

技術資料

Technical Data

サーマルクラックを抑制するハイブリッド冷却による 高能率フライス加工技術の開発

杉野 敦*, 八田武士*

Development of High Efficiency Milling Technology by Hybrid Cooling Method That Suppresses Thermal Cracking

Atsushi SUGINO and Takeshi HATTA

Synopsis

Super heat resistant alloys and austenitic stainless steel such as Alloy 718 and SUS304, used in gas turbines, nuclear systems etc. are known as difficult-to-machine materials because of low thermal conductivity. The purpose of this study is to develop a high efficiency milling technology using a hybrid cooling method and to verify the effect of hybrid cooling in the milling of SUS304.

The results are as follows:

1. In milling of SUS304, the hybrid cooling method is able to suppress thermal cracking roughly equal to the air cooling method.
2. The hybrid cooling method can decrease wear by between 29 and 42 % Maximum flank wear than dry method and air cooling method.
3. In intermittent turning of SUS304, the hybrid cooling method can decrease by 79 °C tool interface temperature amplitude than wet cooling method and can decrease by 13 °C chip-tool interface temperature than dry method.

1. 緒言

地球環境への負荷軽減の観点から、自動車・航空機産業界などで熱効率の向上が重要な課題となっている。熱効率の向上には、燃焼温度の高温化が有効であるため、高温下で優れた機械的特性と化学的特性を持つ材料の適用が今後益々進むと考えられる^{1), 2)}。

ガスタービンや原子力機器用部材などには超耐熱合金やオーステナイト系ステンレス鋼が用いられている^{3), 4)}。これらは高温下での強度と化学安定性が高い反面、切削加工においては熱伝導率の低さと相まって被削材と工具との接触面温度（以降、切削温度という）が上昇し易

いため、熱による工具摩耗の進行が早い。この工具摩耗を抑制するためには、接触面温度を上昇させない様に低速で加工しなければならない加工能率が非常に低くなるため、製造コスト増加の一因となっている。

切削加工では、一般的に油性・水溶性切削油、ミスト、エアなどの冷媒を工具刃先近傍に供給することで切削温度の上昇を抑制し、加工能率の向上を図る。旋削工具による連続加工では、超耐熱合金の加工能率向上に対する取り組みとして、工具刃先に水溶性切削油を超高压で供給する高压クーラントが報告されている^{5) ~ 7)}。一方で、回転工具による断続加工では、冷媒により空転時の工具刃先が急冷されると熱衝撃により工具刃先に

2016年6月9日 受付

* 大同特殊鋼株式会社技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

サーマルクラックが発生し、工具寿命を著しく低下させる⁸⁾。そのため、断続加工ではサーマルクラック抑制を目的として、工具刃先温度振幅が比較的緩やかなミストやエアなどを冷媒として用いるが、切削温度上昇の抑制効果が小さいため加工能率を大きく向上させることは難しい。

そこで、本報告ではオーステナイト系ステンレス鋼などの難削材の加工能率の向上を目的として、SUS304 の断続加工におけるサーマルクラックと工具摩耗の抑制を両立する新しい冷却手法を開発したので紹介する。

2. 冷却方法

2. 1 概念

Fig. 1 に開発した冷却手法（以降、ハイブリッド冷却という）の概念を示す。エア冷却と水溶性切削油冷却を組み合わせることで、工具刃先温度振幅と切削温度上昇の抑制の両立を図った。具体的には水溶性切削油を工具全体をに供給して冷却すると共に、熱衝撃の低減が必要な工具刃先に限定してエア供給して水溶性切削油を局部的に除去することで実現した。

2. 2 実験装置

Fig. 2 にハイブリッド冷却システムの模式図を示す。水溶性切削油をカッター部に向けて供給することで工具全体を冷却し、エアをスルースピンドル方式とすることで工具刃先に限定して供給できるシステムを構築した。

