

航空用高品质 7050 铝合金大规格扁锭熔铸技术研究

王 剑¹, 马斯牧², 朱子宗², 王 开²

(1. 西南铝业(集团)有限责任公司, 重庆 401326; 2. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘要: 7050铝合金具有密度低、强度高、热加工性能优异等优点, 在航空航天结构件上应用广泛。但在7050铝合金大规格铸锭半连续铸造过程中, 存在热裂、成形困难、严重显微疏松和氧化夹杂等问题。本研究开发了大规格扁锭半连续铸造过程中合金熔体冶金质量控制技术, 系统考察了精炼工艺、晶粒细化技术对大规格扁锭品质的影响规律, 确定了大规格扁锭铸造工艺。结果表明, 优化工艺制度能严控熔体内氢和夹杂物含量, 采用Al-Ti-C晶粒细化工艺制度将晶粒度控制在1~1.5级, 高质量的熔体质量缓解了合金凝固收缩应变, 极高比例地解决了扁锭开裂问题。最终, 形成了一套适用于大规格7050合金扁锭的熔铸工艺制度。

关键词: 7050铝合金; 半连续铸造; 熔铸; 热裂; 微观组织

作者简介:

王剑(1967-), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为铝合金熔铸技术。

E-mail: wjsh601166@163.com

通讯作者:

王开, 男, 博士, 副教授。

E-mail: wangkai@cqu.edu.cn

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

07-0933-08

基金项目:

国家自然科学基金资助项目(51974050)。

收稿日期:

2023-08-17 收到初稿,

2023-09-13 收到修订稿。

现代飞机的轻量化、宽敞化、长寿命、高可靠性和低成本的发展需求不断推动大规格高综合性能铝合金材料的发展。7xxx系高强铝合金是航空航天和交通运输载器中的主要结构材料, 但是我国缺乏系统的7xxx系高强合金设计与制备加工技术, 甚至某些产品完全依靠进口。半连续铸造(DC)具有生产效率高、铸锭成品率高以及铸锭质量好等优点, 是生产铝合金热轧铸锭和挤压铸锭的主要加工方法, 通过半连续铸造进行大尺寸铝合金坯的生产一直是工业上的难点^[1]。

在半连续铸造过程中, 冷却水直接喷淋在铸锭表面, 在铸锭中形成很高的温度梯度, 使铸锭各部分收缩不均匀, 相互制约, 从而在铸锭中产生热应力, 在一定应力场作用条件下铸锭会发生开裂^[2]。在工业生产中, 铸锭的开裂往往发生在起始铸造阶段, 或者在起始铸造阶段产生微裂纹, 随后冷却过程中微裂纹向铸锭其他部位扩展, 甚至贯穿整个铸锭。除了开裂以外, 冷隔、翘曲、悬挂等缺陷也容易发生在起始铸造阶段, 因而起始铸造阶段是整个铸造过程中非常关键的环节^[3]。

直接水冷铸造的热裂纹敏感性受化学成分、中间合金、细化剂加入量的影响很大^[6]。合金热裂敏感性在于内应力诱使产生孔洞、裂纹, 其产生与分布取决于合金元素、熔体冶金质量、半连续铸造工艺等^[4]; 主要原因在于7xxx系铝合金大规格铸锭合金元素多、凝固区间宽、铸造应力大、合金元素易氧化偏析、铸锭冶金质量较差以及室温成形性能较低等。已有研究表明, 电磁场与合金元素(包括晶粒细化剂、主合金元素及微量元素)影响半连续铸7xxx合金微观组织及热裂敏感性^[2-5]; 而且, 由于7050铝合金合金成分复杂且含有容易氧化元素, 使合金熔体吸氢更严重, 加上熔体氧化夹杂导致渣气共存, 熔体内部氢含量较高。而熔体氢含量多寡已成为制约和影响铸锭加工材的探伤、断口及疲劳等性能的最主要因素, 有必要按氢在熔体里的存在机理, 采用介质吸附、过滤精炼设施去除熔体中的氢等夹杂物, 以获取高纯净化的合金熔体。

生产中将截面尺寸大于1 000 mm × 400 mm的铸锭视为大规格扁锭, 半连续铸造存在宽度方向与纵向温度分布不均匀的难题^[6], 在糊状区沿铸锭宽度方向的应力和应变分量最大, 特别是在起始铸造阶段, 因此最容易在起始阶段产生垂直于宽度方向

的热裂纹。而且,糊状区产生的热裂纹极大可能在低温时失稳扩展形成冷裂^[7]。在收缩应力的调控方面,除了优化扁锭几何结构、铸造工艺外^[8],合金熔体质量与凝固组织结构也是影响冷却凝固过程热应力的内在要素^[5-9]。从合金内部质量控制方面缓解坯料制备过程的热应力,较好地解决晶间补缩问题,降低由于凝固收缩导致的压降,解决大规格扁锭开裂的技术难题。基于此,研究以大规格7050合金扁锭生产为对象,试验研究合金熔铸生产工艺,探究大规格合金扁锭生产的

熔铸技术。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验过程中参考表1所示的7050国际标准牌号配制合金,控制 $\text{Fe/Si} \geq 1.2$,以抑制有害针状 β 相($\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{Al}_9$)的产生,使之生成危害较小的骨骼状 α 相($\text{FeSi}_3\text{Al}_{12}$),最终按照该表中内控成分控制试验合金成分,并采用火焰反射炉熔炼该试验合金。

