

低温均匀化对 6082 铝合金组织及性能的影响

黄惠毅, 乐永康*, 李飞龙, 廖斌, 张磊

(南南铝业股份有限公司, 广西南宁 530200)

摘要: 通过 OM、SEM、EDS、拉伸测试、硬度检测等方法, 研究了低温均匀化热处理工艺对特定成分的 6082 铝合金铸锭组织及性能的影响。结果表明: 当均匀化温度从 350 °C 升高至 450 °C 时, 随着温度的升高晶界上的第二相(α -Al(FeMnCr)Si)分解越充分, 晶内析出相(Mg₂Si)析出越均匀; 温度升高对应的力学性能也相应提升, 其中抗拉强度及硬度在 450 °C/10 h 时达到最大值为 162.5 MPa 和 53.3HV, 导电率在 450 °C/15 h 时达到最大为 48.63%IACS; 相同均匀化温度下保温 10 和 15 h, 对 6082 铝合金的组织及力学性能影响不大。

关键词: 6082 铝合金; 低温均匀化; 析出相; 力学性能

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9981(2023)04-0728-05

引文格式: 黄惠毅, 乐永康, 李飞龙, 等. 低温均匀化对 6082 铝合金组织及性能的影响[J]. 材料研究与应用, 2023, 17(4): 728-732.

HUANG Huiyi, LE Yongkang, LI Feilong, et al. Effect of Low Temperature Homogenization on the Microstructure and Properties of 6082 Aluminum Alloy[J]. Materials Research and Application, 2023, 17(4): 728-732.

6082 铝合金作为 Al-Mg-Si 系铝合金, 其具有中等强度、易成型、可焊接性和耐腐蚀性良好等优点, 在航空航天、汽车交通、建筑工程等领域中得到广泛应用^[1-3]。6082 合金可挤压加工成棒材、型材等产品, 这类产品用的 6082 铝合金铸锭在半连续熔铸过程中冷却速度快, 组织为非平衡状态, 通过均匀化热处理能使合金铸锭中的非平衡组织在基体中分布趋于均匀, 以达到消除铸造应力、提高铸锭塑性、减小变形抗力及改善挤压加工产品的组织和性能的目的^[4]。在工业生产过程中, 合金均匀化温度一般低于非平衡固相线或合金中低熔点相熔化温度 5—40 °C^[5], 而

更低的均匀化热处理温度很少有人研究。不同的均匀化工艺会对第二相的分解及析出相的分布产生影响^[6-8], 为了调控低温均匀化过程中组织的初生第二相及析出相, 以及析出相与合金力学性能之间的关系, 本文通过不同的低温均热工艺研究 6082 合金组织的析出及性能的影响, 为其扩大应用提供理论基础。

1 试验部分

1.1 试样

试验所用的 6082 铝合金铸锭试样采用半连续铸造法生产, 其直径为 218 mm, 组成成分列于表 1。

表 1 6082 铝合金化学成分

Table 1 Chemical composition of 6082 aluminum alloy

成分	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
含量 $w/\%$	0.92	0.18	0.008	0.49	0.86	0.21	0.007	0.025	余量

1.2 方法

将 6082 铸棒锯切成 150 mm×150 mm×150 mm 的块状样, 采用 GWL-1200LB 箱式电阻炉进行均匀化热处理后水冷(水温 25 °C)至室温, 不同均匀化热处理制度列于表 2。

利用 Carl Zeiss Axio Vert. Al 光学金相显微镜和蔡司 EVO18 电子扫描显微镜, 对热处理后的试样进行组织分析。利用 TMVM-1 型数显显微硬度仪, 对试样进行硬度检测。使用 sigma2008B1 数字金属涡流电导率仪, 对试样进行导电率测试。在 WDW-100 型电子万能试验机上对试样进行力学性能测

收稿日期: 2022-12-23

基金项目: 南宁市创新创业领军人才“邕江计划”项目(2020001); 南宁市科学研究与技术开发计划项目(20221028)

