

铸造冷作 Cr5Mo1V 模具钢的合金化与组织性能

冯贵层¹ 张敬尧²

(1.武汉交通职业学院智能制造学院; 2.扬州大学机械工程学院)

摘 要 采用 X 射线衍射仪、光学显微镜、扫描电镜和透射电镜等手段,研究了 Al 含量对 Cr5Mo1V 模具钢显微组织和力学性能的影响,并分析了 Al 的作用机理。结果表明,铸态 Cr5Mo1V-*x* Al 模具钢的主要物相为 α -Fe、 γ -Fe 和 M_7C_3 型碳化物,且随着 Al 含量增加,模具钢中珠光体面积分数先增大后减小,当 Al 质量分数增至 1.2% 时,开始出现 δ -Fe 相。未添加 Al 的回火态 Cr5Mo1V 模具钢中可见板条马氏体和次生碳化物;在 Al 含量为 1.2% 和 1.5% 时,可见局部细小孪晶和粗大碳化物。随着回火态 Cr5Mo1V-*x* Al 模具钢中 Al 含量从 0 增至 1.5%,模具钢的抗拉强度、伸长率、冲击韧度和硬度呈现先增加后减小的特征,适宜的 Al 含量为 1.2%,这主要与此时模具钢中形成了纳米孪晶、较多的次生碳化物和弥散分布的 δ -Fe 相有关。

关键词 Cr5Mo1V 模具钢; Al 含量; 回火态; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG142.1 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.02.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Alloying and Properties of As-cast Cold Work Cr5Mo1V Die Steel

Feng Guiceng¹, Zhang Jingyao²

(1.Wuhan Technical College of Communications; 2.School of Mechanical Engineering, Yangzhou University)

Abstract: The effects of Al content on the microstructure and mechanical properties of Cr5Mo1V die steel were investigated by means of optical microscope, scanning electron microscope, transmission electron microscope and X-ray diffractometer, and the action mechanism of Al element was analyzed. The results indicate that the main phases of as-cast Cr5Mo1V-*x* Al die steel are composed of α -Fe, γ -Fe and M_7C_3 carbide, and the area fraction of pearlite in the die steel is firstly increased and then decreased with the increase of Al content. As the Al content increases to 1.2%, the pearlite appears in the die steel. Lath martensite and secondary carbide can be observed in tempered Cr5Mo1V die steel without Al addition. When Al content is 1.2% or 1.5%, local fine twins and coarse carbides are generated. With the increase of Al content in tempered Cr5Mo1V-*x* Al die steel from 0 to 1.5%, the tensile strength, elongation, impact toughness and hardness of die steel are firstly increased and then decreased with the appropriate Al content of 1.2%, which is mainly attributed to the formation of nano twins, major secondary carbides and dispersed distribution of δ -Fe phase in die steel.

Key Words: Cr5Mo1V Die Steel, Al Content, Tempered State, Microstructure, Mechanical Properties

随着人们对汽车模具使用性能和制造周期等要求的提高,开发出具有低成本、高强韧性的模具钢越来越受到重视^[1]。目前传统冷作模具钢的研究主要集中在锻造模具钢上,有关铸造模具钢方面的研究报道较少^[2,3],已开发出的铸造模具钢通常在力学性能上要相对锻造模具钢较差,且其硬度和强韧性配合与大型覆盖件模具、高强度钢板冲裁类模具等的使用要求仍然有一定差距^[4],需要通过微合金化和热处理等方法进一步调控模具钢的微观组织^[5~7],进而提升铸造模具钢的综合性能。在微合金化元素中,Al 可以在钢铁材料中起到改善组织和提高强度等有益作用,如降低钢中 C 在奥

氏体中的活度并抑制渗碳体析出、增加铁素体形成驱动力、抑制高碳钢种粗大碳化物析出等,但是关于 Al 对铸造模具钢组织与性能影响的规律尚不清楚^[8]。本课题以铸造 Cr5Mo1V 模具钢为目标,研究了 Al 含量对铸态和回火态模具钢微观组织和力学性能的影响,以期为高强韧性铸造模具钢的开发及其在汽车模具上的应用提供借鉴。

1 试验材料与方法

以 Cr5Mo1V 模具钢(化学成分见表 1)、高纯 Al

收稿日期:2021-07-10;修改稿收到日期:2021-10-12

基金项目:湖北省技术创新专项重大资助项目(2019AA016),湖北省教育科学“十三五”规划课题资助项目(2016GB278)

第一作者简介:冯贵层,女,1976 年出生,讲师,武汉(430065),E-mail:guiceng76@sina.com

引用格式:冯贵层,张敬尧. 铸造冷作 Cr5Mo1V 模具钢的合金化与组织性能[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(2):200-204.