表1 7050合金化学成分
Table 1 Chemical compositions of 7050 aluminum alloy

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Al
项目										
国标	0.12	0.15	2.0~2.6	0.1	1.9~2.6	0.04	5.7~6.7	0.06	0.08~0.15	余量
内控	0.05	0.08	2.25~2.40	—	2.0~2.40	—	5.9~6.4	0.05	0.09~0.11	余量

为了细化凝固组织结构,试验中所采用的晶粒细化剂为LSM公司的Al-3Ti-0.15C产品,化学成分见表2。该产品成分波动范围小,杂质含量低,内部组织中的 TiAl_3 、 TiC 数量多, TiC 颗粒细小。

表2 Al-3Ti-0.15C晶粒细化剂化学成分
Table 2 Chemical compositions of Al-3Ti-0.15C grain refiner

Ti	C	Fe	Si	V	其他	Al
2.9~3.1	0.1~0.2	0.17	0.06	0.15	0.01	余量

为了降低熔体中的氢含量,采用喷粉机分别在熔炼炉、静置炉内进行喷粉精炼试验,所采用的精炼剂为PYROTEK公司的Coveral C520,所对应的化学成分如表3所示。

表3 喷粉用Coveral C520精炼剂化学成分
Table 3 Chemical composition of Coveral C520 refining agent for powder spraying

K	Na	Cl	F	O	其他
36.5~43.5	—	24.5~29.5	8.5~10.0	7.6	8.5~24.5

1.2 试验方法

在试验过程中,熔体经过精炼、除气和过滤以控制熔体的夹杂含量、氢含量以及凝固组织。为了研究熔体精炼、除气、过滤工艺对氢含量和夹渣物含量的影响,采用ELH-IV型铝熔体快速测氢仪检测熔体中氢含量,该设备的测氢范围为0.001~0.999 mL/100 g Al。对于喷粉除氢而言,所采用的除氢时间为20 min、喷粉用精炼剂用量为0.1%~0.2%、氩气为0.2 MPa,并比较了高效SNIF双转子精炼除气效果。试验了Al-5Ti-1B、

Al-3Ti-0.15C的晶粒细化行为,试验条件下按照钛含量所占百分比添加晶粒细化剂,试验条件下研究了Al-3Ti-0.15C晶粒细化剂加入温度(700 ℃、720 ℃、740 ℃)、加入后保持时间(10 min、20 min、30 min)及加入量(0.005%、0.010%、0.015%、0.020%)对晶粒细化的影响规律。试验了PYROTEK公司陶瓷过滤板对熔体杂质含量的影响,比较了孔隙度40 PPI、50 PPI、60 PPI单级过滤和30 PPI+50 PPI双级过滤对熔体净化的影响。通常统计低倍试片和断口,要求夹渣不得多于两处,且单个面积小于0.5 mm²。依据GB/T 3246.2—2012标准评价非连续铸造扁锭的低倍组织结构,评价组织结构特征。

熔体经除气、精炼、除渣处理后,通过NOVILES全自动铸造,控制熔体供流系统、熔体液位控制系统和半连续铸造过程,制备400 mm×1 320 mm、450 mm×1 420 mm、500 mm×1 320 mm、600 mm×1 600 mm等各种尺寸的大规格扁锭,并统计扁锭内部质量,分析其与宏观热裂纹的关系。

2 试验结果与探讨

2.1 熔体净化处理

2.1.1 熔体除气试验

试验比较了精炼管精炼、HD-2000转子精炼、炉底透气砖精炼等方式对炉内精炼效果影响,不同精炼方式下静置炉出口的熔体氢含量如图1所示。精炼管精炼的氢含量在0.40 mL/100 gAl左右,HD-2000转子精炼的熔体氢含量在0.34 mL/100 gAl左右,炉底透气砖精炼的熔体氢含量约为0.20 mL/100 gAl。很明显,透气砖熔体精炼除气效果最好。据分析,精炼管精炼气泡无法打

散,且靠人工移动稳定性较差;转子精炼能通过叶轮旋转剪切作用将气泡打散,但位置固定,精炼效果受限;炉底透气砖可在不同位置均匀布置在炉底,且气泡可控,精炼除气效率高,熔体成分、熔体温度更均匀。

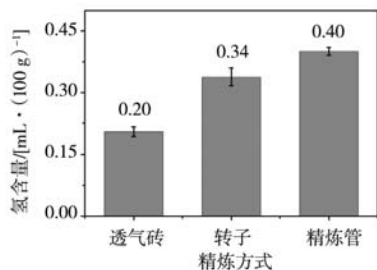


图1 精炼方式对铝合金熔体内氢含量影响

Fig. 1 Effects of refining methods on hydrogen contents in the aluminum alloy melt

图2比较了不同氩气流量对炉底透气砖熔体内氢含量的影响,随着氩气流量增加,熔体中氢含量反而逐渐增大。据分析,影响透气砖除氢效果的主要因素就是气泡大小和气体流量,而气泡大小是用“雷诺准数”作为衡量尺度。精炼气泡大小不能无限制通过增加透气孔洞数来实现,当透气砖孔洞数越过某一数值后就会聚集成较大的气泡,反而降低除气效果。在相同的透气砖孔数条件下,当气体流量增加到某一最大值后,气泡会发生泡径铺展与合泡,也会影响除气效率。

