

铜合金锻件常见的缺陷与对策

(一) 概述

铜的最大特点是具有很高的导电、导热性能，以及良好的耐蚀性。但是，工业纯铜的强度不高（约200MPa），因而限制了它作为结构材料的使用。

为了提高铜的强度，并赋予特殊的性能，在铜中加入适量的合金元素，从而获得铜合金。铜合金具有较高的强度、韧性、耐磨性以及良好的导电、导热性能，特别是在空气中耐腐蚀。因此，在电力、仪表、船舶等工业中得到了广泛的应用。一些要求强度高、耐热、耐压又耐蚀的轴类、凸缘类和阀体类零件都用铜合金锻件来制造。

铜合金主要分为黄铜和青铜两大类。以锌为主要合金元素的铜合金称为黄铜；以锡为主要合金元素的铜合金称为青铜。此外，还有白铜等其它铜合金。

黄铜的牌号、代号和化学成分见表 5-19。

变形青铜的牌号、代号和化学成分见表 5-20 及表 5-21。

表 5-19 黄铜的化学成分

组别	牌号	代号	化学成分（余量为锌）（质量分数）（%）						
			铜	铅	锡	锰	铝	其他	杂质≤
普通黄铜	90 黄铜	H90	88~91						0.2
	70 黄铜	H70	69~72						0.3
	68 黄铜	H68	67~70						0.3
	62 黄铜	H62	60.5~63.5						0.5
铅黄铜	60-1 铅黄铜	HPb60-1	59~61	0.6~1.0					0.5
	59-1 铅黄铜	HPb59-1	57~60	0.8~0.9					0.75
锡黄铜	62-1 锡黄铜	HSn62-1	61~63		0.7~1.1				0.3
	60-1 锡黄铜	HSn60-1	59~61		1.0~1.5				1.0
锰黄铜	58-2 锰黄铜	HMn58-2	57~60			1.0~2.0			1.2
铁黄铜	59-1-1 铁黄铜	HFe59-1-1	57~60		0.3~0.7	0.5~0.8	0.1~0.4	0.6~1.2 (铁)	0.25
镍黄铜	65-5 镍黄铜	HNi65-5	64~67					(镍) 5.0~6.5	0.3
硅黄铜	80-3 硅黄铜	HSi80-3	79~81					(硅) 2.5~4.0	1.5

表 5-20 锡青铜的化学成分

牌 号	代 号	化学成分（余量为铜）（质量分数）（%）
-----	-----	---------------------

		锡	磷	锌	铅	杂质≤
4-3 锡青铜	QSn4-3	3.5~4.0		2.7~3.3		0.2
4-4-2.5 锡青铜	QSn4-4-2.5	3~5		3~5	1.5~3.5	0.2
4-4-4 锡青铜	QSn4-4-4	3~5		3~5	3.5~4.5	0.2
6.5-0.1 锡青铜	QSn6.5-0.1	6~7	0.1~0.25			0.1
6.5-0.4 锡青铜	QSn6.5-0.4	6~7	0.3~0.4			0.1
7-0.2 锡青铜 4-	QSn7-0.2	6~8	0.1~0.25			0.3
0.3 锡青铜	QSn4-0.3	3.6~4.0	0.2~0.3			0.1

表 5-21 特殊青铜的化学成分

组别	牌号	代号	化学成分（余量为铜）（质量分数）（%）					杂质≤
			铝	铁	锰	镍	其它	
铝青铜	5 铝青铜	QAl5	4~6					1.6
	7 铝青铜	QAl7	6~8					1.6
	9-2 铝青铜	QAl9-2	8~10			1.5~2.6		1.7
	9-4 铝青铜	QAl9-4	8~10	2~4	1~2			1.7
	10-3-1.5 铝青铜	QAl10-3-1.5	9~11	2~4				0.75
	10-4-4 铝青铜	QAl10-4-4	11	3.3~5.5		3.5~5.5		0.8
	铍青铜	5 铍青铜	QBe2				0.2~0.6	铍 1.0~2.2
2.15 铍青铜		QBe2.15					铍 2.0~2.3	1.2
2.5 铍青铜		QBe2.5				0.2~0.5	铍 2.3~2.6	0.5
1.7 铍青铜		QBe1.7				0.2~0.4	铍 1.6~1.85 钛 0.10~0.25	0.5
1.9 铍青铜		QBe1.9				0.2~0.4	铍 1.85~2.10 钛 0.10~0.25	0.5
硅青铜		1-3 硅青铜	QSi1-3			0.1~0.4		硅 0.6~1.1
	3-1 硅青铜	QSi3-1					硅 2.75~3.5	1.1
锰青铜	5 锰青铜	QMn5			4.5~5.5			0.9
镉青铜	1 镉青铜	QCd1					镉 0.9~1.2	
铬青铜	0.5 铬青铜	QCr0.5					铬 0.4~1.0	0.5

