高硬度鋼の疲労強度に及ぼす研削加工の影響*

(第1報, CBN および WA 砥粒による研削
によって生じる被削材の表面性状)渡部 正 気^{*1}, 古 市 博^{*2}Effect of Grinding on the Fatigue Strength of highly hardened Steel
(1st Report, Some Features of Surfaces, Ground
with CBN or WA Abrasive Grains)

Seiki WATANABE and Hiroshi FURUICHI

A highly hardened steel (SK 5) was ground with CBN or WA abrasive grains, and some features of ground surfaces (structure, hardness, residual stress, etc.) were studied. It was found that spark-out raised compressive residual stress near the ground surfaces in every case, especially when CBN abrasive grains were used. This suggests the effectiveness of spark-out in raising fatigue strength. It was also found that grinding with CBN abrasive grains raised the hardness, in contrast to the lowering of the hardness after the grinding with WA abrasive grains. This suggests a rise in the wear resistance due to the grinding with CBN abrasive grains, contrary to the case of grinding with WA abrasive grains. The above-mentioned difference caused by the difference of the abrasive grains may be attributed to the difference in the heat conductivity, etc., of the abrasive grains, which caused the difference in the structure of the ground surfaces.

Key Words: Grinding, Abrasive Grain, Fatigue, Affected Layer, Residual Stress, Grinding Wheel

1. 結 言

一般に実用材料としての高硬度鋼材は研削加工によって仕上げされ、実用に供される場合が多い。したがって、研削加工が高硬度鋼材の疲労強度に及ぼす影響に関する研究は重要である。しかし、その研究は意外に少ない⁽¹⁾。しかも、それらの大部分は被削材の表面特性(残留応力、硬さ、およびあらさ)と疲労強度に関するものである。しかし、研削加工によって生じた被削材の組織変化に着目、検討された例について論じた研究はほとんど見受けられない。これを明確にしておくことは、今後その使用頻度が増大すると考えられる高硬度鋼材の疲労強度を論ずるうえでも、さらには研削加工を行ううえでも有用な知見が得られると思われる。

一方、最近の研削加工は工具鋼、難削材などに CBN 砥粒による加工が多用されている。この砥粒による研削加工材の疲労強度は従来の WA 砥粒によるそれより上昇することが報告されている⁽¹⁾⁽³⁾。その強化機構として、CBN 砥粒による研削は、被削材に高

い圧縮残留応力を生じさせることが指摘されている⁽²⁾。しかし、これらの砥粒による研削加工材の加工組織に着目して疲労強度を検討した例もほとんど見受けられない。

本研究では、上述のことを考慮し、高硬度鋼材として工具鋼(SK 5)を焼入れ、焼もどし処理を行い、硬度 H_v を約 750 に調整した試料を取りあげた。その理由は、これが、高硬度鋼材として最も基本的な組織であり、ばねとして実用に供されていることによるものである。この試料に研削条件を同一にして、CBN 砥粒および WA 砥粒による砥石軸方向に送り運動を加えた平面研削を施した。そして、各研削加工材の表面特性(残留応力、硬さ、およびあらさ)について調べた。次に、X線分析によって、各表面特性の特徴について検討を加えた。

CBN 砥粒による研削では、スパークアウトを施し、研削面付近に高い圧縮残留応力が生じた。これらについて報告する。疲労き裂の生成に着目し、疲労強度について検討した結果は別に報告の予定である。

2. 実 験 方 法

実験に供した材料は厚さ 3.2 mm の工具鋼(SK 5)である。その化学成分を表 1 に示す。試験片は素材か

* 原稿受付 平成元年 8 月 28 日。

^{*1} 正員、松江工業高等専門学校(〒690 松江市西生馬町 14-4)。^{*2} 正員、山梨大学工学部(〒400 甲府市武田 4-3-11)。

ら圧延方向が荷重軸と一致するように切り出した。図1に試験片形状を示す。その後、1073 Kで1.2 KS保持し、焼入れ(油)、焼戻し(473 Kで7.2 KS)処理を行った。研削加工は熱処理後の試験片の表裏を化学研磨で約20 μm 除去した後に施した。研削条件は実用性を考慮し、表2に示す条件で行った。表2中のスパークアウト0回、および4回施した理由は表面特性(残留応力、硬さ、およびあらさ)を変えるためである。以後、各研削加工材の記号はCBN砥粒(CBN)、およびWA砥粒(WA)にスパークアウトの回数零および4を付けて呼ぶ。