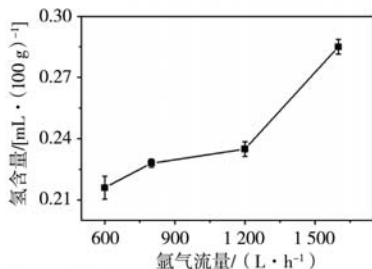


图2 通过透气砖氩气流量与熔体内氢含量关系

Fig. 2 Relationship of variances of the hydrogen contents in melt with the argon flows through breathable bricks

保温炉单纯使用惰性气体氩气精炼,精炼效果会受惰性气体本身纯度影响。惰性气体即使采用很严格的纯化措施,也总会含有ppm级别水分和氧气,这种气体吹入铝液后,在吹入气泡表面会因为水分和氧气形成薄而致密的氧化膜层,阻碍熔体中的氢扩散进入气泡内,影响除气效果。当吹入氩气同时引入粉状熔剂混吹,则气泡表面被熔化的熔剂膜所包围,不仅隔断了气泡中水分和氧气与铝液接触,使之不能形成氧化膜,而且即使有氧化物生成,也会被熔剂氧化膜所吸

附,从而提高除气效果。另外,熔剂还因界面张力润湿作用而具有自动吸附熔体中氧化夹杂的能力,进而通过炉内扒渣除去。据资料介绍,熔体中约1/3的气体是与氧化渣混杂模式共存的,熔剂的加入还可以通过溶解吸附渣气混合物除去熔体中部分氢^[10]。采用喷粉机分别在熔炼炉、静置炉内使用PYROTEK公司Coveral C520精炼剂(表3)进行喷粉精炼试验,结果表明无论在熔炼炉或者静置炉使用喷粉精炼后熔体中氢含量均明显降低,但与经高效SNIF双转子精炼处理后的最终成品氢含量差别不大(表4)。对于7050合金这类探伤、断口要求高的航空用途产品,还要考虑因加入精炼熔剂造成熔体内部夹入熔剂漏过滤系统混入成品铸锭的风险,对于是否采用炉内熔剂喷粉精炼方式要有所选择。

表4 喷粉对铝合金熔体氢含量影响

Table 4 Effects of spraying powder on hydrogen contents of aluminum alloy melts

喷粉位置	在线除气前 [mL · (100 gAl)⁻¹]	在线除气后 [mL · (100 gAl)⁻¹]
(高效SNIF双转子精炼)未喷粉	0.222	0.072
熔炼炉	0.194	0.065
静置炉	0.194	0.067

2.1.2 熔体过滤净化

熔体过滤试验结果如表5所示,经板式过滤的铸锭晶粒尺寸都稳定在1~1.5级之间,铸锭铺底部和浇口部晶粒组织没有明显差异,在低倍试片上也没有观察到夹渣等缺陷;并且随陶瓷板孔隙数增加,过滤精度提高,铸锭加工材探伤、断口检查合格率攀升。为防止双级高精度过滤板过早堵塞失效,生产实践中比较了“30 PPI + 50 PPI”双级过滤对产品冶金质量的影响,同时为降低成本提高效率而四熔次更换过滤板一次。结果表明,可能出现因过滤板过滤沉积和流体动力作用捕获的杂质颗粒和氧化膜夹杂等在大熔次、大通过量条件下偶然脱离过滤板,进入铸锭成品而影响到加

表5 板式过滤铸锭和加工板材检测结果

Table 5 Examination results of slabs and processed plates via plate filter

过滤板	更换频率	晶粒度	疏松	夹渣	探伤合格率/%	断口合格率/%
40 PPI	2炉	1~1.5级	1级	无	90	87
50 PPI	2炉	1~1.5级	1级	无	96	91
60 PPI [*]	2炉	1~1.5级	1级	无	100	100
30+50 PPI	4炉	1~1.5级	1级	无	93	80

注:板式60 PPI为近30熔次检测数据。

工板材探伤断口情况。因此,根据金属熔体过滤流量和铸锭质量要求,7050合金在线熔体过滤净化选择单级60 PPI左右的陶瓷过滤板,两熔次更换一次,以保证铸锭质量和加工材探伤断口要求。图3所示是铸锭内

部与加工材探伤断口表面的夹杂物形貌,其中存在较多聚集分布的块状物。经鉴定主要含有O、Mg、Al元素。据分析这些是由渣-气共存引起,这是影响加工材探伤断口合格率的主要因素。

