

(討10) 変形能の巨視的一般論

大阪大学工学部

加藤健三

鉄鋼の塑性加工においては、どこまで加工が可能であるかという加工限度が問題であり、力学的には破断に至るまでの最大ひずみ ϵ_{max} のことを指しており、材料の変形能または加工性とも呼ばれる。一般的には、材料の加工のしやすさは、変形能、変形抵抗および冶金学的成分・組織を目標として調べられているが、それ以外の塑性加工法に適した方式で調査する必要があり、なかなか難しい問題である。変形抵抗の研究が従来、質的にも量的にもかなり盛んに行なわれ、現在でもますます発展しているのに対して、変形能の研究はその意味するもののあいまいさとも関連して量的には多く行なわれているが、質的にはなかなか発展していないように思われる。

現在、変形能という概念に対しては、大別して二通りの考え方がありように思う。すなわち、引張り、圧縮、ねじりのような基本的試験方法により材料の特性値を求めることにより、これを応用して各種の塑性加工法における材料の変形能を論ずることができるとい立場が一つである。もう一つの立場は、そのような基本的試験も必要であるが、結局はそれ以外の塑性加工法に準じた試験法、云いかえるとシミュレーションを行なうことが必要であり、例えば鍛造ならば円柱圧縮、板の深絞りなら Swift Cupping Test などと、応力状態、変形状態が実際の加工とよく似ていなければ意味がないという立場である。そして、現実には、この両者の考え方を適宜、用いて変形能を判断しているといことが云えよう。

以下、これらの現状を見ながら、変形能を巨視的に考えてみることをする。なお、一般に加工性が良好であるといことは、変形抵抗が小さく、変形能が大であると考えてよからう。

1. 変形能の測定方法

変形能の測定について、板材加工およびその他の加工に分け、その他の加工を総括して棒状試験片を用いるので、棒材加工又はブロック加工として表1に、板材加工については表2に変形能の測定方法をまとめて示した。

引張りや圧縮などの標準的なものは、基礎的試験とし、Wedge Test や回転鍛造試験などの実際の加工の模倣試験は直接的試験として分類した。とくに衆知のように板材加工については直接的試験が各種よく発展しているのが特色である。恐らく大切な引張り試験は基礎的試験に入れたもよいと思われるが、現在、英国でマンネスマン穿孔性の判定のために主として用いられているので直接的試験に入れた。この試験法は静水圧効果を考慮に入れているといわれる。圧縮試験(すえみ)の中でも拘束円柱試験、切欠き円柱試験、拘束切欠き円柱試験は最近、圧縮試験として冷間鍛造性の判定のためによく使用されるようになった。

変形能の測定は、とくに問題となるのは破断や破壊の発生時を主として目視で判定するといことである。この異なる考えは、目視だけで判定しなればならない円柱圧縮試験や Wedge Test など圧縮的な試験に比して、引張りやねじり試験などの引張りの試験では応力とひずみの同時測定結果より破断時の判定が可能である便利である。

表1 棒材加工における変形能の測定方法

種別	変形能試験法		用途
基礎的試験	引張り	熱間 引張り試験 切欠き引張り試験	一般
		冷間 引張り試験 切欠き引張り試験	
	圧縮 (寸え込み)	熱間 円柱圧縮試験 円錐圧縮試験	熱間鍛造
		冷間 円柱圧縮試験 拘束円柱圧縮試験 切欠き円柱圧縮試験 拘束切欠き円柱圧縮試験	冷間鍛造
	ねじり	熱間 ねじり試験	管材, 圧延, 鍛造
冷間 ねじり試験		線材	
曲げ	熱間 曲げ試験	ピット, 熱間曲げ	
	冷間 曲げ試験	冷間曲げ	
直接的試験	引張り	熱間大切欠き引張り試験	穿孔
	圧縮	くさ心試験 (Wedge Test)	鍛造
	横圧縮	回転鍛造試験 7-10°空抜き穿孔試験 転造試験 (クロスロール試験)	横鍛造 穿孔 クロスロール

表2 板材加工における変形能の測定方法

種別	変形能試験法	目的	
基礎的試験	引張り試験	変形抵抗, 降伏点, 降伏比, 変形量, n値, r値	
	切欠き引張り試験	せん断力, せん断心ずみ, 異列性, 伸び fragility	
硬さ	硬工試験	加工硬化	
ねじり	ねじり試験	平面曲げねじり	
曲げ	曲げ試験	曲げ性	
直接的試験	深絞り	Swift カツプ°試験 ユニカルカツプ°試験 TZP 深絞り試験 Sachs くさ心引抜き試験	限界絞り比 (LDR) CCV TZP値
	張出し	エリクセン試験 オルセン試験 液圧バルジ試験	エリクセン値 張出し高さ
	伸心フランジ	KWI 穴広げ試験 エリクセン穴広げ試験	穴広がりの率
	現場試験	フレックステスト	F値, R値
	プレス試験	スクライプト サークル テスト	心ずみ分布

