論 説

UDC 621.91.011:621.73.016.3.011

被削性に及ぼす冷間加工の影響*

阿部山 尚三**, 木村 篤良**, 中村 貞行**

Influence of Cold Working on Machinability

Shozo Abeyama, Atsuyoshi Kimura and Sadayuki Nakamura

Synopsis

Experiments on the effects of cold working (backward extrusion and cold drawing) upon cutting force, finished surface texture and tool wear were carried out. The results show that the cutting force of cold worked steel decreases with increasing the degree of cold working except for the thrust force in drilling which is related to the hardness of work material, and that the decrease in chip thickness with cold working has relation to the variation in work hardening exponent. It is also suggested that the sum of plastic energy for cold working and cutting energy is constant irrespective of degree of cold working. Tool wear rate is reduced by cold working and it is related to the variation in cutting energy. However, in the case of automatic screw machining, there is an optimum cold working reduction to minimize the tool wear.

1. 緒 言

近年、冷間鍛造技術の発展に伴い、冷間加工材を切削加工する工程が増加している。また、自動盤で加工される材料の大部分は引抜き加工により製造されている。これらの冷間加工は材料の被削性にさまざまな影響を及ぼすことが考えられる。

一般に、低炭素鋼のような著しく延性のある材料には、冷間加工が被削性改善に有効であるといわれているが、被削性に及ぼす冷間加工の影響に

関する研究は少なく、わずかに工具寿命^{1)~4)}(含工具摩耗)、切削抵抗⁵⁾、切くず破砕性⁶⁾および仕上面あらさ⁷⁾など個々の被削性評価項目に及ぼす冷間加工の影響についての報告が見られる程度で、これらの報告に見るかぎり、必ずしも系統的な把握はされていない。著者らは冷間加工材の切削加工は、今後ますます増加すると考え、冷間加工材の被削性に関するいくつかの実験を行い、考察を加えた。

冷間加工には前方押出し、後方押出し、引抜き、アブセット等多くの方法があるが、本実験では後方押出しおよび引抜き加工を対象とした。試験材には後方押出しした S15C, S45C, SCM420, SUJ 2 および引抜きした SCM420 を用いた。

2. 実 験 方 法

2.1 供 試 材

後方押出し材 S15C, S45C, SCM420, SUJ 2 お

*1977年 Int. Symp. on Influence of Metallurgy on Machinability of Steel, ASM/ISI, Tokyo, Japan および1978年 Int. Conf. on Machinability Testing and Utilization of Machining Data, ASM/SME, Oak Brook, USA にて一部発表。

**大同特殊鋼(株)研究開発本部中央研究所

および引抜き材 SCM420 の化学成分、熱処理および硬さを **Table 1** に示す。後方押し出し材は機械加工により直径 25mm、長さ 25mm および直径 18mm、長さ 18mm に調整した後、それぞれ押し出し比 1.33、2.0 および 3.0 (減面率 25、50、67%) で押し出し成形した。押し出し材の両端部は変形が不均一なため硬さの均一な中央部のみを切削試験に用いた。引抜き材は各種直径の熱間圧延材を焼なましした後、直径 22.5mm の丸棒(減面率 7.5~25%)

に引抜き供試材とした。

2.2 切削試験方法

後方押し出し材については①切削抵抗(超硬旋削、ハイスドリル)および②仕上面あらさ(旋削)を測定し、引抜き材については①、②に加え③工具摩耗試験を行った。**Table 2、3** および **Table 4** にこれらの試験の切削条件を示す。切削抵抗は工具動力計により測定し、繰返し 3 回の平均値を代表値とした。仕上面あらさ試験用の工具については、

Table 1. Chemical composition (%), heat treatment and hardness (Hv) of test materials.

Type of cold working	Steel grade	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	H.T.	Hv
Backward extrusion	S15C	0.16	0.28	0.43	0.017	0.008	0.01	—	0.02	—	N	116
	S45C	0.45	0.22	0.75	0.023	0.016	0.01	0.01	0.01	—	SA	140
	SCM420	0.21	0.27	0.72	0.009	0.009	0.19	0.04	1.09	0.20	SA	152
	SUJ2	1.02	0.28	0.40	0.011	0.011	0.08	0.08	1.41	0.03	SA	175
Cold drawing	SCM420	0.21	0.23	0.78	0.023	0.022	0.11	0.06	1.13	0.19	N	195

N : Normalizing. SA : Spheroidizing annealing

Table 2. Cutting conditions for backward extruded materials.

