研削切断用レジノイド砥石の曲げ強さの温度依存性*

八 高 隆 雄^{*1}Temperature Dependence of Bending Strength
of Cutting Wheels

Takao YAKOU

Temperature dependence of the strength of commercial cutting wheels was examined using three-point bending tests. Fracture occurred inside the bond without exception. Bending strength depended not on the bond of the grain on the abrasive wheel but on the fraction of the bond. Increase in the grade abrasive and bonding grade of the wheel results in the increase in the volume fraction of the bond. Thus the bending strength of the wheel becomes high. The bending strength first decreases with temperature up to 100°C and then increases up to 160°C. Above 180°C, the strength decreases sharply. The change in strength with temperature might be attributed to the bridging phenomena and glass transformation of the bond.

Key Words: Bending, Grinding Wheel, Ductile Fracture, Brittle Fracture, Material Test

1. 結 言

研削切断法は、円板上の砥石を高速で回転させ材料を切断する加工法であり、焼入れ材やセラミックスなどの通常の機械加工がむずかしい材料をも切断できるため⁽¹⁾、今後の発展が期待される加工法の一つである。しかし、特に精密切断用の厚さ1mm以下の薄砥石では、端面のみならず側面からも摩耗が進行する⁽²⁾⁽³⁾ため、砥石の摩耗を抑えた状態での加工条件の選定が重要である。一方、砥石の摩耗は被加工材と砥石との接触部で発生する摩擦熱と強く結びついており⁽¹⁾、砥石の特性を考えた場合に、その温度依存性は重要な因子である。そこで、本研究では砥石の寿命につながる基礎資料を得る目的で、研削切断砥石強度の温度依存性を調べた。

2. 実 験 方 法

2.1 試料 実験には砥粒種類、粒度、結合度の異なる市販の7種類(厚さ0.8mmまたは0.9mm)の研削切断用砥石を用いた。それらはA100NB, A100

PB, A80PB, GC400LB, GC150NB, GC150HB, GC100NBであり、結合剤はいずれもフェノール樹脂である。ここで、結合度はアルファベットの順に大きくなる。これらの円板状の砥石から幅30.0mmで長さ40.0mmの曲げ試験用の試料を得た。

表1には用いた各砥石の気孔率 $(V_f)_A$ 、砥粒率 $(V_f)_G$ および結合剤率 $(V_f)_B$ を示す。気孔率 $(V_f)_A$ は、20mm×40mmに切断した6枚の砥石の外形状から計算によって求めた体積 V_0 と、それらを界面活性剤入りの水を入れたメスシリンダに入れたときの増加体積 V_1 とから、 $(V_0 - V_1)/V_0$ によって求めた。この試

表1 用いた各砥石の成分組成

	$(V_f)_A$	$(V_f)_G$	$(V_f)_B$
A100NB	0.180	0.482	0.338
A100PB	0.155	0.493	0.352
A80PB	0.181	0.571	0.248
GC400LB	0.086	0.445	0.469
GC150NB	0.031	0.520	0.449
GC150HB	0.195	0.587	0.218
GC100NB	0.265	0.465	0.270

$(V_f)_A$: void content, $(V_f)_G$: grain content, $(V_f)_B$: bond content

* 原稿受付 平成4年11月26日。

*¹ 正員、横浜国立大学教育学部(〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156)。

料を 600°C で 30 min 加熱して結合剤を完全に燃焼させ、その後燃焼灰と砥粒を分離し、乾燥して砥粒の体積 V_2 を求めた。なお、このときの砥粒をポータブルマイクロ스코プ(キーエンス製)によって観察したところ、図 1 に示すように、完全な砥粒だけの集まりであった。以上の結果 $(V_f)_B$ は $(V_1 - V_2)/V_0$ から、 $(V_f)_C$ は $1 - (V_f)_A - (V_f)_B$ から求めた。

