

半连续铸造和热处理工艺对锌铝合金管材性能的影响

黄鸿兴¹ 吴波^{2,3}

(1.福建省产品质量检验研究院; 2.福州大学材料科学与工程学院; 3.福州博德新材料科技有限公司)

摘 要 研究了在半连续铸造、热处理工艺和挤压工艺条件下,Zn-22Al 合金铸棒与挤压管的显微组织和力学性能。结果表明,相较于传统井式炉铸造,经过半连续铸造的 Zn-22Al 合金铸棒品质好、致密光洁、晶粒细小,杂质更少,氧化不明显,挤压前可省去超塑性处理工艺。经过传统铸造挤压成形的管材最多只能减径至 $\phi 6.4$ mm,而经过半连续铸造挤压成形的管材可拉拔减径至 $\phi 5.8$ mm,不仅减少了工序,而且提高了管材塑性。

关键词 Zn-22Al 合金;半连续铸造;热处理;挤压工艺;力学性能

中图分类号 TG166.3;TG146.1⁺2;TG249.7

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.05.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influence of Semi-continuous Casting and Heat Treatment Process on Properties of Zn-Al Alloy Pipes

Huang Hongxing¹, Wu Bo^{2,3}

(1.Fujian Institute of Product Quality Inspection; 2.School of Materials Science and Engineering, Fuzhou University; 3.Fuzhou Bode New Material Technology Co., Ltd.)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of Zn-22Al cast rods and extruded tubes were investigated under semi-continuous casting process, different heat treatment processes and extrusion processes. The results indicate that compared with the traditional pit furnace casting, the Zn-Al alloy casting rods by semi-continuous casting presents dense and smooth microstructure with high quality, fine grains and less impurities as well as less casting oxidation, indicating the omission of superplastic process before extrusion. The outer diameter of the pipe extruded by traditional casting extrusion is reduced to 6.4 mm to the greatest extent, while that extruded by semi-continuous casting can be reduced to 5.8 mm, which not only reduces the process, but also improves the plasticity of the pipe.

Key Words: Zn-22Al Alloy, Semi-continuous Casting, Heat Treatment, Extrusion Process, Mechanical Properties

工业雷管用延期体制作时,通过对填装延期药粉的合金管进行多道次拉拔减径,实现延期药的致密均匀分布,然后切段装配到工业雷管,通过药芯燃烧穿透时间来机械延时控制爆破系统,该方法成本低廉、可靠性高。因此,用于制备延期体的合金管需要具有冷加工过程中温升小,合适的硬度、强度和塑性匹配的性能。传统延期体材质为铅锡合金,其具有润滑强、质地柔软、流变应力小和易加工等特点,但其容易对环境造成污染,危害人体健康,因此环保型替代材料的研究迫在眉睫。高锌高铝含量的共析型锌铝合金是一种新型的超塑性合金,由于其熔点低、密度小、成本低、加工性和力学性能优异,受到国内外广泛重视^[1-8]。Zn-Al 合金不仅在高温下具有超塑性,且在合适的熔炼工艺及热处理工艺下其

成形的管材也可达到室温超塑性^[9]。DEMIRTAS M 等^[10]研究了不同工艺对无片层超细晶粒形成的影响,讨论了 Zn-22Al 合金的室温超塑性和断裂模式,认为在 100℃×60 min 的 30% 热轧+250℃×30 min 的时效+30 min 的 30% 的冷轧所获得的 Zn-22Al 合金具有较大的伸长率和较小的流动应力。唐巍^[11]提出“一种雷管用超细晶无铅延期体的制备方法”,采用铸造、挤压、轧制和机加工方法制备锌铝合金管,然后拉拔或轧制成细延期体,但是其工艺流程复杂,对设备的要求较高,现有装备和技术只能将直径为 18 mm 的粗管拉拔到直径为 14 mm。林晋伟^[12]通过传统工艺,使用井式电阻炉对 Zn-Al 合金进行小批量熔铸-均匀化热处理-铸棒挤压-管材调质热处理等一系列工艺处理,制备的

收稿日期:2022-10-24;修改稿收到日期:2022-11-09
第一作者简介:黄鸿兴,男,1994 年出生,助理工程师,福州(350001),E-mail:540145120@qq.com
通信作者:吴波,男,1971 年出生,教授,福州(350100),E-mail:wubo@fzu.edu.cn
引用格式:黄鸿兴,吴波. 半连续铸造和热处理工艺对锌铝合金管材性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(5):676-681.
HUANG H X, WU B. Influence of semi-continuous casting and heat treatment process on properties of Zn-Al alloy pipes[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(5):676-681.