纯铜中的杂质主要有铅、铋、氧、硫、氢等。铜中杂质的存在不仅对使用性能有较大影响，而且对铜的工艺性能也有极坏的作用。

加热温度和变形程度对铜合金的组织 and 性能影响很大，当变形程度处于临界变形程度范围时，将引起粗晶。铜合金的临界变形程度范围大致是 10%~15%，温度愈高，变形和再结晶后的晶粒尺寸也愈大。

对于 $\alpha+\beta$ 铜合金（包括 H62、H68、HPb59-1、QAl19-4 等），如果加热温度超过 $\alpha+\beta\rightarrow\beta$ 的转变点，此时由于失去了 α 相对 β 相晶界迁移的机械阻碍作用，因而晶界迁移速度很快， β 晶粒迅速长大，使合金塑性降低，锻造中容易开裂，并常在锻件表面出现“蛤模皮”。粗化后的铜合金晶粒，即使采用大变形程度进行塑性变形，再结晶后的晶粒也是很粗的。这是因为铜合金的层错能低，动态再结晶的速度快，而且，大变形时的热效应也较显著，故在高温下很快再结晶并迅速长大。

铜合金锻件组织中产生粗晶后，不能像碳钢那样，通过热处理的办法加以细化。因此，将使产品的力学性能降低（见表 5-22）。

表 5-22 过热与未过热试样的力学性能

试样情况	σ_b /MPa	δ (%)	试样情况	σ_b /MPa	δ (%)
过热粗晶	290	34.5	正常细晶	415	44

冷变形和冷变形加时效处理对铜和铜合金性能有较大影响。

纯铜的强度较低，但塑性很高。因此，可以通过冷态形变使其强化。图 5-24 为变形程度对纯铜力学性能的影响。冷变形使铜的强度和硬度有较大提高，但塑性指标显著降低。冷变形使铜的电导率稍有降低（约 2.7%）。纯铜一般是在加工硬化状态下用作导线。

还有些铜合金，也需用冷变形来提高其强度和硬度。例如，制造电极用的镉青铜（含镉的质量分数为 0.8%~1.2%），经过冷变形后，可使抗拉强度从原来的 600~850MPa 提高到 1100MPa。锆青铜也常用于制造滚焊轮，硬度要求为 100~140HBS，而一般热锻和固溶时效达不到技术要求。因此，锆青铜滚焊轮一般是热锻后，950℃固溶处理，再冷变形和时效处理。

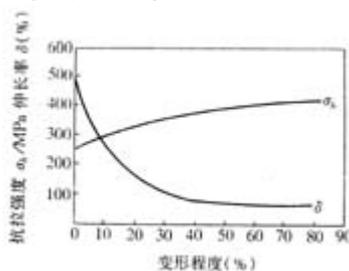


图 5-24 变形程度对纯铜力学性能的影响

铜合金的锻造特点是：

1. 多数铜合金在室温和高温下具有良好的塑性

大多数铜合金在室温和高温下塑性很好，可以顺利地进行锻造，而且对应力状态和变形速度均不敏感，即使在高速变形或具有拉应力存在的条件下变形仍具有足够的塑性。图 5-25~图 5-27 为几种黄铜和青铜的塑性图。

但是，有少数铜合金，例如，含锡较高的锡磷青铜（如 QSn7-0.2）和含铅较高的铅黄铜（如 HPb59-1、HPb64-2），塑性较低，对拉应力状态较敏感。在静拉伸应力状态下变形时，QSn7-0.2 在室温呈单相 α 固溶体，具有很高的塑性，可以在冷变形，但在高温下塑性很低（见图 5-27），其原因是在高温下有低熔点的 ($\alpha + \beta + \text{Cu}_3\text{P}$) 共晶体存在。含铅较高的铅黄铜对变形速度很敏感，在静拉伸和动拉伸二种变形条件下的塑性有明显不同（见图 5-28），这类铜合金适合在压力机上进行锻造。