Table 1 に実験条件を示す。SUS304 の断続加工におけるハイブリッド冷却の加工能率向上効果を検証するため、直径 32 mm のスローアウェイ式フライスカッターによるフライス加工を行った。フライス工具にはステンレス鋼用超硬 PVD コーティング材種の高送りインサートを使用し、水溶性切削油には 10 倍希釈のエマルジョンを使用した。冷却手法は既存手法との比較のため Dry, Air, Hybrid, Wet とし、切削速度は一般的な加工条件の 90 m/min と、加工能率を高めた 110 m/min, 130 m/min で加工を行った。

工具摩耗はフライス加工で SUS304 を 80 cc 加工した後の工具逃げ面摩耗幅を実体顕微鏡で測定し、サーマルクラックは工具すくい面の亀裂有無を実体顕微鏡により観察し、5 刃あたりのサーマルクラック発生率で評価した。

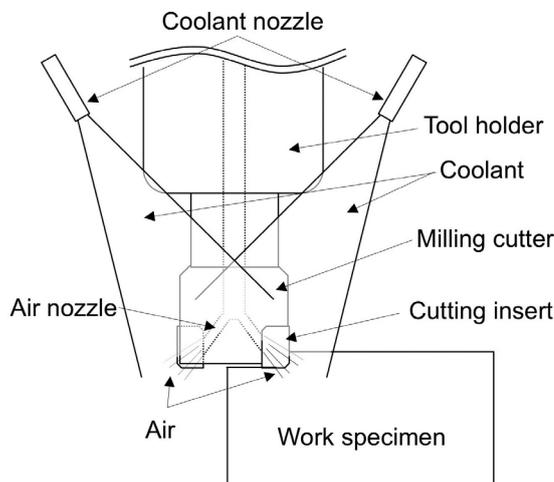


Fig. 2. Schematic view of the hybrid cooling system.

3. 実験方法

実験には DMG 森精機 (株) 製 5 軸加工機 DMU65FDmonoBLOCK を用いて固溶化熱処理を施した SUS304 をフライス加工した。

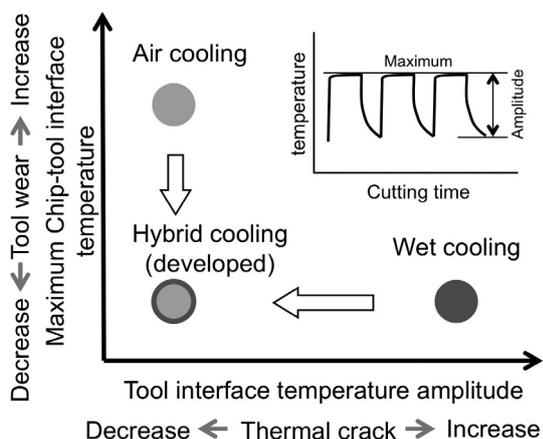


Fig. 1. Concept of the developed hybrid cooling.

Table 1. Experimental conditions in milling of SUS304.

Work specimen	
Materials	SUS304
Hardness	HB179
Milling cutter	
Diameter	φ 32 mm
Axial rake angle	3°
Radial rake angle	5°
Number of tooth	5
Indexable insert	
Carbide	M10
Coating	PVD
Process parameters	
Cutting speed	90, 110, 130 m/min
Feed rate	0.9 mm/tooth
Axial depth of cut	0.9 mm
Radial depth of cut	30 mm
Cooling	
Type of cooling	Dry, Air, Hybrid, Wet
Air pressure	0.5 MPa
Coolant pressure	0.1 MPa
Type of coolant	Emulsion

4. 結果および考察

4. 1 サーマルクラックに及ぼす冷却手法の影響

Fig. 3に SUS304 を冷却手法を変えてフライス加工した際の、冷却手法とサーマルクラック発生率の関係を示す。冷却手法 Dry, Air, Hybridではサーマルクラック発生率は0%となり、Wetでは切削速度 90 m/min で0%, 110 m/min で40%, 130 m/min で100%と切削速度の上昇とともに発生率が高くなった。このことから、SUS304の断続加工においてハイブリッド冷却がサーマルクラックの抑制に有効であり、その効果はAirと同等であると考えられる。