2・2 実験装置および方法 図 2 に用いた自家製の昇温曲げ装置を示す。曲げ試験はこの装置をインストロントタイプの万能材料試験機(三栄測器製)に装着して行った。曲げ装置は、30 mm 離れた 2 本の直径 10 mm の丸棒を下側へ、上側の中央へ同じ径の 1 本の丸棒を配置し、上側を押す形で曲げ試験ができるようにした。昇温状態での曲げ試験は、図 2 の装置に試料をセット後、直径 70 mm で深さ 130 mm のステンレス製円筒容器にシリコンオイル〔東芝シリコン(株)製、TSF 458-100〕を満たして所定の温度に保った中に図 2 の装置を入れ、温度が安定した後に曲げ試験を行った。このときの曲げ応力 σ_B は、曲げモーメント M_B に砥石中央部の断面係数 Z から、 $\sigma_B = M_B/Z$ の関係により求めた。

3. 結 果

3・1 砥石強度の温度依存性 図 3 および 4 にアルミナ系および炭化けい素系の砥石で得られた曲げ試験の結果を示す。実験はすべて 5 回以上行った。それらのデータは、室温で最もばらつきが大きく最大で 16% 以内(A 100 NB: $\pm 12\%$, A 100 PB: $\pm 13\%$, A 80 PB: $\pm 16\%$, GC 100 NB: 11%, GC 150 NB: 9%, GC 150 HB: 10%, GC 400 LB: 8%)であり、ばらつきの大きさは粒度が大きく温度が高いほど小さくなる傾向にあった。以下の図にはそれらの平均値のみを示す。いずれの場合にも、室温から 100°C 近くまで

図 1 A 100 NB の結合剤を燃やして取り出した砥粒

強度がやや低下し、その後 160°C 近くで再び強くなり、180°C 以降急激に低下するという共通の特徴が認められる。

また、図 5 および 6 はそれぞれ炭化けい素系およびアルミナ系の砥石の破断までの変位量 δ と温度 T との関係を示す。 δ は曲げ強度 σ_B のような複雑な変化をせず、温度が高くなるに従って単調に増加している。すなわち、温度 T が高いほど δ が大きくなり破断までの延性が大きいことがわかる。

以上の結果、砥石の破断延性は試験温度が高くなるに従って単調に増加するが、曲げ強度は室温から 100°C 近くまでいったん低下した後、150°C 近くで再び増加し、その後 180°C 以上で急激に減少することがわかる。

3・2 砥粒の粒度と強度との関係 図 7 にアルミナ系および炭化けい素系の 100 NB の砥石の曲げ強度

図 2 用いた昇温可能な 3 点曲げ装置

図 3 炭化けい素系砥石の曲げ強度 σ_B と温度 T との関係

の結果を示す。砥粒の材質は異なっても粒度および結合度は同じであれば、 σ_B も RT から 200°C まで両者で差がほとんど認められない。すなわち、 σ_B は砥粒の材質には依存しないことがわかる。

一方、図4のA 80 PBとA 100 PBの差および図3中のGC 100 NBとGC 150 NBの差に見るように、砥粒の材質および結合度が同じであっても、砥粒の粒度が大きいほど σ_B は高くなっている。すなわち、 σ_B は砥粒の粒度が大きい(砥粒の平均粒径が小さい)ほど大きいことがわかる。

さらに、図4のA 100 NBとA 100 PBおよび図3のGC 150 HBとGC 150 NBに見るように、砥粒の粒度および砥粒の種類が同じであっても、結合度が高い($H < N < P$)ほど曲げ強度も高い。

以上の結果から、研削切断用砥石の曲げ強度は、砥粒の材質に依存せず、粒度が高くかつ結合度が高いほど高くなることが結論できる。

4. 考 察

4・1 強度を支配している因子 表1に示したように、砥石は空孔、砥粒および結合剤により構成されている。研削用砥石の機械的特性は結合剤率^{(4)~(6)}や砥粒率⁽⁵⁾⁽⁶⁾に依存することが知られている。一方、炭化けい素系研削切断砥石の曲げ強度は、砥粒率が同じならば、結合剤の含有量によって支配される⁽⁷⁾ことが明らかとなっている。

