

热等静压对铸造 AlSi7Cu2Mg 合金缺陷及性能的影响

卫振华^{1,4} 毛红奎^{1,4} 张文达^{1,4} 刘洪斌² 侯建兵³ 徐 宏^{1,4}

(1.中北大学材料科学与工程学院; 2.山西中兵铸造有限公司;

3.山西柴油机工业有限责任公司; 4.金属凝固控制与精确成形山西省重点实验室)

摘 要 采用砂型铸造 AlSi7Cu2Mg 铝合金阶梯形铸件,对不同部位试样进行等静处理,研究了不同热等静压压力(80~120 MPa)、时间(1~3 h)对不同壁厚铸件缺陷及性能的影响。结果表明,随着热等静压压力增大和保压时间延长,不同壁厚铸件孔洞减少、密度提升,抗拉强度相应增大。铸件壁厚越大,密度和抗拉强度提升越明显;在热等静压温度(490 ℃)、压力(100 MPa)不变条件下,保温时间超过 2 h,铸件密度增加幅度较小;而在热等静压温度(490 ℃)、时间(2 h)不变条件下,当热等静压压力超过临界值(100 MPa)后,铸件抗拉强度提升不明显。

关键词 AlSi7Cu2Mg 合金;热等静压;密度;力学性能

中图分类号 TG146.21;TG246

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.03.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Hot Isostatic Pressing on the Defect and Properties of AlSi7Cu2Mg Alloy

Wei Zhenhua^{1,4}, Mao Hongkui^{1,4}, Zhang Wenda^{1,4}, Liu Hongbin², Hou Jianbing³, Xu Hong^{1,4}

(1.School of Materials Science and Engineering, North University of China;

2.Shanxi North Casting Co., Ltd.; 3.Shanxi Diesel Engine Industry Co., Ltd.;

4.Shanxi Key Laboratory of Controlled Metal Solidification and Precision Manufacturing)

Abstract: The effects of hot isostatic pressure (HIP) (80~120 MPa) and duration (1~3 h) on defects and properties of AlSi7Cu2Mg alloy castings with different wall thickness were investigated by multi-step sand casting. The results reveal that with the increase of HIP pressure and holding time, the holes are reduced, the density and the tensile strength of castings with different wall thickness are enhanced. The thicker the wall thickness is, the more obvious the enhancement of density and tensile strength is. When the holding time is more than 2 h under the fixed HIP temperature (490 ℃) and pressure (100 MPa), the density is slightly increased, while the tensile strength has no obvious improvement when the HIP pressure exceeds a critical value (~100 MPa) under the fixed HIP temperature (490 ℃) and time (2 h).

Key Words: AlSi7Cu2Mg Alloy, Hot Isostatic Pressing, Density, Mechanical Properties

铸造 Al-Si 合金因其优异的铸造性、低收缩率、耐腐蚀性被广泛应用于交通运输及航空航天等领域^[1~3],其中 Al-Si-Cu-Mg 合金具有良好的气密性、流动性、承载能力和力学性能,被应用于发动机缸体和气缸盖等关键部件的生产^[4]。砂型铸造是发动机缸体和气缸盖的主要制造方法,在铸造中会产生缩孔、缩松和气孔等缺陷,严重影响其力学性能^[5,6]。

热等静压(Hot isostatic pressing, HIP)可以消除铸件内部缺陷,提高铸件的致密度和力学性能^[7~8]。WANG X M 等^[9]研究了在 150 MPa 压力、保压 2 h 条件下不同热等静压温度(1 100、1 150、1 175、1 200 ℃)

对镍基高温合金缺陷愈合情况的影响,发现随着温度的升高,缺陷愈合程度提高,在 1 200 ℃下缺陷愈合效果最佳。曲银辉等^[10]比较了热等静压处理(520±10 ℃, 120 MPa, 2 h)前后 ZL205A 合金壳体铸件缺陷、组织及力学性能的变化,发现经热等静压处理和 T5 热处理后铸件抗拉强度由 428 MPa 提高到 477 MPa,伸长率由 2.3% 提高到 6.8%。CHAMA C C^[11]研究了 68.95 MPa 下热等静压温度(500~560 ℃)和时间(15~120 min)对 Al-Si-Mg 合金密度的影响,发现热等静压后密度都提升,缺陷消除主要发生在热等静压的初始阶段。然而,Al-Si-Cu-Mg 合金不同壁厚铸件在不同热等静压

收稿日期:2020-10-21;修改稿收到日期:2020-11-01

基金项目:山西省自然科学基金资助项目(201801D121108)

第一作者简介:卫振华,男,1994 年出生,硕士研究生,太原(030051),E-mail: weizhnuc@163.com

通信作者:张文达,男,1976 年出生,副教授,太原(030051),E-mail: zwdno@139.com

引用格式:卫振华,毛红奎,张文达,等. 热等静压对铸造 AlSi7Cu2Mg 合金缺陷及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(3): 349-353.