FENG G C, ZHANG J Y. Alloying and properties of as-cast cold work Cr5Mo1V die steel[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(2):200-204.

(99.96%质量分数,下同)为原料,采用中频感应炉熔炼和砂型铸造的方法制备了铸造冷作 Cr5Mo1V-*x*Al 模具钢(*x*=0、0.3、0.6、0.9、1.2 和 1.5,%),浇注温度为 1 546 ℃,浇注后静置 24 h 开箱。

表 1 Cr5Mo1V 铸造模具钢的化学成分

Tab.1 Chemical composition of Cr5Mo1V die steel %									
<i>w_B</i>									
C	Si	Mn	Cr	Mo	V	N	S	P	Fe
0.96	0.42	0.68	5.02	0.72	0.61	0.003	0.004	0.008	余量

在纳博热箱式高温炉中进行等温退火+淬火+回火处理,等温退火工艺为 870 ℃×2 h,随炉冷却至 770 ℃保温 6 h 后炉冷至室温,淬火工艺为 875 ℃×5 min (预热)+1 035 ℃×30 min,回火工艺为 520 ℃×2 h 空冷至室温。

采用锐影 X 射线衍射仪对模具钢的物相进行分析,Cu 靶 K α 辐射,扫描速度为 5°/min;采用 Olymplus GX51 型光学显微镜和 S-4800 型扫描电镜对模具钢的显微形貌和断口形貌进行观察,并用附带的能谱仪分析微区成分;采用 Image Pro6.0 图像分析软件对随机选取的 30 个视场进行相面积分数统计分析^[9];透射电镜试样经过线切割、机械研磨至 60 μ m,冲压成 ϕ 3 mm 薄片后进行双喷离子减薄,在 JEOL-2010 型透射电镜上观察微观结构;室温拉伸性能测试在 QX-W550 型微机控制电子万能试验机上进行,应变速率为 10⁻⁴ s⁻¹,取 3 组试样平均值;室温无缺口冲击性能测试在 JB-W500B 型摆锤式冲击试验机上进行,冲击试样尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm,取 3 组试样平均值;洛氏硬度测试在 HR-430MR 型硬度计上进行,载荷为 0.15 N,取 3 点的平均值。

2 试验结果与分析

图 1 为 Cr5Mo1V-*x*Al 模具钢铸态的 X 射线衍射结果。可以看出,未添加 Al 的 Cr5Mo1V 模具钢,主要物相为 α -Fe、 γ -Fe 和 M₇C₃ 型碳化物;添加 Al 后, Cr5Mo1V 模具钢的物相组成并未发生明显改变,但是

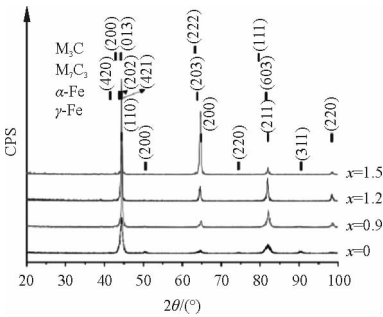


图 1 铸态冷作 Cr5Mo1V-*x*Al 模具钢的 XRD 图谱
Fig.1 XRD patterns of as-cast cooling Cr5Mo1V-*x*Al die steel