2. 変形能に影響を有する因子

材料の変形能を左右する因子としては、冶金学的因子と加工条件が考えられる。

冶金学的因子

- (1) 化学組成：鋼中には S, Sb, Sn, As などが含まれると変形能は低下する。
- (2) 金属組織：単相(固溶体)、金属間化合物、析出物などが影響する。
- (3) 結晶粒度：結晶粒の粗大化、成長速度の大小など。
- (4) 鑄造組織：樹枝状晶、気泡、収縮孔など。
- (5) 不均一性：不純物、 N_2 ガスや O_2 ガスによるせい性、偏析など。

加工条件

- (1) ひずみ速度：速度が低い方が変形能が大きくなる場合が多い。
- (2) 加工履歴：局部に大きな加工度が偏ると変形能が下がる。また、繊維組織など。
- (3) 加熱履歴：不均一加熱、せい性温度領域などは変形能を下げる。
- (4) 応力状態：一軸応力よりも二軸応力、三軸応力の圧縮応力状態になりほど向上する。
- (5) 不連続加工：低加工度でくりかえし加工し、再結晶を毎回行なうと向上する。
- (6) 摩擦状態：摩擦の大小、潤滑の有無の影響。

温度と変形能の関係については、H.J. Henning & F.W. Boulger の分類がある。

I 純金属および単一相合金：温度上昇とともに変形能は非常に向上する。

II 結晶粒成長の速い純金属および単一相合金：温度上昇とともに向上するが、途中から粗大化をおこして、逆に低下する。

III 不固溶性化合物を形成する元素を有する合金：温度を上げてもほとんど向上しない。

IV 固溶性化合物を形成する元素を有する合金：温度を上昇させれば、ある温度から向上する。

V 高温で粘い単相を形成する合金：温度上昇により1相から2相になっても低下しない。

VI 高温で低融点の単相を形成する合金：温度上昇により1相から2相になると急に低下する。

VII 冷却時に粘い単相を形成する合金：炭素鋼、低合金鋼のように2相になっても低下しない。

VIII 冷却時に脆い単相を形成する合金：温度低下とともに1相から2相になると急に低下する。

3. 鋼の熱間変形能に対する化学組成の影響

純鉄：工業用純鉄では $1100 \sim 900^\circ C$ で変形能が著しく低下する。

炭素：変形能最大の温度は、 $0.05\% C$ で $1300^\circ C$ 、 $0.15\% C$ で $1230^\circ C$ 、 $1.0\% C$ で $1175^\circ C$ 、 $1.5\% C$ で $1150^\circ C$ 程度である。

オーステナイトステンレス鋼、高クロムフェライトステンレス鋼では $C\%$ とともに低下する。

ケイ素：炭素鋼では 0.2% 以上の Si では変形能を低下させる。

オーステナイトステンレス鋼では 0.5% 以上の Si はフェライト増加を惹起し、変形能を下げる。

マンガン：極軟鋼では Mn/S の比が4以下になると変形能を下げる。

リン：炭素鋼では $0.3\% P$ 、18-8ステンレスでは $0.1\% P$ までには影響がない。

イオウ：変形能に有害であり、 Mn/S 比を高める必要がある。

銅： $0.3\% Cu$ 以上では変形能を下げる。

ニッケル： $5\% Ni$ 程度では変形能を改善するが、 $9\% Ni$ 以上になると低下する。

クロム： $9\% Cr$ 程度では変形能の低下を示すが、 9% 以上で改善が見られる。

アルミ：炭素鋼、低合金鋼で Al が増加すると粒界に Al_2O_3 窒化物が形成され、

変形能が低下する。オーステナイトステンレス鋼では脱酸材としてのAlは有益であるが、多量になるとフェライトが増加するのでよくない。

その他の元素：

熱間変形能を向上させるもの (Ca, Zr, 希土類元素)

熱間変形能を低下させるもの (Mo, Sb, Sn, As, N₂, O₂, B, Bi, Pb, Se, Ti, W)

4. おわりに

以上が変形能に対する現状の考え方を、一応、巨視的にまとめてみたものである。しかし、まだまだ完全には整理しきれない内容をもっており、変形能について今後とも実際の塑性加工と関連させながら、基礎的試験および直接的試験の関係を明確にしてゆくことが必要であろう。

参考文献

- (1) 加藤：金属塑性加工学 (丸善)
- (2) 日本鉄鋼協会：第9回技術講座
- (3) H.J. Henning, F.W. Boulger: Mechanical Working of Steel I. (ASM) (1963)
- (4) 加藤：鉄と鋼, 56年, 7号 (1970), p.915.