Fig. 4に SUS304 を切削速度 130 m/min でフライス加工した後の工具すくい面刃先写真を示す。冷却手法 Wetでは工具刃先先端にサーマルクラックと見られる亀裂が複数確認された。

4. 2 工具逃げ面摩耗中に及ぼす冷却手法の影響

Fig. 5に冷却手法を変えてフライス加工した際の、冷却手法と工具逃げ面摩耗幅の関係を示す。ハイブリッド冷却での工具摩耗幅は、一般的な切削速度 90 m/min および加工能率を高めた 110 m/min, 130 m/min でも冷却手法 Dry, Air より29%から42%小さく、Wet より27%から61%大きくなった。このことから、SUS304の断続加工において、ハイブリッド冷却がWetに次いで工具摩耗の抑制に有効であることが確認された。

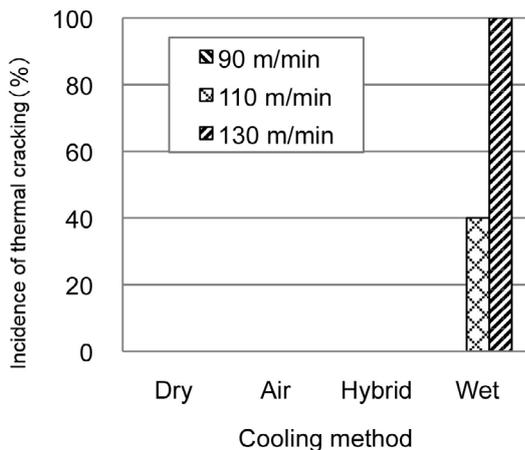


Fig. 3. Comparison of the incidence of thermal cracking in milling of SUS304 using different cooling methods.

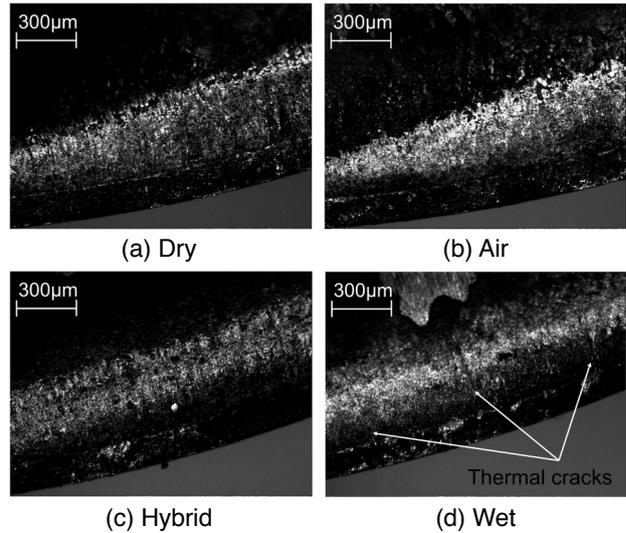


Fig. 4. Principal rake face of after machining SUS304 using different cooling methods ($V_c=130 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$).

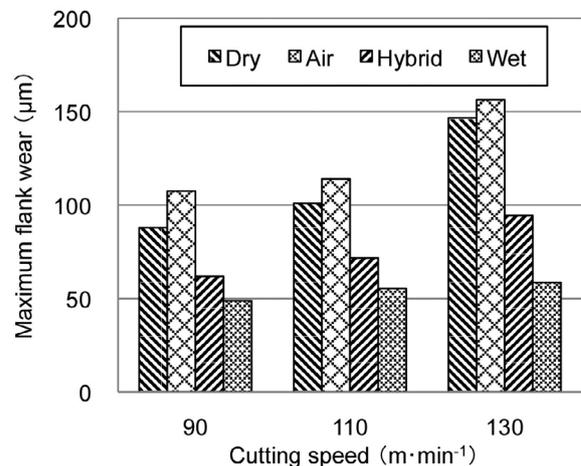


Fig. 5. Comparison of the maximum flank wear in milling of SUS304 using different cooling methods.

