

内 容 提 要

本书就金相组织对铜合金的塑性变形能力的影响，论述铜合金的可锻性；介绍铜合金锻造的温度规范、备料方法、坯料的加热、锻造工艺以及锻件的冷却和热处理等，最后举工艺实例五则，以供锻造车间有关人员编制铜合金锻造工艺时参考。

本书初稿由上海交通大学徐祖禄同志校阅。

铜 合 金 锻 造

刘宝顺 编

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张 1⁵/₁₆ 25千字

1979年8月第一版 1979年8月第一次印刷 印数：00,001—13,600册

统一书号：15034·1808 定价：0.16元

目 录

第一章 铜和铜合金	1
一、杂质对纯铜性质的影响	6
二、铜合金的状态图、组织和变形性能	7
第二章 铜和铜合金的可锻性	12
一、纯铜	12
二、黄铜	12
1. 普通黄铜	12
2. 特殊黄铜	13
三、青铜	16
1. 锡青铜	16
2. 铝青铜	16
3. 铍青铜	17
4. 硅青铜	17
5. 锰青铜	17
6. 铬青铜	17
四、白铜	18
1. 普通白铜	18
2. 锰白铜、铁白铜和锌白铜	18
3. 铝白铜	18
第三章 锻造工艺	19
一、冷态变形和热态变形的应用	19
二、坯料的准备	19
三、锻造温度范围	20
四、坯料的加热	22
五、操作工艺	25
六、铜合金锻件的热处理	27

1. 均匀化退火	27
2. 再结晶退火	27
3. 低温退火	27
4. 铍青铜的淬火和时效	29
5. 铍青铜的淬火及回火强化	29
第四章 工艺实例	30
一、HSn62-1锡黄铜冷凝器管板的锻造	30
二、QSn1-3硅镍青铜万能接触焊机电极的锻造	31
三、BMn3-12锰白铜的锻造	31
四、QSn7-0.2锡磷青铜的冷态变形	32
五、HNi56-3镍黄铜铸锭的开坯	35
参考资料	37

第一章 铜和铜合金

铜具有极高的导电性、导热性和耐蚀性，并具有良好的热态或冷态下的塑性变形能力。但是，铜的强度很低，经变形并 600°C 退火后，抗拉强度 $\sigma_b = 22$ 公斤/毫米²，这仅是含碳量 0.25% 的碳素结构钢抗拉强度的一半。因此，在工业应用中，纯铜主要是制造电线、电缆和导体等的材料及配制合金的原料。而作为具有一定强度的结构材料是铜锌合金（黄铜）、铜锡合金（锡青铜）、铜铝合金（铝青铜）和铜镍合金（白铜）等二元合金，以及为了进一步改善上述合金的组织、机械性能、物理化学性能或工艺性能而加入其它合金元素的复杂合金。如黄铜中加入锰（不超过 4%），可显著提高黄铜的强度而不降低其塑性，含锰的铝青铜有很好的热态或冷态塑性变形能力；镍（2~3%）能促使某些两相黄铜转变为细晶粒的单相合金，镍也能提高铝青铜的耐热性和耐蚀性；磷（不超过 0.5%）显著提高锡青铜的耐磨性；铅（不超过 3%）极显著地改善黄铜的切削性；锡（0.5~1.5%）能使黄铜在海水中的耐蚀性大大提高。

结构材料经锻造变形后，既改善了其内部组织，又节约了原材料。特别是纯铜和铜合金是一种贵重的金属材料，因此掌握纯铜和铜合金的金相组织对其塑性变形能力的影响，从而正确制订锻造工艺，以确保锻造质量就具有很大的技术经济意义了。

表 1-1、1-2、1-3 和表 1-4 分别为纯铜（YB145-71）、

黄铜(YB146-71)、青铜(YB147-71)和白铜(YB148-71)的牌号及其化学成分。

表1-1 纯铜的牌号、化学成分和用途(YB 145-71)