延期体管材可拉拔减径至 $\phi 6.5$ mm 左右,但是其工艺复杂,浇注过程操控不稳定,获得的铸棒组织疏松,杂质和氧含量高,铸棒后续的超塑性处理过程耗时长,水淬速度和淬透深度难以控制,成材率不高,洁净度低,依然局限在实验室 20 kg 级别生产,无法批量化生产。后续研究中,尝试采用半连铸方法来铸造锌铝合金铸棒,挤压出品质和效率更高的环保型延期体管材,实现吨位级别量产,以期高效、环保的工业化生产提供参考。

1 试验方法

采用传统熔铸与半连铸获得高品质铸棒。采用三孔模具,对不同熔炼工艺及热处理工艺的铸棒进行适当速率的正向挤压成形。

采用纯度(质量分数)为 99.7% 的铝锭、99.995% 的锌锭、Al-10RE、Al-8B 以及 Al-5Ti 中间合金为原料,采用 SG2-7.5-12 型井式电阻炉进行 20 kg 合金的常规熔炼并浇注,采用 EMQ-250 型工业炉进行吨位级别熔炼和半连续铸造,将铝锭和锌锭在不同温度下依次放入炉中熔化静置,再依次加入细化剂、除渣剂、精炼剂等,最后搅拌扒渣后将 600 ℃ 左右合金液浇注到备好的模具中,以制备表面光洁、无缺陷的铸棒。

铸棒在挤压前要求尽量低的硬度,一方面为减少管材挤压时的能耗,避免挤压机过载闷车,另一方面为提高管材的成材率从而获得高品质超塑性管材。提高塑性降低硬度可通过细化晶粒来实现。基于有关研究^[13-17]可采用大塑性变形 (SPD) 方法加工 Zn-22Al 合金以获得超细晶粒尺寸,如等通道角挤压 (ECAP)、高压扭转 (HPT)、搅拌摩擦加工 (FSP)、交叉通道角挤压 (CCA) 和连铸挤压 (CAS-TEX) 等方法,但是工艺相对复杂繁琐。在简化工艺、缩短周期,又不影响最终品质的前提下,主要从热处理工艺和铸棒浇注过程降温工艺两方面着手:一种是将铸棒进行超塑性处理(在 360 ℃ 下保温 24 h 后快速水淬火),另一种是在半连续铸造过程中,通过控制牵引机构,利用红外测温器找出 360 ℃ 左右的点位,将结晶器二次冷却水引至该点位以下约 30 cm 进行持续的冷却,见图 1,由该工艺降温后铸棒在挤压成形前不再经超塑性热处理。两种工艺处理后的铸棒经过车削后在 660T 型卧式挤压机上以 0.2~1.6 mm/s 的速度进行正向挤压得到 Zn-Al 合金管,随后对挤压成形后的管材进行直接退火和超塑性处理。

直接退火是在 150 ℃ 下,将管材分别保温 3、6、9 和 12 h 的退火处理。超塑性处理是将挤压成形的管材在 360 ℃ 下保温 24 h 后再水淬 (WQ)、空冷 (AC) 或炉冷 (FC) 降至室温后,在 150 ℃ 下保温 3、6、9 或 12 h 的低

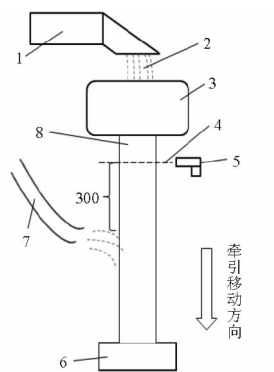


图 1 铸棒水冷却操作原理图

Fig.1 Schematic diagram of casting rod operated by water cooling

1.多孔陶瓷过滤器 2.洁净合金液 3.结晶器 4.360 ℃温度线
5.测温器 6.牵引机构 7.冷却水 8.铸棒

温退火处理。

维氏硬度测试采用 DHV-1000 型显微维氏硬度计根据 GB/T 4340.1-2009 进行。采用压头为正四棱锥体金刚石,载荷为 1 N,保压 15 s。卸除载荷后,测量试样表面对角线压痕,获得维氏硬度值。拉伸试样按照 GB/T228-2009,见图 2。拉伸试验在常温下采用 CMT6104 型微机控制电子万能试验机进行,拉伸速度为 0.6 mm/min。

