

铸造铝合金缺陷分析与热处理工艺研究

王荣滨

(南湾工具厂, 江西 南昌 330002)

中图分类号: TG246; TG166.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-8365(2008)04-0524-04

Analysis on the Defects of As-cast Aluminum Alloy and Investigation of Heat Treatment

WANG Rong-bin

(Nanwan Tool Factory, Nanchang 330002, China)

随着高科技日新月异飞速发展,现代制造材料构成发生较大变化,高密度材料使用比例下降,低密度材料使用比例上升。轻金属材料应用范围不断扩大,向轻量化、高性能、多功能、环保、易成形再生和省能源方向发展。

铝合金有良好力学性能,较高的比强度、比刚度和铸造性能;具有低密度,仅为钢的 $1/3$,便于运输、安装和使用;热导率高,为 $123 \sim 170 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$,是钢的 4 倍,有效降低零部件冷却时间;导电性好,而腐蚀性优良,成形性好,易回收再生与环保;有优良冷切削加工性能,切削速度是钢的 5 倍,显著缩短生产周期,提高工模具寿命,降低生产成本等。因此,广泛应用于航空航天、军工、造船、矿山冶金、汽车、机械制造等工业。

1 铸造铝合金缺陷分析与措施

铸造铝合金常见的主要缺陷有 6 种。

(1) 铸造裂纹。因铸件形状复杂,厚薄不均,在凝固过程中,各部位冷却速度不一致产生较大内应力,当应力超过合金材料抗拉强度时,铸件被拉裂。裂纹分热裂纹和冷裂纹两种。热裂纹是沿晶开裂,裂缝有氧化黑色,形状不规则,成锯齿状;冷裂纹沿晶内开裂,断口未氧化呈折射状银色发亮。

消除裂纹的工艺措施:合金化学成分应准确,杂质含量不得超标;避免熔体过热和在炉内停留时间不宜长;制订科学合理的铸造温度和铸造速度;液体金属流动和冷却应均匀;防止外来夹杂物掉入熔体等。

(2) 花边状组织。边界晶粒呈波浪状、锯齿状折线形花边,形状类似铸造孪晶,往往呈羽毛状,显微组织是相互平行呈薄片状。因化学成分调整不合适,熔体发生过热和停留时间过长,过滤管孔直径过细,铸造

温度过高,结晶器过矮和变质细化剂失去作用等所致。

消除花边状组织的措施:严格控制合金化学成分和杂质含量不得超标;科学合理设计过滤系统与结晶装置;精确控制铸造熔炼温度和时间;加入合格变质细化剂等。

(3) 光亮晶粒。当铸件出现合金元素含量较低的贫乏固溶体时,其晶粒粗大,树枝状网络稀薄光亮晶粒,硬度低于正常组织。因在铸造过程,漏斗温度低,在底部形成低成分固溶体一次晶的结构,按原成分不断长大,当重量达到一定程度时,便形成光亮晶粒,降低合金强度。

防止措施:漏斗材料导热性要好,表面应光亮,漏斗距底部高度适中,漏斗涂料要均匀;浇注前预热漏斗和沉入金属液不宜过深;严格控制铸造温度,均匀平稳供应铝液等措施,能有效消除铸件光亮晶粒缺陷。

(4) 浇不足。造成铸件产品不完整,因浇注温度低,加快铸件凝固速度,铸件未浇满凝固成形,形成浇不足。因浇注系统通道狭窄,铝液流量小,形成瓶颈;当浇注流量小于铝液填充速度时,便形成浇不足,成为废品。

防止措施:重新设计和改进浇注系统,加大铝液流量;预热模具,浇注时避免铝液流冷速过快;涂料在型腔分布应合理,厚度适中均匀,涂料不宜太薄;确保模具排气顺畅等措施,可有效消除浇不足形成的废品。