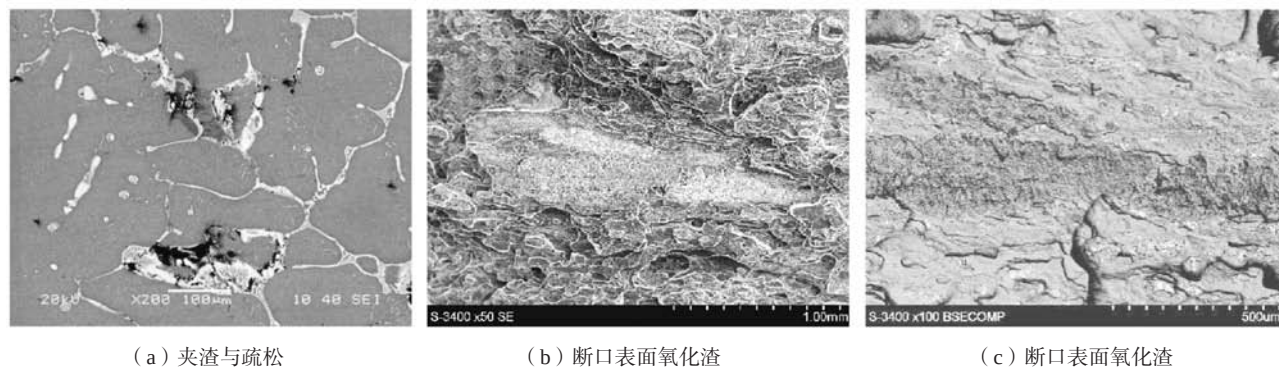


图3 铸锭和加工材内部典型组织结构

Fig. 3 Typical microstructures of slabs and processed plates

2.2 合金细化处理

2.2.1 晶粒细化行为

7050合金主要使用Al-5Ti-1B、Al-3Ti-0.15C两种类型的晶粒细化剂,比较试验两种晶粒细化剂在线加入的晶粒效果。结合图4和表6的统计结果可以发现:①采用Al-5Ti-1B晶粒细化剂的铸锭晶粒尺寸明显较小,铸锭边部到心部晶粒尺寸大小过渡更均匀,铸锭粗晶层也较薄,Al-5Ti-1B在铸锭全区域表现出更强烈的晶粒细化效果;②当配料中混有Al-Ti-C细化的原料时,Al-5Ti-1B细化作用会减弱,Al-5Ti-1B加入量过多细化能力并不是呈比例提高,应控制Al-Ti-B的加入量在2 kg/t以内;③经Al-3Ti-0.15C晶粒细化剂处理后的合

金主要由细小的球状等轴晶构成,且晶粒尺度在扁锭宽度方向比较均匀,加入3~4 kg/t的Al-3Ti-0.15C晶粒细化剂可以稳定产品质量。此外值得注意的是,7050合金加入Al-5Ti-1B晶粒细化剂后,其中的 TiB_2 在铸造激冷条件下向铸锭氧化膜表面聚集偏析,容易聚集成夹杂,在铸锭凝固成形时向内收缩形成沟槽状皱褶,会改变熔体表面张力状态,导致合金熔体粘稠,流动性变差,在铸造铺底部和铸锭大面与大小面角部位置容易产生裂纹,铸锭裂纹倾向性显著增加,极大影响铸造成形率。考虑到7050合金铸造成形、国外同类铸锭产品晶粒度和最终加工产品情况,除特殊需要外,铸造7050合金时还是宜用Al-3Ti-0.15C作为在线晶粒细化剂。

表6 晶粒细化工艺对7050铝合金铸锭晶粒度影响

Table 6 Effects of grain refinement processes on the grain sizes of 7050 aluminum alloy slabs

铸锭规格/mm	熔次	配料	细化剂	加入量/($kg \cdot t^{-1}$)	晶粒分级	粗晶层/mm
500 × 1 320	1	Al-Ti-C配料	Al-Ti-B	2	1	12
500 × 1 320	2	新铝	Al-Ti-B	2	1	6
500 × 1 320	3	Al-Ti-B配料	Al-Ti-B	2	1	6
500 × 1 320	LSM均值	不详	Al-Ti-C	4	1~2	14
400 × 1 320	1	Al-Ti-C配料	Al-Ti-B	2	1	9
400 × 1 320	2	Al-Ti-C配料		1.2	1	10
400 × 1 320	LSM均值	Al-Ti-C配料	Al-Ti-C	3+	1~2	14

2.2.2 Al-3Ti-0.15C细化剂晶粒细化行为

试验研究了Al-3Ti-0.15C晶粒细化剂的加入温度、加入后保持时间及加入量对7050合金晶粒细化效果的影响,其结果如图5-7所示。从图中可见:①细化剂加入温度为720 ℃时,晶粒主要由等轴状晶粒和少量胞状

结构晶粒构成,且尺寸最为细小(图5);②细化剂加入后10 min时,晶粒主要为发达生长的枝晶,而过长的保温时间导致晶粒粗大(图6);③当晶粒细化剂加入量为0.010%和0.015%时,可以得到尺寸细小的等轴状晶粒(图7)。最终确定的优化晶粒细化条件是:在线