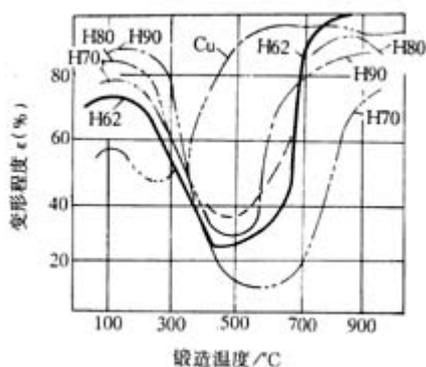


图 5-25 黄铜的塑性图

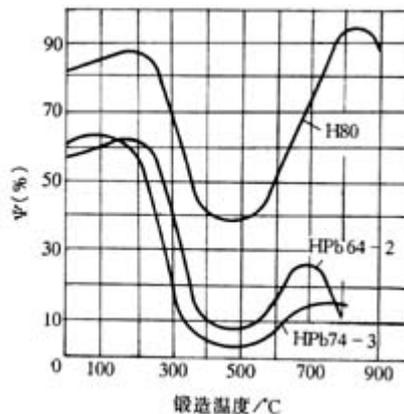


图 5-26 铅黄铜的塑性图

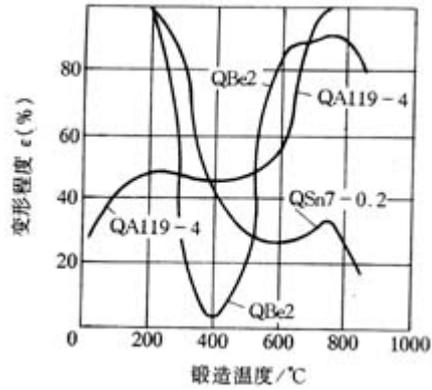


图 5-27 青铜的塑性图

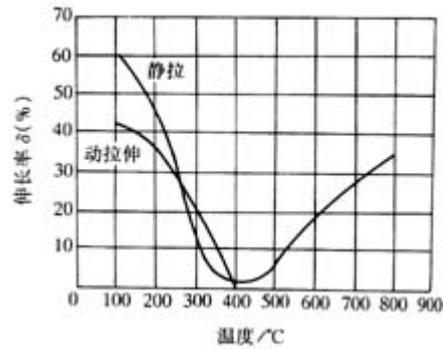


图 5-28 HPb74-3 铅黄铜在不同温度下的力学性能

2. 存在中温脆性区

从图 5-25、图 5-26、图 5-27 可以看到，铜合金存在中温脆性区。以黄铜为例，在 20~200°C 和 650~900°C 两个温度范围内有很高的塑性，而在 250~650°C 之间是一个脆性区，合金的塑性显著降低，很容易锻裂。其原因是合金中有铅、铋等杂质存在，它们在 α 固溶体中的溶解度极小，与铜形成 Cu-Pb 和 Cu-Bi 低熔点的共晶体，呈网状分布于 α 固溶体的晶界上，从而削弱了 α 晶粒之间的联系，当加热到 500°C 以上时，发生 $\alpha \rightarrow \alpha + \beta$ 转变，铅和铋溶于 β 固溶体中，于是塑性提高。表 5-23 为几种铜合金的脆性温度区。

由于中温脆性区的存在，很多铜合金的 $\alpha + \beta$ 双相区的塑性比 α 单相区的塑性好。因此，锻造变形主要在 $\alpha + \beta$ 双相区的温度范围进行。

3. 锻造温度范围窄

铜合金的锻造温度范围比碳钢窄。所有铜合金的锻造温度范围都不越过 100~200°C，其中铅黄铜 HPb59-1、铝黄铜 HA177-2、HA160-1-1、HA159-3-2 及锡青铜 QSn7-0.2、QSn6.5-0.4 等合金的锻造温度范围尚不足 100°C。以 HPb59-1 为例，当加热温度超过 $\alpha + \beta \rightarrow \beta$ 转变温度（~700°C）时， β 晶粒急剧长大，使塑性降低；当变形温度低于 650°C 时，变形抗力迅速增大，并可能进入中温脆性区。

表 5-23 几种铜合金的脆性温度区 ($\epsilon < 40\%$)

合金牌号	脆性（可低塑性）区/ °C	合金牌号	脆性（可低塑性）区/ °C
H62	250~650	QA15	370~530
H68	250~650	QSn4-4-2.5	>300
H80	400~500	QSn6.5-0.1	420~620
H90	400~650		
HPb64-2	>300		
HPb74-3	>250		

