

1060 工业纯铝杆件夹杂物分析

裘尧衡¹, 陈朝轶¹, 李军旗¹, 李正龙², 王林珠¹, 兰苑培¹, 赵飞¹

(1. 贵州大学材料与冶金学院, 贵州贵阳 550025; 2. 遵义恒佳铝业有限公司, 贵州遵义 563100)

摘要: 从铝熔体洁净程度方面, 对某厂1060工业纯铝杆件进行了夹杂物检测分析。以机械抛光和电解抛光制备试样, 采用SEM/EDS观测样品中 Al_2O_3 、含铁金属间化合物、氯盐、氟化物等多种类型夹杂物。统计分析合格铝杆和不合格铝杆夹杂物分布、总数量和平均直径。数量最多的夹杂物为 Al_2O_3 夹杂物, 主要尺寸在0~20 μm 范围内。不合格杆中夹杂物总数量接近合格杆夹杂物数量两倍, 大量夹杂物易在连续分流挤压模具壁上积累, 造成加工铝管表面擦伤, 是不合格管件加工失效的主要原因。

关键词: 工业纯铝; 铝杆; 制冷铝管; 夹杂物; 分流挤压

铝及铝合金材料因其优良的延展性、导电性、导热性及耐蚀性, 高产量和相对较低廉的价格^[1-6], 广泛应用于换热器、制冷管、蒸发器等器件中。铝代铜成为冰箱、空调等制冷行业降低成本和轻量化产品的发展趋势^[7-9]。然而铝产品生产加工过程中, 其铝熔体洁净度直接影响了产品合格率和产品质量, 成为限制铝材发展的关键环节^[10-13]。夹杂物作为评价铝熔体洁净度的重要指标, 会造成铝熔体中氢气难以除净^[14], 形成裹气、缩孔、微裂纹等缺陷。夹杂物破坏基体连续性, 与基体性质差异大, 夹杂物尖角处易出现应力集中, 为材料常见断裂源、腐蚀源^[15-16], 非金属夹杂物是典型的疲劳裂纹源^[17]。在没有空腔、划痕等其他缺陷作为起裂部位的情况下, 夹杂物尺寸越大, 疲劳强度越低。Gao Hua等人^[18]对Al-Si-Cu合金压铸缸体中夹杂物形成的“硬点”进行了分析, 发现该“硬点”主要成分是 Al_2O_3 和少量的 Al_4C_3 , 其硬度在1425.7 HV到818.1 HV之间, 是铝合金基体硬度的14倍多。贺永东等人^[19]则研究了电解铝液过程中阳极效应产生的 CO_2 对铝液的作用过程, 经物相分析在970 $^{\circ}C$ 温度条件下, CO_2 与铝液反应生成 $\alpha-Al_2O_3$, 生成的大量氧化夹杂多与气孔相伴而生。

本文通过ICP元素含量分析、C、S、H元素分析仪、多种金相制备方法, SEM/EDS分析, 夹杂物统计分析等方法, 比较某铝加工企业生产的合格与不合格铝杆铝管差异, 分析讨论其加工失效原因, 夹杂物种类、形貌、数量、尺寸及可能来源。

1 试验样品与方法

1.1 试验样品

试验样品取自某铝加工企业, 如图1所示, 编号1~4分别为合格铝杆、不合格铝杆、合格铝管、不合格铝管。铝杆直径9.5 mm, 铝管外径8 mm, 内径6.6 mm。采用1060工业纯铝为原料, 铝管是由铝杆以分流挤压工艺成型。图1中5为不合格管面放大2 000倍表面SEM图像, 其加工表面存在均匀分布的丝状划痕缺陷, 不满足产品质量要求。对杆件进行ICP元素含量分析结果见表1。C、S、H元素含量分析仪测试结果见表2。

ICP测试结果中元素含量符合GB/T3190—2020 1060牌号化学成分要求。氢含量测试结果, 杆的氢含量高于管的氢含量, 塑性加工过程进一步降低了铝材中的氢含量, 合格铝材和不合格铝材的氢含量并不存在明显差异。碳元素含量测定结果

作者简介:

裘尧衡(1994-), 男, 硕士生, 研究方向为有色金属冶金。E-mail: 864446260@qq.com

通讯作者:

陈朝轶, 男, 教授。E-mail: ccy197715@126.com

中图分类号: TG115

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)07-0863-07

基金项目:

贵州省科技计划项目(黔科合成果[2021]一般086); 遵义市播州区科技项目(遵播科合科特[2020]3号)。

收稿日期:

2022-12-20 收到初稿,
2023-01-09 收到修订稿。

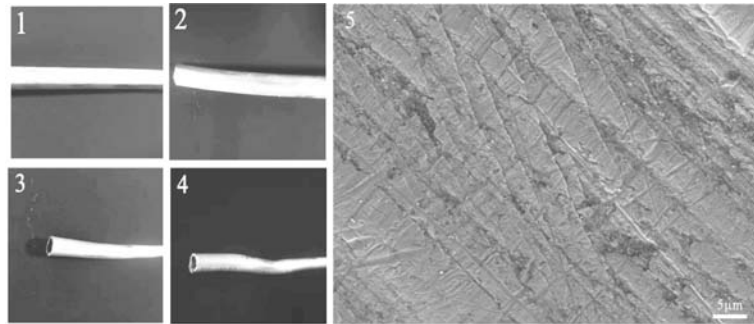


图1 实验样品与不合格铝管表面缺陷

Fig. 1 Test sample and unqualified aluminum tube surface defects

表1 铝杆ICP测试元素含量
Table 1 Aluminum rod ICP test element content

	Al	Mn	Mg	Cu	Zn	Si	Fe	Ti	V
$w_B / \%$	99.76	0.002	0.004	0.001	0.005 1	0.047 0	0.166	0.008 0	0.001 1

表2 C、S、H元素含量
Table 2 Content of C, S and H elements

样品编号	样品类型	测试质量/g	H/%	C/%	S/%
1	合格杆	0.062 7	0.004 3	0.016 674	0.011 538
2	不合格杆	0.071 8	0.003 6	0.016 045	0.005 434
3	合格管	0.063 3	0.002 0	0.020 914	0.010 233
4	不合格管	0.075 6	0.002 8	0.027 190	0.008 030

表明,由杆加工至管的过程中,试样中碳元素含量上升,这可能是在杆件塑性变形挤压过程中润滑油的引入造成的。

1.2 试验方法

截取合适长度试样,在机械抛光和电解抛光前,采用1 000目至7 000目SiC砂纸逐层打磨待抛光表面,机械抛光采用真丝绒抛光布结合金刚石抛光喷雾剂,将待测面抛光至镜面,然后将试样放入无水乙醇溶液中超声清洗5 min,去除表面油污,冷风吹干后进行SEM/EDS测试。由于机械抛光易造成划痕,且抛光过程中使用大量蒸馏水易造成盐类夹杂物溶解留下坑洞,因此需进行电解抛光制样。电解抛光液采用10%高氯酸酒精溶液^[20],阳极为待抛试样,阴极为不锈钢片。抛光温度20~30℃、电源电压25 V、极间距2 cm、抛光时间8~12 s。电抛至试样表面光亮后立即用蒸馏水冲洗电解液,并放入无水乙醇溶液中超声清洗1 min,冷风吹干后进行SEM/EDS测试。对每个试样选取五个截面,每个截面以固定放大倍数不重叠视场方式对夹杂物存在区域进行拍摄记录。采用ImageJ图像分析软件进行夹杂物数量和尺寸统计。

2 结果与讨论

2.1 夹杂物种类

Al_2O_3 夹杂物类型多,形态多样。文献报道^[21-24]的有 $\alpha-Al_2O_3$ 、 $\gamma-Al_2O_3$ 、 $\eta-Al_2O_3$ 等多种类型,具有碎屑状、颗粒状、膜状、板块状,尺寸分布在1 nm~1 000 μm 之间。试样中观测到 Al_2O_3 夹杂物最为普遍,如图2所示,a1、a2、a3为机械抛光处理样品的电镜图,a1、a2为长35 μm 左右、宽10~15 μm 的板块状 Al_2O_3 ,a3为直径5 μm 颗粒状 Al_2O_3 。b1、b2为采用电解抛光处理的样品电镜图,由于铝基体充当阳极发生溶解,使部分夹杂物突显出来,显现出更为立体的形貌。b1为尺寸约5 μm 块状 Al_2O_3 ,b2为短棒状 Al_2O_3 。a3图中箭头所示为富铁金属间化合物,铁在纯铝中的最大溶解质量分数仅为0.04%^[25],因此在凝固过程中,溶解的铁会析出形成富铁金属间化合物。在氩离子抛光处理样品c1图中,可以更加清晰的观察到该种金属间化合物,尺寸通常小于5 μm ,呈现球形汉字状结构。其来源可能与熔炼铁制工具与废杂铝的使用有关^[25],但该金属间化合物数量稀少、尺寸细小、形状圆盾,与基体紧密连接,使其造成危害的可能性远低于铝中常见夹杂物^[26]。