そこで、今回用いた7種類の砥石の強度はいずれの因子によって支配されているかを調べてみる。図8(a)は、各砥石間で最も強度差が著しかった室温における曲げ強度と粒度との関係を示す。全体的に見た場合には、粒度が大きいほど σ_B も大きくなる傾向が認められる。この結果を結合剤率(V_f)_Bで割った $\sigma_B/(V_f)_B$ と粒度の関係を図8(b)に、砥粒率(V_f)_Cで割った $\sigma_B/(V_f)_C$ と粒度の関係を図8(c)に示す。図か

図4 アルミナ系砥石の曲げ強度 σ_B と温度 T との関係

図6 アルミナ系砥石の破断までの変位量 δ と温度 T との関係

図5 炭化けい素系砥石の破断までの変位量 δ と温度 T との関係

図7 アルミナ系砥石と炭化けい素系砥石の曲げ強度 σ_B の比較

ら明らかなように、 $\sigma_B/(V_f)_G$ はかなり著しいばらつきを示すが、 $\sigma_B/(V_f)_B$ は粒度によらずほぼ一定値を示している。2章に述べたように、室温におけるデータのばらつきの範囲が最大で16%程度であったことを考えると、 σ_B は $(V_f)_B$ によってほぼ決定されるものとみなしてよいであろう。

また、図9は同様のデータを結合度に対して整理したものである。図9(a)では、結合度が大きいほど σ_B も高いが、 $\sigma_B/(V_f)_B$ で規格化することによって、この

場合もほぼ一定値になっている。

一方、研削用砥石の曲げ試験を行った海野ら⁽⁵⁾の結果によれば、砥石の曲げ強度は砥粒率と結合剤率に依存する。しかし、本研究の結果は結合剤率によって一義的に決まっている。この両者の差の原因を調べるため、各温度で破断した破面をポータブルマイクロスコプで調べた。図10には、代表例として、A 100 NBの(a)室温と(b)180°Cにおける結果を示す。いずれの写真も線状に見える結合剤のディンプル状のパターンが認められ、砥粒と結合剤との界面ではがれたような状態は認められない。このことから、今回用いた砥石は砥粒と結合剤との接合が完全であったため、破壊はおもに結合剤内で生じ、その結果として曲げ強度が結合剤の体積率によって一義的に決定されたものと思われる。したがって、粒度が高いほどおよび結合度が高いほど曲げ強度が高くなった理由も、これらの因子が高いほど結合剤の体積率が高かったためであろう。

4.2 砥石曲げ強度の温度依存性 図3, 4に示したように、すべての砥石の曲げ強度は室温から100°C近くまでいったん低下するものの160°C近くで再び増加する傾向が認められた。SiC⁽⁸⁾やAl₂O₃⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾は500°C以下ではほとんど強度は劣化せず、しかも160°Cで強度が再び増加するような特異な現象は認められていない。また、上述の4.1節の結論として、研削切断用砥石の曲げ強度は結合剤率によって一義的に決まることが

図8 (a) 曲げ強度 σ_B , (b) 結合剤率で規格化した曲げ強度 $\sigma_B/(V_f)_B$ および(c) 砥粒率で規格化した曲げ強度 $\sigma_B/(V_f)_G$ と粒度との関係

図9 (a) 曲げ強度 σ_B および(b) 結合剤率で規格化した曲げ強度 $\sigma_B/(V_f)_B$ との関係

明らかとなった。したがって、図 3、4 の砥石の強度特性も結合剤自身の強度特性と考えることができる。結合剤の温度特性から砥石強度の温度特性を考えた場合、結合剤自身の温度特性と砥石の焼成処理温度の影響が考えられる。まず結合剤自身の温度特性を考えてみよう。結合剤のフェノール樹脂は熱硬化性の高分子

