

铝锌镁系高强度铸造铝合金

王乘安 许长林 等

摘要: 本文叙述了铝锌镁高强度铸造铝合金 ZL24(S) 的特点, 它抗拉强度高, 热处理后 σ_b 为 27—35kg/mm², 加工后表面光洁度高, 另件在使用过程中尺寸稳定性好, 合金对产生针孔的敏感性较小, 合金不需要变质处理, 熔炼工艺简单, 铸件可在空气中淬火, 因此比水淬变形小。合金的化学成分为: 3.5—4.5%Zn, 1.5—2.2%Mg, 0.3—0.6%Mn, 0.2—0.3%Ti 其余为铝, 有害杂质铁明显降低机械性能, 因此限制在0.5%以下, 文章叙述了熔炼工艺, 合金的热处理规范: T₆ 为 540±5℃保温 6 小时, 在空气中冷却, 然后 160℃保温 16 小时, 铸态时效可采用 180—190℃保温 8 小时, 此外还谈到了热处理规范对另件尺寸稳定性的影响。

四十年代以后, 铝锌镁系铸造铝合金在许多国家中得到推广和应用, 因为这类合金铸态强度高, 热处理以后更能显著强化, 具有令人十分满意的机械性能, 所以应用日益广泛。这类合金牌号很多, 现将一些主要的合金牌号及化学成分列于表 1。我们仅以 ZL24(S) 合金为例加以叙述。ZL24(S) 这是我们所内的标准, 在十多年的大量生产实践中我们体会到, 这个合金具有高的机械性能, 加工后具有高的表面光洁度, 另件在使用过程中具有高的尺寸稳定性, 就是说随着时间的变化而另件几何尺寸基本保持不变, 达到相对稳定。这一点与铝硅系合金 ZL10、ZL11 和铝镁系合金 ZL5 相比具有突出的优点, 它们淬火以后残余应力大, 铸件尺寸稳定性不好, 尤其制造精密另件它们往往不能满足要求。

ZL24(S) 铝合金具有良好的抗腐蚀性能和焊接性能, 特别是产生针孔的倾向性较小, 用 ZL24(S) 铝合金浇注的大型铝铸件可以得到 1 级针孔度或没有针孔的优质铸件。

ZL24(S) 铝合金具有良好的铸造性能, 在砂型铸造中可以浇注成从 50 克到 300 公斤的各种复杂铸件。虽然铸造性能不如铝硅合金好, 但生产实践证明, 它是能够满足各种铸件要求的性能良好的合金。我们将 ZL24(S) 铸造铝合金、应用于光学精密机械结构件的

生产上, 取得了良好的结果。这一合金的铸态抗拉强度在 20kg/mm² 以上, 热处理后, 抗拉强度可达 27~35kg/mm²。为高强度铸造铝合金的一种。

一、合金的化学成分及各组元的作用

ZL24(S) 铝合金的化学成分列于表 2。

表 2

主要化学成分 %					杂质含量 (不大于)		
Zn	Mg	Mn	Ti	Al	Fe	Cu	Si
3.5~4.5	1.5~2.2	0.3~0.6	0.2~0.4	余量	0.5	0.6	0.3

锌和镁是合金的主要强化元素, 当锌含量低于 3% 时, 热处理后强化不明显, 机械性能低, 当锌含量增加时, 强度亦随之显著增加, 而延伸率下降, 当含锌量达到 6~7% 时, 抗拉强度高达 40kg/mm² 以上, 但延伸率低于 1.0%, 只有含锌为 4.0%, 镁为 2.0% 时, 合金具有良好的综合机械性能, 抗拉强度为 27~35 公斤/毫米², 延伸率 2~5%。