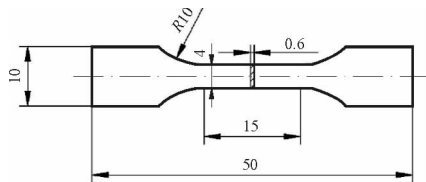


图 2 标准拉伸试样尺寸

Fig.2 Dimension of standard tensile specimen

采用 XJZ-6A 型金相显微镜、Nova NanoSEM 230 和 Zeiss Supra55 型扫描电镜进行显微组织观察,经过研磨抛光后使用体积分数为 1% 的 HF 水溶液腐蚀,金相试样和扫描电镜试样分别腐蚀 15 s 和 35 s。本研究主要用途为环保型延期体替代材料分析,因此将管材的一端在轧尖机齿口上进行缩头处理,轧完后往端部塞入海绵,避免药芯洒漏,然后使用尺子测量管材内部空间,依据药芯大概密度范围将管材填满延期药,用木棒或塑料棒轻轻筑紧,对药粉计重。装填结束后,用海绵堵住封口处理,然后使用固定口径的模具进行逐道次的减径拉拔,制备成所需尺寸的延期索。

2 试验结果与讨论

2.1 微观组织分析

Zn-22Al 合金由 α_1 (富 Al 相, FCC 结构) 和 η (富锌

相,HCP 结构)所构成^[18-20]。Zn 与 Al 在高温状态下可以任意相溶,而在室温下有限互溶。当温度为 385 ℃ 时,发生共晶反应: $L \rightarrow \eta(\text{富 Zn}) + \alpha_2(\text{富 Zn})$,当温度降到 275 ℃ 时,发生共析反应: $\alpha_2(\text{富 Zn}) \rightarrow \alpha_1(\text{富 Al}) + \eta(\text{富 Zn})$,其中单相 α_2 为颗粒状软相, η 为硬相,共析组织($\alpha_1 + \eta$)为层状结构,其层状结构附近会出现微裂纹,使塑性降低^[10],因此从片状到粒状形态的转变对塑性的改善起着重要作用,所以可以通过超塑性工艺(360 ℃ 保温 24 h+快速水淬)获得尽可能多的颗粒状软相 α_2 组织。

不同熔炼铸造工艺下铸棒横截面组织见图 3。其中,富 Al 区为灰黑色,而富 Zn 区为亮白色^[21]。可以看出,半连续铸造合金组织更加致密,晶粒更加细小,组织也更加均匀。表 1 为管材主要挤压工艺参数,图 4 为经

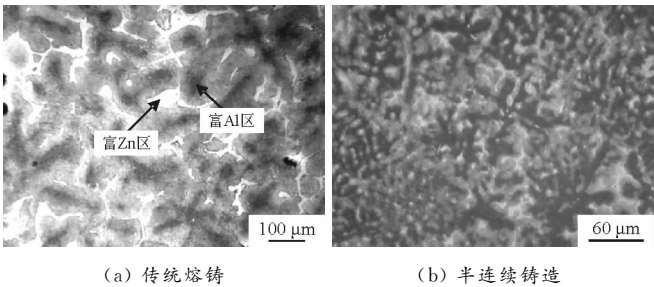


图 3 铸态 Zn-22Al 合金试样显微组织
Fig.3 Optical microstructure of as-cast Zn-22Al alloy speimens