4. 导热性好

铜具有很高的导热性，热导率 λ 为 385.48 W/m°C。铜中加入合金元素后，导热性有所降低。例如，H62 黄铜的热导率 λ 为 108.94 W/m°C；QA14 铝青铜的热导率则更低些，为 58.66 W/m°C。但总的来说，铜合金的导热性比钢好，而且铜合金的导热性随温度升高而增加。所以，铜合金可以直接高温装炉，快速加热。

由于铜合金的导热性好，锻造时应采取必要的工艺措施，以尽量减少金属的热量散失。

5. 某些铜合金的热效应现象较显著

一些铜合金，例如锡磷青铜和锰青铜，锻造时热效应现象较显著。若变形速度过快，则由于热效应的作用，容易产生过热，甚至过烧。含铅量较高（超过 2.5%）的铅黄铜模锻件，在变形程度较大的部位极

易开裂。其原因也就是由于变形程度较大的部位热效应显著，使合金的温度升高，引起合金中低熔点杂质的熔化，破坏了晶间的联系。

另外，铜合金锻造时的外摩擦系数较大，所以流动性较差，模锻时难以成形。

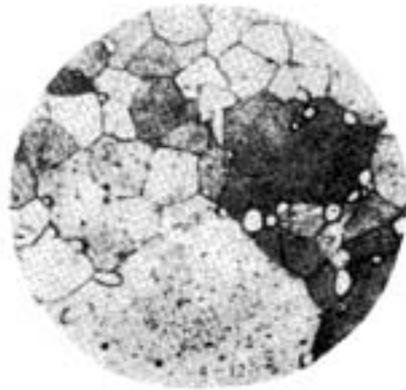
（二）铜合金锻造过程中的缺陷与对策

1. 过热、过烧

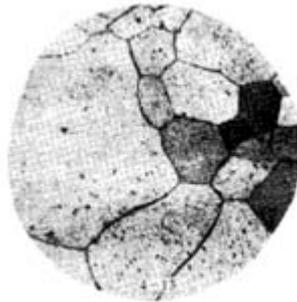
铜合金加热温度超过始锻温度时要产生过热， α 黄铜和 $(\alpha+\beta)$ 黄铜的过热倾向较大。这类黄铜，如加热温度超过 β 转变温度，晶粒会剧烈长大，锻造时坯料形成桔皮表面，甚至开裂。过热的 $(\alpha+\beta)$ 黄铜和 $(\alpha+\delta)$ 铝青铜等快冷时，要出现魏氏组织。为避免过热这类铜合金的加热温度不宜超过 β 转变温度，即在 $(\alpha+\beta)$ 两相区锻造为宜。

图片 5-32、5-33 是不同加热温度下铅黄铜的高倍组织。铅黄铜的含铜量变动范围较大（57%~60%），其实际含铜量对其 β 转变温度影响很大。因此，确定这种铅黄铜的转变温度时要考虑到实际铜含量的影响。根据试验，HPb59-1 加热温度控制在 710~730℃为宜。

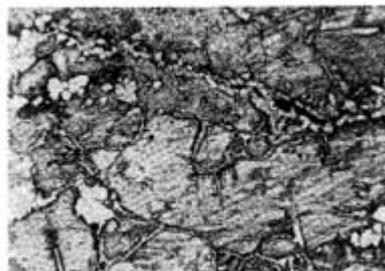
铜合金过烧时，模锻件表面粗糙，无金属光泽，边缘处开裂；自由锻时开裂更为严重。铜合金过烧后，断口氧化很严重，无金属光泽，裂纹沿晶界扩展。图片 5-34 为 HPb59-1 铅黄铜产生轻微过烧的显微组织。从图中可看到， β 晶粒粗大，部分 α 相沿 β 晶界析出，部分呈块状在晶内析出，裂纹沿晶界扩展。图片 5-35 是 HMn58-2 铜合金严重过烧的实物图片。



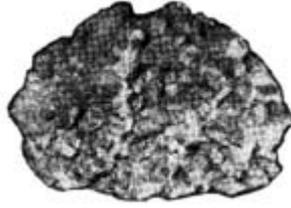
图片 5-32 HPb59-1，740℃、7.5min 盐水淬火后的显微组织 250×