各物相的衍射峰强度明显不同,随着 Al 含量增加, γ -Fe 衍射峰逐渐消失,M₇C₃型碳化物衍射峰逐渐增强。

图 2 为 Cr5Mo1V-*x*Al 模具钢的显微组织。可以看出,未加 Al 的 Cr5Mo1V 模具钢组织中可见初生碳化物、马氏体和残余奥氏体;当 Al 含量为 0.3%时,出现珠光体,其面积分数约为 2.4%;当 Al 含量达到 0.6% 时,枝晶状马氏体转变为贝氏体,珠光体面积分数增加至 8.3%,且随着模具钢中 Al 含量增多,珠光体面积分数呈现先增大后减小特征,在 Al 含量为 1.2% 时达到最大值为 89.7%;当 Al 含量增至 1.2% 时,开始出现 δ -Fe 相,且 Al 含量越高 δ -Fe 面积分数越大,在 Al 含量达到 1.5% 时模具钢中 δ -Fe 相已较为弥散地分布在基体中。

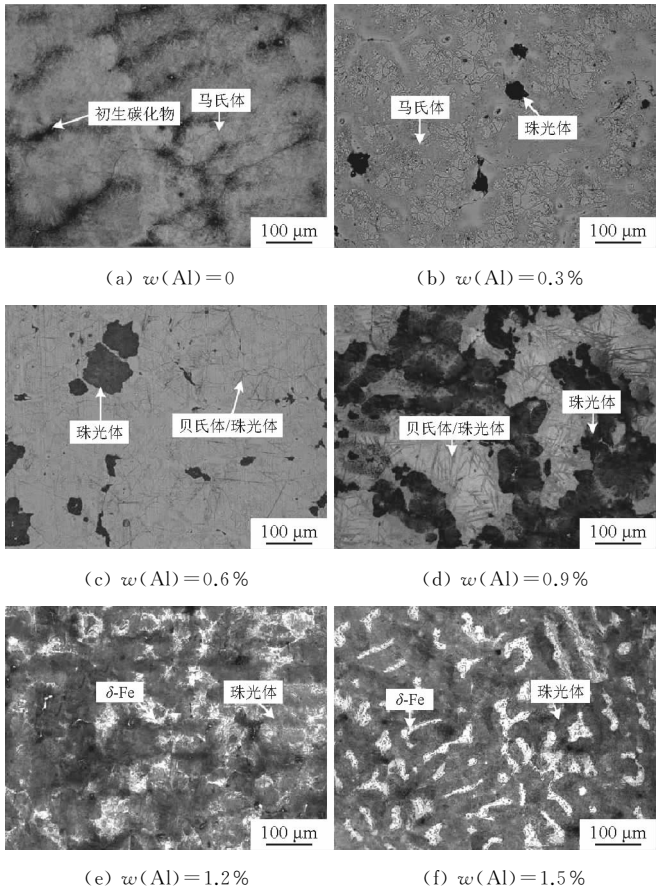


图 2 铸态冷作 Cr5Mo1V-*x*Al 模具钢的显微组织
Fig.2 Microstructure of as-cast cooling Cr5Mo1V-*x*Al die steel

图 3 为铸态冷作 Cr5Mo1V-*x*Al 模具钢的 TEM 形貌。可以看出,Al 含量为 0.3% 的 Cr5Mo1V 模具钢,组织中可见马氏体呈板条状;在 Al 含量为 0.6% 时,组织中出现贝氏体,且在 Al 含量为 0.9% 时,出现孪晶马氏体形态;在 Al 含量为 1.2% 和 1.5% 时,可见 δ -Fe 相和珠光体,马氏体相基本消失。