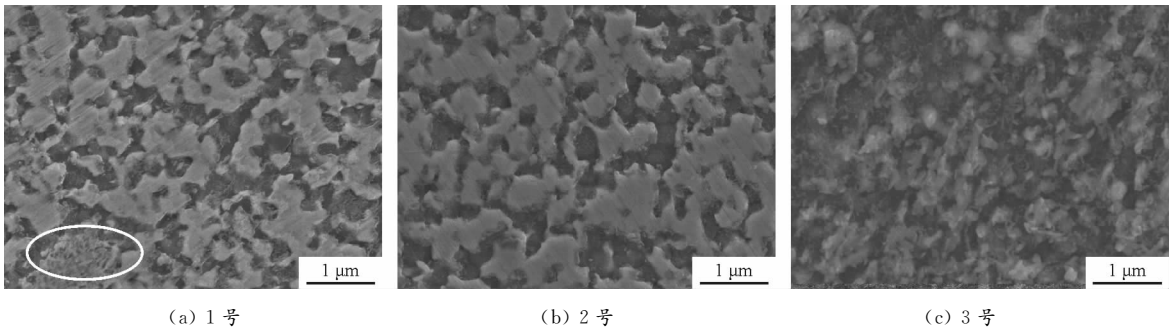


图 4 管材横截面扫描电镜图
Fig.4 SEM images of cross section of tube



图 5 多孔陶瓷过滤器
Fig.5 Porous ceramic filter

重复进行 360 ℃ 超塑性处理,就会导致组织粗化,所以 2 号管组织细化程度反而不如 1 号管,作为对比,3 号管在挤压成形前,铸棒未进行单独超塑性处理工艺,其成

表 1 管材主要挤压工艺参数

Tab.1 Main extrusion parameters of tube							
编号	熔炼工艺	处理工艺	棒料温度/℃	挤压筒温度/℃	出口温度/℃	挤压速度/(mm·s ⁻¹)	
1	传统熔炼	360 ℃×24 h+WQ	200	235	250	0.4	
2	半连续铸造	360 ℃×24 h+WQ	200	235	250	0.4	
3	半连续铸造	—	200	235	250	0.4	

过不同成形工艺下经 150 ℃×12 h 退火后管材横截面的 SEM 组织。从图 4a 可见,1 号管的组织均匀性稍差,并且出现了共析组织($\alpha_1 + \eta$)层状结构(图 4a 圆圈处),其对塑性影响较大^[10],而 2 号管并无该方面缺陷。由图 3 知,半连铸下合金组织的细化程度要远大于传统熔炼的铸态组织,但对比图 4a 和图 4b 会发现,同样在管材挤压成形前对铸棒进行了 360 ℃ 的超塑性处理,2 号管材组织细化不明显,甚至略比 1 号管材组织更为粗大些,主要原因为在半连续铸造浇注过程中,熔体经过陶瓷多孔过滤器后(见图 5),被均匀地导入结晶器中,在结晶器壁和结晶器底座的作用下,始终保持匀速顺序结晶,组织均匀且有明显的方向性,消除了气孔和缩松等缺陷,待铸棒达到一定高度后,就会在牵引机构的控制下接受来自结晶器下缘处的二次冷却水的冷却,见图 6,在冷却过程中尽可能保证铸棒在与水接触时的温度为(360±5) ℃。该过程与单独进行 360 ℃ 超塑性处理后水淬类似,同样会获得足够多的 α_2 相,后期如果

形的管材横截面组织均匀,晶粒比 2 号管更为细小且无影响塑性的层状结构。传统熔炼通过手动浇注(见图 7),其均匀性受重力影响很大,容易产生气孔,成材率相



图 6 铸棒水冷却过程
Fig.6 Water cooling process of casting rod



图 7 传统熔炼铸造过程
Fig.7 Traditional smelting and casting process

对半连铸较低,并且铸造后经过空冷, α_2 相减少,主要以($\alpha_1+\eta$)层状结构为主,因此必须进行 360 ℃的超塑性处理。图 8 为传统熔炼铸造铸棒和半连续铸造铸棒横截面,可见传统铸造存在缩孔。



(a) 传统熔铸 (b) 半连铸
图 8 铸棒横截面形貌
Fig.8 Cross section of casting rod

2.2 热处理工艺对性能影响

2.2.1 对硬度的影响

表 2 为不同超塑性处理工艺参数,处理后合金性能见图 9。可以看出,管材硬度变化规律为 7 号管(无超塑性处理)<4 号管(超塑性处理+水淬)<6 号管(超塑性处理+炉冷)<5 号管(超塑性处理+空冷),并且随着退火时间的延长,硬度逐渐降低并最后趋于稳定。虽然越快的降温速度对应产生越大的热应力,但 4 号管经过水淬会使 360 ℃下的颗粒状过冷态软相 α_2 充分保留