组别	牌 号				主要成分(%)			杂质 总和 (%)	用途举例
	汉字名称	GB 代号	YB 代号	旧 牌号	铜 (不小 于)	磷	锰		
纯 铜	一号铜	Cu-1	T1	M0	99.95			0.05	导电和高纯度 合金用
	二号铜	Cu-2	T2	M1	99.90			0.1	导电用铜材
	三号铜	Cu-3	T3	M2	99.70			0.3	一般用铜材
	四号铜	Cu-4	T4	M3	99.50			0.5	
无 氧 铜	一号无氧铜	—	TU1		99.97			0.03	电真空器件用 铜材
	二号无氧铜	—	TU2		99.95			0.05	
	三号无氧铜	—	TU3		99.5	0.01~ 0.04		0.49	焊接等用铜材
	四号无氧铜		TU4		99.6		0.1~ 0.3	0.30	电真空器件用 铜材

表1-2 黄铜的化学成分(YB 146-71)

组别	合 金 牌 号	主 要 成 分 (%)			杂质 不大于 总和 (%)
		铜	其	它	
普 通 黄 铜	H96	95~97			余量 0.2
	H90	88~91			余量 0.2
	H85	84~86			余量 0.3
	H80	79~81			余量 0.3
	H75	74~76			余量 0.3
	H70	69~72			余量 0.3
	H68	67~70			余量 0.3
	H65	64~67			余量 0.3
	H63	62~65			余量 1.2
	H62	60.5~63.5			余量 0.5
	H59	57~60			余量 0.9

(续)

组别	合金牌号	主要成分 (%)			杂质 不大于 总和 (%)
		铜	其它	锌	
铅 黄 铜	HPb74-3	72~75	铅: 2.4~3.0	余量	0.25
	HPb64-2	63~66	铅: 1.5~2.0	余量	0.3
	HPb63-0.1	61.5~63.5	铅: 0.05~0.15	余量	0.5
	HPb63-3	62~65	铅: 2.4~3.0	余量	0.75
	HPb61-1	59~61	铅: 0.6~1.0	余量	0.5
	HPb60-3	59~61	铅: 2.0~3.0	余量	0.75
	HPb59-1	57~60	铅: 0.8~1.9	余量	0.75
	HPb59-1A	57~61	铅: 0.8~1.9	余量	1.5
锡 黄 铜	HSn90-1	88~91	锡: 0.25~0.75	余量	0.2
	HSn70-1	69~71	锡: 1.0~1.5	余量	0.3
	HSn62-1	61~63	锡: 0.7~1.1	余量	0.3
	HSn60-1	59~61	锡: 1.0~1.5	余量	1.0
铝 黄 铜	HA177-2	76~79	铝: 1.75~2.50	余量	0.3
	HA177-2A	76~79	铝: 1.8~2.6, 砷: 0.03~0.06 铍: 0.006~0.015	余量	0.3
	HA177-2B	76~79	铝: 1.8~2.6, 铋: 0.02~0.06 铍: 0.006~0.015	余量	0.3
	HA170-1.5	69~71	铝: 1.1~1.8, 砷: 0.03~0.07	余量	0.3
	HA167-2.5	66~68	铝: 2.0~3.0	余量	1.5
	HA160-1-1	58~61	铝: 0.75~1.50, 铁: 0.75~1.50 锰: 0.1~0.6	余量	0.7
	HA159-3-2	57~60	铝: 2.5~3.5, 铁: 2.0~3.0	余量	0.9
	HA166-6-3-2	64~68	铝: 6.0~7.0, 铁: 2.0~4.0 锰: 1.5~2.5	余量	1.5
锰 黄 铜	H Mn58-2	57~60	锰: 1.0~2.0	余量	1.2
	H Mn57-3-1	55~58.5	锰: 2.5~3.5, 铝: 0.5~1.5	余量	1.3
	H Mn55-3-1	53~58	锰: 3.0~4.0, 铁: 0.5~1.5	余量	1.5
铁 黄 铜	H Fe59-1-1	57~60	铁: 0.6~1.2, 锡: 0.3~0.7, 锰: 0.5~0.8, 铝: 0.1~0.4	余量	0.25
	H Fe58-1-1	56~58	铁: 0.7~1.3, 铝: 0.7~1.3	余量	0.5