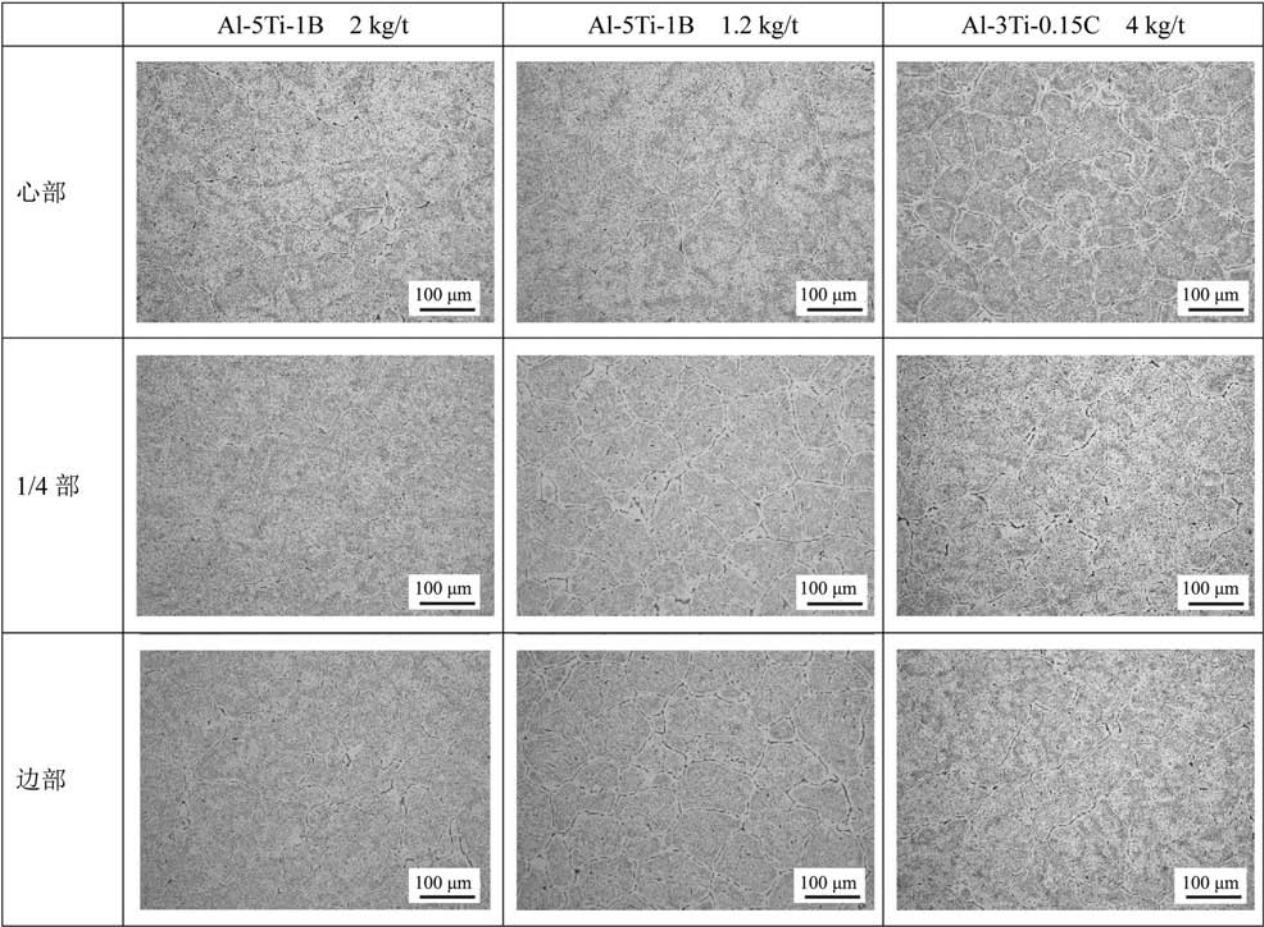


图4 晶粒细化剂对铸锭晶粒形貌影响
Fig. 4 Effects of grain refiners on the grain morphologies of the cast slabs

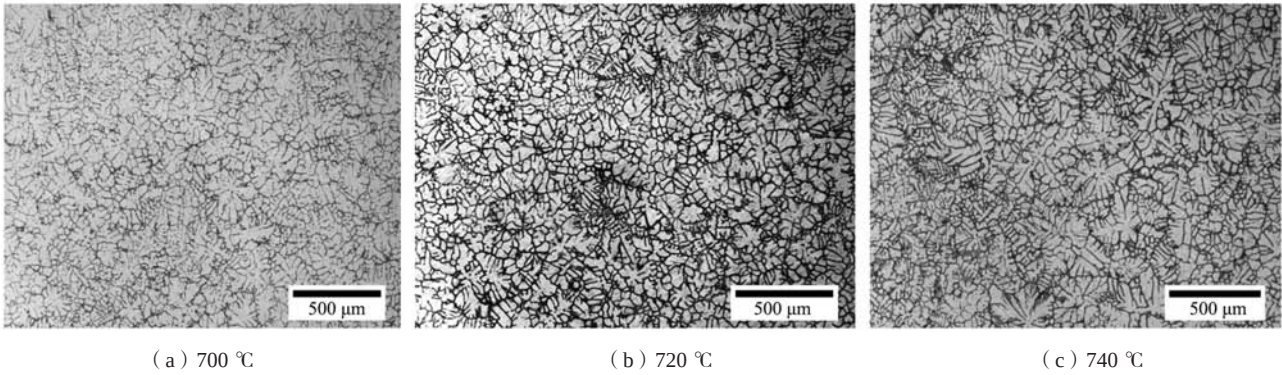


图5 不同温度下加入0.010%Al-3Ti-0.15C细化剂保持20 min后晶粒形貌
Fig. 5 Grain morphologies after adding 0.010% Al-3Ti-0.15C refiner and holding 20 minutes under different temperatures

晶粒细化剂加入温度约在720 °C左右、加入细化剂后到凝固结晶之间时间控制在约20 min、细化剂加入量约0.01%~0.015%，对应于3~4 kg/t的Al-3Ti-0.15C晶粒细化剂加入量。

依据晶粒细化剂试验研究结果，结合7050合金工业生产流程，合金熔体出炉后加入Al-3Ti-0.15C细化剂时的熔体温度约在720~730 °C，加入量为3~4 kg/t。尽