图片 5-33 HPb59-1，785℃、8min 盐水淬火后的显微组织 250×



图片 5-34 HPb59-1 铜合金锻造裂纹沿晶界扩展 100×



图片 5-35 HMn58-2 铜合金严重过烧

为防止过热、过烧，应严格控制加热温度和时间。在油炉和煤炉中加热时，更应准确控制炉温以保证加热质量。为避免火焰直接喷射到坯料上引起局部过烧，可以在坯料上面覆盖一层薄铁皮。

2. 锻造裂纹

铜合金锻裂的原因主要有以下几方面：①坯料内部或表面有缺陷；②锻造温度不合适，材料塑性低；③变形程度过大或拉应力过大。

钢锭的表面质量较差，内部也常常有较严重的偏析，锻造时常易开裂。因此，钢锭需经均匀化退火，锻前要进行车皮。

锻造温度对铜合金的塑性影响很大。铜合金中由于加入了大量合金元素，始锻温度低，锻造温度范围窄，并存在中温脆性区。加热温度过高，容易产生过热、过烧，引起锻裂或粗晶。锻造温度过低时，有些铜合金（例如铁青铜），由于再结晶不充分，塑性降低，也常常产生裂纹。图片 5-36 是在高速锤上锻造的黄铜螺母，锻造温度在 250~650℃ 范围内，在转角处均出现了裂纹，后来把锻造温度提高到 750℃ 就再未出现裂纹。因此，要控制锻造温度不要过高或过低，并要避开中温脆性区。有些钢合金锻件由于变形程度过大（热效应显著）或局部地方应力集中等原因也常产生锻裂。自由锻操作时，要勤翻轻击，避免在同一方向连续重击，以防止因热效应而引起过热、过烧。



图片 5-36 H62 铜合金在脆性温度范围内锻裂情况

3. 切边撕裂

铜合金锻件在胎模锻和模锻后，如立即进行切边，往往会在切边处有撕裂锻件本体的现象。当锻件冷却后再切边时，就可避免这种缺陷。

4. 折叠

铜合金变形时，表面容易起皱。因此，较易产生折叠。例如，拔料时，如变形后的台阶较尖锐，在第二次锤击时就容易产生折叠。又例如，当阀体锻件的大本体上有小管接时，如采用压肩倒角的成形工艺，小管接处会由于变形不均匀产生缩孔；若再用墩粗法将其端面拍平，便会在管接与本体交接处形成折叠。因此，锻造铜合金时，工具和模具转角处的圆角半径要大一些，并注意润滑；对于一些高度与直径比例不大的管接，适于采用在漏盘中挤压成型；对较易产生折叠的铜合金锻件，要考虑到以后的清理，在确定加工余量和计算用料时，应比碳钢取得大些。

5. 晶粒粗大

铜合金晶粒长大后不能像碳钢那样通过热处理加以细化，因此，晶粒粗大将使产品性能下降。铜合金晶粒粗大的原因：①坯料过热；②终锻温度过高；③锻造时的变形程度处于临界变形程度范围（10%~15%）内。

为了避免形成上述粗大晶粒，应当注意以下几点：①锻造时每次变形程度应大于 10%~15%；②为保证适宜的终锻温度，应根据成形方式和变形量大小选择合适的始锻温度。例如，QA19-11 合金胎模锻时

900℃始锻，而自由锻时 850℃始锻，原因是胎模锻较自由锻散热快。③ ($\alpha+\beta$) 黄铜和青铜的加热温度应稍低于 $\alpha+\beta\rightarrow\beta$ 的转变温度。

6.应力腐蚀开裂

如果铜合金锻件内存在残余应力，则在潮湿大气中，特别是在含氮盐的大气中会引起应力腐蚀开裂，也称季裂。防止这种缺陷的对策是：①锻造时，应使锻件上各处的变形量和变形温度比较均匀。例如，锻造长轴类锻件时，应将工件经常调头变形，使各部分的变形温度相近，以减小内应力；②铜合金锻造后，要及时在 260~300℃范围内进行消除应力退火。

7.氢气病

所有高铜的铜合金（如 H90），铝青铜及铜镍合金，在高温下极易氧化。含有氧的铜合金，如在含有 H_2 、 CO 、 CH_4 等的还原气氛中加热，则这些气体会向金属内扩散，与 Cu_2O 化合而生成不溶于铜的水蒸气或 CO_2 。这种水蒸气具有一定的压力，力图从金属内部逸出，结果在金属内部形成微小裂纹，使合金变脆，即所谓氢气病。因此，加热铜合金时，炉子气氛最好是中性的。