(续)

组别	合金牌号	主要成分 (%)			杂质 不大于 总和 (%)
		铜	其 它	锌	
硅 黄 铜	HSi80-3	79~81	硅: 2.5~4.0	余量	1.5
	HSi65-1.5-3	63.5~66.5	硅: 1~2, 铅: 2.5~3.5	余量	0.5
镍 黄 铜	HNi65-5	64~67	镍: 5.0~6.5	余量	0.3

表1-3 青铜加工产品的化学成分(YB 147-71)

组别	合金牌号	主要成分 (%)					杂质 不大于 总和 (%)
		锡	铝	铍	锰	其 它 铜	
锡 青 铜	QSn4-3	3.5~4.5				锌2.7~3.3 余量	0.2
	QSn4-4-2.5	3.0~5.0				铅1.5~3.5 锌3.0~5.0 余量	0.2
	QSn4-4-4	3.0~5.0				铅3.5~4.5 锌3.0~5.0 余量	0.2
	QSn6.5-0.1	6.0~7.0				磷0.1~0.25 余量	0.1
	QSn6.5-0.4	6.0~7.0				磷0.3~0.4 余量	0.1
	QSn7-0.2	6.0~8.0				磷0.1~0.25 余量	0.3
	QSn4-0.3	3.5~4.5				磷0.2~0.3 余量	0.1
铝 青 铜	QA15		4.0~6.0			余量	1.6
	QA17		6.0~8.0			余量	1.6
	QA19-2		8.0~ 10.0		1.5~2.5	余量	1.7
	QA19-4		8.0~ 10.0		1.5~2.5	铁2.0~4.0 余量	1.7
	QA110-3-1.5		8.5~ 10.0		1.0~2.0	铁2.0~4.0 余量	0.75
	QA110-4-4		9.5~ 11.0		1.0~2.0	铁3.5~5.5 镍3.5~5.5 余量	0.8
	QA11-6-6		10.0~ 11.5		1.0~2.0	铁5.0~6.5 镍5.0~6.5 余量	1.5

(续)

组别	合金牌号	主要成分 (%)						杂质 不大于 总和 (%)
		锡	铝	铍	锰	其它	铜	
铍青铜	QBe2			1.9~2.2		镍0.2~0.5	余量	0.5
	QBe2.15			2.0~2.3			余量	1.2
	QBe1.7			1.6~ 1.85		镍0.2~0.4 钛0.1~0.25	余量	0.5
	QBe1.9			1.85~ 2.1		镍0.2~0.4 钛0.1~0.25	余量	0.5
硅青铜	QSi1-3				0.1~0.4	镍2.4~3.4 硅0.6~1.1	余量	0.4
	QSi3-1				1.0~1.5	硅2.75~3.5	余量	1.1
锰青铜	QMn1.5				1.2~ 1.55		余量	0.3
	QMn5				4.5~5.5		余量	0.9
镉青铜	QCd1.0					镉0.9~1.2	余量	—
铬青铜	QCr0.5					铬0.5~1.0	余量	0.5
	QCr0.5-0.2 -0.1		0.1~ 0.25			铬0.4~1.0 镁0.1~0.25	余量	0.5
锆青铜	QZr0.2					锆0.15~0.25	余量	0.5
	QZr0.4					锆0.30~0.50	余量	0.5

表1-4 白铜的化学成分(YB148-71)

组别	合金牌号	主要成分 (%)				杂质 不大于 总和 (%)
		镍+钴	锰	铝	铜	
普通白铜	B0.6	0.57~0.63			余量	0.10
	B5	4.4~5			余量	0.7
	B16	15.3~16.3			余量	0.2
	B19	18~20			余量	1.5
	B30	29~33			余量	—