(5) 缩松。因铝合金液温度和浇注温度偏高,冷却速度缓慢,收缩量大,导致晶粒粗大,组织不致密,形成缩松铸件废品。

防止措施:改进工艺,精心操作,控制好合金加热温度和浇注温度;科学合理设计冒口尺寸,涂料不宜过薄或过厚,确保铸件收缩补给量;铸件设计尽量对称,厚薄悬殊不宜过大等。

(6) 氧化夹渣与气孔。因操作不当,铝液进入型腔时产生飞溅,形成气泡被包裹在铸件内部,使金属发

收稿日期:2007-06-29; 修订日期:2007-10-08

作者简介:王荣滨(1937-),福建武平县人,工程师。研究方向:铸件强化处理。

生氧化,形成氧化夹渣;当铝液中有大量体积小的氢气时,则会形成不规则小孔洞,多见于厚大砂型铸件,急剧降低物理、化学性能。

防止措施:精心操作,浇注时铝液流速应平稳缓和,减少冲击力,采用蛇形浇口和底注式浇注系统为宜;严格检查炉料清洁度,制订合理的铝合金熔化温度和浇注温度,进行精炼除气等。

2 铸造铝合金固溶淬火组织转变机理

铸造铝合金分为共晶型和固溶体型2种。前者以ZL101、ZL104、ZL105等牌号为代表;后者以ZL201、ZL202和ZL301等牌号为代表。

共晶型铸造铝合金ZL104系Al-Si-Mg-Mn合金,主要成分为8.0%~10.5% Si、0.17%~0.30% Mg、0.20%~0.50% Mn、余量Al,杂质0.6% Fe、0.30% Cu和0.30% Zn。铸态组织为固溶体+(+Si)二元共晶体+AlSiMnFe+Mg₂Si次生。在淬火温度下,Mg₂Si溶入固溶体,不溶相Si和AlSiMnFe发生聚集,淬火组织为固溶体+(+Si)+AlSiMnFe,低熔点共晶体为(+Si+Mg₂Si),过烧温度为558℃。ZL105系Al-Si-Cu-Mg合金,主要成分为4.5%~5.5% Si、1.0%~1.5% Cu、0.35%~0.60% Mg,余量Al,杂质0.6% Fe、0.30% Zn。铸态组织为固溶体+(+Si)二元共晶体+W(AlMg₂Si₄Cu₄)相与次生Mg₂Si及Al₂Cu。在淬火加热过程中,Al₂Cu和Mg₂Si均参与相变,而W相则部分参加相变,不溶相Si则发生积聚球化,淬火组织为固溶体+(+Si)二元共晶体+W_{少量}。过烧温度540℃,当含有较高Cu、Mg时,还会出现(+Si+Al₂Cu+Mg₂Si)四元共晶体,过烧温度517℃。

固溶体型铸造铝合金一般不含形成不溶共晶的元素,铸件结晶和结晶后因冷却缓慢形成的偏析及第二相组元将在淬火加热过程中随强化相溶解而消失。一般正常淬火条件下由单一固溶体组成。该合金结晶温度较宽。主要牌号有ZL201、ZL301等。ZL201铸造铝合金为Al-Cu-Mn-Ti系,主要成分为4.5%~5.3% Cu、0.6%~1.0% Mn、0.15%~0.35% Ti,余量Al,杂质0.3% Fe、0.3% Zn、0.05% Mg。铸态组织为固溶体+Al₂Cu+Al₁₂Mn₂Cu+Al₃Ti化合物。在淬火加热过程中Al₂Cu溶解于固溶体中和Al固溶体分解形成细小质点T相(Al₁₂Mn₂Cu)。为获得最佳组织性能,推荐双级淬火加热法:在530±3℃稍低于规定温度第一级加热,促使Al₂Cu强化相溶入固溶体,并沿晶界析出T相质点;第二级加在

