

CVD処理金型鋼の熱疲労挙動

日原政彦・藤原和徳

Behaviour of Thermal Fatigue on Hot Die Steel after CVD Treatment

Masahiko HIHARA and Kazunori FUJIHARA

要 約

ダイカスト金型および鋳抜ピンの寿命向上を目的として、各種のCVD処理金型鋼の熱疲労挙動について検討した。

TiNおよびTiC—TiCN—TiN皮膜の熱疲労試験過程でのクラック発生サイクル数およびクラック発生頻度 ($dC/d\ln NF$) はともに低い値を示した。また、各CVD皮膜処理金型鋼の熱疲労特性は皮膜と金型鋼との熱膨張率差 ($\Delta\alpha$) の小さい皮膜試料が良好な結果を示した。

1. 緒 言

CVD処理によって形成した各種の皮膜は工業製品に適用され、耐摩耗性、耐焼付き性および耐食性などの向上に大きく寄与している¹⁾。

しかし、ダイカスト金型などの適用においては、加熱—冷却の熱サイクルを負荷する熱疲労試験での寿命評価が必要となる。また、これらの評価試験に基づいた結果から、ダイカスト金型への適用性を検討しなければ、最適な皮膜の選択が難しくなる。

本研究はこれらの背景から、ダイカスト金型および鋳抜ピンに効果的な適用を図る目的で行った。

2. 実験方法

2-1 素 材

実験に用いた素材は熱間金型工具鋼 (SKD61) であり、この素材を直径58mm×厚さ20mmの円筒形状に機械加工した。その後、焼入れ—焼戻し熱処

理により、HRC45の硬度とした。

この金型鋼に表1に示す各組成の皮膜処理を行った。また、一般のCVD処理の場合、処理温度が800~1200℃と高温のため、皮膜処理後は再焼戻し処理により、素材の硬度とした。なお、W₂C処理は500℃と低温のため、金型などの処理時の変形が少ない利点がある。

2-2 熱疲労試験

熱疲労試験は溶解アルミニウム射出時の加熱と離型剤塗布時の冷却の熱サイクルを想定し、加熱時570℃、135秒保持および冷却時100℃、5秒保持を1サイクルと設定した。

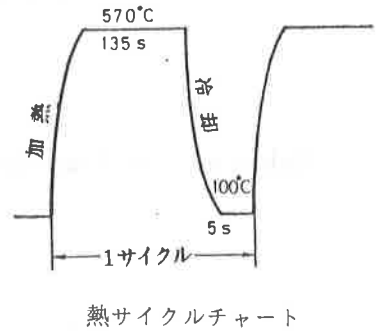
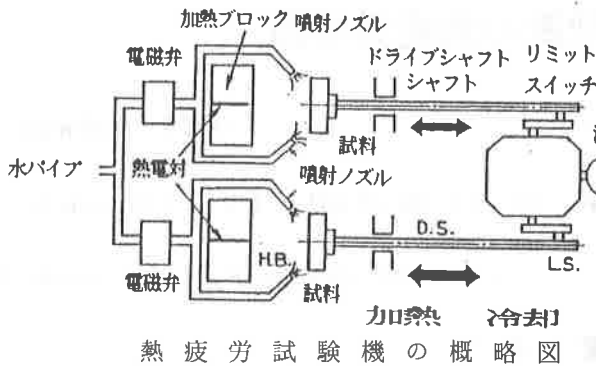
熱疲労試験装置の概略を図1に示す。

なお、熱疲労試験過程における、各皮膜処理金型鋼のクラック発生数の測定は下記に示す1式から行った。

$$C = K \Sigma L / A \quad \dots\dots 1$$

表1 各表面処理金型鋼の皮膜組成と膜厚

処 理 方 法	C V D					
皮 膜 組 成	TiN	TiC	W ₂ C	TD(VC)	TiCN	TiC-TiN
膜 厚 μm	3.2	5.6	8.5	8.5	7.2	8.7
処 理 方 法	C V D					
皮 膜 組 成	TiC-TiCN-TiN(a)			TiC-TiCN-TiN(b)		
膜 厚 μm	5.0			4.7		



- ここで、C：各試験サイクルでの単位面積当たりのクラック総長，mm/cm²
 ΣL：視野内に認められたクラック総長，mm
 A：測定倍率での単位面積，cm²
 K：測定倍率

なお、クラック発生頻度C_fは単位面積当たりのクラック総長Cと試験サイクル数N_fとの関係から求めた勾配 (dC/dlnN_f) によって整理した。

3. 実験結果および考察

CVD皮膜処理金型鋼の10,000サイクル熱疲労試験後のクラック発生サイクル数、単位面積当たりのクラック総長およびクラック発生頻度について、試験結果を整理したものが表2である。なお参考に各皮膜の熱膨張率、縦弾性率およびビッカース硬度も示した。

この結果から、クラック発生頻度の大きい値を示した皮膜はTiC、TD、TiC(生地側) - TiCN - TiN(表面側)(b)及びW₂C皮膜などであり、TiNおよびTiC-TiCN-TiN(a)の各皮膜は他の皮膜に比べ高サイクル側となった。

しかし、TiC-TiN皮膜のように、クラック発生サイクル数は50サイクルと初期に認められても、クラック発生頻度がTiCNおよびW₂C皮膜に比べ低い値となる皮膜も存在した。