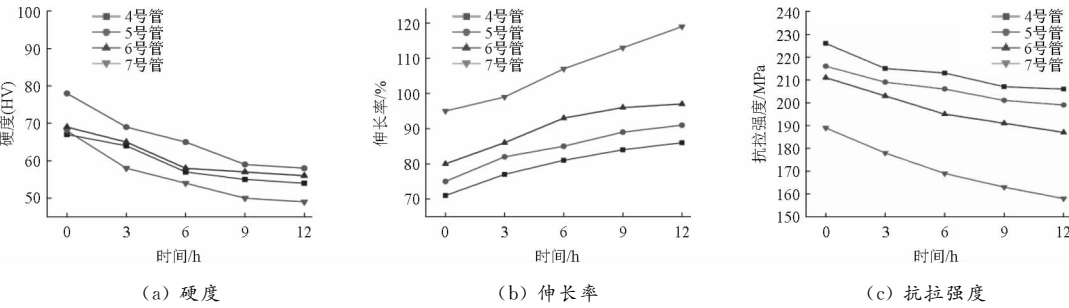


图 9 Zn-22Al 基金属挤压管材在不同超塑性处理工艺下的力学性能

Fig.9 Mechanical properties of Zn-22Al alloy extruded pipe under different superplastic treatment processes

2.2.2 对力学性能的影响

整体管材伸长率变化规律为:7 号管(无超塑性处理)>6 号管(超塑性处理+炉冷)>5 号管(超塑性处理+空冷)>4 号管(超塑性处理+水淬),并且伸长率随着退火时间的延长先上升后趋于稳定。挤压管成形过程属于大塑性焊合变形,管材内部难免存在微裂纹,因此在塑性上热应力影响大于组织类型,水淬后虽然 α_2 相含量高,但是热应力太大,有可能会造成管材内部因挤压成形产生的微裂纹加剧,造成不可逆的组织脆性,退火工艺无法完全消除微裂纹,导致在塑性拉伸过程容易发生脆断,所以水冷工艺的 4 号管伸长率最差;其次是空冷的冷却速率不如水淬,但是空冷一方面会给 α_2 相提供一定的相变分解的时间,另一方面又会造成较

下来,而热应力在后期的退火中可以消除少部分,因此经 360 ℃×24 h-WQ 处理后硬度较低;经过炉冷后的 6 号管硬度比 4 号管略高,主要原因为长时间的高温炉冷下,虽然发生共析反应: $\alpha_2\rightarrow\alpha_1+\eta$,该共析相为硬脆相层状结构,但是在半连续铸造工艺下,组织均匀致密,晶粒细化程度高、缺陷少,且几乎不受热应力影响,因此该共析组织对硬度影响也会更低;5 号管硬度最高,主要是由于空冷降温速度相对较快,会受到较大的热应力影响,而空冷也会给软相 α_2 的分解提供充分的时间,所以 5 号管既受热应力影响又受组织相变影响。经特殊半连铸水冷工艺,7 号管大部分细小的软相 α_2 可以保留下来,且不受单独超塑性处理后水冷导致的热应力影响,从图 4c 也可知该工艺管材无微裂纹和粗大组织,长时间的低温退火便可使管材中组织均匀化,既保留了 α_2 组织又消除了内应力,所以整体硬度最低,保温 12 h 后最低硬度(HV)为 49.04。

表 2 半连续铸造管材热处理工艺

Tab.2 Heat treatment parameters of semi-continuous casting tube

编号	管材超塑性处理	退火工艺
4	360 ℃×24 h-WQ	150 ℃×3、6、9、12 h
5	360 ℃×24 h-AC	150 ℃×3、6、9、12 h
6	360 ℃×24 h-FC	150 ℃×3、6、9、12 h
7	—	150 ℃×3、6、9、12 h

大程度的热应力,所以 5 号管伸长率稍好于 4 号管;6 号管虽然 α_2 相含量最低,但几乎不受因热应力加剧微裂纹的影响,本身在半连铸工艺下组织均匀致密,可塑性好,所以其伸长率大于 5 号管;7 号管成形后直接进行退火处理,其本身组织均匀, α_2 相含量高,经退火后消除大部分应力且不会造成 α_2 相的粗化和减少,其塑性最佳,在保温时间为 12 h 时伸长率达 119.06%。抗拉强度和伸长率呈反比关系,二者机理相同。