	Cutting force test, Turning	Cutting force test, Drilling	Finished surface texture test
Tool	Carbide, P20 0,6,6,6,8,0,0	HSS, SKH9 5 mm dia. 118° point angle	Carbide, P20 0,6,6,6,8,0,0.5R
Feed, mm/rev	0.05, 0.1	0.065	0.05
Cutting speed, m/min	100	23.6	100
Depth of cut, mm	1.0, 2.0	—	1.0
Cutting fluid	Dry	Dry	Dry

Table 3. Cutting conditions for cold drawn materials.

	Cutting force test, Turning	Finished surface texture test	Cutting force test, Drilling	Tool wear test, Turning
Tool	Same as in Table 2		HSS, SKH9 10mm dia. 118° point angle	Carbide, H10 0,6,6,6,8,0,0.2R
Feed, mm/rev			0.15, 0.31	0.05
Cutting speed, m/min			20.6	100
Depth of cut, mm			—	1.0
Cutting fluid			Dry	Dry
Cutting period, min			—	50

Table 4. Cutting conditions for automatic screw machining.

	Turning	Drilling	Cut-off
Tool	Carbide, K10 0,6,6,6,8,0,0,2	HSS, SKH9 7 mm dia. 118° point angle	Carbide, K10 2 mm width 30° rake angle
Feed, mm/rev	0.117	0.080	0.035
Surface speed, m/min	63		
Depth of cut, mm	1.0	10	6.75
Cutting fluid	Insoluble oil, JIS No. 2—3		
Cutting period	300 cycles		

あらかじめ標準材 (12L14Te) を、送り 0.05mm/rev, 切削速度 200m/min で切削し、最大あらさ (R_{max}) が 4μ 以下のものを選択して用いた。

3. 実験結果

Fig. 1. Effect of cold backward extrusion on cutting force in turning.

Fig. 2. Effect of cold backward extrusion on cutting force in drilling.

Fig. 1 は後方押し材の減面率と旋削における切削抵抗の関係を示したものである。主分力および送り分力とも減面率の増加に伴い、減少することがわかる。Fig. 2 は減面率とドリルの切削抵抗の関係を示したもので、減面率の増加により、トルクは低下するがスラストは増大する。Fig. 3 は供試材の硬さとスラストの関係を示す。図からスラストは硬さの増加に伴って上昇する。Fig. 4 および Fig. 5 はそれぞれ旋削およびドリル加工について、減面率と冷間加工による切削抵抗の増加率(冷間加工材の切削抵抗と素材の切削抵抗の比)を示す。これらの図から切削抵抗は、鋼種および冷間加工法に関係なく、冷間加工率のみに依存するといえる。Fig. 6 は減面率と切くず厚さの関係をプロットしたもので、切くず厚さは減面率の増加に伴い、著しく薄くなる。Fig. 7 は減面率と仕上面あらさの関係を示したもので、仕上面あらさは冷間加工によって改善される。しかし、改善効果は加工率が高くなるとほとんど飽和する傾向にある。なお、引抜き材についても同様な傾向が認め

Fig. 3. Relationship between thrust force in drilling and hardness of work material.

られた。**Fig. 8**は冷間引抜きしたSCM420を50 min間切削した後の減面率と工具摩耗の関係を示したものである。冷間加工率の増加に伴い、工具摩耗はかなり減少する。一方、同一材料を自動盤で切削加工した後の工具摩耗は**Fig. 9**に示すよ

Fig. 4. Relationship between cutting force ratio in turning and cold working ratio.

Fig. 5. Relationship between cutting force ratio in drilling and cold working ratio.

Fig. 6. Effect of cold working on chip thickness.

うに、減面率約20%のとき最も小さいという傾向が認められる。

Fig. 7. Effect of cold backward extrusion on surface roughness in turning.

