. SEM fractographs taken from the crack origin of low cycle fatigue specimen.