なお、TiNおよびTiC-TiCN-TiN(a)皮膜は他の皮膜と比較し、クラック発生サイクル数は高サイクル側となり、なおかつ、クラック発生頻度も低い結果が得られ、これらの各皮膜は耐熱疲労特性が著しく向上している。

各皮膜のクラック発生は熱疲労試験過程での皮

膜と金型鋼の熱膨張率の違いに起因して発生する熱応力の影響が大きい。そこで、クラックが比較的初期段階で発生する皮膜の熱膨張率を金型鋼の値と比較すると、金型鋼(SKD61)の熱膨張率が11.6×10⁻⁶/°Cに対し、TiC皮膜は7.4×10⁻⁶/°C、TD皮膜は7.25×10⁻⁶/°CおよびTiCN皮膜は8.1×10⁻⁶/°Cの各値となる。

このことは金型鋼の熱膨張率に比較して、各皮膜の熱膨張率差は36%(TiC皮膜)、38%(TD皮膜)および30%(TiCN皮膜)と大きいことが明らかとなる。

熱疲労試験過程での金型鋼の表面は加熱時、表面の膨張により圧縮応力が発生し、冷却時には表面の収縮から引張応力が発生する形態をとる。この繰返し応力振幅(ひずみ振幅)から、熱疲労が引き起こされクラックの発生を誘発する。

よって、熱疲労試験過程での繰返しサイクルにおける皮膜の健全性は皮膜と生地との熱膨張率差の大小が支配的因子となる。

ここで、皮膜と金型鋼との熱疲労試験過程での熱膨張率差によって発生する皮膜の応力は2式によって求めることが可能となる。ただし、この2式はCoffin-Mansonの熱応力式²⁾における繰返し数に対するファクタは考慮していない。そこで、1サイクルの加熱-冷却によって発生する応力となる。

$$\sigma_c = \frac{(1-\nu_m)}{E_m} \sigma_m \cdot \frac{E_c}{(1-\nu_c)} - \frac{E_c}{(1-\nu_c)} \{(\alpha_m - \alpha_c)(T_h - T_o)\} \quad \dots\dots 2$$

ここで、

σ_c, σ_m ：皮膜に発生する応力，金型鋼に発生する応力，kgf/cm²

E_c, E_m ：皮膜の縦弾性係数，金型鋼の縦弾性

表2 PVD・CVD皮膜処理金型鋼の熱疲労試験後のクラック発生サイクル数, 単位面積当たりのクラック総長, クラック発生頻度の結果及び各皮膜の特性値

PVD・CVD処理皮膜の種類	クラック発生サイクル数 Nf	単位面積当たりのクラック総長 C, mm/cm ²	クラック発生頻度 dC/dlnNf	熱膨張係数 x10 ⁻⁶ /°C	縦弾性係数 x10 ⁴ , kgf/mm ²	ビッカース硬度 HV
TiN(PVD)	2000	2000	0.9	9.30	2.56	1900—2400
TiC(PVD)	10	26000	3.0	7.40	4.48	3300—4000
TiCN(CVD)	200	14500	1.2	8.10	3.52	2600—3200
TiC-TiN(CVD)	50	15000	0.9	—	—	—
TiC-TiCN-TiN(a, CVD)	300	1000	0.7	—	—	—
TiC-TiCN-TiN(b, CVD)	500	17500	2.3	—	—	—
W ₂ C(CVD)	500	20000	2.7	3.84 *	5.36 *	2300—2400
TD(VC)	10	60000	6.0	7.25	2.60	2800
金型鋼従来材	100	24000	3.9	10.30	2.10	450 (HRC45)
金型鋼改良材	500	22000	2.8	11.60	2.10	450 (HRC45)

* : W₂Cの値が不明のためWCの値を示す。

係数, kgf/mm²

ν_c, ν_m : 皮膜のポアソン比, 金型鋼のポアソン比

Th, T_c : 到達加熱温度, 到達冷却温度 (°C)
2式から, TiN皮膜とTiC皮膜について, 皮膜に発生する応力を求めると, 前者は59.0kgf/mm² 後者は74.0kgf/mm²となる。またその時の金型鋼に発生する応力はTiN皮膜の場合, 31.0kgf/mm², TiC皮膜, 49.0kgf/mm²となる。

この結果から明確なように, TiC皮膜はTiN皮膜に比べ大きな応力の発生が明らかとなり, 熱疲労試験から得られた傾向と良く一致する。

なお, TiCN皮膜はTiCとTiN皮膜との中間組成を持つ皮膜であることから, 本実験で得られた単位面積当たりのクラック総長およびクラック発生頻度の値は各単一皮膜の中間的な値となることが明らかとなった。

4. 結 言

CVD皮膜処理金型鋼の熱疲労試験過程における皮膜の熱疲労特性について検討を行った。

得られた結果からは, 皮膜の耐熱疲労特性は各皮膜の物理的特性に大きく依存されることが明らかとなった。よって, 実際のダイカスト金型および鋳抜ピンなどに適用する場合, これらの各特性を考慮して, 最適な皮膜を選択することが, 寿命向上を図る上で重要となる。

文 献

- 1) M.J.Mirtich : Sputtered Protective Coating for Die-Casting Die, Thin Solid Films, 84 (1981) 295.
- 2) S.S.Manson : Thermal Stress and Low-cycle Fatigue, McGraw-Hill, N.Y. (1958) 404.