WEI Z H, MAO H K, ZHANG W D, et al. Effects of hot isostatic pressing on the defect and properties of AlSi7Cu2Mg alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(3): 349-353.

压力和时间下的组织和性能演变尚不清楚。

因此,本课题主要研究不同热等静压压力及时间等工艺参数对不同壁厚的铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金显微组织及性能的影响,了解热等静压处理对缺陷及性能的影响,采用不设补缩系统的砂型铸造方法在铸件中引入更多缺陷,为高强度 Al-Si-Cu-Mg 合金铸件铸造提供参考。

1 试验材料及方法

采用 AlSi7Cu2Mg 合金铸锭,其化学成分见表 1。采用 Al-10Sr 中间合金作为变质剂,采用工业纯镁(纯度 99.9%)补偿 Mg 的烧损。

表 1 AlSi7Cu2Mg 合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of AlSi7Cu2Mg alloy %						
ω_B						
Si	Cu	Mg	Mn	Ti	Fe	Al
7~8	1.4~1.7	0.3~0.5	0.1~0.3	0.1~0.3	<0.05	余量

AlSi7Cu2Mg 合金在 SG2-5-10 电阻炉中熔化,待铝液升温至 740 ℃时加入 Al-10Sr 合金与纯 Mg,并保温 10 min,待铝液降温至 730 ℃时,用 C₂Cl₆精炼,随后扒渣并静置 10 min,然后将熔体降温至 710 ℃左右浇注至砂型中。为了使研究结果更接近气缸盖的微观组织与性能,砂型模具采用了具有气缸盖典型壁厚(15、40、70 mm)的阶梯模。用线切割取样进行相关分析,见图 1。

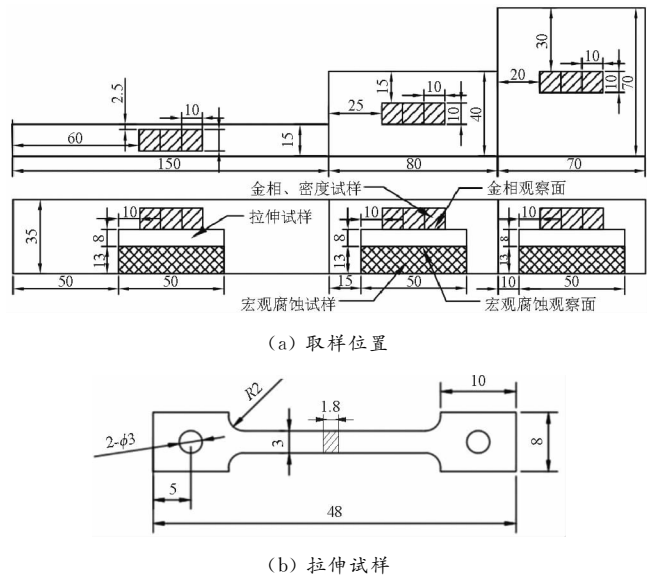


图 1 试样取样位置及拉伸试样示意图

Fig.1 Schematic diagram of sampling location and tensile specimens

采用 EPSI 热等静压机对 AlSi7Cu2Mg 合金进行热等静压试验。所有试样均不进行热处理,热等静压试验参数见表 2。

采用常规金相制备方法制备金相试样,使用 Keller 试剂腐蚀试样,用 ZEISS 显微镜对合金进行显微组织

表 2 热等静压试验参数

Tab.2 Parameters of HIP experiment

编号	温度/℃	压力/MPa	时间/h
铸态	—	—	—
1	490	80	2
2	490	100	2
3	490	120	2
4	490	100	1
5	490	100	3