(续)

组别	合 金 牌 号	主 要 成 分 (%)				杂质 不大于 总和 (%)
		镍 + 钴	锰	铝	铜	
锰 白 铜	BMn3-12	2.0~3.5	11~13		余量	1.1
	BMn40-1.5	39~41	1~2		余量	0.9
	BMn43-0.5	42.5~44	0.1~1.0		余量	0.6
铁 白 铜	BFe30-1-1	29~33	0.5~1.0	铁0.5~1.0	余量	0.4
	BFe5-1	5~6.5	0.3~0.8	铁1.0~1.4	余量	0.7
锌 白 铜	BZn15-20	13.5~16.5		锌18~22	余量	0.9
	BZn17-18-1.8	16.5~18.0	铅1.6~2.0	锌 余量	61~64.9	—
铝 白 铜	BA113-3	12~15		2.3~3.0	余量	1.9
	BA116-1.5	5.5~6.5		1.2~1.8	余量	1.1

一、杂质对纯铜性质的影响

纯铜又称电解铜或紫铜，分别因其炼制方法和外观颜色而得名。无氧铜是真空熔炼或用脱氧剂脱氧而得的高纯度铜。纯铜具有面心立方晶格，塑性良好，但其塑性变形能力显著地受到其固有杂质如铋、铅、氧、硫和磷等的影响，即使这些杂质的含量是极少的。

铋是铜最危险而有害的杂质。它实际上完全不固溶于铜，由于少量铋(0.005%)的存在，在铜晶粒边界上形成低熔点的共晶体(Cu+Bi)(共晶温度270°C)，当铜在热态变形时，这种低熔点共晶体熔化，破坏晶间结合而造成脆性断裂。这种现象称为铜的热脆性。

铅在铜中以元素铅夹杂的形态存在。随着温度升高，它转为液态并沿晶粒边界分布，从而破坏晶间结合使铜在热态

变形时呈现脆性。铅的这种有害作用不仅与其浓度有关，而更主要是与其在铜中的分布特征有关。铅以细小颗粒夹杂物分布在铜中的有害影响较它以薄层沿铜晶粒边界分布的有害影响小。其它易熔的、或不溶解于铜的杂质也具有和铅或铋相似的影响。这就是铜及其合金在某个温度区域（200~600℃）出现脆性现象的原因，这个温度区域称为铜及其合金的脆性区。

氧极少固溶于铜，它的有害作用是生成（Cu+Cu₂O）共晶体，虽然它的共晶温度为1065℃，不会引起热脆，但因Cu₂O是脆性化合物，使铜在冷态变形时产生破裂，这种现象称为铜的冷脆性。

硫能很好地溶解于液态铜中，但它在铜凝固时的溶解度降低到零。硫铜化合物Cu₂S与Cu₂O是同时存在的，由于它们都是高熔点的脆性化合物，因此对铜的热态和冷态变形能力都有不良影响。

氢的有害影响是一种“氢气病”。当铜在具有H₂、CO和CH₄等气体的还原性气氛中加热时，氢气在高温下进入铜并与铜中的Cu₂O反应产生大量水蒸汽。这种水蒸汽既不扩散又不分解，并以很高的压力力求外溢而降低了铜本身的结合力，在热态变形时促成裂纹。