镁也是该合金的主要强化元素, 当含镁

表 1

合金牌号	国名	化 学 成 分										备 注				
		Zn	Mg	Mn	Ti	Cr	Cu	Fe	Si	Ni	Zr					
7075	美国	5.1-6.1	2.1-2.9	<0.3	<0.2	0.18-0.4	1.2-2.0	<0.7	<0.5							
7079	美国	3.8-4.8	2.9-3.7	0.1-0.3	<0.1	0.1-0.25	0.4-0.8	<0.2	<0.3							
7178	美国	6.3-7.3	2.4-3.1	<0.3	<0.2	0.18-0.4	1.6-2.4	<0.7	<0.5							
×7002	美国	3.5	2.5	0.2	—	0.2	0.75	—	—							
×7005	美国	4.5	1.25	0.5	—	0.1	—	—	—							
×7006	美国	4.25	2.25	0.2	—	0.1	0.1	—	—							
×7039	美国	3.5-4.5	2.3-3.3	0.1-0.4	<0.5	0.15-0.25	<0.1	<0.4	<0.3							
ZG32A	美国	2.7-3.3	1.4-1.8	0.4-0.6	<0.25	0.2-0.4	<0.2	<0.8	<0.2							用于砂型及金属型
ZG42A	美国	4.0-4.5	1.8-2.4	0.4-0.6	<0.25	0.2-0.4	<0.2	<0.8	<0.2							用于砂型
ZG61A	美国	5.2-6.0	0.5-0.65	<0.3	—	0.4-0.6	<0.3	<1.0	<0.25							" "
ZG61B	美国	6.0-7.0	0.6-0.8	<0.05	0.1-0.25	—	0.35-0.65	<0.5	<0.15							" "
HSD	日本	8.0	1.5	0.6	—	0.25	1.2	<0.6	<0.5							
HD I	日本	5.0-5.8	1.5-2.2	0.5-1.0	—	0.2-0.5	<0.8	<0.6	<0.5							
HD II	日本	4.5-5.5	1.2-2.2	0.3-0.8	—	0.1-0.4	<0.8	<0.6	<0.5							
S社Al-Zn-Mg合金(特许)	日本	6.0	2.0	—	0.2	0.3	—	—	—					1.0		
DTD500SA	英国	4.8-5.7	0.5-0.7	<0.1	0.15-0.25	0.5-0.6	<0.1	<0.5	<0.25							
ISO15	英国	4.5-6.0	0.2-0.7	<0.4	0.1-0.3	0.15-0.6	<0.35	<1.0	<0.3							
A-Z 5 G	法国	4.5-5.5	0.4-0.65	<0.4	0.15-0.35	0.15-0.35	0.15-0.35	<0.8	<0.3					<0.05		
B-15	苏联	3.5-4.5	1.4-1.75	0.2-0.3	—	0.25	0.3-0.6	<0.3	<0.3							
An24	苏联	3.5-4.5	1.5-2.0	0.2-0.5	0.1-0.2	—	—	—	—							≤0.2
AlZnMg3	西德	4.2-5.3	2.0-3.0	0.1-0.6	<0.2	0.1-0.3	—	<0.7	<0.7							
AlZnMgCu0.5	西德	3.8-5.2	2.4-3.8	0.1-0.6	<0.1	0.1-0.3	0.4-1.0	<0.5	<0.5							
AlZnMgCu1.5	西德	5.1-6.1	2.1-2.9	<0.3	<0.1	0.18-0.4	1.2-2.0	<0.7	—							
74S	加拿大	4.0-4.6	1.4-2.0	0.2-0.4	—	—	<0.1	<0.4	<0.25							
C74S	加拿大	3.7-4.3	0.5-1.0	<0.1	—	—	<0.1	<0.4	<0.25							

量低于0.5%时,热处理后不能强化,机械性能低,随着含镁量的增加强度提高,当含镁量达到1.5%时可以实现有效地强化,但延伸率下降,当含镁量为1.5~2.2%时,合金具有很好的综合机械性能。

锰(Mn):对此合金有提高强度的作用,同时还可以抵抗晶间腐蚀、提高抗应力腐蚀的能力。锰可以和铁生成化合物,以降低杂质铁在合金中的有害作用,因此锰在合金中起着良好的作用。

钛(Ti):合金中加入钛与铝生成 Al_3Ti ,它可以细化合金晶粒,一般在铝合金中加入0.2~0.4%Ti,就能有效地细化合金晶粒和提高机械性能,过多的钛,反而会形成大块的 Al_3Ti 偏析物,起不到结晶核心的作用,因此使合金性能变坏。