Fig. 8 Effect of cold drawing on tool wears in turning. (SCM420)

Fig. 9. Effect of cold drawing on tool wears in machining SCM420 with an automatic screw-machine.

Table 5. Influence of cold working on cutting force.

4. 考 察

被削性に及ぼす冷間加工の影響は、基本的には被削材の機械的特性に起因すると考えられる。すなわち、冷間加工により著しく変化する機械的性質として、①変形抵抗の増加、②延性の低下、③加工硬化指数の減少等がある。切削機構に及ぼすこれらの影響は実験結果およびその解析結果から Table 5 のように整理できる。

前出の Fig. 4 および Fig. 5 に示すように、ドリル穴あけ時のスラストを除けば切削抵抗は冷間加工により減少する。これはせん断応力 τ_s の増加による効果が、せん断角 ϕ の減少による効果より小さいためと考えられる。

Fig. 10 は切刃丸味の影響を無視し、準二次元切削と仮定して、単一せん断面理論を用い、切削抵抗および切くず厚さの測定値から計算で求めたせん断面におけるせん断応力と冷間加工した材料の硬さとの関係を示したものである。図から、硬さの増加により、さきにのべたようにせん断面にお

Fig. 10. Relationship between shear stress at primary shear plane and hardness of work material.

けるせん断応力が増加している。しかし、冷間加工によるせん断応力の増加は炭素鋼の炭素含有率の変化に伴う、せん断応力の増加に比べて非常に小さい。これは冷間加工時の塑性変形が切削加工における塑性変形に影響しているためであろうと考えられる。

いっぽう、冷間加工による延性の低下は、せん断面周辺のボイドおよびマイクロクラックの発生をうながし、その結果、2次せん断ひずみが減少する。このことがせん断面でのせん断ひずみ γ_s の減少に関与しているものと考えられる。

つぎに、前出の Fig. 6 から、冷間加工により、切くず厚さが薄くなることが明らかになったが、このことを加工硬化指数 (n 値) との関連でとらえてみる。

Fig. 11 は圧縮試験から求めた同一材料の加工硬化指数 n ($\sigma = \sigma_0 \epsilon^n$, ここで σ : 応力, ϵ : 塑性ひ

Fig. 11. Relationship between chip thickness in turning and work hardening exponent of the work material.

ずみ, σ_0 , n : 定数) とその切くず厚さとの関係をプロットしたものである。図から, 加工硬化指数が減少すると切くず厚さは薄くなる。すなわち, せん断角は増大する。加工硬化指数の異なる広汎な材料においても, 切くず厚さは加工硬化指数の減少により, 薄くなり, せん断角が増大することが明らかにされており⁹⁾, 被削材料の加工硬化指数が切削機構に対する役割については今後の検討課題と考えられる。

Fig. 12 は単位体積あたりの切削エネルギー U_c ($F/(f \times d)$, F : 主分力, f : 送り, d : 切込み) と減面率の関係をプロットしたもので, 切削エネルギーは冷間加工によって減少することがわかる。冷間加工での塑性変形エネルギー U_p は冷間加工した材料の降伏応力を連続して描いた応力-ひずみ曲線から計算によって求めた。 U_p と U_c の総和を求め, 冷間加工率で整理すると Fig. 13 に示すように冷間加工率にかかわりなくほぼ一定

Fig. 12. Effect of cold working on cutting energy.

Fig. 13. Effect of cold working on total plastic energy: cutting energy and plastic energy for cold working.

となる。ドリル穴あけの場合にも同様な結果が得られ, $U_p + U_c$ はほとんど一定である。

仕上面あらさに及ぼす要因としては, 構成刃先, 工具摩耗, 工具チップングおよび被削材の延性等が考えられる。本実験においては, 極く切削初期の仕上面あらさを測定しているの, 工具摩耗および工具チップングの仕上面あらさに及ぼす影響は無視できる。構成刃先の付着は切削温度に関係することはよく知られており, 通常約 200~600°C⁹⁾において付着する。冷間加工によって切削抵抗が減少し, 切削温度が低下するため, 冷間加工材の構成刃先の付着する切削速度領域はより高速側に移行する。つまり, 仕上面あらさの悪くなる領域は構成刃先の付着と同じ方向に移行する。冷間加工による延性低下は全切削速度域で仕上面あらさの改善に有効と考えられる。