管铸锭规格存在差异，但是合金熔体出炉加入细化剂到熔体流经在线装置、流槽、结晶器至凝固终了，全程时间约在15~20 min之间。而且，在工业生产中试验加入不同量的细化剂时，发现细化剂“钛当量”超过0.01%时的晶粒细化效果无明显提升，反而因过量细化剂容易引起Ti、C元素富集，增加加工材断口缺陷出现几率（表7）。在进行不同位置加入细化剂试验时，发

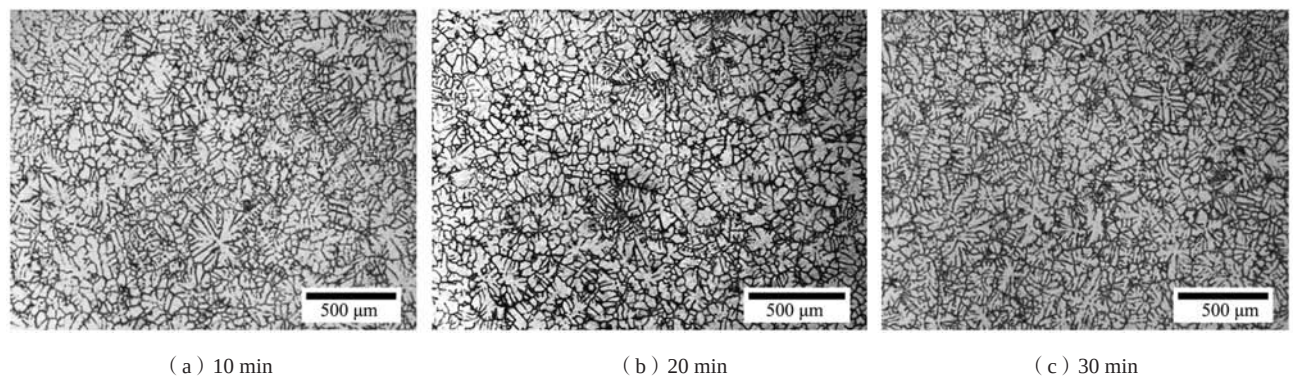


图6 Al-3Ti-0.15C晶粒细化剂加入量为0.010%、加入温度为720 °C时停留时间对晶粒形貌的影响
Fig. 6 The effects of different holding times on the grain morphologies when the adding amount of Al-3Ti-0.15C refiner was 0.010% and the melt temperatures was 720 °C

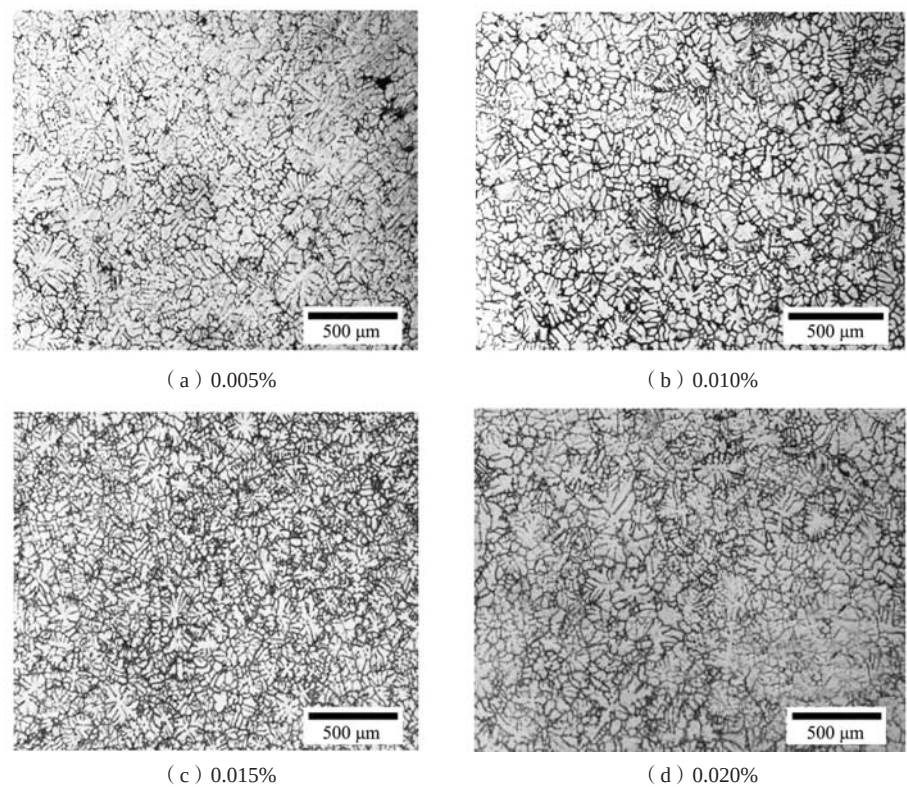


图7 Al-3Ti-0.15C晶粒细化剂加入温度720 °C、保持20 min时加入量对晶粒形貌的影响
Fig. 7 Effects of Al-3Ti-0.15C grain refiner adding amounts on the grain morphologies when the adding temperature was 720 °C and the holding time was 20 minutes

现在除气装置入口、除气装置出口、铸造流槽处加入细化剂后铸锭晶粒差别不大，不经过滤在铸造流槽加入会带来加工材探伤断口缺陷风险（表7）。从充分均匀细化晶粒、避免细化剂富集角度出发，细化剂应从除气装置入口端加入。