观察,随机选取至少 5 个视场拍摄金相照片,并采用 Image J 软件测量孔洞缺陷尺寸及二次枝晶臂间距(SDAS),最后计算出不同视场上孔洞缺陷尺寸平均值和 SDAS 平均值。基于阿基米德原理测量试样密度,所用电子天平精度为 0.1 mg。采用 Instron 3382 电子万能拉伸试验机对 AlSi7Cu2Mg 合金进行拉伸试验,拉伸试验前需将拉伸试样两侧用砂纸打磨光滑,每组至少测 3 个试样,并取平均值。

2 试验结果与讨论

2.1 金相显微组织分析

图 2 为阶梯铸件不同壁厚部位的铸态显微组织。可以看出,未经热等静压处理的阶梯铸件不同壁厚部位枝晶间均存在较多的孔洞缺陷。随着壁厚增加,枝晶间孔洞缺陷尺寸增大,在 15、40、70 mm 壁厚处的孔洞缺陷尺寸分别为 94、107、189 μm,二次枝晶臂间距分别为 105、126、143 μm。

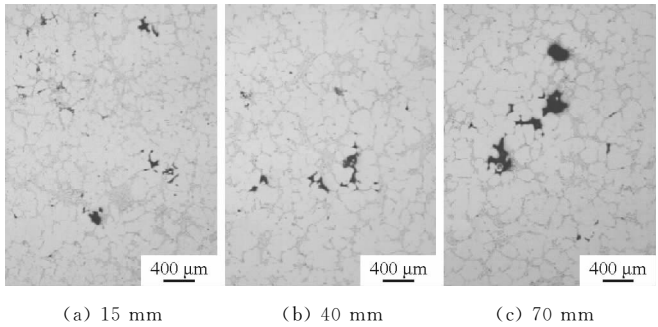


图 2 阶梯铸件不同壁厚部位的铸态显微组织

Fig.2 The as-cast microstructures of parts with different wall thickness of multi-step castings

根据枝晶间距与冷却速率的关系 $\lambda_s = av^{-n}$,其中, a 和 n 为常数,且 $n > 0$, λ_s 为二次枝晶臂间距, v 为冷却速率。 v 增加时, λ_s 减小。凝固过程中,壁厚小的部分由于散热快,局部凝固时间短, λ_s 较小。壁厚大的部位,由于冷却缓慢,凝固时间较长,从而枝晶比较粗大, λ_s 较大。当 v 增大时, λ_s 减小,枝晶尺寸变小,数量增多,枝晶间的区域也减小,在这种情况下,熔体供给充足,形成的孔洞尺寸较小^[12]。随着铸件壁厚增加, v 减小, λ_s 增大^[13],缺陷尺寸增加。

图 3 为不同热等静压压力对阶梯铸件不同壁厚部

位显微组织的影响。同图 2 相比,经热等静压处理后,显微组织中晶粒大小没有发现明显改变^[8],但孔洞缺陷数量、尺寸显著减小,甚至消失。由图 3 可以看出,在热等静压温度(490 ℃)和保压时间(2 h)不变的条件下,当热等静压压力为 80 MPa 时,15 mm 壁厚阶梯部分显微组织中已看不到明显的孔洞缺陷,仅在 40 mm 和 70 mm 壁厚部位存在尺寸为 28 和 44 μm 的孔洞。热等静压压力为 100 MPa 时,仅 70 mm 壁厚部位还存在少数尺寸在 30 μm 左右的孔洞。当热等静压压力增加到 120 MPa 时,70 mm 部位观察不到孔洞。