铁(Fe):铁在此合金中是杂质,它与Al、Mn、Si、Mg等化合,生成复杂的脆性化合物,降低合金的抗拉强度和延伸率。具体实验数据列于表3。

表3

含Fe量 (%)	δ_0 , kg/mm ²	δ %	合金成分	备注
0.16	28.6	2.0	1.0%Zn, 1.8% mg 0.5%Mn, 0.2%Ti	三根 试棒平 均值
0.42	27.6	1.4	" "	四根 试棒平 均值
0.84	25.6	1.1	" "	四根 试棒平 均值

可见随着含铁的增加抗拉强度和延伸率都下降,当含铁量增加到0.84%时,抗拉强度和延伸率都有明显的下降,因此在合金中必须限制铁的含量,一般 $Fe \leq 0.3\%$ 为宜,不能超过0.5%。

二、合金的熔炼

铝合金的熔炼是铸造生产中获得良好致密铸件的十分重要的环节,因此为了提高铸件质量,获得无气孔、针孔铝铸件,必须充

分考虑合金熔炼过程中每个重要环节。

(一) 炉料的准备:

熔炼所使用的金属原材料见表4。

所有炉料应该清洁,表面没有脏物及油污,铝锭及中间合金加料前应该扫除灰尘,去除油污,然后放入坩锅中。回炉料要用钢刷刷干净或经过吹砂处理再装入坩锅中。浇

表4

炉料名称	牌 号	成 分 %
铝 锭	特一号铝(苏A00)	铝不少于99.7
锌 锭	二 号 锌	锌不少于99.9
镁 锭	一号镁或二号镁	镁不少于99.8
铝锰合金	自 制	含10%Mn
铝钛合金	自 制	含4~6%Ti

注一般铸件时回炉料(指废铸件或浇冒口),一般不超过炉料总重的50%,其余为新料。浇注重要铸件应该全用新料。如果回炉料过多,带进脏物及夹杂的可能性就大,铸件则容易产生气孔、针孔和夹杂等铸造缺陷,生产中常常遇到这种情况。

所有炉料均应予热,当用电阻炉坩锅熔炼时,铝锭及中间合金可随炉升温完成予热过程。但是当炉中尚有较多合金液体再加入新料时,应该予热到300~400℃、镁块应放入箱式炉中予热到250~300℃、保温1~2小时,使蜡及油完全烧掉。锌块加入前也要予热到200~300℃。炉料予热不仅能去除水分、油污、而且能加速其熔化过程。

(二) 熔化过程

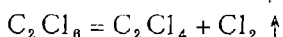
1. 合金配料成分推荐为4.2%Zn、2.0%Mg、0.5%Mn、0.25%Ti,铝余量。

2. 熔炼工具和坩锅应该仔细清理干净,每次使用前应予热并喷上涂料,顺序为:回炉料→铝锭→铝铜、铝钛中间合金,全熔后、合金升温至680°~690℃时平稳加入予热过的锌块,并搅拌均匀,当升温至710°~720℃时加入予热过的镁块,用压罩

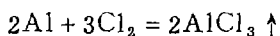
分批压入合金中，每次压入后，保持一定时间，约15~30秒，之后再压下一次，每次压入后要等镁熔到铝液中去，压罩再抬起，否则镁就会浮到表面上来，很快氧化燃烧。镁全加完后搅拌几下。合金升温到750℃进行精炼。下面谈谈精炼中所使用的去气剂：我们在生产中采用过氯化锌（ZnCl₂）、氯化锰（MnCl₂）和六氯乙烷（C₂Cl₆）。ZnCl₂和MnCl₂都极易吸潮结块，ZnCl₂比MnCl₂更为严重，这是氯化物的普遍缺点，因此使用前需要将它烘干，之后妥善保管，以备使用。此外MnCl₂在烘干时，其中一部分MnCl₂转变成氯酸锰，使去气能力大大降低。ZnCl₂和MnCl₂去气效果差，用它们精炼合金不能彻底去除合金中的气体，对于一般中小型的金属型铸件或薄壁的砂型铸件，可以得到致密铸件，但是对于大型厚壁铸件，往往不能得到好的效果。