材である。したがって、150°C 前後で高分子の橋かけ現象が生じ強度が増し、さらに高温のガラス転移温度では強度が急激に低下する⁽¹⁰⁾ことが考えられる。一方、砥石の焼成温度(今の場合約 180°C)が強度の特異現象の原因と成り得るかを考えた場合、130~180°C までの焼成温度は砥石の機械的性質にほとんど影響しない⁽⁷⁾ことから、前者の高分子材自身の温度特性が砥石の温度特性に現れたものとするほうが矛盾がない。

なお、図 11 および 12 は A 100 NB と GC 100 NB の破断面のマクロ写真である。強度が回復した 160~180°C の破面形状がその前後の温度の場合に比べ凹凸が激しく複雑な形状をしている。図 10 に示したように、破断面のミクロ的組織には温度による差がないものの、マクロ的にはこのように破断面の凹凸が激しくなることは、例えば試料断面形状が一定であっても、割れた面の凹凸が激しいほど実質の断面積は大きくなるものと思われる。このことは高分子の橋かけが生じた結果、結合が強まり、より強度的に弱いところで割れ形状が複雑になったものと思われる。しかし結合剤自体の強度が変わらなくても割れる断面積さえ大きくなれば強度は回復する可能性も考えられる。

5. 結 言

粒度、結合度および砥粒材質の異なる市販の 7 種類のレジノイドボンドの研削切断砥石の室温から 200°C までの範囲で曲げ試験を行い、以下の結論を得た。

(1) いずれの砥石も曲げ強度は、室温から 100°C 近くまでいったん低下した後、160°C 近くで再び増加し、その後急激に低下した。

(2) 曲げ強度は、砥粒材質に依存せず、粒度が大きいほどかつ結合度が高いほど高い。

(3) 砥石の破壊は結合剤内で生じ、曲げ強度は結

図 10 破断面のポータブル顕微鏡組織写真

図 11 A 100 NB 砥石の種々の変形温度における破断面のマクロ写真

図 12 GC 100 NB 砥石の種々の変形温度における破断面のマクロ写真

合剤率によって一義的に決定する。また、(2)の原因は、粒度が高いほどかつ結合度が高いほど結合剤率が高いためである。

(4) (1)の原因は結合剤の橋かけ作用とガラス転移の結果と思われる。

最後に、本研究の曲げ試験に協力された元横浜国立大学学生 長島岳紀君、組成の解析に協力された横浜国立大学学生 荒川進君および供試材を提供された平和テクニカ(株)に謝意を表す。本研究は平成4年度文部省教育研究特別経費(物質の変質過程の動的観察とその教材化、代表：横浜国立大学渋谷祥子教授)の一部によって行われたものである。

文 献

- (1) 例えば、正野崎, 切削, 加工技術便覧, (1968), 820, 日本工業新聞社.
- (2) 松井・庄司・寺本, 精密工学会誌, 53-7 (1987), 1051.
- (3) 中村, 精密機械, 42-4 (1976), 281.
- (4) 吉川, 精密機械, 26-11 (1960), 89.
- (5) 海野・篠崎, 精密機械, 38-4 (1972), 349.
- (6) 海野・篠崎, 精密機械, 36-9 (1970), 608.
- (7) 小林, 精密機械, 20-3 (1954), 89.
- (8) 島田・杉田編著, セラミックスの機械加工, (1985), 65, 養賢堂.
- (9) Kingery, W. D., Bower, H. K. and Uhlman, D. R. *Introduction to Ceramics*, (1960), 704, John Wiley & Sons.
- (10) Nielsen L. E. (小野木訳), 高分子と複合材料の力学的性質, (1976), 1, 化学同人.