2.3 大规格扁锭熔铸生产

通过准确定位7050合金熔铸生产存在的问题，开展熔体炉内和在线熔体净化、晶粒细化研究，结合工

表7 板式过滤条件下Al-3Ti-0.15C晶粒细化剂加入位置对7050铸锭晶粒级别影响

Table 7 Effects of Al-3Ti-0.15C grain refiner adding positions on the grain grades of 7050 cast slabs under the condition of plate filter			
加入位置	铸锭晶粒	探伤合格率/%	断口合格率/%
除气室出口	1级	90	90
除气室入口	1~1.5级	90	90
铸造流槽	1级	18	0

装结构优化设计,最终确立了7050合金“静置炉内炉底透气砖精炼→在线Al-Ti-C晶粒细化→高效SNIF双转子精炼→PYROTEK单级板式过滤→NOVILES全自动铸造”的熔铸生产工艺路线,利用自主国产化制作的系列扁锭铸造工装,优化确定各种大规格扁锭熔炼铸造

工艺参数,工业化规模稳定铸造出7050合金400 mm×1 120 mm、400 mm×1 320 mm、400 mm×1 620 mm、450 mm×1 420 mm、500 mm×1 320 mm、520 mm×1 600 mm、600 mm×1 600 mm、620 mm×1 320 mm等规格扁锭(图8)。

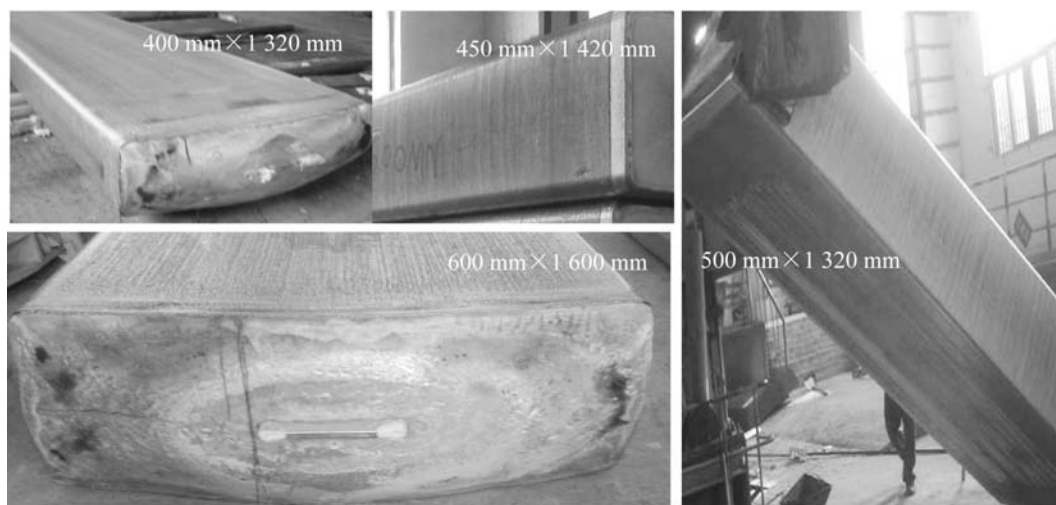


图8 半连续铸造7050铝合金各规格扁锭

Fig. 8 7050 aluminum alloy slabs with various specifications processed by semi-continuous casting

按铸锭成形率为铸造成形熔次与铸锭投料熔次比值、铸锭产出率为成形铸锭毛重与投料重量比值、铸锭交货率为成品定尺铸锭铣边后重量与投料量比值计算,除研究早期外,随熔铸工艺路线确定和铸造参数优化,7050合金铸造成形率和成品率呈上升态势直至稳定可达到铸造成形率 $\geq 97\%$ 、铸锭产出率 $\geq 90\%$ 、成品铸锭交货率 $\geq 70\%$ 。

依据SKK热裂预测判据^[11],采用糊状区的压降方程评估热裂倾向。热裂主要取决于收缩速度、补给速度和型腔临界尺寸,一旦型腔糊状区尺寸大于临界尺寸,扁坯就会发生热裂。一般来说,合金凝固过程可以分为大量补给阶段、枝晶间补给阶段、枝晶间分离阶段和枝晶间搭桥阶段等。在枝晶间分离阶段,枝晶臂接触更加紧密,液相流动被表面张力所限制,糊状区的渗透能力弱化,当产生足够大的凝固收缩和热应力,可能形成微孔甚至热裂纹。而枝晶间搭桥阶段只有少量液相存在于三叉晶界处,半固态材料具有相当大的强度和塑性,只能通过固相蠕变弥补凝固收缩和热应力,这两个阶段容易形成收缩孔洞或热裂缺陷。

大规格扁锭常产生外部裂纹、内部疏松与夹杂,严重影响合金凝固期间的力学行为。凝固过程合金力学特性很大程度上取决于内部组织结构,包括晶粒尺寸、氢含量以及夹杂物含量等^[12]。首先,对于具有枝晶结构的铝合金而言,二次枝晶臂间距对力学性能和凝固过程均有严重影响。细小的二次枝晶臂间距会