残留応力と硬さは、表層を順次化学研磨で除去し、その表面を測定する方法によった。なお、残留応力は特性X線CrK α 線を使用し、放物線近似で 2θ を求め、 $\text{Sin}^2\psi$ 法で応力値を算出した⁽⁴⁾。回折面はFe(211)である。硬さはマイクロビッカース硬度計(荷重1.96 N)で測定した。また、各研削面のあらさは触針式表面あらさ測定機で測定した。さらに、各研削面を特性X線CoK α 線およびCrK α 線で定性分析した。

表1 供試材の化学成分(Wt %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
SK5	0.86	0.22	0.44	0.008	0.004	0.17	0.08	0.02

表2 研削条件

Grinding Wheel	CBN80M100V 300X25X127mm	WA80H7V 305X38X76mm
Wheel speed	1696m/min	1725m/min
Table speed	18m/min	
Depth of cut	5 μm ×10times 5 μm ×10times+0 μm ×4times	
Cross feed	5mm/pass	
Grinding fluid	Chemical type BT-1	
Dressing conditions		
Dressing tool	Rotary diamond dresser	A single point diamond
Table speed	0.01mm/rev	0.03mm/rev
Depth of cut	2.5 μm ×3times	25 μm ×4times

図1 試験片形状

3. 実験結果および考察

3.1 研削加工材の表面特性

3.1.1 残留応力 残留応力は前報⁽¹⁵⁾⁽⁶⁾と同様図2に示すように ψ を ϕ 方向(0, $\pi/2$, π , および, $3\pi/2$)に変化させて測定した。なお、熱処理材の ϕ の取り方は試験片の長手方向、およびそれと直角方向をそれぞれ $\phi=0$ と π , および $\phi=\pi/2$ と $3\pi/2$ とした。しかし、 $2\theta-\text{Sin}^2\psi$ 線図は $\phi=0$ と π および $\phi=\pi/2$ と $3\pi/2$ がそれぞれ一致するので、 $\phi=0$ と $\phi=\pi/2$ の場合の残留応力を計算した。図3は熱処理材および各研削加工材の表層を化学研磨で除去した面の残留応力である。なお、試料内部の残留応力は表層除去による応力の解放を考慮していない。熱処理材は $\phi=0$ および $\pi/2$ 方向とも表面付近で引張残留応力が生じていた。しかし、表面から約50 μm 除去すれば $\phi=0$ 方向で約-70

図2 ψ と ϕ の関係

図3 研削材の残留応力分布

MPa. $\phi = \pi/2$ 方向で約 20 MPa の値で一定となる。各研削加工材の $2\theta - \sin^2 \phi$ 線図は $\phi = \pi/2$ と $3\pi/2$ が一致するので $\phi = \pi/2$ の結果を示した。しかし、表層付近では $\phi = 0$ と π が一致しない。この $2\theta - \sin^2 \phi$ 線図の不一致の理由は、研削加工によって残留ひずみ分布格子面の回転などに加工向き依存性⁽⁶⁾⁽⁷⁾が生じた結果と考えられる。この不一致の深さは WA 砥粒の研削加工材でスパークアウトの有無にかかわらず極めて浅く、約 10 μm 以内であった。しかし、CBN 砥粒によるそれはスパークアウトなしの場合に約 50 μm 、ありの場合に約 20 μm も生じた。砥粒の違いでこのように $2\theta - \sin^2 \phi$ 線図に不一致の差が生じることは注目すべきことである。このことは、CBN 砥粒の熱伝導度が WA 砥粒のそれを上回ることによるのであろう。次に、スパークアウトの効果については、いずれの ϕ 方向にも認められ、圧縮残留応力がより大きくなる傾向にある。この傾向は、CBN 砥粒による研削のほうが WA 砥粒によるそれよりも著しく大きい。従来、CBN 砥粒による研削は加工能率の観点から高切入みで、最終仕

