

加工状態モニタリング砥石による研削状態のインプロセス判別

東京農工大学 ○鈴木 修平, 福原 義也, ◎笹原 弘之

要 旨

本研究では、砥石内に熱電対を埋め込み、加工中の砥石表面温度を測定する加工状態モニタリング砥石を開発し、リアルタイムに研削状態の判別を行うことを目的とする。測定データは工具内部の通信機から外部端末に転送し、加工中の砥石表面温度のモニタリングを可能とした。さらに、各々の研削状態で特徴ある温度変化が測定され、そのデータを用いてリアルタイムに研削状態の判別を可能とするアルゴリズムを提案した。

1. 緒 言

金属部品の除去加工において、代表的なものに切削加工や研削加工がある。その中で、高い寸法精度や形状精度が求められる場合、研削加工を用いることが有効である。しかし、良好な加工が行われている最中でも、砥石の表面では常に砥粒の微細破砕や磨滅、切りくずの付着などの影響により、研削状態は常に変化していくため、異常が発生する場合がある。研削時に発生する異常には、目つぶれ、目づまり、目こぼれの代表的な三状態がある。これらの異常は製品に悪影響を及ぼすため、適切な加工条件を選定し防ぐ必要があるが、適切な加工条件の選定は作業者の経験に基づく場合が多い。従来の研究において、過電流計を用いた目づまりの検出法¹⁾や、レーザ変位計を用いた複合的な砥石作業面の状態をインプロセス判別が可能であることは示唆されている^{2) 3)}が、研削加工において重要な問題である発熱に関連した研究は見当たらない。

そこで、本研究では、砥石内に熱電対を埋め込み、加工中の砥石表面温度を測定する加工状態モニタリング砥石を開発し、研削状態のインプロセス判別を行うことを目的とする。

2. 実験方法

加工状態モニタリング砥石の概略図を図1に示す。加工状態モニタリング砥石では、砥石内に熱電対が埋め込まれ、加工中の砥石表面温度を測定する。測定データは工具内部の通信機から外部端末に転送し、加工中の砥石表面温度のモニタリングを可能とした。

表1に加工条件を、また表2に使用した砥石の要目を示す。正常に加工できる基準となる砥石 (Standard) と目つぶれ (Grazing)、目づまり (Clogging)、目こぼれ (Shedding) が発生しやすい砥石の4種類を用いて被削材に対してアップカットとダウンカットを交互に計10パスのドライ加工を行い、それぞれの温度データを取得した。

Table.1 Grinding condition

Grinding velocity	m/s	7.85
Feed rate	mm/min	500
Depth of cut	mm	0.02 (10 pass)
Grinding method		up cut , down cut
Type of coolant supply		dry
Material of workpiece		S50C

Table.2 Condition of grinding wheel

	Standard	Grazing	Clogging	Shedding
Grain	WA	A	A	WA
Grain size	#80	#46	#120	#46
Grade	K	R	R	H
Structure	14	7	7	10

3. 砥石表面温度の測定

10パス加工中、測温部が被削材と接触する際の平均温度変化を図2に示す。正常な研削では、測温部が408℃まで上昇している。各条件を正常な研削と比較すると、目つぶれ研削では、559℃まで上昇している。これは砥粒が摩滅し、研削抵抗の増加により研削熱が発生したためと考えられる。目づまり研削では、温度上昇後の下降が緩やかである。これは被削材が測温部に溶着することで熱容量が増大したためと考えられる。目こぼれ研削では、326℃までしか上昇していない。これは過度に自生作用が働いたためと考えられる。

4. 研削状態の評価指標

それぞれの砥石作業面における温度データから、加工中の研削状態を判別する指標を検討した。加工状態モニタリング砥石を用いて研削状態を判別する際、「測定開始時の温度」、「最高温度」、「最高温度からの温度下降勾配」、「測定区間終了時の温度」、「パス間の最高温度の推移」を用いることを提案する。しかし、測定開始時の温度、最高温度、測定終了時の温度については、砥石要目、被削材、加工条件などによって絶対値が大きく左右される可能性がある。そのため、研削状態の評価項目の中で、特に最高温度からの温度下降勾配とパス間の最高温度推移を重要視する。最高温度からの温度下降勾配は、最高温度到達点からの時間的溫度変化であり、温度の絶対値での判断が必要ない。また、パス間の最高温度の推移も同様に、温度の絶対値ではなく、パス毎の最高温度の変化の勾配に着目する。したがって、砥石要目、被削材、加工条件が変化しても適用が可能であると考えられる。