作者简介: 黄惠毅, 硕士, 工程师, 研究方向为铝合金应用技术, E-mail: hhyi637@163.com。

通信作者: 乐永康, 博士, 高工, 研究方向为铝合金研发, E-mail: 1823098142@qq.com。

试,拉伸样的尺寸如图 1 所示。

表 2 均热制度

Table 2 Homogenizing regime

序号	均热工艺
a	350 °C/10 h
b	350 °C/15 h
c	400 °C/10 h
d	400 °C/15 h
e	450 °C/10 h
f	450 °C/15 h

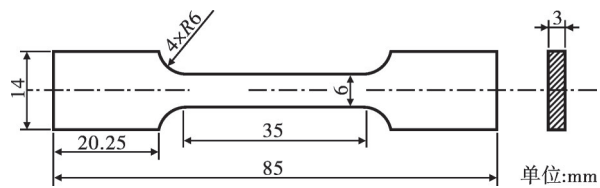


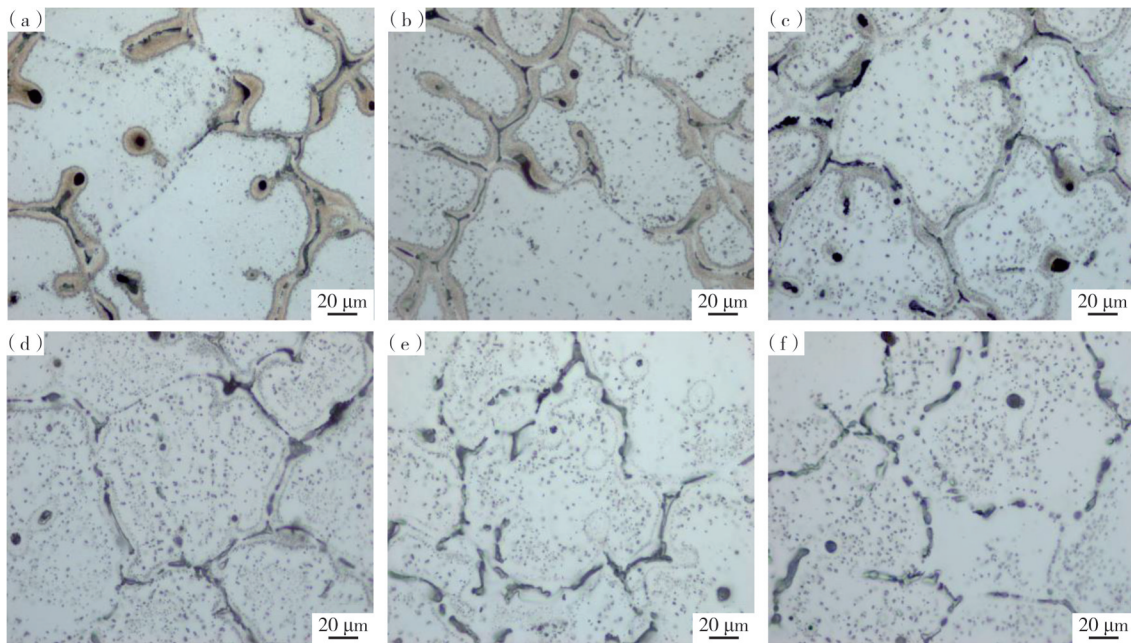
图 1 拉伸试样

Figure 1 Tensile sample

2 实验结果

2.1 金相组织

图 2 为不同均匀化制度下试样的金相组织形貌。从图 2 可见:经 350 °C 均匀化处理后,合金初生第二相在组织晶界处明显存在,并且保留有原始的树枝晶组织,同时晶内存在一定量的晶内析出相并随着保温时间延长数量增多,但分布较为聚集且不均匀;当均热温度为 400 °C、保温 10 h 时合金中枝晶组织还存在有残余,当时间延长到 15 h 时枝晶组织基本消除,同时晶界表现出平直化,初生第二相得到进一步分解,晶内析出弥散相并均匀分布;当温度升高到 450 °C 时,晶界初生第二相有所细化,当保温 15 h 时第二相细化更加明显且晶界处出现断续,析出相较 400 °C 时析出多且相对细小,但随着保温时间的延长,晶内析出相得到一定程度的长大。结果表明,相对于保温时间,温度的升高使合金组织改变更加明显。



(a)—350 °C/10 h;(b)—350 °C/15 h;(c)—400 °C/10 h;(d)—400 °C/15 h;(e)—450 °C/10 h;(f)—450 °C/15 h。