C₂Cl₆是一种白色结晶体，比重是2.091克/厘米³，升华温度为185.5℃。C₂Cl₆是有机物、不吸潮、容易保存，根据有的资料介绍C₂Cl₆为MnCl₂去气能力的二倍，用C₂Cl₆精炼的合金含氢量比用等量ZnCl₂精炼的低30%、可见它的去气能力强，由于C₂Cl₆具有这些优点，所以现在在生产中已经广泛应用。

大家知道C₂Cl₆在熔融的合金中受热分解，生成四氯乙烯和氯气，即：



生成的氯气部分与铝作用，生成氯化铝

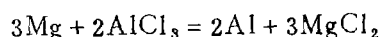


氯化铝沸点为183℃、四氯乙烯沸点为121℃、在精炼的温度下二者都是气体，这种气体具有强烈的去气能力，非常细小的气泡，在上浮的过程中，溶于合金中的氢气则扩散到气泡中，气泡逐渐上升，逐渐扩大，最后从合金液中析出，同时氯化铝还能吸附合金中的氧化夹渣，浮到合金液的表面上形成熔渣。

六氯乙烷精炼含镁的铝合金时，还可以

生成氯化镁： $Mg + Cl_2 = MgCl_2$

部分AlCl₃和Mg作用：



生成的氯化镁去气能力很低，它的熔点712℃，在固态时吸附在AlCl₃、C₂Cl₄的气泡上，阻碍气体的扩散，所以精炼温度不能低于712℃。当温度上升超过712℃时它变为液体，它具有一定的去气能力，它包围在AlCl₃气泡周围，延缓上浮速度，使去气数量增加，同时液态的氯化镁对于合金液有一定的复盖作用。

由于六氯乙烷是一种粉状物质，它的升华温度很低，所以为了有足够的精炼时间，充分发挥去气作用，将它压成圆柱体，比重约1.83克重/cm³，每块尺寸可为φ50×60mm，重量为200克左右。我们采用的精炼剂除了六氯乙烷还加入了氟硅酸钠（Na₂SiF₆）和氟化钠（NaF）、它们组成的重量比是：六氯乙烷75%、氟硅酸钠12.5%、氟化钠12.5%把它们混拌均匀，然后在压力机上，将它们压制成块。

加入氟硅酸钠和氟化钠的目的是为了延缓去气剂在合金液中的反应速度，使合金液面沸腾而不是飞溅，延长去气时间，以取得更好的除气效果。另外氟硅酸钠和氧化铝作用生成冰晶石（Na₃AlF₆）吸附悬浮于合金液中的氧化夹渣。

精炼时将去气剂分几次用钟罩压入合金内，压到熔池深度的2/3、然后作均匀的圆周运动，到合金液面停止产生气泡为止。一般精炼10—13分钟，所用去气剂数量为合金液重量的0.6—0.7%为最好。

铝合金液随着温度的升高吸气量增加，所以一般熔炼温度不要超过780℃，合金精炼后需搅拌一分钟，防止合金成分的偏析，如果不搅拌则会出现上部合金液含锌2—3%，下部合金液含锌5—6%的偏析现象，搅拌后扒渣，之后即可进行浇注。一般精炼后要求静止5—10分钟，使渣质上浮，为了防止偏析，静止时间不要过长。

合金在正个熔炼过程中，一般可以不用复盖剂，同样可以得到良好的结果。因为在形成熔池后表面铝被氧化形成 Al_2O_3 ，这是一层非常致密的膜，复盖在液态合金表面，从而可以防止外界气体在熔炼过程中侵入合金中，同时也可以防止合金液再继续遭到氧化。

3. 熔炼的几点体会：

- a. 为了提高铸件质量，减少气孔、针孔、夹渣，回炉料不宜过多；
- b. 去气剂最好选用六氯乙烷，压成块状使用，数量为0.6—0.7%为宜；
- c. 精炼温度应高于712℃，选用740—750℃为好，合金温度不要超过780℃，这样既能充分除气，又能减少吸气；
- d. 熔炼时可以用不用复盖剂，简化熔炼工艺，