上述杂质在铜合金中有着同样的有害作用。

二、铜合金的状态图、组织和变形性能

图1-1、图1-2和图1-3分别为铜锌合金、铜锡合金和铜铝合金的状态图。

图中的α相是锌、锡或铝溶解于铜中的固溶体，它与纯

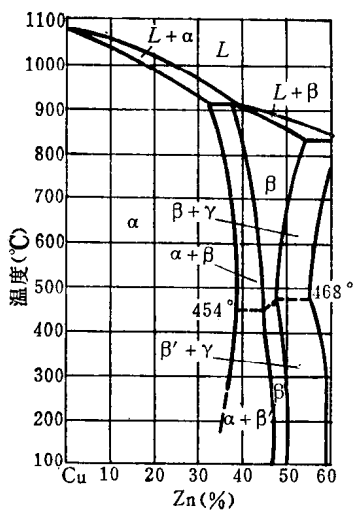


图1-1 Cu-Zn状态图

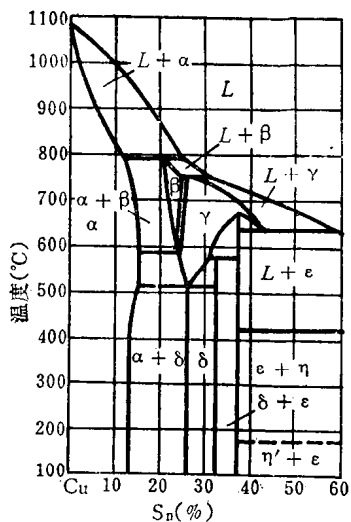


图1-2 Cu-Sn状态图

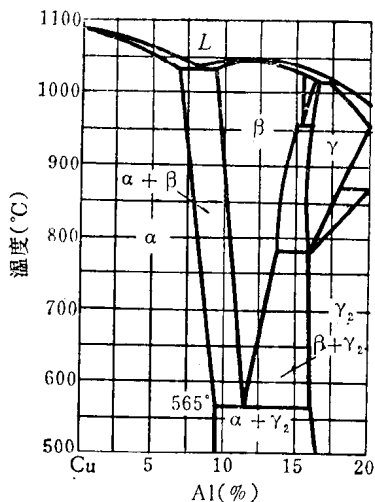


图1-3 Cu-Al状态图

铜一样具有面心立方晶格，塑性良好，具有极佳的热态或冷态变形能力。

β 相是以锌、锡或铝与铜的电子化合物（分别为 CuZn 、 Cu_5Sn 和 Cu_3Al ）为基的固溶体，具有体心立方晶格，强度高塑性低，在高温下塑性良好，适宜于热态变形加工。

两相组织（ $\alpha + \beta$ ）在冷态下的塑性较 α 相差，因此适宜于热态下变形加工。

铜锌状态图中的 β' 相是 $468 \sim 454^\circ\text{C}$ 时 β 相的有序转变相。这种低温下存在的 β' 相具有较高的硬度和脆性，故在冷态下变形加工较困难。 γ 相是以电子化合物 Cu_5Zn_8 为基的固溶体，具有复杂的立方晶格，性质更硬脆，对合金的塑性起着有害作用。图 1-4 反映了含锌量对黄铜室温强度和塑性的影响。随着含锌量的增加，黄铜的强度和塑性随着升高。虽然 α 黄铜的单相区在室温下能扩展到 61% Cu (39% Zn)，但由于在接近这个饱和界限的单相黄铜中，扩散过程进行得十分缓慢，而总有不多量 β' 相存在。因此，当含锌量超过 32% 时，组织中

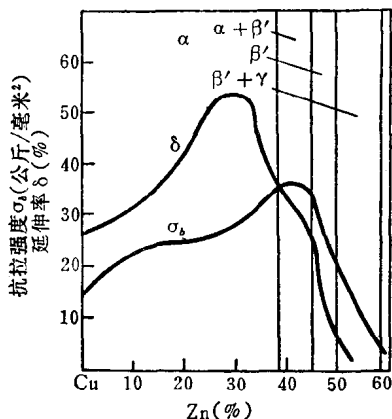


图1-4 黄铜机械性能与含锌量的关系

开始出现了一部分 β' 相，塑性已趋下降，但强度仍继续升高。直到含锌量高于 45% 时，组织中已全部为 β' 相，特别是将出现 γ 相时，强度也急剧下降了。因此，压力加工用黄铜的含锌量不超过 43%。