图 2 不同均匀化制度下试样的金相组织形貌

Figure 2 The metallographic structure morphology of the samples under different homogenization regimes

2.2 材料性能

图 3 为不同均匀化制度下合金的硬度。从图 3 可见:随着均匀化温度升高,合金硬度从 350 °C/10 h 均热下的 46.95 HV 提高到在 450 °C/10 h 均热下的 53.3 HV,表明晶内析出相的析出使合金的硬度得

到一定程度的提升;在 450 °C/15 h 的均热下硬度值为 52.9 HV,整体可以看出相同温度下延长保温时间对硬度影响不大,并且在 450 °C 下延长保温时间硬度有小幅下降,可能与针状 AlMn 相的析出量变多有关。

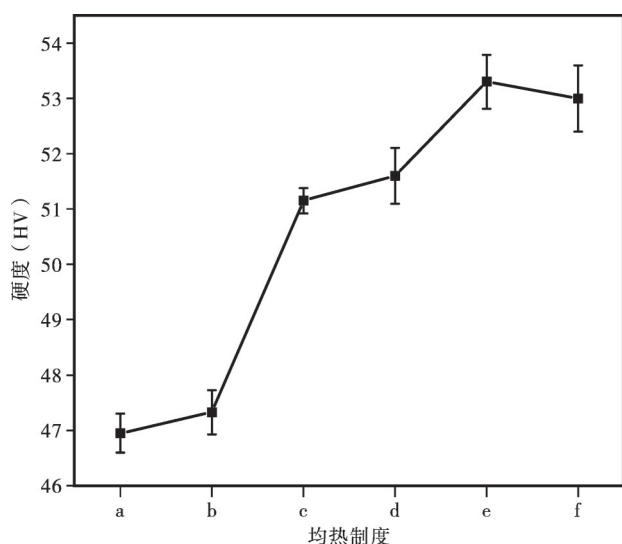


图3 不同均匀化制度下合金的硬度

Figure 3 Hardness for different homogenization regimes

图4为不同均匀化制度下合金的导电率。从图4可见:均匀化温度对合金导电率的影响较大,随均匀化温度提高及时间延长,合金导电率不断上升;相比于同温度下延长时间,温度每升高50℃,导电率提高幅度都会较大,当450℃/15h时导电率达最大为48.63%IACS。

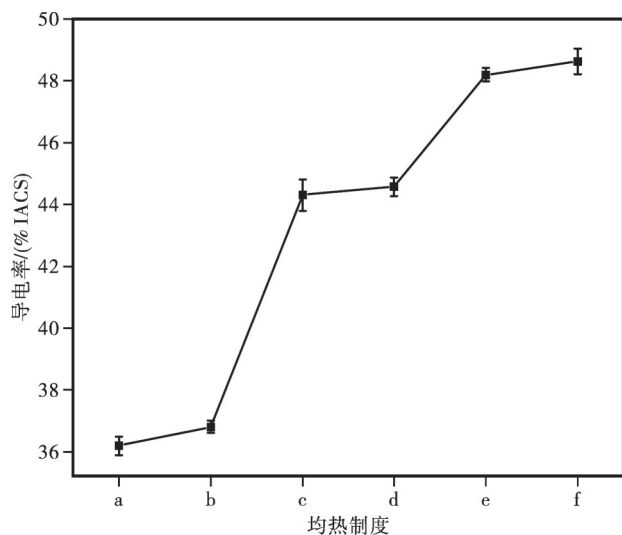


图4 不同均匀化制度下合金的导电率

Figure 4 Conductivity for different homogenization regimes

图5为对应不同均热制度下合金的力学性能。从图5可见:在350℃均热制度下,合金抗拉强度基本维持不变,而屈服强度随保温时间延长而提升;在400℃均热制度下,合金抗拉及屈服强度随保温时间延长快速提升;在450℃/10h制度时,抗拉强度

达到最大值162.5 MPa,在该温度下延长保温时间抗拉强度变化不明显,而屈服强度在400℃/15h的制度下达到最高为133.5 MPa,之后开始降幅明显;延伸率随温度升高和保温时间延长,从350℃/10h的11%降低到400℃/10h的8.7%,之后趋于稳定9%左右。由此可知,随着温度升高,组织晶界上粗大第二相分解及析出相在晶内析出,使合金得到一定的强化。

