論 説

UDC 669. 15-194:539. 215. 9:621. 9. 011

合金鋼粉末の被削性について

草 加 勝 司*, 久 田 建 男*, 中 村 貞 行*

On the Machinability of Some Alloyed Powder

Katsushi Kusaka, Tatsuo Hisada and Sadayuki Nakamura

Synopsis

An investigation was made of the influence of pressing and sintering conditions, and S addition up to 0.4% on the machinability of SUS304L and other sintered alloy steels manufactured by the water atomization.

The results were as follows:

(1) The sintered density gave remarkable influence on cutting resistance. The resistance got smaller first, and then larger with increasing density having the minimum value around 7g/cm^3 of density.

(2) The surface roughness of SUS304L sintered steel was improved with smaller feed rate and higher cutting speed in turning.

(3) The cutting resistance of SUS304L and 316L sintered steels got smaller with increasing S-content in powders. As the result of it, the tool life was remarkably improved for SUS304L sintered steel bearing 0.2% S.

1. 諸 言

粉末冶金は粉末を原料としてプレス焼結工程のみで最終形状に近い焼結部品を得るもので、できる限り切削加工をはぶくことを目的に、形状設計^{1), 2)}や部品の組合せなどに多くの努力がはらわれてきた。しかし、近年複雑な形状の焼結部品が作られるようになり、焼結後切削加工を組合わせることにより、製造上の特長を出そうとする試みも多くなってきた。

一方焼結材の被削性に関する研究例^{3)~7)}は少なく、粉末冶金的な立場から焼結材の切削機構について検討したものはない。そこで筆者らは SUS

304L 焼結材のドリル切削実験を行い、被削性と焼結密度の関係、S 添加効果などについて報告した⁸⁾。これらの結果をもとに本実験では各種ステンレス鋼焼結体についてドリル切削や旋削試験を行い、その被削性に及ぼす焼結条件や焼結雰囲気、S 添加の影響などについて検討したので報告する。

2. 試料および試験方法

水噴霧⁹⁾により Table 1 に示す粉末を約 30kg づつ11種類製造し、-100メッシュに分級後試験に供した。この際、C, Si, Mn は粉末冶金用の粉末に適した範囲¹⁰⁾に調整した。切削試験片の製造は粉末に潤滑剤としてステアリン酸亜鉛を1%混合し、 $\phi 33 \times 35$ の寸法に成形後 1200°C で 1hr 真空中 ($< 10^{-3}$ Torr) で焼結した。焼結密度が 7.2g/

昭和55年9月10日 受付

*大同特殊鋼㈱研究開発本部中央研究所

Table 1. Characteristics of tested stainless steel powders.

No.	Chemical composition (wt%)								Particle size distribution (%)						Apparent density (g/cm ³)	Note
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	+100	100/150	150/200	200/250	250/350	-350		
1	.018	.90	.21	.014	.012	10.49	18.78	—	0	9.7	23.6	12.7	21.7	32.3	2.55	SUS304L
2	.022	.84	.19	.016	.014	13.04	17.05	2.52	0	6.5	19.0	9.5	19.8	45.2	2.58	SUS316L
3	.018	.90	.10	.017	.010	.06	12.43	—	0	9.8	22.5	13.6	19.5	34.6	2.68	SUS410L
4	.024	.91	.10	.018	.012	.10	16.20	—	0.2	11.2	20.0	10.2	18.7	39.7	2.66	SUS430L
5	.009	.76	.03	.005	.005	46.60	.08	—	0	9.8	29.5	13.5	22.2	25.0	2.78	45Ni-Fe
6	.027	.86	.25	.016	.151	10.56	18.95	—	0.5	14.7	22.7	11.5	18.1	32.5	2.77	S-bearing 304L-type
7	.029	.79	.22	.015	.158	10.57	19.11	—	0.2	8.7	15.8	9.8	18.2	47.3	2.90	
8	.016	.85	.09	.014	.218	10.54	18.83	—	0	5.0	11.2	6.7	17.2	59.9	2.75	
9	.018	.89	.07	.016	.396	10.56	18.85	—	0.1	5.1	10.0	6.1	16.7	62.0	3.12	S-bearing 316L-type
10	.027	.89	.06	.015	.204	12.93	17.17	2.14	0	4.8	16.5	14.3	23.6	40.8	2.68	S-bearing 410L-type
11	.023	.75	.06	.008	.213	.09	12.14	—	0.1	3.0	19.0	11.5	21.2	45.2	2.63	

Table 2. Cutting conditions of drilling and turning for measurement of cutting force and tool life.