上加工をする方法が取られてきた。しかし、スパークアウトを施すことによって表層により高い圧縮残留応力が生じる。これは、今後の CBN 砥粒による研削の最終仕上げ工程にこれを導入する必要があることを示唆している。なお、スパークアウトの効果が疲労強度の上昇に有効であることについての実証は別に報告する。

3・1・2 硬さ 図4は熱処理後の試験片および研削加工材の硬さ分布である。硬さ20点の平均値である。熱処理材は表面から約50 μm の深さまで軟化し、それ以上では一定である。研削加工材は砥粒の違いで明確な差が生じている。すなわち、研削面の極表層は CBN 砥粒および WA 砥粒でそれぞれ硬化および軟化する。これは CBN 砥粒の冷却効果が WA 砥粒のそれより著しく大きいこと⁽²⁾から理解できる。図5に熱処理材の表面を50 μm 化学研磨で除去した試験片(C. P. S)の面を200点、各研削面を100点ランダムに測定した硬さ分布を示す。硬さの分布はいずれもばらつきが大きい。しかし、硬さ分布は両砥粒の特徴をよく示している。CBN 砥粒による研削面の硬さ分布は、化学研磨面のそれより硬さの高い方向に移行し、スパークアウトを施してもほとんど変わらない。一方、WA 砥粒による研削面のそれは、逆に硬さの低い方向に移行する。また、スパークアウトを施しても、より硬さの低い方向に移行する傾向も見られた。両砥粒によって生じる硬化層および軟化層はそれぞれ表層から2 μm および5 μm 以内に生じている(図4参照)。これらの結果から、CBN 砥粒による研削が WA 砥粒のそれよりも耐摩耗性の向上が期待される。

3・1・3 表面あらさ 表3は各研削面のあらさを研削方向に平行および直角に測定した結果である。研削方向に対して直角方向のあらさは、スパークアウト

図4 研削材の硬さ分布

図5 化学研磨面および研削面の硬さのばらつき

を施すことによって、いずれの砥粒においても改善される。しかし、平行方向のそれは、WA 砥粒による場合ではわずかに改善されるが、CBN 砥粒ではほとんど変化が見られない。これは CBN 砥粒の摩耗が WA 砥粒のそれに比べて小さく、砥粒切れ刃が WA 砥粒のそれより鋭利なこと、CBN 砥粒の強度や耐摩耗性が WA の砥粒のそれよりも高いため砥粒の粒度が大きいこと、CBN 砥粒の高い熱伝導度により砥粒の凝着が少ないこと凹凸が生じにくいなどの理由によると思われる。

3・2 加工組織 図6は熱処理後、化学研磨で50 μm 除去した面および各研削面を CoK α 線で調べた結果である。化学研磨した面を試験片内部の組織として考えれば、明らかに CBN 砥粒による研削面は γFe (残留オーステナイト) および $\alpha'\text{Fe}$ (マルテンサイト) のピーク強度が増加している。しかし、WA 砥粒のそれは γFe のピーク強度の減少、逆に αFe (焼戻しマルテンサイト) のピーク強度が増加している。また、スパークアウトの効果は WA 砥粒で αFe のピーク強度が若干減少するだけである。図7は図6と同じ試料を CrK α 線で調べた結果である。化学研磨した面の

表3 研削材の表面あらさ

Specimen	Direction	Roughness R _{max} (μm)
WA-0	P*	1.3
	R*	3.8
WA-4	P	0.7
	R	2.5
CBN-0	P	1.0
	R	4.0
CBN-4	P	1.0
	R	2.8

P*: Parallel to the grinding direction
R*: Right-angled to the grinding direction

図6 研削材のX線分析結果 (CoK α 線)

αFe の回析線を基準に比較すると両砥粒の特徴がよくわかる。CBN 砥粒のそれは化学研磨した面と、ほぼ同じ回析線の幅の広がりである。しかし、WA 砥粒のそれは明らかに回析線の幅が小さくなっている。これらの結果から各砥粒での研削が残留応力および硬さに及ぼす影響は以下のように考えられる。