在铜锡合金状态图中， β 相随温度下降迅速进行分解 $\beta \rightarrow \alpha + \delta$ 。 δ 相是复杂立方晶格的电子化合物 Cu_3Sn ，在常温下极其硬脆，不能进行塑性变形。由于 δ 相的共析分解 $\delta \rightarrow \alpha + \varepsilon$ （ ε 是电子化合物 Cu_3Sn ）极端困难，以致在含锡量小于20%的合金中， ε 相实际上是不存在的，而铸造和一般退火组织中共析体是 $(\alpha + \delta)$ 相。图 1-5 说明含锡量大于 6~7% 后，塑性迅速降低，当含锡量大于 20% 后，由于组织中出现大量 δ 相，合金变脆，强度急剧降低。因此，压力加工用锡青铜的含锡量一般不超过 8%。含锡量小于 5% 的适宜于冷态变形，含锡量 5~7% 的适宜于热态变形。

锡青铜结晶温度间隔大， α 相常以枝晶组织出现，呈现晶内偏析。由于锡青铜中扩散过程极其缓慢，要经过多次变形和热处理才能消除这种枝晶组织，因此使锡青铜锭料的变形加工较困难。

在铜铝合金状态图中， β 相在 565°C 的共析反应 ($\beta \rightarrow \alpha + \gamma_2$) 只有在充分缓冷条件下才能进行，一般在 450°C 以下

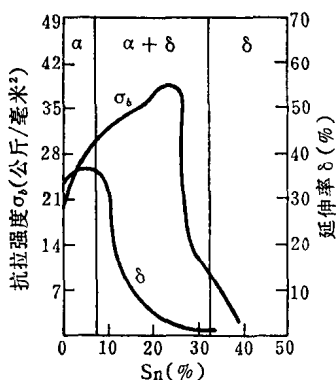


图 1-5 锡青铜机械性能与含锡量的关系

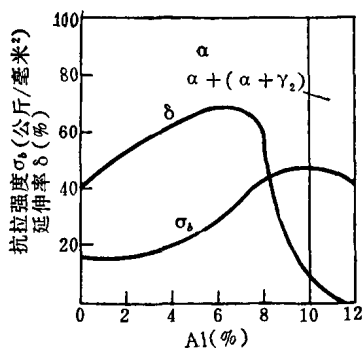


图 1-6 含铝量对铝青铜机械性能的影响

形成相当稳定的 β' 相。如 β' 相数量适当，分布均匀，则合金强度有较大提高，若 β' 相数量太多，合金将显现脆性。 γ_2 相是以电子化合物 Cu_9Al_4 为基的固溶体，是一种复杂立方晶格的脆性相。含铝量超过10%的铝青铜是由 $\alpha + (\alpha + \gamma_2)$ 相组成的。含铝量对铝青铜机械性能的影响示于图 1-6。当含铝量小于5%时，强度很低，当含铝量大于8%时塑性急剧下降。因此，压力加工用铝青铜的含铝量不超过11%。当含铝量为5~7%时，适宜于冷态变形加工，含铝量10%左右的适宜于热态变形加工。

第二章 铜和铜合金的可锻性

金属的塑性是指它在外力作用下能承受永久变形而不破坏其完整性的能力。影响金属这种塑性变形能力的因素很多，如变形程度、变形温度、变形速度、应力状态和晶粒大小等都对金属的塑性变形能力有很大影响。但是，在其它条件相同的情况下，金属的组织结构决定了它的塑性变形能力。如铜合金中具有面心立方晶格的 α 相在冷态或热态下变形能力极佳， β' 相只有在高温下转变为 β 相时塑性良好，而 $(\alpha + \beta)$ 两相组织在冷态下的塑性较 α 相差，只适宜于热态下变形。

可锻性是各种材料相对的塑性变形能力。因此，比较各种金属材料的组织结构，就能对各种金属材料的可锻性作出估价。

一、纯 铜

变形后退火的纯铜抗拉强度 $\sigma_b = 20 \sim 25$ 公斤/毫米²，延伸率 $\delta = 45 \sim 50\%$ ，这和热轧正火后的100%铁素体的纯铁性能($\sigma_b = 25$ 公斤/毫米²， $\delta = 50\%$)相差不多，有相当高的塑性变形能力，能承受冷态和热态下的变形加工。