	Drilling		Turning
	Cutting force	Tool life	Cutting force
Tool	SKH9. $\phi 10$ point angle 118°	SKH9. $\phi 5$ point angle 118°	P20 (0,6,6,6,8,0,0)
Feed rate (mm/rev)	0.10	0.07	0.20
Depth of hole (mm)	13	15	2.0
Depth of cut (mm)			
Max. cutting speed (m/min)	10	7~30	100
Cutting speed (m/min)			

cm³以上の試験片は、焼結後コイニングあるいは焼結鍛造により作ったもので、1200°Cで1hr再焼結して加工歪の影響を除いて使用した。また①粉末粒度の影響を調べるために粉末を100/200, 200/350および-350メッシュに分級し、②焼結温度の影響をみるために1100~1300°Cで真空焼結を行い、更に窒素の影響をみるために焼結後、850°Cで30min N₂ガス中で加熱するなどして試験片を作製した。

それら焼結材について Table 2 の条件でドリル切削試験を行い、切削抵抗及び工具寿命を求めた。一部については旋削試験も行った。試験はいずれ

も乾式で行い、工具寿命はドリルが切削不能になるまでの穴の深さの総計で評価した。これら切削試験中に発生した切りくずについて色および形状を観察した。焼結体の切削仕上げ面については表面肌の観察と表面あらさの測定を行い、更にミクロ組織の観察や表層の硬さ分布も測定した。このうちS添加材やN含有材については定電位電解法¹¹⁾で硫化物あるいは窒化物を抽出し、その形態をX線回折で固定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 SUS304L 焼結材の切削試験結果

3.1.1 ドリル切削試験結果

焼結材の諸特性には粉末性状¹²⁾やプレス焼結条件が影響することが知られている。これらの粉末特性は被削性にも影響する可能性がある。

Fig. 1 に1200°Cで焼結した材料の成形圧力による焼結密度およびドリル切削抵抗の変化を示す。成形圧力の増すほど焼結密度は向上している。しかし切削抵抗は成形圧力が6t/cm²までは減少して、ほぼそこで最低値を示し、6t/cm²をこえると再び上昇に移っている。

Fig. 2 には成形圧力を調整して焼結密度をほぼ一定とした場合の焼結温度や粉末粒径とドリル切削抵抗の関係を示す。焼結温度が1100~1300°Cに上昇しても切削抵抗にほとんど変化がないが、粉末粒径は粗くなると切削抵抗の上昇する傾向が認められる。

Fig. 3 はさらに焼結密度を広範囲にとり、密度と切削抵抗の関係を調べたものである。焼結材の機械的性質は密度があがるにつれ増加するが、切削抵抗は密度約7g/cm³付近で最小となり、この曲線を高密度側に延長した結果は溶製材と等しく

Fig. 1. Influence of compacting pressure on sintered density and cutting force during drilling in SUS304L compacts sintered at 1200°C for 1 hr in vac.

なっている。ここで Fig. 2 に示した粉末粒径および焼結温度を変えた場合の切削抵抗も同じ曲線上にのり、焼結密度で整理できることがわかる。

Photo. 1 はこれら切削抵抗を測定後、切りくずの形状、ドリル穴の切削面およびマイクロ組織を調査した結果である。この中、切削抵抗が比較的高い5.55g/cm³(密度比70%)の試片ではドリル穴先

Fig. 2. Influence of sintering temperature and particle size on sintered density and cutting force during drilling in SUS304L compacts sintered at 1100~1300°C for 1 hr in vac.

Fig. 3. Influence of sintered density, sintering temperature and particle size on cutting force during drilling in SUS304L sintered compacts.

Photo. 1. Cutting chips, surface of drilled holes and microstructures in SUS304L compacts with various density.

