各種窒化ケイ素球の摩耗特性

岩佐美喜男・木下 実

(大阪工業技術試験所, 563 池田市緑丘 1-8-31)

Wear Behavior of Silicon Nitride Ball

Mikio IWASA and Makoto KINOSHITA

(Government Industrial Research Institute, Osaka, 8-31, Midorigaoka 1-chome, Ikeda-shi 563)

The ball-on-disk method was applied to measure the wear behavior of Si_3N_4 balls sliding on SiC disk at the load of 10 kgf and velocity of 20 cm/s. Four kinds of Si_3N_4 balls from different sources were named A, B, C, D, in increasing order of their hardness or fracture toughness. The large grain structure and large porosity of Si_3N_4 (A) will explain its low hardness and low fracture toughness. The fine fibrous structure without porosity of Si_3N_4 (D) may be the reason of its high hardness and high fracture toughness. The wear volume calculated from the wear scar on a Si_3N_4 ball sliding on the SiC disk was proportional to the weight loss and to the sliding distance. The wear of Si_3N_4 ball decreased with increasing hardness or fracture toughness, but on the contrary, the wear of SiC disk increased sharply. The Si_3N_4 (C) ball, which has crystallized grain boundary phases, showed very low wear of ball but high wear of SiC disk.

[Received August 18, 1988; Accepted October 21, 1988]

Key-words : Ball-on-disk method, Silicon nitride ball, Silicon carbide disk, Vickers hardness, Fracture toughness, Wear scar, Specific wear rate

1. 緒 言

高温、腐食性などの厳しい雰囲気にも耐え、無潤滑で利用できるなど、窒化ケイ素製のボールベアリングはその優れた特性が注目されている^{1),2)}。各所で焼結加工法や性能評価に関する研究開発が進められ、一部では既に商品化、市販されている^{3),4)}。

そのようなベアリング素材の基礎データである摩擦・摩耗特性を検討するため、入手可能な4種の窒化ケイ素球について、ボールオンディスク法による摺動試験を実施した^{5),6)}。ボールオンディスク法とは、回転するディスク試料に球試料を押し付ける試験法である。他の方法に比べて剛性の高い試験ができ、また試料の重量減少のみではなく生ずる摩耗痕の形状からも摩耗量を求めることができるなど、ボールベアリングに期待される厳しい摺動条件に適した試験法であると言える。なお、ボールオンディスク法による鋼球とセラミックス間の摺動試験については既に報告している⁷⁾。

2. 実 験

ボールオンディスク法の概要を図1に示した。窒化ケイ素試料(Si_3N_4)はすべて直径10 mmで、真球度 $0.1 \mu\text{m}$ 、表面粗さ $R_a=0.02 \mu\text{m}$ 以下に仕上げられた真球であり、また相手ディスクにはホットプレス炭化ケイ素(SiC、密度 3.17 g/cm^3 、ピッカース硬度 2600 kgf/mm^2)を用いた。球試料は圧縮空気駆動のペロフラムタイプシリンダーにより、回転するディスク試料に押し付けられ

る。押付荷重は10 kgf、ディスク回転数は150 rpmとし、摺動円の直径が25 mmなので摺動速度は約20 cm/sとなる。摩擦トルクをベンディングロードセルで測定し、摩擦係数(μ)を求めた。 Si_3N_4 球の摩擦量 W_b は生ずる摩耗痕の直径 d を計測顕微鏡で測り、球の半径を r 、摩耗深さを h として、次式から求めた。

$$W_b = \pi h^2 \left(r - \frac{h}{3} \right), \quad h = \frac{(d/2)^2}{r + \sqrt{r^2 - (d/2)^2}} \quad (1)$$

一方、ディスクの摩耗量 W_d は摺動円の断面形状を表面粗さ計で測り、積分して体積とした。いずれも単位荷重、単位摺動距離当たりの摩耗体積、比摩耗量 W_s に換算して相互比較を行った。各 Si_3N_4 試料の破断面や摺動面などの様子は走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した。

Fig. 1. Schematic illustration of ball-on-disk method.

3. 結果と考察

実験に使用した4種の Si_3N_4 球, A, B, C, Dを切断, 鏡面研磨し, 荷重10 kgfでのピッカースインデンテーション法により, 硬度(H_v)およびNiiharaの式による破壊靱性(K_{Ic})を測定した^{8),9)}. それらの H_v と K_{Ic} の関係を図2に示したが, H_v , K_{Ic} ともAが最小, Dが最大, その中間にB, Cがある. 図3に破断面, 図4にピッカース圧痕のSEM写真を示した. Aは等方的で

Fig. 2. Relation between Vickers hardness and fracture toughness of the Si_3N_4 balls used.

数 μm と大きく成長した粒子からなっていて, しかも気孔がかなり多い. それが低い H_v , K_{Ic} の原因と思われる. それに比べて, Dは高靱性な Si_3N_4 に特有な非常に微細な針状組織を持ち, 気孔はほとんどない. B, Cも気孔は少ないが, Dよりも若干粒子径が大きく, H_v , K_{Ic} がいくらか低い原因であろう. 図5にX線回折の結果を示した. A, B, Dでは $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ のみの回折ピークが検出され, Cにはそれ以外に結晶粒界相であるMelilite相が認められる.