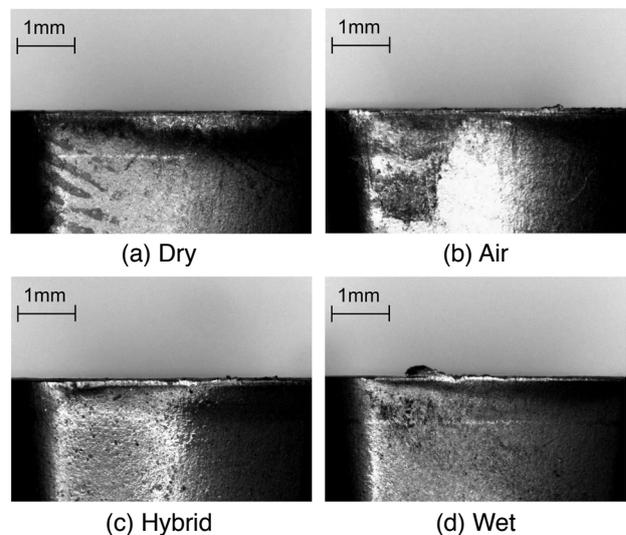


Fig. 6. Principal flank surface of insert after machining SUS304 using different cooling methods.

Fig. 6 に切削速度 130 m/min でフライス加工した後の工具逃げ面刃先写真を示す。冷却手法 Dry, Air では偏りのある逃げ面摩耗が進行したが、ハイブリッド冷却では Wet と同様に刃先全長に均一な逃げ面摩耗が進行した。

4. 3 考察

ハイブリッド冷却ではサーマルクラックが抑制され、工具逃げ面摩耗幅も Wet に次いで抑制されたことから、工具刃先温度振幅および切削温度の上昇が抑制されたと思われる。

そこで、ハイブリッド冷却による工具刃先温度振幅および最高切削温度の抑制効果を確認するため、被削材 - 工具熱電対法⁹⁾を用いてフライス加工を模擬した断続旋削時の切削温度の測定を行った。また、被削材 - 工具熱電対法では測定できない空転中の工具刃先温度については、実測した切削温度を用いた工具熱伝導シミュレーションにより求めた。

Table 2 に実験条件を示す。切削条件は切削速度 110 m/min のフライス加工実験の平均切屑厚さ 0.1 mm、平均切削速度 100 m/min および空転時間を再現できるように選定した。また、冷却手法はフライス加工実験と同じ Dry, Air, Hybrid, Wet とし工具刃先温度振幅および最高切削温度に及ぼす冷却手法の影響を調査した。

Table 2. Experimental conditions in intermittent turning of SUS304

Work specimen	
Materials	SUS304
Hardness	HB179
Cutting insert	
	TPGN
Tool geometry	
Orthogonal rake angle	5°
Cutting edge inclination	0°
Orthogonal clearance angle	6°
Entering angle	90°
Nose radius	0.4 mm
Process parameters	
Cutting speed	100 m/min
Feed rate	0.1 mm/rev
Depth of cut	2 mm
Cooling	
Type of cooling	Dry, Air, Hybrid, Wet
Air pressure	0.5 MPa
Coolant pressure	0.1 MPa
Type of coolant	Emulsion

*Based on JIS-B4120-1998

Fig. 7 に冷却手法と工具刃先温度振幅と最高切削温度の関係を示す。切削温度 930 °C から 960 °C の範囲では、ハイブリッド冷却を適用することで Wet に対し 79 °C の工具刃先温度振幅の抑制効果が得られ、Dry に対し 13 °C の最高切削温度の抑制効果が得られることがわかった。

Fig. 8 に冷却手法と工具逃げ面摩耗幅の関係を示す。ハイブリッド冷却での工具摩耗幅は、冷却手法 Dry より 22 %、Air より 40 % 小さく、Wet より 22 % 大きくなったことから、フライス加工と同様にハイブリッド冷却が Wet に次いで工具摩耗の抑制に有効であった。また、工具摩耗の傾向が Fig. 5 のフライス加工と良く一致していることから、フライス加工においても工具刃先温度振幅および最高切削温度の抑制効果によってサーマルクラックと工具摩耗が抑制されたと考えられる。