图 4 为回火态 Cr5Mo1V-*x*Al 模具钢的 SEM 形貌和 EDS 分析。可以看出,未添加 Al 的 Cr5Mo1V 模具

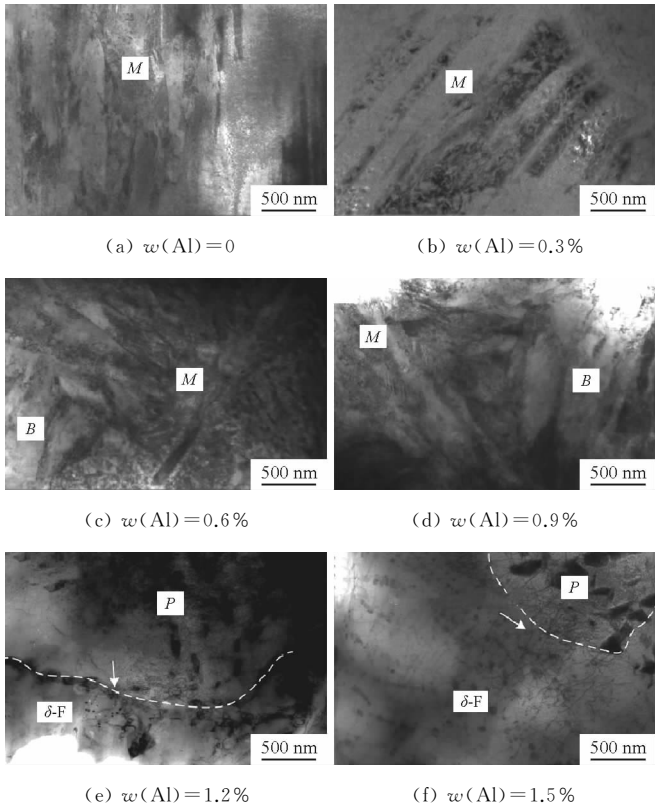


图 3 Cr5Mo1V- x Al 模具钢的透射电镜显微形貌
(M 为马氏体; B 为贝氏体; P 为珠光体)

Fig.3 TEM morphologies of as-cast cooling
Cr5Mo1V- x Al die steel

钢,组织中可见粗大马氏体和尺寸较大的碳化物,组织均匀性较差,从图 4b 看出,区域 A 处的碳化物主要含有 Cr、V 和 Mo 等元素;当 Al 含量为 0.9% 时,其组织为均匀马氏体,未见碳化物聚集现象;当 Al 含量增加至 1.2% 和 1.5% 时,仍然可见 δ -Fe 相存在,且后者组织中 δ -Fe 相含量更高,并在局部形成了片状马氏体(见图 4e 黑色箭头处),这主要是因为 δ -Fe 相中 Cr 和 C 元素的固溶度较小, δ -Fe 相的形成会使得奥氏体中这两种元素浓度提高,降低马氏体开始转变温度的同时促进片状马氏体形成^[10];从图 4f 中还看出, δ -Fe 相周围出现了较多的碳化物,这是伴随着新相产生而发生了碳重新分配的缘故^[11]。