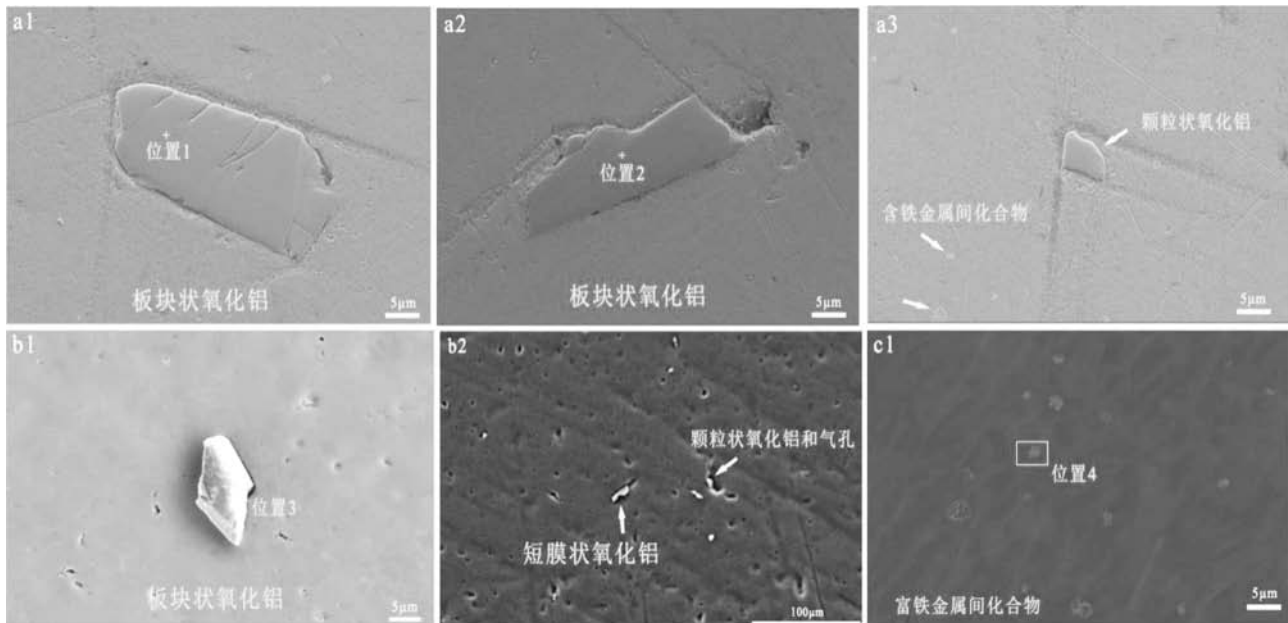


图2 氧化铝夹杂和铝铁金属间化合物

Fig. 2 Alumina inclusion and Al-Fe intermetallic compounds

样品中还发现了数量较少的其他类型夹杂物，如图3中所示，d1为直径20 μm的氟盐颗粒，含有Al、O、Na、K、Cl；其来源为熔体净化过程中添加精炼剂的NaCl-KCl组分^[27-28]，往往吸附有Al₂O₃夹杂物。d2为3 μm颗粒状夹杂物，主要含有Al、O、Na、K、F、Ti，其来源可能为原铝中冰晶石和精炼剂中氟化物组分，精炼剂中氟化物的添加有利于铝熔体和渣之间的分离^[29]。Ti的来源则可能为晶粒细化剂Al-5Ti-B的使用，e1呈现出多个细小颗粒聚集的情况，含有Al、O、Ti、Cr、Fe，尺寸约为2 μm，从形貌上看其来源可能为晶粒细化剂TiB₂粒子的团聚，而Fe、Cr元素在TiB₂表面异质形核析出^[30]。

