鉛入り黄銅の圧縮ねじり試験について*

財 満 鎮 雄** 堀 内 宰***

On the Compression-Torsion Tests of Leaded Brass

by

Shigeo ZAIMA and Osamu HORIUCHI

(Faculty of Engineering, Shizuoka University, Hamamatsu)

Leaded brass, *i. e.* brass with small quantities of lead added to it, is used in many fields for mechanical purposes because of its anti-corrosive properties and machinability without diminishing its mechanical properties, such as tensile strength and hardness. The effect of adding lead to brass on its machinability has been studied in many fields, and it is intended in this paper to find out the characteristics of leaded brass regarding its rupture under combined stress by subjecting it to compression-torsion test. For specimens leaded brass rods based on α -brass (7/3 brass) containing 0~3% lead, melted and extruded, were used, as the $(\alpha+\beta)$ brass is complex in structure and therefore inadequate for the purpose, and the trial compression-torsion testing apparatus was used. It has been found as the result that when lead is added to brass simultaneously under the compression stress and the shearing stress the brass is deteriorated in rupture strain, and it is found also that it is one of the reasons why the discontinuous chip is obtained when leaded brass is cut.

(Received Dec. 15, 1966)

1 緒 言

黄銅に少量の鉛を添加すれば引張強度、かたさなどの機械的性質はあまり低下せず耐食性、表面処理性がすぐれているうえ、機械加工は容易であり古くから快削黄銅として用いられてきた。すなわち、 $(\alpha+\beta)$ 2相共存範囲の黄銅成分で鉛4%程度以内の添加では、急激な機械的性質の低下ははみられないとしている。鉛は黄銅に固溶しないので、快削黄銅の切削機構における鉛の効果については工具すくい面と切りくずの摩擦抵抗を減少させるとか、あるいは鉛添加によるせん断領域での塑性変形の差異などを論じているが、いずれの所論についても明確に実証された研究は少ないようである。鉛添加による材料の機械的性質の変化についての従来の研究では引張試験、せん断試験などの単純応力状態における性質を取り扱ったものが多い。しかし、切削機構における応力状態ははなはだ複雑で、たとえば静水圧が作用している条件下での破断現象ともみなせるので、その場合に単純応力下の材料の破断特性と同じ挙動を示すかどうかは不明である。このような関係を確かめるため本報では、鉛入り黄銅を圧縮応力が作用するもとでねじり試験を行ない、連合応力作用下における黄銅の破断特性を求めて鉛の添加効果を

検討するを目的とした。この方面ではP.W. Bridgman,¹⁾ S.S. Chang と W.B. Heginbotham²⁾ などがそれぞれ銅、黄銅などについてねじりの破断特性に及ぼす圧縮応力の影響を検討している。

2 試 料

Table I. Chemical compositions of specimens used.

No.	Cu (%)	Pb (%)	Zn
1	68.44	0	Bal
2	67.58	0	Bal
3	68.02	0	Bal
4	67.93	0	Bal
5	67.58	0	Bal
6	66.87	1.06	Bal
7	66.88	1.14	Bal
8	67.63	0.94	Bal
9	67.63	1.01	Bal
10	67.63	1.01	Bal
11	67.63	0.94	Bal
12	66.83	3.02	Bal
13	67.59	3.14	Bal
14	67.37	2.97	Bal
15	65.87	3.05	Bal
16	67.59	3.14	Bal
17	67.37	2.97	Bal

* 原稿受理 昭和41年12月15日

** 正 会 員 静岡大学工学部 浜松市城北3丁目

*** 静岡大学大学院 浜松市城北3丁目

銅65%, 亜鉛35%の $3\text{mm}\phi$ 黄銅線材と電解銅を原材料とし、シリコニットろを用いて Table I に示すように鉛含有量を 0, 1 および 3 % に変化した 17 種類の鉛入り 7/3 黄銅棒(ピレット寸法 $55\text{mm}\phi \times 120\text{mm}$) を溶製した。この際の鑄込温度は 950°C 、金型温度は 250°C であった。ここで試料として 7/3 黄銅をベースとして選んだのはいわゆる快削黄銅は $(\alpha + \beta)$ 2 相共存組織で複雑なので、検討を容易にするために α 単相としたわけである。