端部に大きな亀裂があり、穴側面は凸凹が著しく、その塑性流動層にも亀裂が発生している。この状態での切りくず形状は厚くてむしれ型であり、酸化色からも切削温度の高かったことが推定できる。

一方、切削抵抗がほぼ最低となる密度 $6.90\text{g}/\text{cm}^3$ の試験片では、ドリル穴先端部の亀裂および穴側面の凸凹とも著しく小さく、また塑性流動層も薄くなっている。ちなみに切削表面からの硬化層の厚さは密度 $5.55\text{g}/\text{cm}^3$ の試片では約 0.5mm であるのに対し、 $6.90\text{g}/\text{cm}^3$ の試片では約 0.2mm となっており、焼結体の受けた切削加工の影響が小さいことを示している。また切りくず厚さは著しく薄く、酸化色も見られない。

このような各種現象面からも本切削条件では密度 $6.90\text{g}/\text{cm}^3$ の試片の方が被削性がよく、Fig. 3 の切削抵抗の測定結果を裏づけている。

3.1.2 旋削試験結果

焼結材の後加工にはドリル切削と並び旋削加工も行われる場合が多い。

Fig. 4 に焼結体の旋削抵抗に及ぼす成形圧力の影響を示す。送りが $0.2\text{mm}/\text{rev}$ の場合、主分力、送り分力ともに成形圧力の小さい焼結体の場合に大きく、先きのドリル切削試験の結果とはほぼ同じ傾向を示している。送りを $0.05\text{mm}/\text{rev}$ と小さくすると切削抵抗も全体に低くなり、同時に成形圧

Fig. 4. Influence of compacting pressure on cutting force in turning for SUS304L compacts sintered at 1200°C for 1hr in vac.

力の影響力も小さくなる。この場合、成形圧力が低くても抵抗は小さくならず、成形圧力の低い側の抵抗が相対的に大きいと言える。以上より、送りの大小にかかわらず旋削抵抗はドリル切削抵抗と同様に、成形圧力の低い場合に大きくなると言える。

Photo. 2 に旋削抵抗測定後の試験片の仕上げ面および切りくずの形状を示す。抵抗の高い密度 $5.55\text{g}/\text{cm}^3$ の試片は仕上げ面が悪く、特に送りが $0.2\text{mm}/\text{rev}$ と大きい場合には凸凹が著しく、むし

Photo. 2. Cutting chips and turning surface in SUS304L compacts to various density.

Photo. 3. Comparison between cutting surface of SUS304L compacts to 6.90g/cm³ of sintered density and that of SUS304 bulk in turning at various cutting speed.

れが発生している。また切りくずは厚く形状がまちまちで酸化色がついており、切削温度の高かったことを示している。

一方、抵抗の小さい密度 6.90g/cm³ の試片では、0.2mm/rev の送りでもむしれの発生はなく、仕上げ面も著しく改善されている。

次に焼結体の仕上げ面に及ぼす切削条件の影響を調べるため、密度 6.90g/cm³ の試片について、切削速度 10～100m/min の範囲で旋削試験を行い、仕上げ面の観察とあらさ測定を行った。それらの結果を **Photo. 3** および **Fig. 5** に示す。

切削速度が低いと焼結体の仕上げ面は劣り、ま

Fig. 5. Comparison between max. surface roughness of SUS304L compacts sintered at 1200°C for 1hr in vac. and SUS304 bulk after turning in 0.2mm/rev of feed rate.

た 20m/min では構成歯先の脱落片の付着が認められるが、切削速度の上昇に伴い仕上げ面は改善される。対比した SUS304 溶製材と比べると、同一切削条件では仕上げ程度もほぼ同等の傾向を示している。これらの現象は送りの小さい場合にも観察されている。

Fig. 5 の焼結体の仕上げ面あらさも Photo. 3 での観察結果と一致する。

3.2 その他の焼結材の切削試験結果

Fig. 6 に粉末冶金で一般に使用される各種粉末の焼結体のドリル切削抵抗を比較して示す。試験片はいずれも成形後、1200°C で 1hr 真空焼結したものをを用い、SUS304L 焼結体の場合と同条件で切削試験を実施した。

Ni 含有量の多い 45Ni-Fe 焼結体は抵抗が比較的小さいが、他のステンレス鋼焼結体の切削抵抗は 304L 焼結体に対し ±10% 以内であり、鋼種による抵抗の差は焼結密度の影響よりも小さくなって

Fig. 6. Cutting force during drilling in various sintered compacts sintered at 1200°C for 1hr in vac.