f1为机械抛光样品表面观察到的坑洞，坑洞底部EDS能谱显示存在CaO，f2为尺寸约为20 μm的CaSO₄，硫酸盐可能是S在该样品中存在的主要形式，其来源可能为电解铝原料，而精炼剂中的亚硫酸盐在高温条件下，多以SO₂气体的形式逸出。也有文献^[31]指出工业大规模生产精炼熔剂时选择的低纯度NaCl中主要杂质也是CaSO₄。g1为圆盘状颗粒Al₄C₃颗粒，尺寸在20 μm左右。h1为掉入铝熔体的SiO₂，其尺寸在20 μm左右。在打磨制备试样过程中，由低目砂纸向高目砂纸逐层更换砂纸打磨，当更换至3 000目砂纸打磨时，发现试样中存在一明显硬点h2。发现的基体中的SiC颗粒，其尺寸达到约60 μm。虽然研磨采用的是SiC砂纸，但其最低为1 000目砂纸，显然达不到如此大的粒度。该大尺寸SiC颗粒更可能来源于SiC泡沫陶瓷过滤器，经过铝熔体长时间的侵蚀而脱落掉入熔体中。h3为所示的两

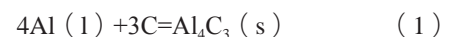
个30~40 μm的颗粒，主要含有C、O、Si、Ca，其可能为SiC和CaO复合而成。

2.2 夹杂物形成机制

因铝活性高，高温条件下O₂、H₂O、CO₂和铝熔体均能发生反应生成氧化铝。在熔炼过程中铝熔体表面最初形成的γ-Al₂O₃向α-Al₂O₃转变并发生碎裂，最终被铝熔体浸润，形成板块状氧化铝夹杂。棒状氧化铝则是在转运、浇注、以及在原料中添加铝屑形成的，在后续精炼过程中，铝熔体的机械搅拌、精炼剂的添加，使氧化铝夹杂的尺寸进一步减小^[32]，形成颗粒状氧化夹杂。细小的颗粒状氧化夹杂难以采用过滤方式去除，而残留在铝基体中。

其他类型夹杂物多为外部环境引入杂质造成。氟盐和氟化物多为精炼剂组成成分，其主要功能为吸附氧化夹杂，带至熔体表面以便于扒渣去除，但也存在扒渣不净、精炼剂残留在熔体中的情况。铝熔炼过程中向铝熔体中加入Al-Ti-B中间合金，产生TiB₂粒子以达到铝材晶粒细化的目的，但这些粒子易团簇形成夹杂。

铝熔体中不同碳源都可能形成Al₄C₃，如电解铝过程中的石墨电极、熔炼过程中添加石墨添加剂^[33]、压铸过程中添加的润滑油、无保护层的SiC坩埚^[34]等，铝熔体和C、SiC发生的反应分别为(1)和(2)。