规定工艺温度540±3℃进行,促使残留的Al₂Cu相全部溶入固溶体。该合金应严格控制杂质Si元素含量不得超标,因Si超标会出现熔点为525℃的Si+Al₂Cu三元共晶体,将降低淬火温度和化学、物理性能。过烧温度为547℃。ZL301铸造铝合金系Al-Mg二元合金,主要成分为:9.5%~11.5% Mg,余量Al,杂质含量0.3% Fe、0.3% Si、0.10% Zn。若加入微量Ti或Be元素可改善工艺性能和提高物理、化学性能。铸态组织为固溶体+相(Al₃Mg₂),加入微量Ti元素会形成Al₃Ti化合物。淬火加热过程主要是相的固溶和固溶体充分合金化过程,经淬火获得单一均匀固溶体。过烧温度为448℃。

3 铸造铝合金淬火温度对组织性能影响

共晶型铸造铝合金或固溶体型铸造铝合金,在不引起组织过热条件下提高淬火加热温度,促使强化相尽量溶入Al基固溶体中达到饱和状态,提高强化效果。试验表明,共晶型铸造铝合金淬火加热温度应低于过烧温度10~15℃;固溶体型铸造铝合金淬火加热温度应低于过烧温度5~10℃。淬火加热温度愈高,固溶体饱和程度愈大,强化组元越接近极限浓度淬火,强化效果愈显著。表1~表4为ZL104、ZL105、ZL201和ZL301铸造铝合金不同温度淬火对主要力学性能影响。表1~表4均为50~70℃水淬,一组三件性能试样的平均值。

表1 不同淬火温度对ZL104合金主要性能影响

性能	淬火温度(±3℃)						
	500	510	520	530	540	550	560
b/MPa	185	196	214	223	235	238	201
s(%)	4.4	5.9	6.3	6.7	6.3	5.9	2.6

表2 不同淬火温度对ZL105合金主要性能影响

性能	淬火温度(±3℃)					
	500	510	520	530	540	550
b/MPa	193	216	223	231	229	197
s(%)	2.8	3.9	4.6	5.1	4.7	3.6

表3 不同淬火温度对ZL201合金主要性能影响

性能	淬火温度(±3℃)					
	500	510	520	530	540	550
b/MPa	312	356	364	362	316	298
s(%)	11.3	13.5	14.6	13.9	9.6	7.9

表4 不同淬火温度对ZL301合金主要性能影响

性能	淬火温度(±3℃)						
	400	410	420	430	440	450	460
b/MPa	272	293	314	319	343	348	301
s(%)	5.2	6.4	10.6	13.5	14.3	13.9	11.8

4 淬火保温时间对组织性能影响

淬火保温时间长短与铸铝合金原始成分、组织状态和溶解速度有关。如ZL101、ZL104等共晶型铸造铝合金其强化组元较少,而Mg₂Si溶解速度快,在正

常淬火加热温度,只需保温 1~4 h 即可达到技术条件要求的组织性能,且在 1~4 h 之内,性能随保温时间延长而增加;但保温时间延长至 9 h 以上,其性能因 Si 元素强烈聚集而降低。固溶体型铸造铝合金如 ZL201、ZL301 等因强化组元含量较高,铸态下呈大块化合物状态,在淬火加热过程中,化合物溶解与固溶体扩散需较长时间,保温时间还取决于原始晶粒大小,细晶粒只需保温 3~5 h 即可,粗晶粒需 6~10 h,但不宜超过 10 h,因过长保温时间将引起晶粒长大,降低铝合金强韧度。表 5~表 9 为淬火保温时间对铸造铝合金主要性能影响。

表 5 ZL101 合金淬火保温时间对主要性能影响

性能	保温时间/h					
	1	3	5	7	9	11
σ_b /MPa	182	214	219	221	198	189
δ_s (%)	3.3	4.6	5.2	4.9	4.1	3.9

注:淬火温度 550 ± 3 , $50 \sim 70$ 水淬,一组三件性能试样的平均值。

表 6 ZL104 合金淬火保温时间对主要性能影响

性能	保温时间/h					
	1	3	5	7	9	11
σ_b /MPa	186	216	221	215	210	198
δ_s (%)	2.9	5.1	5.6	5.2	4.7	4.1