图 5 为回火态 Cr5Mo1V- x Al 模具钢的 TEM 形

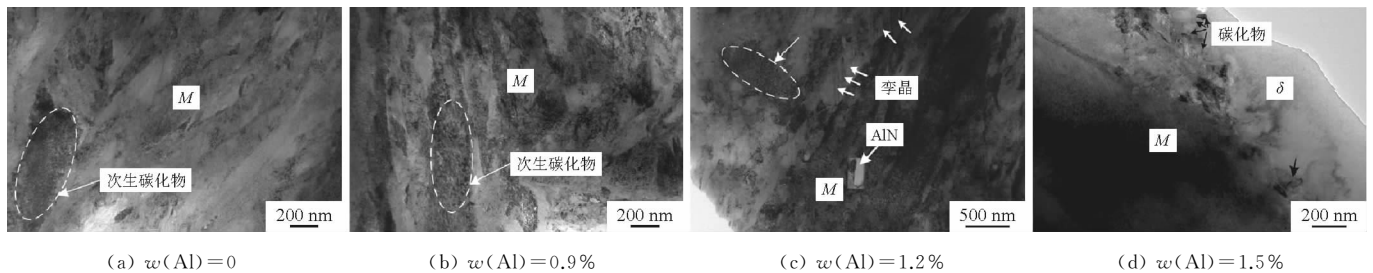


图 5 回火态 Cr5Mo1V- x Al 模具钢的 TEM 形貌

Fig.5 TEM morphologies of tempered Cr5Mo1V- x Al die steel

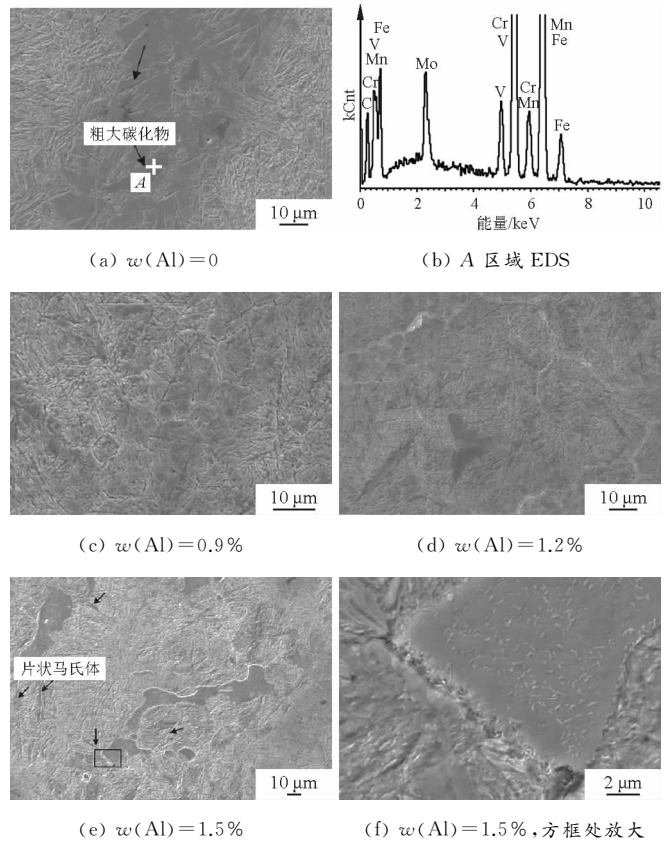


图 4 回火态 Cr5Mo1V- x Al 模具钢 SEM 形貌和 EDS 分析

Fig.4 SEM morphologies and EDS analysis of tempered
Cr5Mo1V- x Al die steel

貌。可以看出,未添加 Al 的 Cr5Mo1V 模具钢,组织中有板条马氏体和回火过程中析出的尺寸较小的次生碳化物;当 Al 含量为 0.9% 时,组织仍为板条马氏体+次生碳化物,但是马氏体板条宽度有所减小、次生碳化物数量增多,表明 Al 添加有助于增加马氏体板条界面数量并增加次生碳化物数量,这主要是因为 Al 元素添加会降低碳元素的活度并抑制初生碳化物形成^[12],在回火过程中可以析出更多的次生碳化物;在 Al 含量增至 1.2% 时,除板条马氏体和次生碳化物外,还可见局部细小孪晶形态,这主要与 Al 添加形成了使滑移更加困难、原子错排更加容易的组织结构有关;为 Al 含量达到 1.5% 时, δ -Fe 相/马氏体界面处由于碳元素再分配而形成了较多的粗大碳化物,这种碳化物的存在对模具

钢的强韧性会带来不利影响^[13]。

表 2 为回火态 Cr5Mo1V-xAl 模具钢的力学性能。可以看出,未添加 Al 的 Cr5Mo1V 模具钢,抗拉强度、伸长率、冲击韧度和硬度(HRC)分别为 977 MPa、4.6%、6.88 J/cm² 和 61.3;在添 Al 后,Cr5Mo1V-xAl 模具钢的抗拉强度、伸长率、冲击韧度和硬度都有不同程度提高,随着 Al 含量从增加,其抗拉强度、伸长率、冲击韧度和硬度(HRC)呈现先增加后减小的特征,在 Al 含量为 1.2% 时均达最大值,分别为 1 143 MPa、5.6%、10.47 J/cm² 和 62.7,相较未添加 Al 的模具钢分别提升 16.99%、21.74%、52.18% 和 2.28%,这主要与此时模具钢中形成了有助于抑制位错运动的纳米孪晶、含有较多的可以起弥散强化效果的次生碳化物和弥散分布的具有良好韧塑性的 δ -Fe 相有关^[14]。而当 Al 含量增至 1.5% 时,较多 δ -Fe 相的形成会降低强度较高的马氏体含量,且较多的 δ -Fe 相/马氏体界面处粗大碳化物的析出会降低模具钢的韧性^[15],因此,Cr5Mo1V-1.5Al 模具钢的强度、硬度和冲击韧度有所减小。冲压模具的刃口由于其服役条件较为恶劣,对铸造冷作模具钢也提出了较为苛刻的要求,包括铸造冷作模具钢的硬度(HRC)>62、强塑性和冲击韧性高等。综合而言,在 Cr5Mo1V 模具钢中添加一定的 Al,可以在不降低模具钢室温力学性能和硬度的前提下,提升模具钢的冲击韧度,Cr5Mo1V 模具钢中适宜的 Al 添加量为 1.2%。