これらのピレットを荒削り切断して $48\text{mm}\phi \times 50\text{mm}$ の素材とし、横型アムスラー万能試験機 (30 t) を改造した熱間押出し機により $200\text{mm}/\text{min}$ の押出し速度で $27\text{mm}\phi$ 丸棒に熱間押出した。この際の素材、ダイスおよびコンテナの最高加熱温度は 800°C であり、潤滑剤としては黒鉛を使用した。Fig. 1 は素材の顕微鏡組織の一例であるが、鉛の微粒子が分散している状況がうかがえる。

試験片形状は Fig. 2(a) に示すとおりで、試験片の平行部、テーパ部の機械加工に使用した工具形状を Fig. 2(b) に示す。機械加工後、平行部表面に中心軸に平行なケガキ線を刻み、ケガキ線の傾き角を測って外皮のせん断ひずみを求めるようにした。

Fig. 2. Specimen used and its machining tool.

3 圧縮ねじり試験機

試作した圧縮ねじり試験機の概略は Fig. 3 のとおりである。試験機の上下面で圧縮荷重をかけ、試験片をねじり軸④と固定軸③の間に取り付け、ねじり軸④はモータの回転を減速歯車⑧によって減速し $10^\circ/\text{sec}$ の角速度で回転する。試験片にかかるねじりモーメントは固定軸③とピアノ線⑤によってひずみ体⑥に伝えら

Fig. 3. Compression-torsion testing apparatus.

れるが、軸受②の内輪と固定軸③とはすきまばめになっており、試験片が中心軸方向にひずんでも固定軸③は上下に自由に移動できるので、圧縮荷重は一定に保たれる。ねじり軸の回転角は歯数 180 の歯車⑦を電気接点とし、回転による電流の断続を利用して記録されるようにした。Fig. 4 は装置の概観である。なお、装置の摩擦損失は圧縮荷重 400kg のとき約 $3\text{kg} \cdot \text{cm}$ であった。

Fig. 4. View of testing apparatus.

4 圧縮ねじり試験

Fig. 5 (a), (b) および (c) にそれぞれ圧縮荷重 0, 200 および 400kg の場合の回転角-ねじりモーメント線図を示す。回転角増加に伴うねじりモーメントの変化をみると、まず回転角 2° 付近に降伏点と思われる屈曲点があり、その後ゆるやかに増加し、ついにねじりモーメントの最大値に達する。ここで、ねじりモーメントが最大になったときに破断が始まり、最大値を過ぎた

Fig. 5. Relation between twisting angle and twisting torque.

後の減少過程を経て、一定値になったときに破断をほぼ完了するものと思われる。圧縮荷重がない場合、ね

じりモーメントの最終値は零となるが、圧縮荷重が作用すれば零とならない。これは圧縮荷重が作用すると破断面間に摩擦を生ずるためと思われる。試験片の鉛含有量によるねじりモーメントの変化状況の差は、ねじりモーメントの最大値以後の減少過程において、鉛含有量0%のものがほかの鉛含有のものに比べて著しく回転角が大きく、ねじりモーメントの減少はゆるやかである。また、鉛含有量0%のものがほかのものに比べてねじりモーメントの最大値も大きく、鉛含有量1%と3%のものの中には前者のほうがねじりモーメント最大のときの回転角がやや大きいようであるが大きな差異は認められなかった。

ねじりモーメントの最大値 T_m とそのときの回転角 ϕ^* およびケガキ線の傾き角から求めた外皮のせん断ひずみの最終値 γ_R^* を Table II に、また、試験片平行部の直径の変化を Table III に示す。圧縮荷重をかけない場合わずかの直径の減少があるが、これを無視すれば γ_R^* は外皮の最大せん断ひずみを表わし、この外皮の最大せん断ひずみは鉛含有量の多いものほど小さいことがわかる。これに対して圧縮荷重をかけた場合、半径方向と軸方向のひずみが相当にあるものであり、かつ、ひずみ硬化性材料であるため、ケガキ線の傾き角から求めた γ_R^* がそのまま外皮の最大せん断ひずみを表わすとはいえない。しかしながら、圧縮荷重が同じならばいずれの試験片の直径増加も同じ程度であるので、 γ_R^* の大小によって定性的に外皮の最大せん断ひずみの大小を比較することはできる。した

Table II. Shear strain and maximum torque.