Fig. 7. Influence of amount of S-addition on cutting force during drilling in SUS 304L-type, SUS316L-type and SUS410L-type compacts vacuum-sintered to 6.5g/cm³ of sintered density.

いる。

3.3 被削性に及ぼす S 添加の影響

一般の溶製材では快削元素として添加された S は、MnS の形で鋼中に固定される。一方、粉末冶金用のステンレス鋼粉末中の Mn は粉末特性上低レベルにおさえられ¹⁰⁾のため、S 添加の効果も溶製材と異なることが予想される。そこで SUS 304L, SUS316L および SUS410L 粉末中の S 量を変化させ、その被削性に及ぼす影響について検討することとした。

Fig. 7 に焼結体のドリル切削抵抗と S 量の関係を示す。本実験では S 添加の場合に最も切削抵抗の小さくなる密度近傍 (6.5g/cm³) での比較を行った。どの密度域でも S 添加により切削抵抗は低下し、特に低密度域における被削性の改善効果が著しい。この場合切削抵抗は S 含有率の高いほど小さくなる傾向が見られる。S 添加した場合にも SUS304L に比べ 316L 焼結体の方が被削性がすぐれている¹⁵⁾。これらの S 添加材では、Photo. 1 に示した SUS304L 焼結体の場合と比べ切りくずは薄く剪断され、切削仕上げ面の凸凹も小さくなっている。

S 添加材のマイクロ組織を Photo. 4 に例示する。数 μ の大きさの硫化物が粒内に分散し、粉粒界にも連鎖状に認められる。この硫化物を電解抽出して X 線回折で調べた結果、CrS であることが確認された。一般の溶製材での被削性向上には S 量に見合った Mn を添加し、MnS の形で分散し

た方がよい¹⁶⁾とされている。しかし、粉末では Mn 添加に限度があるため S は CrS の形で存在することになるが、同様に S の被削性改善が発揮されていると言える。

Fig. 8 は SUS304L 焼結体についてドリル工具寿命に及ぼす S 添加の影響を示す。SUS304L 焼結体の工具寿命は、相当する溶製材に比べ劣っているが、S を添加した焼結体の工具寿命は著しく延長される。例えば切削速度が 15m/min 前後での工具寿命は 0.15% の S を添加することにより、12cm から約 5 m にも延長され、寿命値は約 40 倍と

Photo. 4. Microstructure of S-bearing SUS304L-type sintered stainless steel (S: 0.396).

Fig. 8. Relationship between cutting speed and drill life for SUS304L and S-bearing 304L-type compacts sintered at 1200°C for 1hr in vac.

なる。

3.4 被削性に及ぼす焼結雰囲気の影響

以上のように真空焼結により作製した焼結ステンレス鋼では S 添加が被削性改善に極めて有効であることがわかった。しかし焼結ステンレス鋼の量産工程では焼結雰囲気としてアンモニア分解ガスが使用されることが多いが、この場合焼結材は硬くなりやすく、後加工には不向きである¹⁷⁾とも言われている。

通常、アンモニア分解ガス中で焼結した焼結体中には最大 4 000ppm 程度の窒素が認められる。そこで S を 0.204% 含んだ 316L 粉末成形体を真空焼結後、850°C で 30min N₂ ガス中で加熱窒化した試片を製造し、引張り試験およびドリル切削試験を試みた。Table 3 にその結果をまとめて示す。No.1 の試料に比べ加熱窒化した No.2 の試片の N 量は 0.30% に増加している。同試料について電解抽出して残渣を X 線回折で調べた結果、(Cr, Fe)₂N であることが判明した。No.2 の試料は硬さ、強度ともに No.1 の場合より増加し、含有窒素の機械的性質に及ぼす影響の大きい¹⁸⁾ことを示している。この両者の切削抵抗を比較すると、N 含有量の多い No.2 の試料の方が約 10% 切削抵抗が大きく、上記機械的性質の影響を受けていることがわかる。同傾向は S 無添加の SUS316L 焼結体でも確認されている。

一般に粉末圧粉体は多孔質であり、焼結時に雰囲気中の N を吸収しやすい状態にある。従って切削加工を施したり機械的性質を重視するような場合には、真空中あるいは H₂ ガス中などで焼結することが好ましいと考えられる。

4. 結 言

水噴霧による SUS304L 粉末を主な対象として焼結体のドリル切削および旋削試験を行い、焼結

Table 3. Effect of N-content on mechanical properties and cutting force in drilling for S-bearing SUS316L-type compacts sintered at 1200°C for 1hr in vac.