2.3 挤压工艺的影响

表 3 为部分管材主要挤压工艺参数。表 4 为不同挤压工艺的管材经过装药拉拔减径后的数据。可以看出,传统井式电阻炉熔炼的铸棒在挤压前通过超塑性处理工艺(360 ℃×24 h-WQ)所制备的管材拉拔性能会

更好,最小可减径至 6.4 mm,主要考虑传统熔炼采用空冷降温,成材率低,组织均匀性受重力影响,气孔多,以($\alpha_1+\eta$)层状结构为主,而从层状结构到颗粒状细晶 α_2 的转化对塑性的提高起着重要作用^[22-24],因此为提高 α_2 含量,传统熔炼后的铸棒通过超塑性工艺处理十分重要。对比管材③和④,半连续铸棒在挤压前如果单独再进行超塑性工艺,其挤压制备的管材组织晶粒会粗化,粗大的晶粒对塑性影响极大^[25],拉拔性能反而降低。主要考虑本次半连续铸造工艺过程会在特定温度下(约 360 ℃)接受结晶器流下的二次冷却水的水冷,该过程会在铸棒浇注中直接保留下大部分细小颗粒状过冷态 α_2 相,与 360 ℃×24 h 再进行水冷的超塑性工艺类似,但又远比其简单省时且易操作。通过该方法浇注出的铸棒组织均匀,晶粒细化程度高,在此基础上再进行单独超塑性工艺,反而会使原本细化的晶粒生长,并且铸棒体积较大,淬透深度不好控制。随着淬火次数增加,难免会导致 α_2 相含量降低和组织的硬化,因此本研究中半连续铸造工艺的铸棒在挤压前不需要超塑性工艺。从③、⑤、⑥和⑦对比中知,成形后的管材并不适合进行超塑性处理,主要考虑管材成形过程中组织经过剧烈塑性变形,产生较大的残余应力和不均匀组织,甚至会产生微裂纹,而超塑性工艺的降温过程如果太快,会产生较大的热应力。此时热应力会加剧裂纹缺陷的产生,并且该缺陷会随着降温过冷度的提高而加剧。此缺陷为不可逆缺陷,并不能通过退火完全消除。因此对合金塑性极为不利,如果降温太慢如空冷和炉冷,又会导致 α_2 相分解,极大影响管材后期的减径拉拔。对比③、⑧、⑨和⑩可知,挤压速度对管材塑性的影响极大,挤压速度从 0.2 到 1.6 mm/s,管材拉拔减径能力先增大后减小,

表 3 管材主要挤压工艺参数

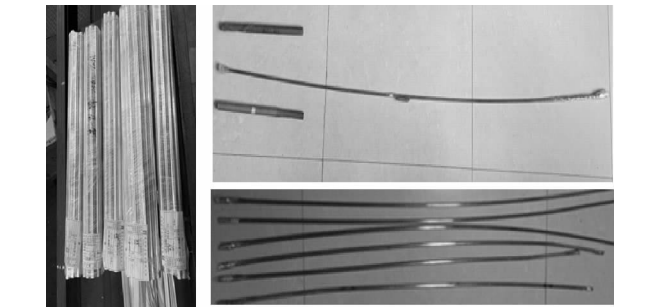
Tab.3 Main technical parameters of tube extrusion						
管 编 号	熔 炼 工 艺	铸 棒 情 况	棒 料 温 度/℃	挤 压 筒 温 度/℃	挤 压 速 度 mm/s	管 材 热 处 理 工 艺
①	传统熔炼	—	200	235	0.4	150 ℃×12 h
②	传统熔炼	360 ℃× 24 h-WQ	200	235	0.4	150 ℃×12 h
③	半连续铸造	—	200	235	0.4	150 ℃×12 h
④	半连续铸造	360 ℃× 24 h-WQ	200	235	0.4	150 ℃×12 h
⑤	半连续铸造	—	200	235	0.4	360 ℃×24 h- WQ+150 ℃×12 h
⑥	半连续铸造	—	200	235	0.4	360 ℃×24 h- AC+150 ℃×12 h
⑦	半连续铸造	—	200	235	0.4	360 ℃×24 h- FC+150 ℃×12 h
⑧	半连续铸造	—	200	235	0.2	150 ℃×12 h
⑨	半连续铸造	—	200	235	0.8	150 ℃×12 h
⑩	半连续铸造	—	200	235	1.6	150 ℃×12 h