旋削加工における工具摩耗は Fig. 8 に示すように, 冷間加工により減少する。Fig. 14 は工具摩耗と切削エネルギーの関係を示したもので切削エネルギーの増加に伴い, 工具摩耗は増大する。一般に, 工具摩耗は切削温度が高いほど大きくなる。したがって, 冷間加工により, 切削エネルギーが減少し, その結果, 切削温度が低下し, 工具摩耗が減少したものと考えられる。

一方, 自動盤により, 同一材料を切削した後の工具摩耗は冷間加工率の増加に伴い, 一様に減少せず, Fig. 9 に示すように減面率約 20% 近辺で最

Fig. 14. Relationship between tool wear and cutting energy.

Fig. 15. Effect of cycle time in intermittent cutting and hardness of work material on tool wear. (10min cutting)

小になり、それ以上では増加する。この原因については十分明らかではないが次のようなことが考えられる。

Fig. 15 は別の実験で求めた同一量切削した場合の断続回数と工具摩耗との関係を示したものである。図から断続回数が多いほど工具摩耗は大きく、高硬度材においてこの傾向が顕著である。これは「切り始め」と「切り終り」における工具と被削材のこすり合い¹⁰⁾によるもので、硬さの高い材料ほど工具を摩耗(マイクロチップングを含む)させるためと考えられる。自動盤加工では上述したような工具と被削材のこすり合い作用とさらに減面率増加に伴う硬さの増大によって工具摩耗が大きくなったものと考えられる。このように自動盤切削における冷間加工材の最適減面率は冷間加工による切削抵抗の減少に起因する工具摩耗の減少と工具と被削材のこすり作用による工具摩耗の増加とのバランスによって決まると考えられる。

5. 結 論

(1) ドリル穴あけでのスラストを除けば、旋削およびドリル穴あけでの切削抵抗は冷間加工により減少する。また、切削抵抗に及ぼす冷間加工の影響は鋼種および冷間加工の方法にかわりなく一定である。

(2) 冷間加工による切削抵抗の減少は切くす厚

さの減少と関係がある。また、切くす厚さの減少は、加工硬化指数 (n 値) の減少と対応する。

(3) 冷間加工に要する塑性変形エネルギー U_p と切削に要する切削エネルギー U_c の和はほぼ一定とみなし得る。したがって冷間加工は切削エネルギーの低下に有効である。

(4) 仕上面あらさは冷間加工によって改善される。この仕上面あらさへの影響は構成刃先の挙動(切削条件)と密接なつながりをもつ。

(5) 工具摩耗は冷間加工によって減少する。これは、切削エネルギー(切削抵抗)の減少によるものと考えられる。しかし、自動盤切削においては「切り始め」および「切り終り」時の工具とワークとのこすり合いの頻度が高い。冷間加工によって被削材が硬化するため、このこすり合いによる摩耗が加速される。したがって工具摩耗の点からは被削材種によって最適な冷間引き率が存在する。

(文 献)

- 1) 山本俊郎, 熊谷憲一: 鉄と鋼, **59** (1973) 1, 100
- 2) H. Darlington, P. T. Aylward: Automatic Machining, **30** (1969), 55
- 3) M. C. Shaw, N. H. Cook, P. A. Smith: Trans. ASME, ser. B, **83** (1961), 163
- 4) 高橋賢司, 中島浩衛, 菊間敏夫: 製鉄研究, No. 254 (1966), 6376
- 5) 山口喜弘, 下畑隆司, 喜多壮太: 神戸製鋼技報, **24** (1974) 3, 16
- 6) 山本俊郎, 熊谷憲一: 鉄と鋼, **62** (1976) 1, 72
- 7) 山本俊二, 藤田達, 山口喜弘, 山上徹, 菅原宏文: 鉄と鋼, **55** (1969) 3, 196
- 8) 山口勝美: 日本機械学会講演論文集, No. 720-12, 145
- 9) 臼井英治: 切削・研削加工学上, P.183 [共立出版]
- 10) 勇田敏夫: 精密機械, **35** (1969) 5, 292