废铝原料在预处理后仍含有高钙的杂质，熔炼时

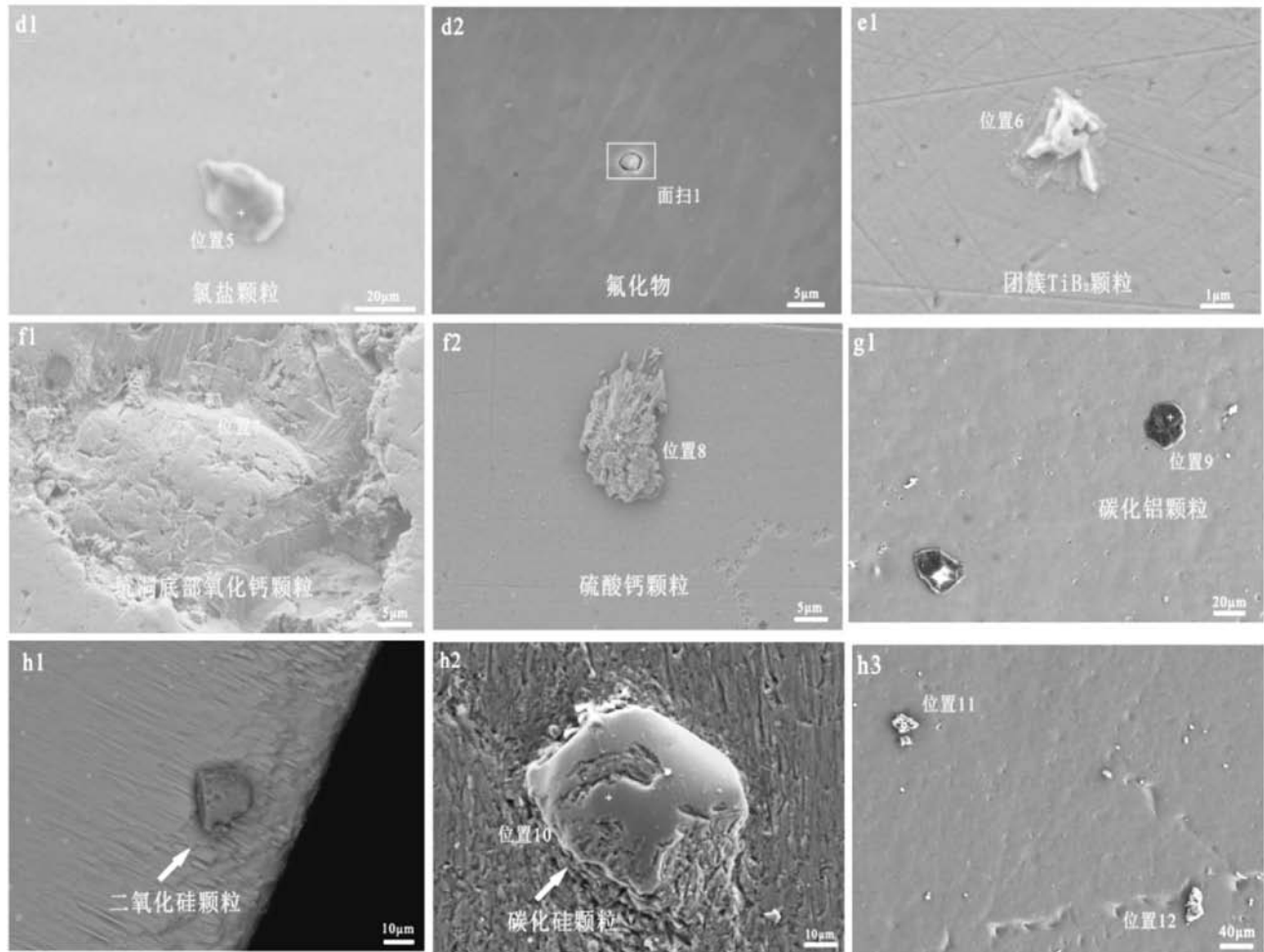


图3 其他类型夹杂物

Fig. 3 Other types of inclusions

表3 EDS测试元素含量
Table 3 EDS elements content

位置	O	Al	C	Ti	Fe	Na	Cl	K	F	Cr	Ca	S	N	Si	Mg	at/%
位置1	57.64	42.36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
位置2	57.26	42.74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
位置3	57.32	38.64	3.14	0.90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
位置4	-	90.45	-	-	9.55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
位置5	46.31	29.63	-	-	-	11.18	8.96	3.92	-	-	-	-	-	-	-	-
面扫1	4.03	73.09	-	1.17	-	2.07	-	5.96	13.61	-	-	-	-	-	-	-
位置6	39.39	37.61	-	14.69	1.42	-	-	-	-	6.89	-	-	-	-	-	-
位置7	62.56	14.28	-	-	-	-	-	-	-	-	23.16	-	-	-	-	-
位置8	66.61	0.94	-	-	-	-	-	-	-	-	18.92	13.53	-	-	-	-
位置9	7.88	11.54	71.73	-	-	0.27	0.27	0.27	-	-	0.15	0.22	7.63	-	-	-
位置10	0.55	-	49.38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50.07	-	-
位置11	26.02	2.72	6.31	-	-	0.11	1.69	0.36	-	-	1.46	-	-	61.13	0.19	-
位置12	52.41	1.87	26.95	0.47	1.15	0.15	0.76	1.15	-	-	7.61	-	-	4.53	2.62	-

Ca会再次进入熔体。在高温下, 杂质Ca会与氧反应生成CaO颗粒^[31], 也有报道^[32]铝基体中的CaO夹杂物颗

粒, 是在电解含有CaO杂质的氧化铝过程中被带入到电解铝液中的。对于含有多种元素的复杂夹杂物, 若排

除EDS分析所带来的误差,这些夹杂并不单一由一种化合物凝聚而成,而是由多种化合物及原子以某种方式复合而成^[32]。

2.3 夹杂物数量与尺寸统计

对合格杆件与不合格杆件,各五个截面的夹杂物尺寸与数量统计如图4所示。从每个样各自不同截面的分布看,杆件不同截面的夹杂物数量分布规律性不强。对于合格杆件,存在截面夹杂物数量陡然增高的情况,夹杂物在合格杆件沿杆长方向的分布并不均匀。不合格杆件不同截面的夹杂物数量波动较小。不

同于Jaradeh在文献^[35]中提及的铸件,这可能是塑性加工的影响,也可能是截面距离仅为0.03 mm,检测截面间的距离偏近,不足以反应加工过程中夹杂物在产品中周期性波动的规律。