更早产生孔隙和高的孔隙分数,由此会降低热裂临界应力;其次,晶间结构收缩孔洞和夹杂物等缺陷严重降低固相骨架的强韧性,显著降低热裂临界应力;再次,晶粒形貌是影响热裂行为的一个重要微观结构因素。当晶粒由等轴状枝晶转变为球状等轴状晶粒,一方面合金具有更低的刚性温度、晶间液相的渗透能力增强,抑制了孔洞长大;另一方面,细小晶粒可承受更大的应变和应变速率,以及具有更加复杂的热裂纹扩展通道,因此这样的晶粒形貌转变导致最终热裂倾向也降低了。本研究中,通过熔体熔铸技术的优化,严格控制夹杂物含量、熔体氢含量以及晶粒结构等,有利于提升合金扁锭抗热裂的内部结构。同时,辅以工装结构、加工工艺等外部因素,最终制备出高成品率大规格优质扁锭。

3 结论

(1) 炉内精炼除气效果炉底透气砖>HD-2000转子>精炼管,炉底透气砖流量控制在600 L/h时除气效果最佳,配合颗粒精炼剂喷吹精炼可获得更好的除气效果。

(2) 采用陶瓷过滤板过滤时,使用效果60 PPI单级>50 PPI单级>40 PPI单级,过滤板多熔次更换会使沉积或拦截的氧化膜夹杂等脱落导致板材探伤或断口合格率低。

(3) 铸造7050合金时宜用Al-3Ti-0.15C作在线晶粒细化剂, 加入温度约在720 ℃左右, 加入细化剂后到凝固结晶之间时间控制在约20 min, 加入量约

0.01%~0.015%。

(4) 通过对熔体冶金质量的精细控制, 解决了扁坯开裂的问题, 实现了大规格板坯的高成品率制备。

参考文献:

- [1] LI Yue, LI Hongxiang, LAURENS Katgerman, et al. Recent advances in hot tearing during casting of aluminium alloys [J]. Progress in Materials Science, 2021, 117: 100741.
- [2] 李跃. 合金元素对半连铸7金元素铝合金微观组织和热裂敏感性的影响研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2019.
- [3] 白清领, 李宏祥, 张济山, 等. 起始铸造速度对AA7050合金半连续铸锭应力分布的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44 (1): 158-163.
- [4] 于博, 豆瑞锋, 王一帆, 等. AA5182 铝合金半连续铸造过程热裂敏感性模拟研究 [J]. 铸造, 2022, 71 (12): 1529-1536.
- [5] 王睿, 张浩宇, 王顺成, 等. 电磁场频率对半连续铸造Al-Zn-Mg-Cu合金组织与性能的影响 [J]. 铸造, 2020, 69 (3): 240-245.
- [6] 侯健, 廖启宇, 贾永辉, 等. 特大规格AZ系镁合金扁锭的半连续铸造工艺 [J]. 铸造, 2020, 69 (10): 1048-1054.
- [7] 白清领, 李宏祥, 张济山, 等. 7050铝合金半连铸过程应力场及开裂倾向 [J]. 北京科技大学学报, 2014, 36 (11): 1527-1533.
- [8] 白清领, 缪姚军, 单小龙, 等. AA7050合金半连铸开裂及变形机制 [J]. 铸造, 2023, 72 (1): 77-81.
- [9] 苏鹏, 郭学益, 董健雄, 等. 铝熔体过滤技术的应用与研究方向 [J]. 轻合金加工技术, 2009, 37 (9): 14-22.
- [10] ALUMAX Inc. Process for treating molten aluminum with chlorine gas and sulfur hexafluoride to remove impurities: US5536296A [P]. 1995-05-03.
- [11] BAI Q, LIU J, LI H X, et al. A modified hot tearing criterion for direct chill casting of aluminium alloys [J]. Materials Science and Technology, 2015, 32: 151223020613003.
- [12] DOU, RUIFENG, PHILLION. Application of a pore fraction hot tearing model to directionally solidified and direct chill cast aluminum alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47 (8): 4217-4225.

Research on Smelting and Casting Technology of High-Quality 7050 Aluminum Alloy Large-Sized Slab for Aerospace Applications

WANG Jian¹, MA Si-mu², ZHU Zi-zong², WANG Kai²

(1. CHINALCO Southwest Aluminum(Group) Co., Ltd., Chongqing 401326, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract:

7050 aluminum alloy is widely used in aerospace structural parts because of its low density, high strength and excellent thermal processing performance. However, the problems of hot tearing, difficult forming, severe microporosities and oxidation inclusions within slabs have been existed in the semi-continuous direct-chill casting (DC) process of large-sized 7050 aluminum alloy slabs. In this study, the metallurgical quality control technology of alloy melt in the DC casting process of large-sized slabs was investigated, and the influence of melt refining process and grain refinement technologies on the quality of large-sized slabs were systematically explored, and the casting process of large-sized slab was also confirmed. The results show that, applying the optimized processes, the hydrogen and inclusion contents of the melt can be strictly controlled, and the grain sizes can be controlled at 1-1.5 grades when the grain refinement process with Al-Ti-C refiner was used for the alloy. High-quality melt alleviated the solidification shrinkage strain of the alloy, which solved the hot tearing behaviors of the cast slab ingots in a large proportion. Finally, a set of melting and casting process suitable for large-sized 7050 alloy slab ingot had been established.

Key words:

7050 aluminum alloy; semi-continuous direct-chill (DC) casting; melting and casting; hot tearing; microstructure