WA 砥粒の研削では、砥石の熱伝導度が低いため、焼戻しが生じる。その結果、転位の消滅あるいは再配列が生じ γFe の分解が進む。したがって、硬さが低下したものと考えられる。一方、CBN 砥粒のそれは表層付近に硬い $\alpha'\text{Fe}$ が生じ硬化に寄与する。この $\alpha'\text{Fe}$ が生じる理由は、CBN 砥粒の熱伝導度が高いためであろう。

次に、残留応力はいずれの砥粒においても、スパークアウトを施すことによって圧縮側に移行する。これは、スパークアウトによる研削圧力の低下およびそれに伴う摩擦力の減少による研削後研削面付近の弾性回復量が減少することによるのであろう。

図8は熱処理材の組織および研削面の腐食状態を観察したものである。図8(a)は熱処理材を化学研磨で表面から50 μm 除去し、ピクラールで腐食した組織である。典型的な焼戻しマルテンサイトおよび未溶解炭化物が観察される。図8(b)および図8(c)はそれぞれ CBN-4 および WA-4 の研削面をナイトールで1 min 腐食した組織である。WA-4 の研削面は非常に腐食されやすく、黒くなっている。しかし、CBN-4 は微細なびり模様あるいは塑性変形によって生じたと考えられる模様が観察された。耐食性は WA-4 より優れている。図8(d)は CBN-4 の研削面を電解研磨で1 μm 除去し、ピクラールで腐食した組織である。図8(a)に示す組織とほぼ同様である。したがって、CBN-4 に生じた αFe および γFe の組織の変態は、表面から1 μm 以内に生じていると考えられる。なお、CBN-0 を1 μm 除去すれば加工条こんが観察される

図7 研削材のX線分析結果 (CrK α 線)

図 8 研削面の組織

だけで組織は図 8 (d) とほぼ同じである。

4. 結 論

CBN 砥粒および WA 砥粒による平面研削加工を高硬度鋼 (SK 5) に施し、組織、硬さ、残留応力などを調べた。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) CBN 砥粒による研削では研削面表層 1 μm 以内に変態によるマルテンサイトおよび残留オーステナイトが認められた。しかし、WA 砥粒のそれは焼戻しが生じた。

(2) 各研削加工材の残留応力は加工向き依存性を示した。各砥粒によるスパークアウトはいずれも表面の残留応力を圧縮側に移行した。特に、CBN 砥粒によるその効果は大きい。CBN 砥粒による研削面の硬さ分布は、スパークアウトの有無にかかわらずほぼ同じであった。しかし、WA 砥粒のそれは、スパークアウトを施しても、軟化層は除去できず、さらに軟化する傾向が認められた。よって、いずれの砥粒の場合でも、スパークアウトによる疲労強度の上昇が期待される。特に CBN 砥粒の場合、その傾向は大きい。

(3) CBN 砥粒による研削加工では、研削面から約 2 μm の深さまで硬化した。しかし、WA 砥粒のそれは約 5 μm の深さまで軟化した。したがって、耐摩耗性の観点からは、CBN 砥粒による研削が WA 砥粒のそれよりも有利と思われる。

おわりに、本実験に協力いただいた佐藤公紀氏 (島根工業技術センター) ならびに瀬尾博俊氏 [(株) ノリタケカンパニーリミテド] に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 例えば, Tarasov, L. P. and Grover, H. J., *Proc. ASTM*, 50(1950), 668, 日本機械学会編, 金属材料疲労度の設計資料(II), (1984), 3.
- (2) Johnson, G. A., *Soc. Manuf. Eng.*, MR 86-625(1986).
- (3) Torshoff, H. K. and Heyz, F., *Soc. Manuf. Eng.* MR 85-191(1985).
- (4) 日本材料学会編, 改善 X 線応力測定法, (1981), 75, 養賢堂.
- (5) Watanabe, S. and Furuichi, H., ほか 1 名, *Bull. JSME*, 29-253(1986), 2323.
- (6) 若林・中山・永田, 精密機械, 43-6(1977), 661.
- (7) Furuichi, H., *Wear*, 113-3(1986), 323.