注:淬火温度 545 ± 3 , $50 \sim 70$ 水淬,一组三件性能试样的平均值。

表 7 ZL105 合金淬火保温时间对主要性能影响

性能	保温时间/h					
	1	3	5	7	9	11
σ_b /MPa	179	201	215	219	214	209
δ_s (%)	3.0	4.2	5.0	5.7	6.1	5.7

注:淬火温度 535 ± 3 , $50 \sim 70$ 水淬,一组三件性能试样的平均值。

表 8 ZL201 合金淬火保温时间对主要性能影响

性能	保温时间/h					
	10	12	14	16	18	20
σ_b /MPa	291	302	312	319	321	309
δ_s (%)	10.2	12.3	13.4	14.7	15.7	14.6

注:淬火温度 540 ± 3 , $50 \sim 70$ 水淬,一组三件性能试样的平均值。

表 9 ZL301 合金淬火保温时间对主要性能影响

性能	保温时间/h					
	10	12	14	16	18	20
σ_b /MPa	281	300	316	318	309	298
δ_s (%)	9.2	12.6	12.8	14.1	14.9	13.6

注:淬火温度 545 ± 3 , $50 \sim 70$ 水淬,一组三件性能试样的平均值。

5 淬火冷却速度与转移时间对性能影响

铸造铝合金淬火时的冷却速度,应确保溶解在固溶体中的强化相淬火时不被析出和淬火转移时间尽量短。淬火介质冷却速度大小决定于该介质热容量、导热性、粘滞性、蒸发潜热等诸因素。铸造铝合金淬火冷却介质宜选用不同温度清洁水,既来源广、价廉、方便,又环保、易控制,不同温度水可得到不同冷却速度,满足不同产品使用要求。其冷却速度随着水温升高而降低,随着水温降低而增加。通常选用适当热水淬火即可达到铸造铝合金技术要求,对复杂铝铸件可减少淬火内应力,避免畸变。淬火效果不仅决定淬火介质冷却速度,同时受到淬火转移时间影响,转移时间愈短,水温愈低,强化效果愈显著。表 10、表 11 分别为不同水温和不同淬火转移时间对 ZL101 合金主要性能影响。

表 10 不同水温对 ZL101 合金主要性能影响

性能	水温/°C							
	10	25	35	45	55	65	75	100
σ_b /MPa	229	213	203	191	187	179	165	126
δ_s (%)	6.4	5.9	5.0	4.1	3.9	3.5	3.1	2.8

注:淬火温度 550 ± 3 , 保温 1 h, 一组三件性能试样的平均值。

表 11 不同淬火转移时间对 ZL101 合金主要性能影响

性能	淬火转移时间/s					
	10	20	30	40	50	60
σ_b /MPa	235	219	211	202	186	135
δ_s (%)	6.5	5.2	3.9	3.1	2.0	1.2

注:淬火温度 550 ± 3 , 保温 1 h, $50 \sim 70$ 水淬,一组三件性能试样的平均值。

6 铸造铝合金时效

源于迁移扩散与过饱和固溶体脱溶分解是铝合金时效过程的组织转变特征。溶解的溶质原子在固溶体内部成核析出、集结和聚集,均伴随化合物形成和微杂质析出与在未溶解过剩相的聚集过程。公认的时效原理:合金固溶淬火后,时效期沉淀相的析出按 GP 区 (GP 区) (CuAl_2) 的顺序逐步转变。Al-Cu 系合金的时效沉淀序列为: GP 区

CuAl_2 ; Al-Mg 系合金的沉淀序列为: GP 区

(Mg_2Al_3)。Al-Si-Mg 系合金时效沉淀序列为:

GP 区 (Mg_2Si)。按产品使用性能要求分为强化时效(即淬火+完全时效)和软化时效(即淬火+不完全时效)两类。若要求产品获得较高强度,而塑性指标要求不高时,则选用强化时效;若要求产品具有高的塑性,而强度要求不高时,则选用软化时效。时效强化效果与合金成分和淬火加热铝固溶体饱和浓度有关,合金浓度愈高,则淬火后固溶体饱和程度