Si_3N_4 球, Dについて摺動距離を約1 kmから80 mまで6段階にかえて測定した摩耗量 W_b と, そのときの球の重量減少との関係を図6に示した. すべての測定点がDの密度 3.23 mg/mm^3 に相当する直線上に分布していることから, 鋼球と同様, Si_3N_4 についても摩耗量の測定に(1)式が適用できることが分かった⁷⁾. 次に, 摺動距離による摩耗量の変化が図7であるが, 摺動距離にほぼ比例して摩耗量が増加している. そこで, 最小二乗法による近似直線を求め, その傾きから比摩耗量が $W_s = 2.8 \times 10^{-7} \text{ mm}^2/\text{kgf}$ と計算される.

同様な結果が他の Si_3N_4 球についても得られ, 各 Si_3N_4 球の比摩耗量を H_v の関数として図8に示した. 同図にあるSiCディスクの比摩耗量は図9に示すよう

Fig. 3. Fractured surfaces of Si_3N_4 balls. The lines are $10 \mu\text{m}$ in length.

Fig. 4. Vickers indentation on polished surfaces of Si_3N_4 balls. The lines are $10\ \mu\text{m}$.

Fig. 5. X-ray diffraction patterns of Si_3N_4 balls. M indicates Melilite phase.

Fig. 6. Relation between wear volume from the wear scar and weight loss of Si_3N_4 (D) ball sliding on SiC disk.

Fig. 7. Wear volume of Si_3N_4 (D) ball sliding on SiC at load 10 kgf and velocity 20 cm/s, as functions of sliding distance.

な摺動円の断面形状から求めたものである。なお、摩擦係数はいずれも $\mu=0.75$ 前後であり、 Si_3N_4 球による差異は認められなかった。 Si_3N_4 球の摩耗は H_v あるいは K_{IC} が高くなると減少し、逆に SiC ディスクの摩耗は急速に増大している。各 Si_3N_4 球上の摩耗痕の様子が図 10 であるが、いずれも表面凹凸が激しく、完全に脆性破壊的な様相を呈している。このようなシビア摩耗では、試料の硬さや靱性が高いほどそれ自身は摩耗せず相手をより摩耗させる、とある程度までは単純な説明ができるのかもしれない。しかし、結晶粒界相を含む C の摩耗は非常に低く、逆に相手ディスクの摩耗は高くなってい

Fig. 8. Specific wear rates of Si₃N₄ ball and SiC disk, in relation to its Vickers hardness.

Fig. 9. Cross sections of wear circle on SiC disk slid by Si₃N₄ balls for about 3 km.

Fig. 10. Wear surfaces on Si₃N₄ balls sliding on SiC disk at load 10 kgf and velocity 20 cm/s. The lines are 10 μ m.

る。マクロな H_v や K_{10} では評価しきれない結晶粒界の特性も摩耗には大きな影響を与えるようである。

4. 総 括

ボールオンディスク法により、荷重 10 kgf、摺動速度 20 cm/s で、4 種の Si₃N₄ 球、A、B、C、D と SiC ディ

スク間の摩耗試験を行った。その結果を要約すると以下のようになる。

(1) 粒径が大きく、気孔の多い A は硬さ、靱性が低く、逆にち密で微細な針状組織を持つ D は高い硬さ、靱性を示している。

(2) 各 Si₃N₄ 球上の摩耗痕形状から求められる摩耗

量は重量減少に比例し, また摺動距離に比例して増加する.

(3) 各 Si_3N_4 球の摩耗は硬さあるいは靱性が高くなると減少し, 逆に相手 SiC ディスクの摩耗は急速に増大する.

(4) 結晶粒界相を含む C の摩耗は非常に低く, 逆に相手ディスクの摩耗は高くなっている.

文 献

- 1) R. N. Katz, *Int. J. High Tech. Ceram.*, 1, 69-79 (1985).
 - 2) L. B. Sibley and M. Zlotnick, *Mater. Sci. & Eng.*, 71, 283-93 (1985).
 - 3) 竹林博明, 小松通泰, 機械設計, 29, 84-91 (1985).
 - 4) 藤原孝誌, 竹林博明, 潤滑, 32, 367-70 (1987).
 - 5) 大工試ニュース, 32, No. 2 (1988).
 - 6) H. Czichos, S. Becker and J. Lexow, *Wear*, 114, 109-30 (1987).
 - 7) 岩佐美喜男, 木下 実, 窯協, 95, 899-905 (1987).
 - 8) K. Niihara, R. Morena and D. P. H. Hasselman, *J. Mater. Sci. Lett.*, 1, 13-16 (1982).
 - 9) 岩佐美喜男, 溶射技術, 6, 1-10 (1985).
-