从各个截面夹杂物尺寸分布上分析,夹杂物尺寸主要分布在0~20 μm的范围内,多为危害较小的细小颗粒,主要类型为Al₂O₃夹杂物,其他类型夹杂物含量极少,纯铝杂质元素含量低,工业精炼剂添加量受严格控制,一般不超过熔体质量的0.5%^[28, 36-37]。该厂在熔体净化的最后工序采用双层泡沫陶瓷过滤板,将绝大多数20 μm以上的夹杂物过滤掉。如图5所示,不合格

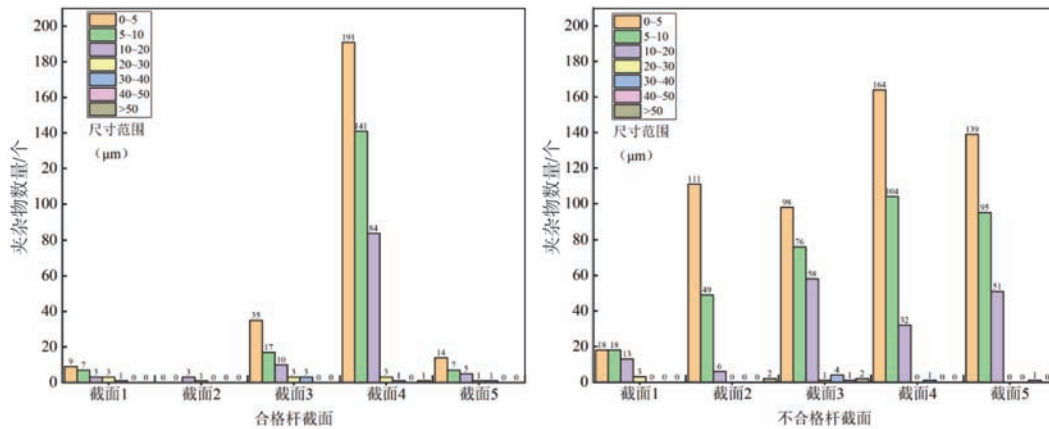


图4 不同截面夹杂物尺寸统计分布图

Fig. 4 Statistical distribution of inclusions size at different sections

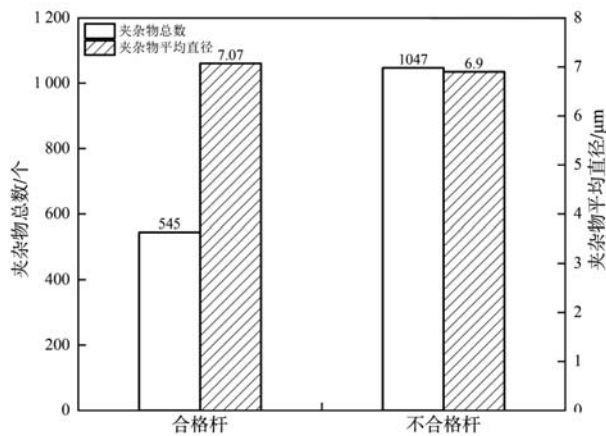


图5 合格与不合格铝杆样品夹杂物总数量与平均直径

Fig. 5 Total inclusions and mean diameters of qualified and unqualified aluminum rod samples

杆夹杂物数量明显高于合格杆夹杂物数量,接近合格杆夹杂物数量的两倍。而在夹杂物平均直径上,合格杆和不合格杆件中的夹杂物差别不大。尽管夹杂物尺寸较小,但易在连续分流挤压模具壁上积累,经显微硬度仪测试夹杂物硬度为HV 156.33,基体硬度HV 67.10。造成了加工铝管表面擦伤,这是不合格杆件加工失效

的主要原因,对于尺寸大于20 μm的夹杂物颗粒,其主要类型为h1、h2、h3含Si、C、O元素的硬质颗粒,这样尺寸较大的夹杂物危害性更大^[38],可能来自于熔体过滤之后、分流挤压之前的连铸连轧工艺过程中外部环境的污染,需尽可能避免。此外采用电解抛光制样方式,虽然样品已抛至镜面,但会存在局部的起伏突起,这对0~20 μm尺寸范围内夹杂物统计可能存在干扰,使实际统计夹杂物数量偏高。

3 结论

(1) 塑性加工过程降低了铝材的氢含量,合格铝材和不合格铝材的氢含量并不存在明显差异,氢含量不是铝管的失效原因。由杆加工至管的过程中,试样C元素含量上升,这可能是在杆件塑性变形挤压过程中润滑油的引入造成的,需警惕加工过程中Al₄C₃颗粒的形成。