二、黄 铜

1. 普通黄铜 表1-2中列有十一种牌号的普通黄铜。前八种(H196~H65)是单一的 α 相合金，又称为单相黄铜，具

有极佳的冷态和热态下的变形能力，在两次退火间按横截面积减小计算的最大冷变形程度可达90~75%。H63~H59具有 $(\alpha + \beta')$ 的两相，又称为两相黄铜，应加热后转变为 $(\alpha + \beta)$ 或 β 相时进行变形加工。

2. 特殊黄铜 黄铜中除铜和锌两种合金元素外，再加入其它合金元素的称为特殊黄铜。压力加工黄铜的合金元素加入量较少，使它能全部溶入固溶体中，以保证有足够的变形能力。实验证明，加入的合金元素并不生成新的相，而只影响 α 相和 β 相的数量比例。因此添加的合金元素对组织的影响大致相当于以一定的比值增减了锌。这个比值称为锌当量 η 。表2-1列举了各种合金元素的锌当量。 η 值大于1的合金元素，起增锌的作用， η 值小于1的合金元素，起减锌

表2-1 特殊黄铜中合金元素的锌当量

元 素	硅	铝	锡	铅	铁	锰	镍
η	10~12	4~6	2	1	0.9	0.5	-1.3~-1.7

的作用。因此，可利用合金元素的锌当量按下式求出特殊黄铜组织所相当的名义含锌量 X ：

$$X = \frac{A + \sum(C \times \eta)}{A + B + \sum(C \times \eta)} \times 100\%$$

式中 A ——特殊黄铜中锌的实际百分含量；

B ——特殊黄铜中铜的百分含量；

C ——添加的合金元素的百分含量。

求得特殊黄铜的名义含锌量后，就可以推断这种特殊黄铜的显微组织，从而近似地掌握它的塑性变形能力。应当指

出，用合金元素的锌当量确定特殊黄铜的组织是近似的，仅仅限于添加的合金元素量不超过百分之几。

铅黄铜 铅的加入主要是改善黄铜的切削加工性。铜-锌-铅三元系状态图表明，HPb74-3、HPb64-2、HPb63-0.1和HPb63-3四种合金在常温时是 α 相和元素铅。在850°C时是($\alpha + \beta$)相和液态铅。

因为在常温下元素铅呈细粒状分布于晶粒间，对 α 相的塑性没有显著影响。含铜量大于63%的黄铜，亦即接近饱和界限的单相合金，在850°C时虽为($\alpha + \beta$)相，但 β 相是少量的，实质上呈单相 α 晶粒，它在高温下易于长大而使液态铅积聚，有严重的热脆性。因此，这四种铅黄铜一般不进行热态下的变形加工。

HPb61-1、HPb60-3、HPb59-1和HPb59-1A四种合金在高温时呈($\alpha + \beta$)相和液态铅，由于铜含量降低使 β 相数量增加， α 相晶粒长大受到抑制，液态铅的积聚相当困难，从而减轻了热态下铅对变形的危害。因此，($\alpha + \beta$)相的铅黄铜能在热态下承受变形加工。由于HPb61-1和HPb60-3在常温下为单相的 α 铅黄铜，所以它们还能在冷态下变形。

锡黄铜 黄铜中加入锡显著提高耐蚀性。HSn90-1和HSn70-1是单相的 α 黄铜，所以具有良好的冷态和热态下的变形能力。HSn62-1和HSn60-1是($\alpha + \beta$)的两相黄铜，因此在热态下具有良好的变形能力。这两种锡黄铜在两次退火间按横截面积减小计算的最大冷变形程度分别可达30%和20%。

铝黄铜 加入铝可使黄铜提高强度和耐蚀性。铝使 α 固