Compressed loads (kg)	No of specimen	Inclination of marking-off line ϕ (deg)	Shear strain $\gamma_R^* = \tan \phi$	Maximum torque T_m (kg·cm)	Twisting angle ϕ^* (deg)
0	1	73.0	3.27	91	162
	2	69.7	2.70	90	140
	6	58.5	1.63	82	82
	7	58.0	1.60	76	74
	12	56.0	1.48	81	70
	13	55.5	1.43	80	72
200	3	63.2	(1.98)	109	150
	4	62.5	(1.92)	106	145
	8	53.5	(1.35)	83	70
	9	43.4	(0.95)	75	55
	14	51.0	(1.23)	77	61
	15	47.3	(1.08)	81	58
400	5	60.2	(1.75)	116	130
	10	40.0	(0.84)	88	55
	11	42.7	(0.92)	87	58
	16	37.5	(0.77)	82	45
	17	38.0	(0.78)	82	45

Table III. Changes of diameter in specimen.

Compressed load (kg)	No. of specimen	Diameter before testing D_0 (mm)	Diameter after testing D (mm)	Change of diameter $D-D_0$ (mm)
0	1	4.99	4.88	-0.11
	2	5.00	4.90	-0.10
	6	4.99	4.90	-0.09
	7	4.97	4.86	-0.11
	12	5.02	4.98	-0.04
	13	5.01	4.95	-0.06
200	3	5.02	5.30	0.28
	4	5.01	5.25	0.24
	8	4.99	5.22	0.23
	9	5.00	5.22	0.22
	14	5.00	5.25	0.25
	15	5.01	5.24	0.23
400	5	5.01	5.50	0.49
	10	4.98	5.47	0.49
	11	4.99	5.45	0.46
	16	5.02	5.50	0.48
	17	5.00	5.48	0.48

がって、圧縮荷重をかけた場合でも鉛含有量が多いほうが外皮の最大せん断ひずみは小さいといえるようである。また、圧縮荷重を増すとねじりモーメント最大のときの回転角 θ^* や γ_R^* は減少する傾向にある。これは圧縮荷重のため平行部がたる形にふくらみ、ねじりによるひずみが直径の小さい平行部とテーパ部との境界付近に集中するものと思われる。

5 せん断応力とせん断ひずみ

以上の測定結果より外皮のせん断ひずみとせん断応力の関係をただちに求めることはできない。すなわち、圧縮荷重が存在すればねじりによるせん断ひずみのほかに中心軸方向と半径方向のひずみがあり、かつ、ひずみ硬化性材料であるためである。しかし、圧縮荷重が存在しない場合には L. Prandtl によれば半径 R の中実丸棒にねじりモーメント T が作用するとき、比ねじれ角を θ とすれば外皮のせん断応力 τ_R は、

$$\tau_R = \frac{1}{2\pi R^3} \left(\theta \frac{dT}{d\theta} + 3T \right) \quad (1)$$

で与えられる。外皮のせん断ひずみ γ_R は $R\theta$ で与えられる。ここでは Table II に示す γ_R^* とねじりモーメントが最大のときの回転角 θ^* とより、任意の回転角 θ における外皮のせん断ひずみ γ_R はひずみが半径に比例し、破断はひずみの最も大きい外皮から始まり回転角の増加とともに中心に向かって進行するとすれば

$$\gamma_R = \frac{\gamma_R^*}{\theta^*} \cdot \theta \quad (2)$$

また、 $T-\theta$ の関数形と $T-\theta$ の関数形は同じであるの

で(1)式の θ を θ に置きかえれば、

$$\tau_R = \frac{1}{2\pi R^3} \left(\theta \frac{dT}{d\theta} + 3T \right) \quad (3)$$

これらの結果に従って、外皮の応力-ひずみ線図を求めれば Fig. 6 のようになる。図(a)(b)(c)の順に鉛含有量がそれぞれ 0, 1 および 3% の試料のものを示す。これらについて比較すると、外そう法によって求めた降伏応力はいずれの場合にも約 10 kg/mm^2 であるが、

Fig. 6. Relation between shear stress and shear strain.