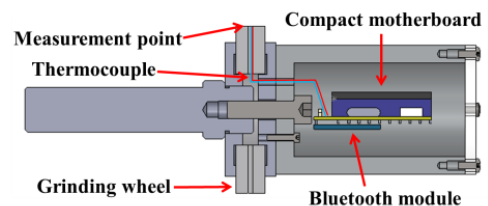


Fig.1 Schematic of grinding state monitoring wheel

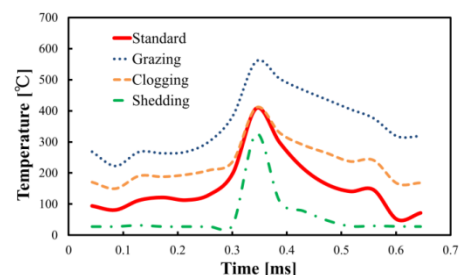


Fig.2 Average surface temperature of grinding wheel

これより、作成した研削状態の評価指標を表3に示す。この評価指標に則れば、上記の加工条件においては正しく研削状態を判別することが可能である。しかし、この評価指標は今回使用した4種類の砥石及び特定の条件から導出したものであるため、これをより一般化した評価指標を表4に示す。また、アルゴリズムを図3に示す。

一般化した指標では、表中に網掛けをした正常な研削状態となる一条件のみにおいて、「測定開始時の温度」、「最高温度」、「最高温度からの温度下降勾配」、「測定終了時の温度」、「パス間の最高温度の推移」を予備的な実験により設定することを想定している。もちろん、これに加え異常発生時の温度データを予備的に収集すれば、判別の精度は向上する。

Table.3 Performance index of specific grinding state

	Start temp (0~0.2ms)	Max temp (0.3~0.4ms)	Finish temp			Transition of max temp	
			Finish temp (0.645 ms)	Decreasing rate of max temp (After 0.1ms)	Slope of 3 points from max temp	Range of transition	Slope of 10 pass
Standard	50~200°C	300~500°C	50~200 °C	40%	-110	200 °C	±10
Grazing	200~350°C	400~700°C	150~450 °C	20%	-60	300 °C	+15
Clogging	50~350°C	300~500°C	50~300 °C	20%	-30	200 °C	-20
Shedding	20~50°C	200~400°C	20~50 °C	50%	-100	200 °C	±5

Table.4 Performance index of general grinding state

	Start temp (0~0.2ms)	Max temp (0.3~0.4ms)	Finish temp			Transition of max temp	
			Finish temp (0.645 ms)	Decreasing rate of max temp (After 0.1ms)	Slope of 3 points from max temp	Range of transition	Slope of 10 pass
Standard	$a_1 \sim a_2$ °C ($a_1 < a_2$)	$b_1 \sim b_2$ °C ($b_1 < b_2$)	$c_1 \sim c_2$ °C ($c_1 < c_2$)	α_1 %	$-\beta_1$	d_1 °C	$\pm\gamma_1$
Grazing	$a_2 \sim a_3$ °C ($a_3 > a_2$)	$b_2 \sim b_3$ °C ($b_3 > b_2$)	$c_2 \sim c_3$ °C ($c_3 > c_2$)	α_0 % ($\alpha_0 < \alpha_1$)	$-\beta_2$ ($ \beta_2 \approx \beta_1/2 $)	d_2 °C ($d_2 > d_1$)	$+\gamma_2$ ($ \gamma_2 > \gamma_1 $)
Clogging	$a_1 \sim a_3$ °C	$b_1 \sim b_3$ °C	$c_1 \sim c_3$ °C	α_0 % ($\alpha_0 < \alpha_1$)	$-\beta_3$ ($ \beta_3 \approx \beta_1/4 $)	d_1 °C	$-\gamma_3$ ($ \gamma_3 > \gamma_2 $)
Shedding	$a_0 \sim a_1$ °C ($a_0 < a_1$)	$b_0 \sim b_1$ °C ($b_0 < b_1$)	$c_0 \sim c_1$ °C ($c_0 < c_1$)	α_1 %	$-\beta_1$	d_1 °C	$\pm\gamma_0$ ($ \gamma_0 < \gamma_1 $)