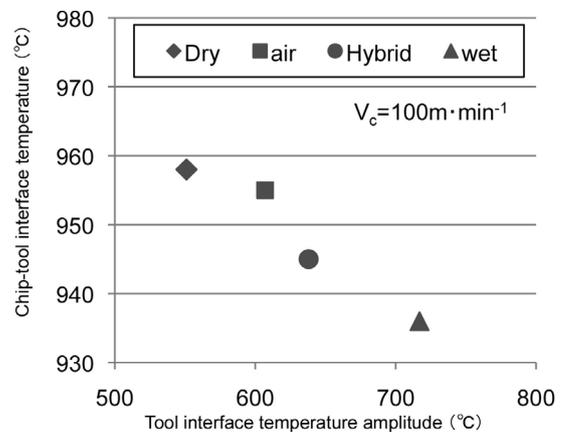


Fig. 7. Comparison of the tool interface temperature in intermittent turning of SUS304 using different cooling methods.

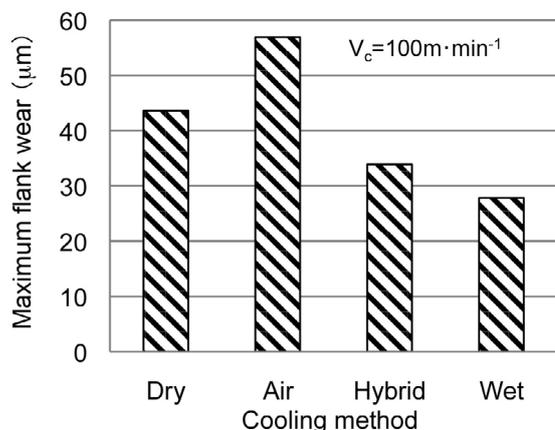


Fig. 8. Comparison of the maximum flank wear in intermittent turning of SUS304 using different cooling methods.

5. 結 言

オーステナイト系ステンレス鋼の加工能率の向上を目的として、SUS304の断続加工におけるハイブリッド冷却のサーマルクラック抑制と工具摩耗抑制の効果を検証するフライス実験を行い以下の成果を得た。

- 1) 切削速度 90 m/minから 130 m/minの範囲のフライス加工において、ハイブリッド冷却を適用することで冷却手法 Airと同等なサーマルクラック抑制効果が得られた。
- 2) フライス加工にハイブリッド冷却を適用することで、切削速度 90 m/minから 130 m/minの範囲において工具逃げ面摩耗を冷却手法 Dry, Airより 29 %から 42 %抑制できた。
- 3) フライス加工を模擬した断続旋削加工および工具熱伝導シミュレーションにおいて工具刃先温度を求めた結果、ハイブリッド冷却を適用することで Wetに対し 79 °Cの工具刃先温度振幅の抑制効果が得られ、Dryに対し 13 °Cの最高切削温度の抑制効果が得られた。

(文 献)

- 1) 木村宰, 加治木紳哉: 電力中央研究所報告, Y07009 (2008), 2.
- 2) 三浦信祐: 電気製鋼, 83(2012), 1, 35.
- 3) R. Couturier, C. Escaravage: High temperature alloys for the HTGR Gas Turbine, 1.
- 4) 中田耕太郎, 高橋雅士, 萩原剛: 東芝レビュー, 65 (2010), 12, 62.
- 5) 猪谷彦太郎, 黒田基文, 江川康夫, 竹内政人, 板倉勝利: 三菱重工業技報, 35(1998), 2, 148.
- 6) E. O. Ezugwu: ABCM., 116(2004), 1, 1.
- 7) 杉野敦, 八田武士: 電気製鋼, 82(2011), 2, 165.
- 8) 山口顕司: 脆性工具の耐熱衝撃性向上に関する研究, 鳥取大学, (2002), 49.
- 9) 中山一雄: 切削加工論, コロナ社, (1993), 64.



杉野 敦



八田 武士