No.	N (%)	Sintered density (g/cm ³)	Mechanical properties		Cutting force		Heat treatment after sintering
			Hardness (H _B F)	*Strength (kg/mm ²)	Torque (kg·m)	Thrust (kg)	
1	0.02	6.70	70.3	36	0.38	97	—
2	0.30	6.67	90.2	53	0.42	110	850°C × 30min in N ₂ gas

* Compressive strength when ln ε is 0.1

材の被削性と粉末特性、プレス焼結条件との関係調べ、S添加の影響についても検討した。得られた結果を要約して以下に示す。

- (1) SUS304L 焼結体の切削抵抗は密度の影響を大きく受け、 7g/cm^3 までは密度増加につれて減少し、さらに高密度になると逆に増加する。これに比べ、粉末粒度や焼結温度の影響は比較的小さい。
- (2) SUS316L, 410L および 430L 焼結体の切削抵抗も同密度で比較すると上記 304L 焼結体についての試験結果とほぼ一致する。これらステンレス鋼焼結体に比べ、45Ni-Fe 焼結体の切削抵抗は若干小さい。
- (3) SUS304L 焼結体の旋削仕上げ面あらさは、送りが小さく切削速度の高いほど優れ、溶製材の SUS304 とほぼ同じ傾向を示す。
- (4) SUS304L 粉末中に S 添加すると、焼結材の切削抵抗が減じ、切りくず形状や仕上げ面あらさも改善できる。また工具寿命ももとの 304L 焼結体に比べ、数10倍延長される。
- (5) 焼結ステンレス鋼は多孔質のためN含有雰囲気中で加熱すると容易にNを吸収して窒化し、 $(\text{Cr}, \text{Fe})_2\text{N}$ を生成する。この窒化物は焼結材本来の被削性を低下させる。

終りに本研究にあたり、種々のご指導を賜った大同特殊鋼株式会社中央研究所副所長 加藤哲男博士、研究第1部次長 阿部山尚三氏ならびに粉末製造を担当された能藤彰氏に感謝の意を表する。

(文 献)

- 1) American Machinist, May29 (1972), 65
- 2) 小宮山：材料加工, 4 (1973), 30
- 3) 田中, 津和, 大森：精密機械, 31 (1964), 100
- 4) 田中, 三橋：精密機械, 41 (1975), 808
- 5) American Machinist, March (1977), 72
- 6) O. W. Reen: Int. Powder Met. Conf. (USA), 5 (1977), 431
- 7) D. J. Andersen, J. S. Hirschhorn: Int. Symp. of Influence of Met. on Machinability of Steel, Tokyo, (1977), 333
- 8) 加藤, 草加, 久田：鉄と鋼, 66 (1980), 1142
- 9) 加藤, 手塚, 草加, 鈴木：電気製鋼, 46 (1975), 4
- 10) 加藤, 草加：粉体および粉末冶金, 22 (1975), 1
- 11) 小野, 河野：鉄と鋼, 64 (1978), 1389
- 12) 加藤, 草加：粉体および粉末冶金, 23 (1976), 11
- 13) 例えば, R. L. Sands, J. F. Watkinson: Powder Met., 5 (1960), 85
- 14) 例えば, H. I. Sanderow: Int. Powder Met. Conf. (USA), 5 (1977), 11, 229
- 15) 中谷, 浅井：機械技術, 26 (1978) 4, 33
- 16) C. W. Kovach, A. Moskowitz: Metal Progress, 98 (1970) 1, 105
- 17) 武谷, 早坂：電気製鋼, 48 (1977) 2, 119
- 18) 増本, 今井：日本金属学会誌, 33 (1969), 1364