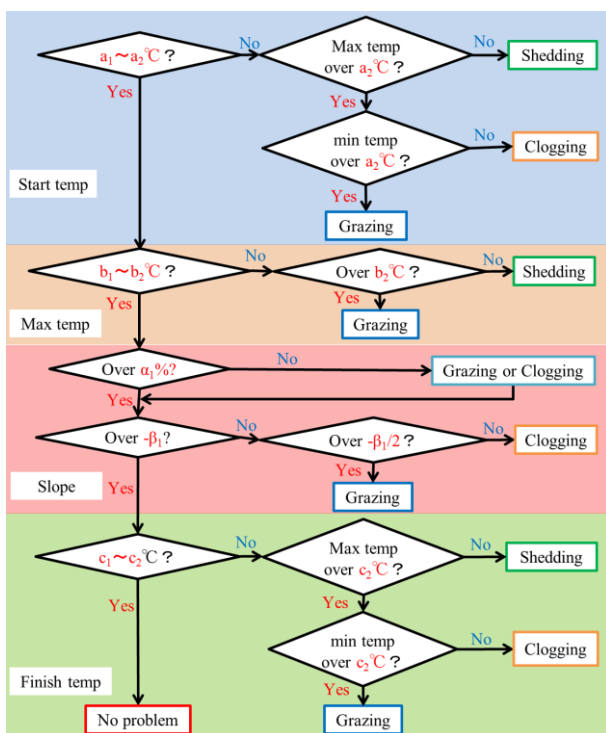


Fig.3 Algorithm for grinding state discrimination

5. 評価指標とアルゴリズムの適用性

提案した評価指標とアルゴリズムの適用性を確認するため、基準となる砥石 (Standard) を用いて、表1の加工条件を2倍の切り込み量0.04 mm, 2倍の砥石周速15.71 m/sに変更し、10パスの砥石表面温度を測定した。結果を図4に示す。

研削状態を判別するに当たり、表4に示した正常な加工状態が得られていた際の値としては、 $a_1=50, a_2=200, b_1=300, b_2=500, c_1=50, c_2=200, \alpha_1=40, \beta_1=110, d_1=200, \gamma_1=10$ を用いた。図4の温度データに対し、図3のアルゴリズムを適用すると、測定開始時の温度は約50~200°Cであり、正常な研削の可能性がある。最高温度の範囲は約350~550°Cであり、目つぶれ研削の可能性がある。最高温度からの温度下降勾配は-80であり、目つぶれ研削の可能性がある。測定終了時の温度は約50~300°Cであり、目つまり研削の可能性がある。以上のことを踏まえ、目つぶれか目つまりが発生している可能性があると考えられる。

ここで、加工前後の砥石表面写真を図5に示す。ただし、破線で囲った箇所が目つまり、実線で囲った箇所が目つぶれの領域を表す。確かに砥石表面には少量の目つぶれと目つまりが発生していることが確認できた。加工条件が変更されても評価指標とアルゴリズムが適用可能であることが示された。

6. 結 言

加工状態モニタリング砥石を用いて加工中の砥石表面温度の測定を行う手法を提案し、以下のことを明らかにした。

- 1) 目つぶれ、目つまり、目こぼれの各研削状態で砥石表面温度は特徴ある変化を示す。
- 2) 取得した温度データから、研削状態を判別する評価指標とアルゴリズムを提案した。
- 3) 提案した評価指標とアルゴリズムは、条件を変更しても研削状態を判別する適用性があることを確認した。

参考文献

- 1) 小尾誠, 辰巳洋二, 佐田登志夫, 研削加工における砥石目づまりのインプロセス測定, 精密機械39(465), (1973), 1062-1067
- 2) 坂本治久, 清水伸二, 研削進行に伴う砥石作業面状態変化の評価法: 作業面状態変化が複合して生じる場合の評価法, 精密工学会誌論文集71(1), (2005), 120-125
- 3) 山本亮介, 大西孝, 大橋一仁, 塚本真也, C25 超仕上における加工状態のインプロセスモニタリング, 生産加工・工作機械部門講演会2010(8), (2010), 193-194

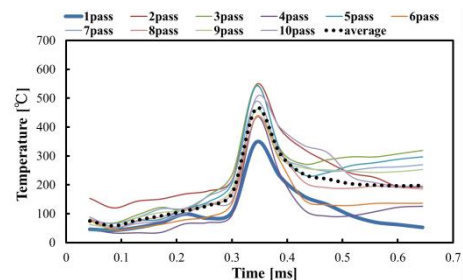


Fig.4 Surface temperature of grinding wheel

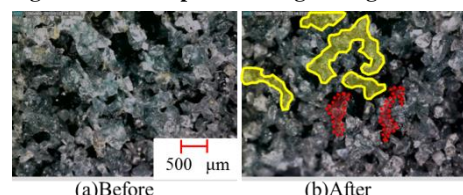


Fig.5 Photomicrograph of grinding wheel surface