表 5

状 态	σ_b , kg/mm ²	δ %	HBkg/mm ²	a_k , kg·m/cm ²	Ekg/mm ²
铸 态	18~21	2.5~5.0	70~80	—	—
时 效	24~25	1.7~2.0	100~105	—	—
淬火时效	26~35	1.5~2.8	100~115	0.2~0.35	6900

合金的物理性能：比重为2.7克/厘米³、热膨胀系数（当20~100℃时） $\alpha = 24.5 \times 10^{-6}$ mm/mm·度，热传导系数 $\lambda = 0.28$ 卡/厘米·秒·度。以上数据是热处理后测得的。

四、合金的热处理及金相组织

在一些情况下，由于这个合金的铸态强度高，而不采用热处理直接使用，普通铸件通常采用人工时效160~170℃保温16小时或者采用180~190℃时效8小时。

为了获得高的机械性能、必须进行淬火和时效处理。这个合金淬火温度对机械性能的影响并不太显著。当采用580℃淬火150℃时效时会得到高的抗拉强度和较好的延伸

节约熔剂和避免铸件中产生非金属夹渣；
e. 加强搅拌，避免偏析。

这些工艺措施，都是在生产中反复实践总结出来的，认真执行它，就能得到良好的产品质量，但是如果马乎大意，草率从事，往往就会影响产品质量，形成针孔、渣孔等不应有的铸造缺陷。

三、合金的机械性能 and 物理性能：

ZL24(S)合金的机械性能数值列于表 5。其中合金时效采用160—170℃保温16小时， T_0 采用540℃保温6小时后空冷，时效同样采用上述规范。

率、但是应该指出580℃淬火接近合金的固液相线(590°~600℃)、在生产中可能产生过烧，所以淬火温度最好选在540°~560℃之间，保温4~6小时、完全可以获得高的机械性能和良好的延伸率。比采用580℃淬火的抗拉强度略低1~2 kg/mm²、但延伸率却可以提高1~1.5%。

这个合金由于固溶体分解的速度慢、在空气中冷却能够固定转变的固溶体、因此合金在空气中淬火即可、而不一定要求水淬、 $\phi 12$ mm 砂型铸造试棒空冷并不比水冷机械性能低、同时还可以减少铸件淬火应力和淬火变形。

试棒随炉加热到540℃保温6小时，后在空气中冷却，分别做160°~170℃时效16小时和180°—190℃时效8小时的试验、所得机械性能数值列于表6。

表 6

时效规范	δ_b , kg/mm ²	δ_s , %	合金的主要成分
160~170℃ 保温16小时	26.1	2.5	3.8%Zn, 1.57%Mg, 0.55%Mn, 0.2%Ti
180~190℃ 保温8小时	28.3	2.1	" "

从机械性能的角度看,180~190℃保温8小时效果好些。

铸件经过淬火及时效,不但要获得最高的机械性能而且要获得最好的尺寸稳定性、从而确定最合适的热处理规范。为此我们做了在时效过程中尺寸稳定性随时间变化的实验。在实验中我们将试件贴上应变片放在烤箱中进行时效,在时效中铸件组织发生变化、所以铸件内的应力也发生变化,应力的变化所产生应变的变化可以从应变仪上读出。这样得到时间和微应变间的关系曲线、如图1、图2所示、从图1中可以看到开始阶段随着时间的变化、微应变也有较大的变化,曲线斜率较大、但是12小时以后曲线平直、微应变变化很小,这说明时效已经充分、组织变化基本结束、合金进入稳定阶段。同理从图2中可以看到试件经过7—8小时进入稳定阶段。因此认为时效采用160—170℃保温16小时或180—190℃保温8小时是合适的。