(2) 试样中存在的夹杂物种类多,成分复杂,含有Na、K、Cl、Ca、Si、S、C、O、Fe、Cr、Ti等多种元素。其中较为典型的夹杂物为氧化铝夹杂;含有极少残留精炼剂中的氟盐、氟化物、硫酸盐;晶粒细化

剂中的 TiB_2 粒子团簇；熔炼原料残留的 CaO ；生产环境杂质掉入熔体而产生的污染物： Al_4C_3 、 SiC 、 SiO_2 颗粒等。

(3) 杆件沿杆长不同截面的夹杂物数量分布规律性不强；数量最多的夹杂物为 Al_2O_3 夹杂物，其尺寸主要分布在 $0\sim 20\ \mu m$ 范围内。含有少数尺寸大于 $20\ \mu m$

的危害性较大夹杂物颗粒，其主要类型为含 Si 、 C 、 O 元素的硬质颗粒夹杂。不合格杆夹杂物总数量明显高于合格杆夹杂物总数量，接近合格杆夹杂物数量的两倍，这使得夹杂物易在连续分流挤压模具壁上积累，高于基体的硬度易造成加工铝管表面擦伤，是不合格管件加工失效的主要原因。

参考文献：

- [1] GUAN Renguo, TIE D. A review on grain refinement of aluminum alloys: progresses, challenges and prospects [J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2017, 30 (5): 409-432.
- [2] REBOUL M C, BAROUX B. Metallurgical aspects of corrosion resistance of aluminium alloys [J]. *Materials and Corrosion*, 2011, 62 (3): 215-233.
- [3] 刘建生, 王丽萍, 姜海, 等. 回用铝对6008铝合金挤压型材晶间腐蚀的影响 [J]. *热处理技术与装备*, 2020, 41 (4): 33-37.
- [4] 代卫丽, 宋月红, 刘彦峰, 等. 细化剂 TiC 物性参数对纯铝组织及性能的影响 [J]. *甘肃科学学报*, 2020, 32 (1): 38-45.
- [5] 魏立艳. 微观组织结构对铝及铝合金腐蚀行为的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [6] 侯嘉鹏. 铝及铝合金线高强度高导电率机制研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- [7] 邓运来, 张新明. 铝及铝合金材料进展 [J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29 (9): 2115-2141.
- [8] 彭楚堂, 王琳, 陈龙, 等. 空调换热器铝管材料的抗腐蚀性研究 [J]. *制冷与空调*, 2020, 20 (8): 29-32.
- [9] 方融, 滕世政, 周彬, 等. 新型铝回气管组在制冷系统中的应用 [C]//2019年中国家用电器技术大会论文集, 佛山, 2019.
- [10] 倪红军, 黄明宇, 朱昱. 铝熔体熔剂的应用与研究 [J]. *铸造技术*, 2004, 5: 402-404.
- [11] MAJIDI O, SHABESTARI S G, ABOUTALEBI M R. Study of fluxing temperature in molten aluminum refining process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 182 (1-3): 450-455.
- [12] 曹以恒. 铝合金中气孔和夹杂相对合金力学性能的影响 [D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [13] 高卫国. 浅谈铝合金熔炼过程中常见夹杂及净化技术 [J]. *冶金管理*, 2021 (11): 31-41.
- [14] 孙泽棠, 傅高升, 王火生, 等. 铝熔体中夹杂物与氢相互关系的分子动力学模拟探索 [J]. *铸造*, 2018, 67 (6): 497-501.
- [15] KARIM M R, KADAU K, NARASIMHACHARY S, et al. Crack nucleation from non-metallic inclusions in aluminum alloys described by peridynamics simulations [J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 153: 106475.
- [16] 许征兵, 王文超, 庞兴志, 等. 夹杂物对工业纯铝组织性能的影响 [J]. *铸造*, 2009, 58 (8): 827-830.
- [17] ZERBST U, MADIA M, KLINGER C, et al. Defects as a root cause of fatigue failure of metallic components.II: Non-metallic inclusions [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 98: 228-239.
- [18] GAO Hua, ZHAO Bin, ZHAO Zhen-bo, et al. A cluster of inclusions on Al-Si-Cu die casting cylinder block [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2015, 55: 370-375.
- [19] 贺永东, 陈楚, 曾慧楠, 等. 阳极效应对电解铝液中氧化铝夹杂形成过程的影响机制研究 [J]. *稀有金属*, 2017, 41 (1): 64-71.
- [20] 全国信息与文献标准化技术委员会. GBT 3246.1-2012变形铝及铝合金制品组织检验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [21] CAMPBELL John. Complete casting handbook [M]. Elsevier Ltd, 2015.
- [22] IMPEY S A, STEPHENSON D J, NICHOLLS J R. Mechanism of scale growth on liquid aluminium [J]. *Materials science and technology*, 1988, 4 (12): 1126-1132.
- [23] 贺永东, 陈楚, 曾慧楠, 等. 阳极效应对电解铝液中氧化铝夹杂形成过程的影响机制研究 [J]. *稀有金属*, 2017, 41 (1): 64-71.
- [24] GOPALAN R, PRABHU N K. Oxide bifilms in aluminium alloy castings-a review [J]. *Materials Science and Technology*, 2011, 27 (12): 1757-1769.
- [25] 何学峰, 刘波, 张深根. 再生铝合金中含Fe杂质的控制技术现状 [J]. *化工进展*, 2021, 40 (10): 5251-5269.
- [26] 唐鹏. 富铁铝合金细化变质及沉降行为的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [27] UTIGARD T A. The properties and uses of fluxes in molten aluminum processing [J]. *Jom*, 1998, 50 (11): 38-43.
- [28] LI Cong, LI Jian-guo, MAO Yi-zhe, et al. Mechanism to remove oxide inclusions from molten aluminum by solid fluxes refining method [J]. *China Foundry*, 2017, 14 (4): 233-243.
- [29] 周巧妹. 废铝再生用熔剂及再生工艺的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [30] SIMENSEN C J, STRAND G. Analysis of inclusions in aluminium by dissolution of the samples in hydrochloric/nitric acid [J]. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 1981, 308 (1): 11-16.