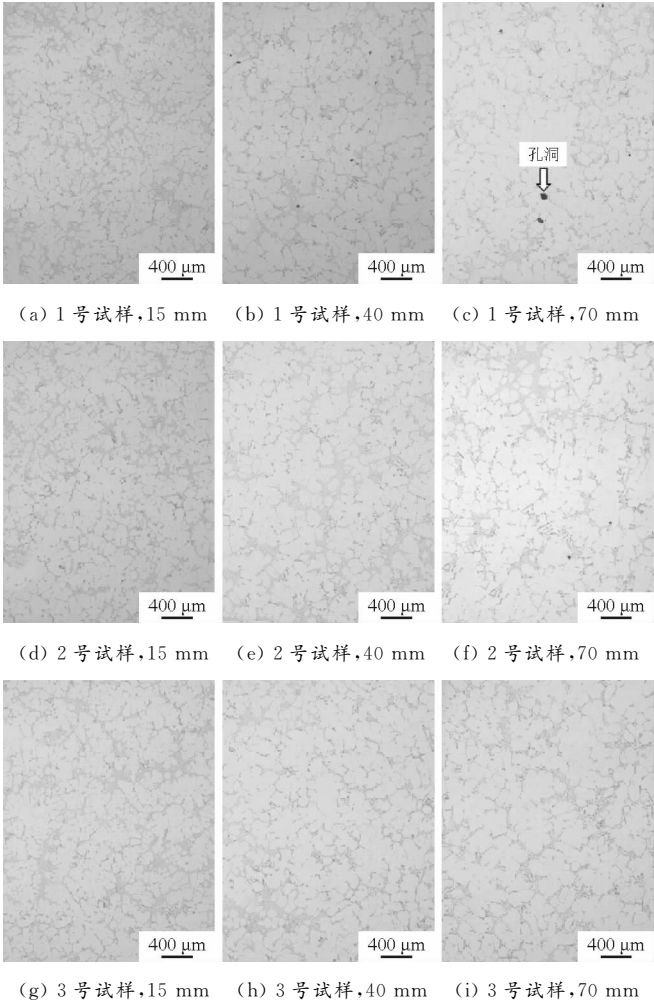


图 3 不同热等静压压力处理的阶梯铸件不同壁厚部位显微组织
Fig.3 The as-cast microstructures of parts with different wall thickness of multi-step castings treated by various HIP pressures

图 4 为不同热等静压时间对 AlSi7Cu2Mg 合金显微组织的影响。可以看出,在热等静压温度(490 ℃)和压力(100 MPa)不变的条件下,热等静压时间越长,缺陷消除效果越好^[11]。当保压时间为 1 h 时,阶梯试样最薄部位(15 mm)仍存在个别孔洞缺陷。当保压时间为 2 h 时,仅在 70 mm 壁厚处还存在 30 μm 左右的孔洞。当保压时间延长到 3 h 时,阶梯试样各壁厚处均未发现孔洞缺陷存在。

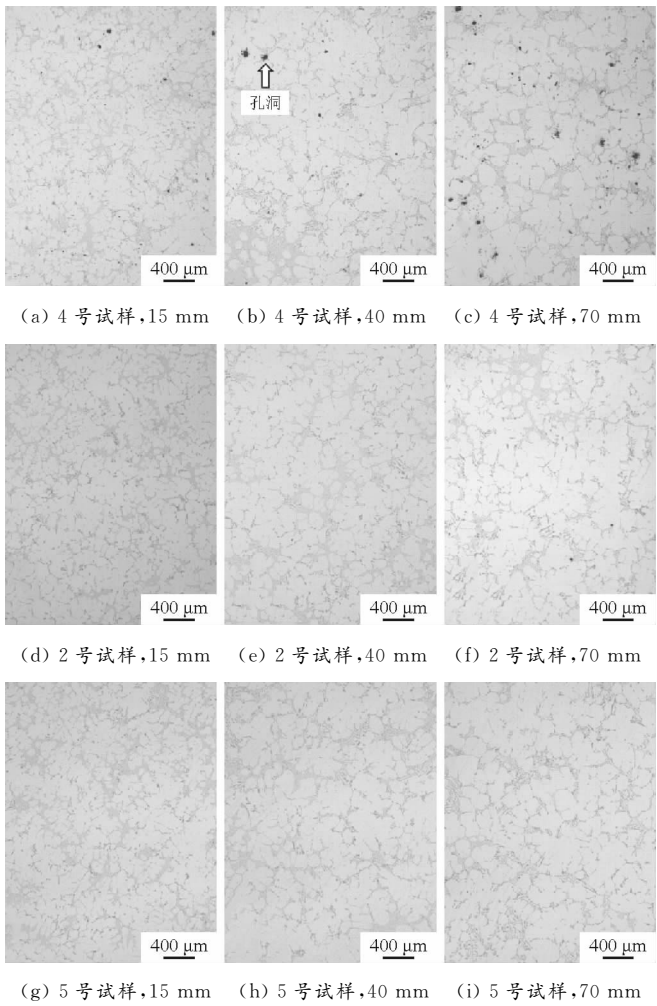


图 4 不同热等静压时间处理的阶梯铸件不同壁厚部位显微组织
Fig.4 The as-cast microstructures of parts with different wall thickness of multi-step castings treated by various holding time