ひずみ硬化率は鉛含有量3%の場合が他のものに比べてわずかに大きいようであるもののあまり顕著な差は認められない。しかし、破断ひずみおよび破断応力については鉛含有量0%のもののほうがほかのものに比べてかなり大きく、特に鉛含有量0%のものの破断ひずみはほかのものの2倍近い値であるが、鉛含有量1%のものの破断ひずみと3%のもののそれとの間にはあまり差はない。したがって、この場合3%程度までの鉛添加は黄銅の応力-ひずみ関係にはほとんど影響を及ぼさず、破断ひずみあるいは破断応力を減少させるといえる。

6 切 削 試 験

切削の際の切りくず生成においては切りくずの形態によって連続型と不連続型切りくずに分類される。連続型ではせん断領域で連続的にせん断変形が行なわれ切りくずは連続しているが、不連続型ではせん断領域で間欠的に破断が生じ切りくずは不連続になる。一般に延性のない材料ほど不連続型切りくずが得られやすく、また延性のある材料でも切削速度が低い場合、すくい角が小さい場合、すくい面の摩擦が大きい場合など不連続型になりやすいといわれている。せん断面におけるせん断ひずみ γ はせん断角を ϕ 、すくい角を α とすれば、

$$\gamma = \cot \phi + \tan(\phi - \alpha) \quad (4)$$

で表わされるが、 $\phi \leq (\pi/4) + (\alpha/2)$ の範囲でせん断角が減少するとせん断ひずみは増加する。したがって、せん断角が減少してこのときの応力状態で被削材がせん断面におけるひずみに耐えられない場合破断するものと考えられる。

いま、鉛入り黄銅板(板厚3.5mm)について切削速度 $V=300$ mm/min一定とし、工具すくい角を $\alpha=-10, 0$ および 10° に変えて二次元切削試験を実施し、切りくずが連続型から不連続型に移行するときの限界切込みを求めればFig. 7 のようになる。図中、矢印のあ

るものはそこまでの切込みでは不連続型の切りくずが認められなかったものである。これからわかるように、切込みが増加すると不連続型の切りくずになりやすく、すくい角が小さいほどより小さい切込みで不連続になる。また、鉛含有量が多いほどより小さい切込みで不連続型になり、実験範囲では鉛含有量0%の場合不連続型にならなかった。

前述の圧縮ねじり試験結果より考えれば、黄銅に鉛を添加すると破断ひずみが減少し破断面の進行が容易になったためで不連続型切りくずになりやすいことが想像される。このことはまた M.C. Shaw らは材料が耐えうるせん断ひずみが圧縮応力によって影響を受けるものと考え、切削におけるせん断ひずみが材料試験の結果から求めた破断曲線に相当するせん断ひずみより大きい場合に不連続切りくずが得られるとした鋼についての結果とも矛盾しないし、また鉛3~4%の添加が黄銅にせん断型切りくずを生成させ切削抵抗を著しく改善するとした結果とも一致する。

7 結 言

以上要約すると、鉛入り黄銅の圧縮ねじり試験の結果、黄銅に1~3%の鉛を添加することにより圧縮応力とせん断応力が同時に作用する状態ではせん断による破断ひずみが減少することがわかり、この結果を切削の際の切りくず生成におけるせん断面の破断特性に適用すれば、黄銅に鉛を添加することにより不連続切りくずが生成されやすくなる理由の一つの説明が得られることになる。

(昭和41年5月18日 日本材料学会第15期総会講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Bridgman, P.W., J. Appl. Phys., **14**, 273 (1943).
- 2) Chang, S.S., and W.B. Heginbotham, Trans. ASME, B, **82**, 315 (1960).
- 3) たとえば, Hill, R., "The Mathematical Theory of Plasticity" (1950), Oxford; R. ヒル訳, 塑性学, p. 73 (1965) 培風館
- 4) たとえば, 益田森治, 室田忠雄, "工業塑性力学", 訂正版, p. 59 (1963) 養賢堂
- 5) たとえば, 精機学会編, "改訂精密工作便覧", p. 24 (1964) コロナ社
- 6) Cook, N.H., I. Finnie, and M.C. Shaw, Trans. ASME, B, **77**, 153 (1954).
- 7) 財満鎮雄, 多々静夫, 館石正規, 畑野昌之, 材料, **14**, 418 (1965).
- 8) 財満鎮雄, 多々静夫, 加茂 進, 金属学会誌, **29**, 541 (1965).

Fig. 7. Limited depth of cut grown continuous flow chip.