表 4 拉拔成形过程数据

Tab.4 Drawing process data										
道次	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
16	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
15.5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
14.5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
14	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
13.5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
13	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
12.5	×✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
12	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
11.5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
11	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
10.5	✓	✓	✓	✓	×✓	✓	✓	✓	✓	✓
10	×✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
9.6	✓	×✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
9.2	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓
8.8	×✓	✓	✓	✓		✓	×✓	×✓	✓	×✓
8.4	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
8	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
7.6	×✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	×✓
7.2	×✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
6.8	×	×✓	✓	×✓		×	×✓	×✓	✓	×✓
6.4		×✓	✓	×✓			×✓	✓	×✓	×
6.2		×	✓	✓			×	✓	✓	
6			✓	✓				×	✓	
5.8			✓	×					×✓	

注:✓表示拉拔通过,×表示未通过,×✓表示第一次拉拔未通过,第二次拉拔通过

从⑧可知过小的挤压速度会降低减径能力,主要考虑挤压速度过小会导致组织连续性降低,并且长时间处于高温的挤压筒中也会造成小部分软相组织 α_2 分解形成($\alpha_1+\eta$)层状硬脆相组织,因此其性能不佳。从⑨和⑩对比可知,挤压速度太快也会导致塑性急剧降低,主要考虑高速挤压会导致管材成形过程中组织不够致密均匀,焊合不及时而产生微裂纹,存在较多组织缺陷。因此对比③、⑧、⑨和⑩可知,挤压速度为 0.4 mm/s 较好,该工艺管材在拉拔减径过程未断裂,一直减径至 5.8 mm,见图 10。



(a) 批量化的挤压合金管材 (b) Zn-Al 基复合合金延期索
图 10 Zn-Al 基挤压合金管材及其延期索成品照片
Fig.10 Images of Zn-Al extruded alloy pipe and its extension cable

3 结 论

(1)半连续铸造 Zn-Al 合金铸棒和传统熔铸相比,其组织更加均匀且受重力影响小,晶粒细化程度更高,无需额外超塑性热处理工艺,就可让铸棒获得颗粒状的过冷态 α_2 组织。

(2)Zn-22Al 合金半连续铸造铸棒可直接加热挤压,其成形管材无需进行超塑性处理,只需进行 $150\text{ }^{\circ}\text{C}\times 12\text{ h}+$ 炉冷的直接退火,管材的硬度(HV)低至49.04,伸长率可达119.06%。

(3)Zn-22Al 合金传统熔铸后,挤压成形的管材最小减径至 $\phi 6.4\text{ mm}$,而半连续铸造后成形的管材最小减径至 $\phi 5.8\text{ mm}$ 。

(4)挤压速度为 $0.2\sim 1.6\text{ mm/s}$ 时,Zn-22Al 合金拉拔性能先增大后减小,最佳挤压速度为 0.4 mm/s ,管材直径可从 $\phi 16\text{ mm}$ 无断裂减径拉拔至 $\phi 5.8\text{ mm}$ 。