2.2 铸件致密度

图 5 为不同热等静压压力、时间对阶梯铸件不同壁厚处密度的影响。可以看出,经过热等静压处理后,阶梯铸件不同壁厚部位密度均得到提升,说明铸件致密度提高。当压力从 80 MPa 升高至 120 MPa,不同壁厚试样的密度分别由 2.763、2.752、2.746 g/cm³ 提升至 2.775、2.770、2.765 g/cm³。且对于相同壁厚来说,压力越大,密度越大^[14]。

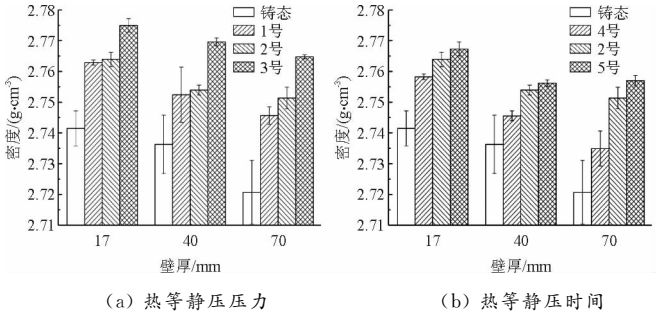


图 5 不同热等静压处理阶梯铸件不同壁厚部位的密度
Fig.5 Density of parts with different wall thickness of multi-step castings treated by various HIP process

在热等静压温度(490 ℃)和压力(100 MPa)不变的条件下,随着热等静压时间的增加,铸件密度增加^[11]。在热等静压过程中,塑性变形和扩散蠕变等机制往往共同促进铸件致密化。在压应力作用下,铸件内部孔洞坍塌,当基体承受的压应力超过其屈服应力时,基体将产生塑性变形,引起塑性流动,在保压过程中,铸件基体发生位错蠕变、体积扩散、晶粒扩散等现象^[15]。缺陷愈合现象随着蠕变变形过程的减弱,塑性变形的难度逐渐增加。在铸件热等静压过程中,扩散蠕变是一个缓慢的过程,需要较长时间,随着保压时间延长,铸件致密程度增加,但当保压时间超过2 h时,铸件密度变化不大。

由图5还可以看出,热等静压处理对70 mm部分致密度提升最为明显。铸态试样由于内部大量孔洞缺陷存在,不同壁厚铸件密度标准偏差值较大,而经热等静压处理后,由于大量孔洞缺陷消除,铸件密度标准差都有所减小^[16],铸件密度趋于稳定。

2.3 力学性能

图6为经不同热等静压压力、时间处理的不同壁厚铸件的抗拉强度。可以看出,随着热等静压压力增加、保压时间延长,铸件抗拉强度提高。铸件壁厚越大,热等静压压力对抗拉强度提升越大。经热等静压处理,15 mm壁厚铸件抗拉强度由150.25 MPa提升至159.31 MPa,提升了6.03%,70 mm壁厚铸件抗拉强度由131.89 MPa提升至146.81 MPa,提升了11.31%。这是由于热等静压工艺能消除内部封闭性孔洞,增大铸件承力截面积,显著提升其力学性能^[14]。

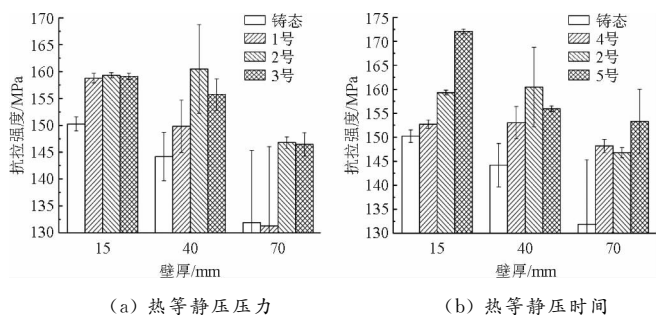


图6 不同热等静压处理阶梯铸件不同壁厚部位的抗拉强度
Fig.6 Tensile strength of s parts with different wall thickness of multi-step castings treated by various HIP process