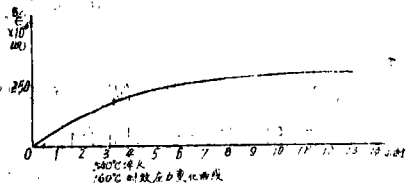


图 1

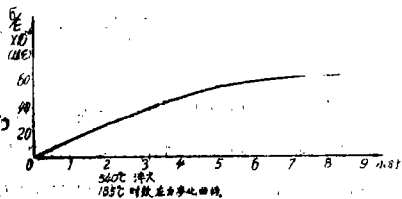


图 2

精密零件往往需要粗加工后再精加工,而机械加工又在零件上形成新的加工应力,再加上原有的残余应力、仍然会使零件几何尺寸发生变化、所以为了得到尺寸稳定的零件、粗加工后需要再进行一次160℃保温8小时的时效、有的特殊零件甚至需要2次、经过这种处理机械加工应力得到消除、零件具有很好的尺寸稳定性、文献^[1]指出采用540℃淬火应力小、通过时效并可以进一步消除,因此有利于零件的尺寸稳定性,同时保持着较高的延伸率、因此大都采用540℃淬火。

合金的金相组织:

从Al—Zn—Mg合金状态图的铝角(图3)就可以知道它的金相组织为:含有大量锌和镁的三元固溶体(即 α 固溶体)和强化相T($Al_2Mg_3Zn_3$)和个别的夹杂相($MgZn_2$)以及含有锰的相。

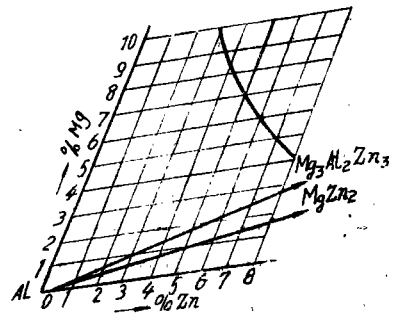


图 3

合金的金相显微组织如图4—10所示:

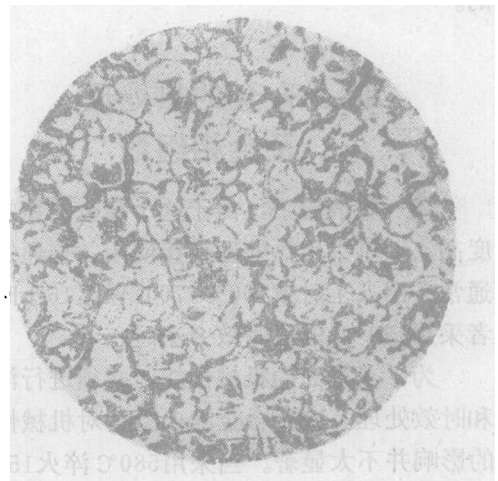


图 4 铸态显微组织×100



图5 铸态160~170℃时效
16小时的显微组织×100

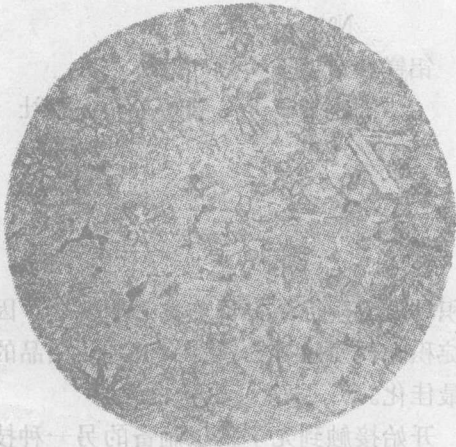


图6 铸后180~190℃时效8
小时的显微组织×100

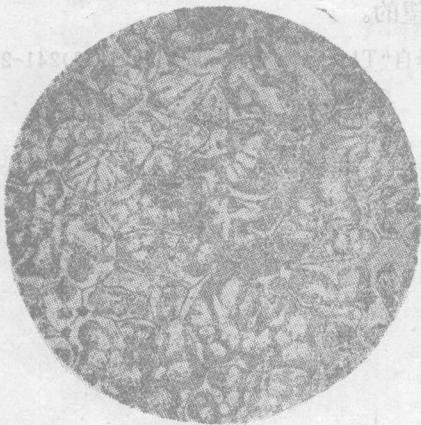


图7 540℃保温6小时淬火后
160~170℃时效16小时
的显微组织×100

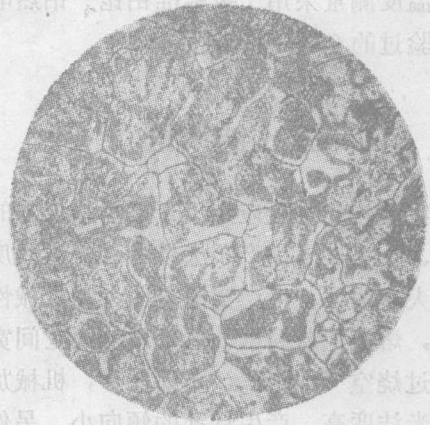


图8 540℃保温6小时淬火后180
~190℃时效8小时的显微
组织×100

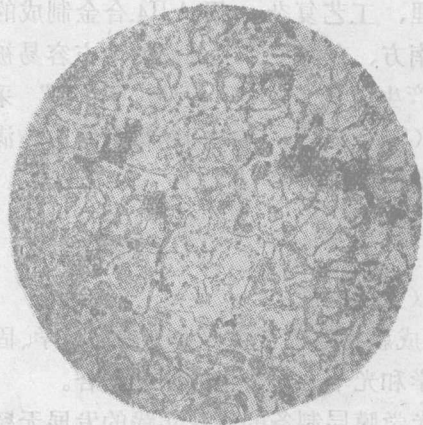


图9 540℃保温6小时空冷后自
然时效的显微组织×100

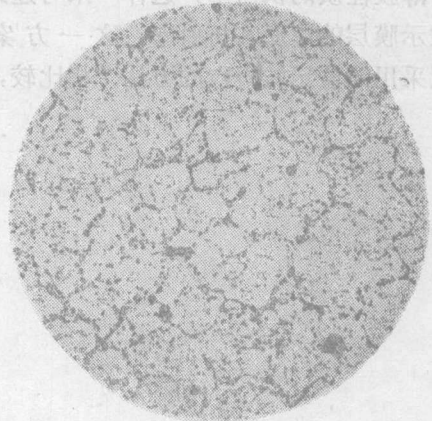


图10 500℃保温5小时后空冷
的显微组织×100

温度测量采用1级标准铂铑-铂热电偶和校验过的303毫伏计。

五、结束语

我们将此合金应用于光学精密仪器的制造上、十多年来生产了大批各种复杂程度不同的大小另件、生产实践表明,它机械性能优良,熔炼工艺简单、热处理淬火区间宽、不易过烧空气中淬火,不易变形,机械加工表面光洁度高、产生针孔的倾向小、另件各处机械性能对壁厚敏感性小、这些都是可贵优点。过去我们采用苏联АЛ4合金、因为针孔常常造成另件报废,更麻烦的是还要变质处理、工艺复杂,用АЛ4合金制成的另件在南方、在海上、在潮湿的地方容易被腐蚀、产生白斑、即所谓长“白毛”采用ZL24(S)合金后,这些问题得到解决、满足了仪器的要求。

(上接33页)

改进。成就将取决于主要搜集表面科学、固体物理学和光学方面情报的明智结合。

光学膜层制备的特殊实践的发展无疑起因于其它方面的革新。因而可以适当地要求,微型信号处理机将很快地编入在测量淀积时薄膜性质的仪器中,这样一来可连续一起监视膜层的厚度和折射率。这一方案与广泛采用的监视转折点的方法^[9]相比较,对

此合金适合于制造工作温度不超过150℃的各种高载荷的复杂另件以及要求尺寸稳定性好的各种精密仪器另件。

此合金不仅适合于砂型铸造、也可以应用于金属型及熔模精密铸造上。

参考文献

- 1 Сплав Ал24 для отливок повышенной точности и прочности
С.И.Спекторова В.Т. Трищенко <Литейное производство>1965. №7
- 2 Хенкин М.Л. и др.
<Литейное производство> 1964. №3
- 3 铝镁合金铸造实践
胡忠等著 国防工业出版社
1965年

淀积物的光学性质提供非常好的性能,因此在淀积时要使膜层的设计修改到使成品的性能最佳化。

开始接触到光学膜层制备的另一种技术是离子镀膜^[46],该技术提出可以淀积具有比真空淀积方法更理想且可重复结构的膜层是有希望的。

译自“Thin Solid Films”50(1978)241-255

[贾淑芝译 赵遂武 施评治校]