- [31] 万兵兵. 再生铝硅合金熔体净化及变质处理技术研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [32] 张胜全, 石伯承. 5083铝合金中夹杂物精炼前后的变化研究 [J]. 热加工工艺, 2012, 41 (15): 68-70.
- [33] 杜科选, 夏禹. 用电解铝液生产铝加工坯料的熔体净化方法探讨 [J]. 铸造技术, 2009, 30 (3): 377-380.
- [34] DAMOAH L N W, ZHANG Lifeng. Removal of inclusions from aluminum through filtration [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2010, 41 (4): 886-907.
- [35] JARADEH M M, CARLBERG T. Method developed for quantitative analysis of inclusions in solidified aluminum ingots [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2011, 42 (1): 121-132.
- [36] MAJIDI O, SHABESTARI S G, ABOUTALEBI M R. Study of fluxing temperature in molten aluminum refining process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182 (1-3): 450-455.
- [37] 沈海鹰. 用电解铝液生产铝合金扁铸锭的熔体净化工艺 [J]. 轻合金加工技术, 2009, 37 (4): 13-16.
- [38] 唐小龙. 铝及铝-硅合金熔体净化处理及其机理研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.

Inclusions Analysis of 1060 Industrial Pure Aluminum Rods

QIU Yao-heng¹, CHEN Chao-yi¹, LI Jun-qi¹, LI Zheng-long², WANG Lin-zhu¹, LAN Yuan-pei¹, ZHAO Fei¹

(1. College of Materials and Metallurgy, University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Zunyi Hengjia Aluminum Co., Ltd., Zunyi 563100, Guizhou, China)

Abstract:

In this paper, the inclusion detection and analysis of 1060 industrial pure aluminum rods in a factory were carried out in terms of the purity of aluminum melt. The samples were made by mechanical polishing and electrolytic polishing, and various types of inclusions such as Al_2O_3 , iron-containing intermetallic compounds, chlorine salts and fluorides were observed by SEM/EDS. The inclusion distribution, total quantity and average diameter of inclusion in qualified and unqualified aluminum rods were statistically analyzed. The most abundant inclusions were Al_2O_3 inclusions, which were in the range of 0-20 μm . The total number of inclusions in the unqualified rod was nearly twice that of the qualified rod. A large number of inclusions easily accumulate on the wall of the continuous shunt extrusion mold, resulting in surface abrasion of the processed aluminum tubes, which was the main reason for the failure of the unqualified pipe fitting.

Key words:

industrial pure aluminum; aluminum rods; refrigeration aluminum tubes; inclusions; porthole die extrusion