经80 MPa和100 MPa热等静压处理,相同壁厚阶梯铸件抗拉强度差值分别达0.45 MPa(15 mm)、10.68 MPa(40 mm)、14.52 MPa(70 mm),而经100 MPa和120 MPa热等静压压力处理相同壁厚阶梯铸件抗拉强度差值分别为0.17 MPa(15 mm)、4.73 MPa(40 mm)、0.35 MPa(70 mm)。可以看出,当热等静压压力超过一定临界值时,压力的增加对铸件抗拉强度提升效果并不明显。

随着热等静压时间的延长,15 mm壁厚铸件抗拉强度增加。不同壁厚阶梯铸件经3 h热等静压处理的抗拉强度比2 h热等静压处理分别提升了8.02%(15 mm)、-2.82%(40 mm)、4.43%(70 mm)。由此可以看出,延长热等静压时间对铸件抗拉强度提升明显。

3 结论

(1)热等静压处理可以有效消除AlSi7Cu2Mg铸件内部孔洞缺陷。对于壁厚70 mm铸件,要消除孔洞缺陷,需在490 ℃下,120 MPa保压2 h或者100 MPa保压3 h。

(2)随着热等静压压力、时间增加,AlSi7Cu2Mg铸件密度增加。铸件壁厚越厚,密度提升越明显,但在490 ℃,100 MPa下保压超过2 h,铸件密度提升不明显。

(3)随着热等静压压力增加、保压时间延长,铸件抗拉强度增大;热等静压处理对铸件厚大部位的力学性能提升明显。在热等静压温度为490 ℃,保压时间2 h条件下,当热等静压压力超过一临界值,对铸件抗拉强度提升不明显。

参考文献

- [1] LU T, PAN Y, WU J L, et al. Effects of La addition on the microstructure and tensile properties of Al-Si-Cu-Mg casting alloys[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2015, 22: 405-410.
- [2] 陈静,叶珍,陈玖新,等.采用铸造法和粉末冶金法制备的Al-Si-Cu-Mg合金组织和力学性能的研究[J].热加工工艺, 2017, 46(1): 55-58.
- [3] 王吉,徐世文,田政,等.铜钼混合稀土对AlSi10MgMn合金组织及性能的影响[J].特种铸造及有色合金, 2020, 40(8): 906-910.
- [4] 侯立群,陈小辉,邢志媛,等.新型Al-Si-Cu-Mg系合金热处理工艺的研究[J].兵器材料科学与工程, 2013, 36(1): 18-21.
- [5] 戴浩杰,赵礼辉,翁硕.铸造AlSi9Cu3合金疲劳性能[J].特种铸造及有色合金, 2019, 39(12): 1 425-1 428.
- [6] RAN G, ZHOU J E, WANG Q G. Precipitates and tensile fracture mechanism in a sand cast A356 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 207: 46-52.
- [7] 张喆,洪润洲,周永江,等.铝合金铸件疏松缺陷的热等静压处理[J].热加工工艺, 2012, 41(1): 34-38.
- [8] 李军义,谢垚,王东新,等.热等静压对铝合金组织及性能的影响[J].稀有金属与硬质合金, 2018, 46(1): 65-69.
- [9] WANG X M, ZHOU Y, ZHAO Z H, et al. Microstructural evolution of creep-induced cavities and casting porosities for a damaged Ni-based superalloy under various hot isostatic pressing conditions[J]. Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.), 2015, 28: 628-633.
- [10] 曲银辉,姚红,车洪艳,等.热等静压对ZL205A壳体铸件缺陷及力学性能的影响[J].铸造, 2017, 66(10): 998-1 000.
- [11] CHAMA C C. Elimination of porosity from aluminum-silicon castings by hot isostatic pressing[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 1992(1): 773-780.
- [12] HOSSEINI V A, SHABESTARI S G, GHOLIZADEH R. Study on the effect of cooling rate on the solidification parameters, microstructure, and mechanical properties of LM13 alloy using cooling curve thermal analysis technique[J]. Materials & Design, 2013, 50: 7-14.