参 考 文 献

- [1] 吴波,周泽友,斜舒适,等.工业延期雷管延期体用锌铝基合金挤压管及其制备[P]. ZL2013 1 0693925.4. 2014-03-26.
- [2] MOHAMMADI H, EIVANI A R, SEYEDEIN S H, et al. Modified Monte Carlo approach for simulation of grain growth and Ostwald ripening in two-phase Zn-22Al alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(5): 9 620-9 631.
- [3] DEMIRTAS M, YANAR H, PURCEK G. Optimization of RT superplasticity of UFG Zn-22Al alloy by applying ECAP at different temperatures and phase regions[J]. IOP Conference, 2017, 194: 012 033.
- [4] 赵玉鹏. 附加金属阻尼器的隔震支座的力学性能研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2019.
- [5] 张阳明,杨慷,赵亚东,等. Zn-22Al 合金的时效硬化行为[J]. 热加工工艺, 2021, 50(16): 1-5.
- [6] ARDAKANI M S, MOSTAED E, SIKORA-JASINSKA M, et al. The effects of alloying with Cu and Mn and thermal treatments on the mechanical instability of Zn-0.05Mg alloy[J]. Materials Science & Engineering, 2020, A770: 138 529.
- [7] 韩保润. Zn-22% Al 合金阻尼器的力学性能研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2020.
- [8] FELDNER P, MERLE B, GOEKEN M. Superplastic deformation behavior of Zn-22% Al alloy investigated by nanoindentation at elevated temperatures[J]. Materials & Design, 2018, 153: 71-79.
- [9] 斜舒适,吴波,周泽友,等. 热处理工艺对 Zn-22Al 基合金挤压管显微组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2015(6): 124-127.
- [10] DEMIRTAS M, PURCEK G, YANAR H, et al. Effect of different processes on lamellar-free ultrafine grain formation, room temperature superplasticity and fracture mode of Zn-22Al alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 663: 775-783.
- [11] 唐巍. Zn-22% Al 合金在雷管延期体中的可行性应用研究[D]. 南京:南京理工大学, 2012.
- [12] 林晋伟. 锌铝合金力学性能改进及管材拉拔过程模拟与工艺优化[D]. 福州:福州大学, 2018.
- [13] CHO T S, LEE H J, AHN B, et al. Microstructural evolution and

mechanical properties in a Zn-Al eutectoid alloy processed by high-pressure torsion[J]. Acta Mater., 2014, 72: 67-79.

- [14] XIA S H, WANG J, WANG J T, et al. Improvement of room-temperature superplasticity in Zn-22Al alloy[J]. Materials Science & Engineering, 2008, 493: 111-115.
- [15] HIRATA T, TANAKA T, CHUNG S W, et al. Relationship between deformation behavior and microstructural evolution of friction stir processed Zn-22Al alloy[J]. Scripta Materialia, 2007, 56(6): 477-480.
- [16] CHOU C Y, LEE S L, LIN J C, et al. Effects of crosschannel extrusion on the microstructures and superplasticity of a Zn-22Al eutectoid alloy[J]. Scripta Materialia, 2007, 57: 972-975.
- [17] SUN S N, LI D Y, LIU D Y, et al. Microstructure and mechanical properties of continuous casting and extrusion Zn-15Al alloys[J]. Materials Letters, 2020, 261: 127 090.
- [18] TANAKA T, KUSHIBE A, KOHZU M, et al. Low-cycle fatigue properties of ultrafine-grained Zn-22Al alloy during room-temperature superplastic flow[J]. Scripta Materialia, 2008, 59(2): 215-218.
- [19] XIA S H, WANG J T, LIU J Q, et al. Improvement of room-temperature superplasticity in Zn-22Al alloy[J]. Materials Science & Engineering, 2008, A493(1/2): 111-115.
- [20] 孙军. 室温超塑性 Zn-22% Al 合金制备及力学性能研究[D]. 南京:南京理工大学, 2010.
- [21] 周泽友. Zn-22Al 基合金及管材的制备、组织及力学性能研究[D]. 福州:福州大学, 2014.
- [22] TANAKA T, CHUNG S W, CHAING L F, et al. On applying superplastic Zn-22Al alloy with nanocrystalline grains to general residential seismic dampers[J]. Materials Science & Engineering, 2005, A410: 109-113.
- [23] YAN X, LIU S, LONG W, et al. The effect of homogenization treatment on microstructure and properties of ZnAl15 solder[J]. Materials & Design, 2013, 45: 440-445.
- [24] YANG C F, PAN J H, LEE T H. Work-softening and anneal-hardening behaviors in fine-grained Zn-Al alloys[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2009, 468(1-2): 230-236.
- [25] SUN S, WANG H, YANG B, et al. Effect of extrusion temperature on mechanical properties of as-extruded Zn-22Al alloys[J]. Materials Science and Technology, 2020, 36(7): 805-810.

(编辑:栗万仲)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号



- | | | |
|--------|---------|--------|
| ● 微官网 | ● 行业动态 | ● 联系我们 |
| ● 微商城 | ● 铸造前沿 | ● 免费推广 |
| ● 本刊会议 | ● 经典案例 | ● 铸造职场 |
| ● 收录动态 | ● 铸造学堂 | ● 产品库 |
| ● 稿件系统 | ● 专利与发明 | ● 企业库 |