愈大;当淬火过程进行愈完善,越接近极限浓度加热淬火,强化相在铝固溶体溶解愈充分,时效强化效果愈显著。表12为时效保温时间对铸造铝合金主要性能的影响。

表12 时效保温时间对铸造铝合金 σ_b 和 σ_s 的影响

合金性能		时效保温时间/ h					
		2	4	6	8	10	12
ZL101	b/ MPa	241	265	269	256	251	246
	s (%)	8.2	6.3	5.8	5.0	4.6	4.1
ZL104	b/ MPa	235	252	263	254	270	262
	s (%)	6.3	5.9	4.8	4.4	4.0	3.5
ZL105	b/ MPa	285	302	309	319	312	299
	s (%)	7.6	6.9	7.2	6.1	5.9	5.4
ZL201	b/ MPa	342	358	362	358	351	334
	s (%)	11.2	9.8	9.1	8.5	7.9	7.0

注:时效温度 $180 \pm$,空冷,一组三件性能试样的平均值。

实验数据表明,上述铸造铝合金,不管是共晶型或固溶体型合金,在正常淬火后,时效温度 $175 \sim 185$ 范围内,保温 $5 \sim 10$ h能获得较满意强化效果。时效温度过高或过低,时效时间过长或过短,均达不到技术条件要求的组织与性能。

7 结语

铸造铝合金在不引起组织过热条件下,淬火温度

越接近极限浓度,强化相充分溶解,则固溶体饱和程度愈大,淬火过程进行愈完善,在足够清洁水淬火冷却速度和缩短淬火转移时间以避免析出第二相,确保饱和固溶体留至室温。试验表明,共晶型铸造铝合金淬火加热温度应低于过烧温度 $10 \sim 15$;固溶体型铸造铝合金淬火加热温度应低于过烧温度 $5 \sim 10$,此合金推荐采用双级淬火:第一级先将合金在较共晶温度低 $10 \sim 15$ 加热淬火,促使低熔点共晶体首先溶解;第二级在较高规定温度下短时间加热,促使剩余相全部溶解到铝固溶体中,经淬火、时效,可获得最佳综合力学性能。

时效过程是淬火过饱和固溶体的脱溶分解和原子迁移扩散过程,科学合理选用时效温度和时效时间最佳配合,是确保优质产品关键工序。传统生产多采用单级时效达到产品使用性能要求。研究发现采用双级时效,第一级时效温度稍低于规定时效温度 $10 \sim 15$,保温后空冷至室温,再进行第二级时效,时效温度为规定的工艺时效温度。电镜观察发现,第一级低温预时效形成细小均匀和弥散分布的强化相,与单级时效比有较高强度与硬度,有较好强化效果。推广和应用双级淬火和双级时效新工艺,有显著技术经济效益。

书讯

《冲天炉技术手册》2008年上半年出版发行

手册以实用性、完整性、先进性、方便查阅为编写原则,主要内容有:绪论,冲天炉熔炼原理,冲天炉炉型及结构,冲天炉系统组成及熔化工部机械设备、工具,冲天炉炉料及筑炉材料,冲天炉熔炼作业,典型铸铁熔炼,冲天炉熔炼过程检测及控制,环境保护及排放物回收利用,熔化工部布置与生产管理,附录等。对于近年来冲天炉方面的新技术:长炉龄水冷冲天炉、热风冲天炉、电炉与冲天炉双联、冲天炉自动检测与控制、冲天炉节能与环境保护等内容则作了重点介绍。

为了充实手册的内容,方便读者使用,本书附录中还设置了“企业名录”一章,对相关企业做付费名片式介绍,为从事冲天炉主机、辅机,原辅材料生产单位以及相关企业提供展示、宣传自己的平台,建立用户和生产单位的直接联系。

联系方式:

1. 030024 太原市太原科技大学 240 信箱《铸造设备研究编辑部》 王录才

电话:0351-6999221/ Email: zshy2@yahoo.com.cn

2. 100037 北京百万庄大街 22 号机械工业出版社机械分社 邝鸥

电话:010-68351729/ Email: kon62@sina.com

机械工业出版社机械分社《冲天炉技术手册》编委会