时效温度和 Cr 含量对 Cu-Ag-Cr 合金性能的影响

王 耀^{1,2} 杨正海^{1,2} 杨倩倩³ 田保红¹ 杨晓辉⁴ 邵星海³ 徐 宇⁴ 曹 磊³

[1.河南科技大学材料科学与工程学院; 2.河南科技大学高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室; 3.清华大学天津高端装备研究院洛阳先进制造产业研发基地; 4.内蒙古电力(集团)有限责任公司内蒙古电力科学研究院分公司]

摘 要 研究了时效温度和 Cr 含量对 70% 冷轧变形的 Cu-Ag-*x*Cr 合金的硬度、导电性能和耐蚀性能的影响。结果表明,Cu-Ag-*x*Cr 合金在 450~500 ℃时效后,其硬度随时效温度增加而降低,随 Cr 含量增加而升高;时效温度和 Cr 含量对合金电导率的影响不大;随时效温度升高,合金耐蚀性降低;随 Cr 含量增加,腐蚀速率降低,耐蚀性提高。Cr 含量为 0.34% 时,在 450 ℃时效 2 h 后,其综合性能较好,电导率为 47.02 MS/m,硬度(HV_{0.1})达到 128.34,耐腐蚀性较好。

关键词 Cu-Ag-Cr 合金;Cr 含量;时效温度;硬度;耐腐蚀性

中图分类号 TG146.1⁺1;TG144 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.03.020 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Aging Temperature and Cr Content on the Microstructure and Properties of Cu-Ag-Cr Alloy

Wang Yao^{1,2}, Yang Zhenghai^{1,2}, Yang Qianqian³, Tian Baohong¹,
Yang Xiaohui⁴, Shao Xinghai³, Xu Yu⁴, Cao Lei³

(1.School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology;
2.National High-end Bearing Tribology Technology and Application Laboratory, Henan University
of Science and Technology; 3.Luoyang Advanced Manufacturing Industry and Development Base,
Tianjin High-end Equipment Research Institute, Tsinghua University; 4.Inner Mongolia Electric
Power Research Institute Branch of Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd.)

Abstract: The influence of aging temperature and Cr content on the hardness, conductivity and corrosion resistance of 70% cold-rolled Cu-Ag-*x*Cr alloy was investigated. The results indicate that with the Cu-Ag-*x*Cr alloy aged at 450~500 ℃, the hardness of the alloy is decreased with the increase of the aging temperature, and increased with the increase of the Cr content. The effect of aging temperature and Cr content on the conductivity can be neglected. With the increase of the ageing temperature, the corrosion resistance is decreased, and with the increase of the Cr content, the corrosion rate is decreased and the corrosion resistance is increased. When the Cr content is 0.34%, the comprehensive performance is optimal at 450 ℃ aging for 2 h, where the conductivity is 47.02 MS/m, the hardness is 128.34 HV_{0.1}, and the corrosion resistance is better.

Key Words: Cu-Ag-Cr Alloy, Cr Content, Aging Temperature, Hardness, Corrosion Resistance

收稿日期:2020-08-28;修改稿收到日期:2020-11-04
基金项目:内蒙古电力(集团)有限责任公司博士后项目(2019-53)
第一作者简介:王耀,男,1993 年出生,硕士研究生,河南洛阳(471023),E-mail: wangyao@lamic.com.cn
通信作者:杨正海,男,1977 年出生,副教授,河南洛阳(471023),E-mail: yym20090115@163.com
引用格式:王耀,杨正海,杨倩倩,等. 时效温度和 Cr 含量对 Cu-Ag-Cr 合金性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(3):353-358.
WANG Y, YANG Z H, YANG Q Q, et al. Effects of aging temperature and Cr content on the microstructure and properties of Cu-Ag-Cr alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(3):353-358.

[13] SUN S C, YUAN B, LIU M P. Effects of moulding sands and wall thickness on microstructure and mechanical properties of Sr-modified A356 aluminum casting alloy[J]. Transactions of Non-ferrous Metals Society of China, 2012, 22(8): 1 884-1 890.

[14] SRIVASTAVA A P, TONG M, TEFANOV T, et al. Elimination of porosity in bulk metallic glass castings using hot isostatic pressing[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2017, 468: 5-11.

[15] 杜旭初,洪润洲,杨守杰,等.热等静压对铝合金铸件组织和性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2016, 44(1): 55-59.

[16] RAN G, ZHOU J G, WANG Q G. The effect of hot isostatic pressing on the microstructure and tensile properties of an unmodified A356-T6 cast aluminum alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2006, 421: 80-86.

(编辑:栗万仲)