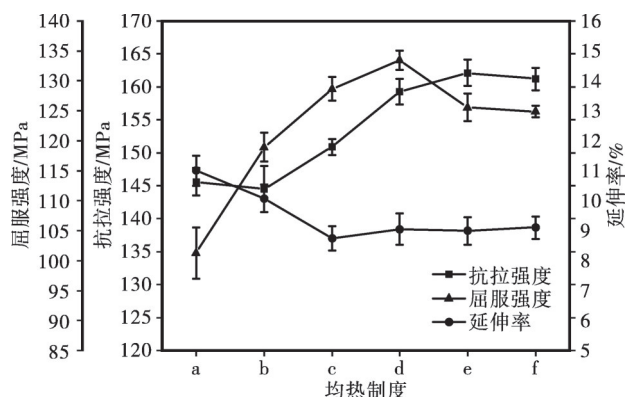


图5 不同均匀化制度下合金的力学性能

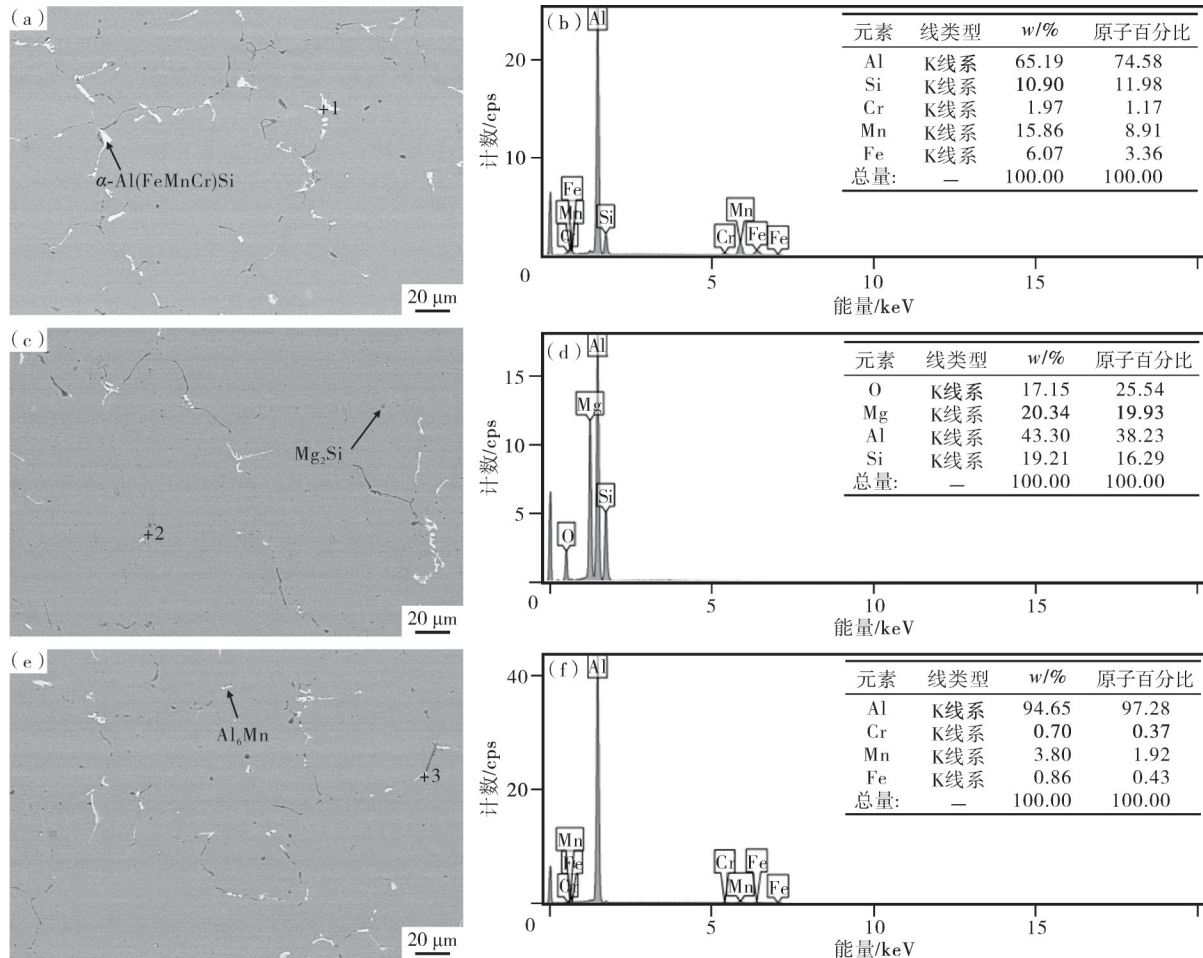
Figure 5 Mechanical properties for different homogenization regimes

3 分析与讨论

6082合金经3个不同温度均热处理后,呈现出不同组织及性能特征。图6为均匀化对合金组织的SEM及EDS图。从图6可以明显看出,不同制度下合金组织内部的热处理析出相有明显的差别。在350℃下合金组织中第二相未得到充分地分解,EDS结果显示第二相为 α -Al(FeMnCr)Si化合物。热处理温度升至400℃后,第二相 α -Al(FeMnCr)Si得到进一步分解并在基体中得到固溶,同时晶内的析出相充分析出,析出相主要为 Mg_2Si ,他在合金组织中的均匀分布在拉伸变形过程中阻碍了位错的运动,因此在350℃/10h到400℃/15h均热制度下合金组织晶界粗大第二相的溶解降低了对基体的割裂作用及析出的 Mg_2Si 起到的弥散强化对合金的强度、硬度起到主要的强化作用^[9-10],合金力学性能得到一定程度的提升。温度升高到450℃时,在合金晶界上析出一定量的小针状析出相,该物质为 Al_6Mn 金属化合物,小针状 $AlMn$ 相对合金基体起到了一定割裂作用,在合金拉伸变形屈服过程中容易导致应力集中,这可能是在450℃/10h均热制度下合金屈服强度有所下降的关键因素^[11-13];合金硬度在450℃/15h均热制度下有小幅的降低,这极可能是小针状 $AlMn$ 相的析出累积所致;在400℃/15h

变到 450 °C/10 h 时,合金抗拉强度和硬度均呈上升趋势,这是因为升高温度更有利于强化相 Mg_2Si 的析出,该析出相在材料组织中均匀分布且相对细小对材料的抗拉强度和硬度起到主要作用,因此呈现抗拉强度和硬度升高。合金的导电率随着温度的提升而提高,这是由于第二相的分解及晶内 Mg_2Si 析

出降低了合金固溶,使其原子空位浓度改变,减少了晶格的畸变,从而在导电过程中对原子的散射降低,因此对导电率提高起到一定的作用^[14-17],并且温度的改变相比于保温时间的延长更有利于第二相的分解及减少晶内的固溶,因此导电率表现出阶梯式的升高。



(a)—350 °C/15 h, SEM; (b)—350 °C/15 h, EDS; (c)—400 °C/10 h, SEM; (d)—400 °C/10 h, EDS; (e)—450 °C/10 h, SEM; (f)—450 °C/10 h, EDS。

图6 均匀化对合金组织的SEM及EDS分析

Figure 6 SEM and EDS analysis of homogenization on alloy microstructure

4 结论

(1) 6082 合金均热工艺温度在 350 °C 时,组织仍保留原始铸态组织,初生第二相主要为 $\alpha\text{-Al(FeMnCr)Si}$ 化合物且形状较为粗大;随温度升高至 450 °C,第二相得到更充分分解,晶内的 Mg_2Si 析出相大小相对一致且较为均匀。

(2) 当 6082 合金随均热温度从 350 °C 升高到 450 °C 时,合金的性能整体随温度升高而升高,抗拉强度和硬度在 450 °C/10 h 时达到最大分别为 162.5

MPa 和 53.3HV,导电率在 450 °C/15 h 达到最大为 48.63% IACS;相比于温度,热处理保温时间对合金性能的影响相对较小,保温 10 h 或者保温 15 h 对合金性能的改变不大。

参考文献:

- [1] 丁向群,何国求,陈成涛,等. 6000 系汽车用铝合金的研究应用进展[J]. 材料科学与工程学报, 2005, 23(2): 302-305.

- [2] MILLER W S, ZHUANG L, BOTTEMA J, et al. Recent development in aluminum alloys for the automotive industry [J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 280(1): 37-49.
- [3] 马远辉, 田进. 车用 Al-Mg-Si 系合金的多元合金化研究进展[J]. 轻金属, 2019(4): 54-58.
- [4] 李念奎, 凌杲, 聂波, 等. 铝合金材料及其热处理技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2019.
- [5] 林钢, 林慧国, 赵玉涛. 铝合金应用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [6] 孙亮, 刘兆伟, 董刘颖, 等. 均匀化制度对 6082 挤压制品组织与性能的影响[J]. 铝加工, 2020, 256(5): 32-35.
- [7] 孙祥彬, 王洪伟, 董颖, 等. 均匀化温度对 6xxx 系铝合金组织与性能的影响[J]. 有色金属加工, 2020, 49(5): 24-28.
- [8] MILKEREIT B, WANDERKA N, SCHICK C, et al. Continuous cooling precipitation diagrams of Al-Mg-Si alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 550: 87-96.
- [9] 李灿, 雷远. Sc, Zr 复合微合金化对 6082 铝合金组织和力学性能的影响[J]. 材料研究与应用, 2017, 11(3): 153-156.
- [10] 李秋梅, 王春雷, 董刘颖, 等. Si、Mn 元素含量对铝合金型材组织及性能影响[J]. 有色金属加工, 2020, 49(5): 46-48.
- [11] 黄惠毅, 刘裔源, 唐鹏, 等. Co 元素对 Al-10Si-1.5Fe 合金显微组织和力学性能的影响[J]. 材料导报, 2020, 34(16): 87-93.
- [12] 董军贺, 韩启强, 刘伟南, 等. 均匀化温度对 6082 合金组织及性能的影响[J]. 有色金属加工, 2022, 51(02): 55-59.
- [13] 刘宏, 赵刚, 刘春明, 等. 几种 6000 系汽车板铝合金的结晶相[J]. 东北大学学报, 2005, 11(26): 1071-1073.
- [14] 王静, 徐国富, 李耀. 淬火冷却速率对 6082 铝合金力学性能的影响[J]. 材料研究学报, 2020, 34(5): 337-344.
- [15] 刘东雨, 高倩, 李宝让, 等. 6xxx 系铝合金导体材料的时效行为[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(增1): 7-11.
- [16] YANG W C, HUANG L P, ZHANG R R, et al. Electron microscopy studies of the age-hardening behaviors in 6005A alloy and microstructural characterizations of precipitates [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 514(1): 220-233.
- [17] 李梦妮, 罗干, 杜军. 合金元素与退火处理对 Al-7Si-0.8Fe 铸造铝合金导电和力学性能的协同影响[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(06): 1571-1578.

Effect of Low Temperature Homogenization on the Microstructure and Properties of 6082 Aluminum Alloy

HUANG Huiyi, LE Yongkang*, LI Feilong, LIAO Bin, ZHANG Lei
(Alnan Aluminum Co., Ltd., Nanning 530200, China)

Abstract: In this paper, the effects of low temperature homogenization heat treatment process on the microstructure and properties of 6082 aluminum alloy ingots with specific composition were studied by OM, SEM, EDS, tensile testing and hardness testing. The results show that the homogenization temperature increases from 350 °C to 450 °C, as the temperature increases, the decomposition of the second phase (α -Al(FeMnCr)Si) on the grain boundary is more sufficient, and the precipitation of the intragranular phase (Mg_2Si) is more uniform. The mechanical properties corresponding to the increase in temperature also increase accordingly. Among them, the tensile strength and hardness reach a maximum of 162.5 MPa and 53.3 HV at 450 °C/10 h, and the electrical conductivity reaches a maximum of 48.63% IACS at 450 °C/15 h. Holding the alloy for 10 h and 15 h at the same homogenization temperature has little effect on the microstructure and mechanical properties of the alloy.

Keywords: 6082 aluminum alloy; low temperature homogenization; precipitates; mechanical properties

(学术编辑: 黎小辉)