表 2 回火态冷作 Cr5Mo1V-xAl 模具钢的力学性能
Tab.2 Mechanical properties of tempered cooling Cr5Mo1V-xAl die steel

w(Al)/ %	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %	冲击韧度/ (J·cm ⁻²)	硬度 (HRC)
0	977	4.6	6.88	61.3
0.3	992	4.8	7.47	61.4
0.6	1 022	4.9	8.56	61.6
0.9	1 032	5.0	9.51	62.2
1.2	1 143	5.6	10.47	62.7
1.5	1 009	4.1	6.59	57.4

图 6 为回火态 Cr5Mo1V-xAl 模具钢的拉伸断口

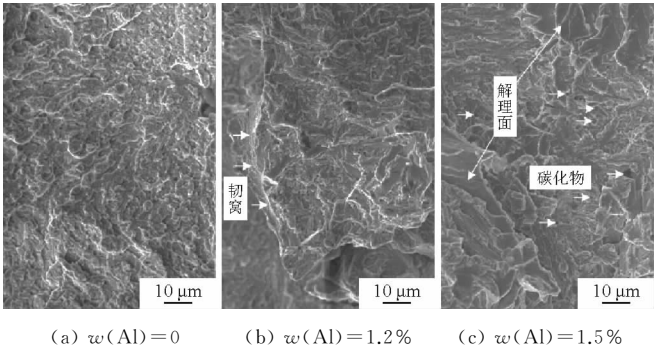


图 6 回火态 Cr5Mo1V-xAl 模具钢的拉伸断口形貌

Fig.6 Tensile fracture morphologies of tempered Cr5Mo1V-xAl die steel

形貌。可以看出,未添加 Al 的 Cr5Mo1V 模具钢,拉伸断口有发射状解理小面,呈现脆性解理断裂特征;当 Al 含量为 1.2% 时,可以看见细小韧窝和解理小面,表现为准解理断裂特征;当 Al 含量增至 1.5%,拉伸断口可见较大的解理面和碳化物,呈明显解理断裂特征。在 Al 含量为 1.2% 时,组织中纳米孪晶和 δ -Fe 相的形成有助于提升模具钢的塑性,而当 Al 含量达到 1.5% 后, δ -Fe 相/马氏体界面处粗大碳化物的析出会加速裂纹扩展而降低塑性^[16]。

3 结 论

(1)对于铸态冷作 Cr5Mo1V-xAl 模具钢,未添加 Al 时其主要物相为 α -Fe、 γ -Fe 和 M_7C_3 型碳化物;随着 Al 含量增加, γ -Fe 衍射峰逐渐消失, M_7C_3 型碳化物衍射峰逐渐增强,珠光体面积分数呈现先增大后减小特征,在 Al 含量为 1.2% 时取得最大值。

(2)经回火处理后,未添加 Al 的 Cr5Mo1V 模具钢中可见板条状马氏体和回火过程中析出的尺寸较小的次生碳化物;当 Al 含量增至 1.2% 时,除板条状马氏体和次生碳化物外,还可见局部细小孪晶形态;当 Al 含量达到 1.5% 时, δ -Fe 相/马氏体界面处由于碳元素再分配而形成了较多的粗大碳化物。

(3)在 Cr5Mo1V 模具钢中添加 Al 后,其抗拉强度、伸长率、冲击韧度和硬度都有不同程度提高,且随着 Al 含量从增加,其抗拉强度、伸长率、冲击韧度和硬度(HRC)呈现先增加后减小的特征,在 Al 含量为 1.2% 时取得最大值,分别达到 1 143 MPa、5.6%、10.47 J/cm² 和 62.7,相较未添加 Al 的模具钢分别提高了 16.99%、21.74%、52.18% 和 2.28%。

参 考 文 献

[1] 刘献礼,姜彦翠,吴石,等.汽车覆盖件用淬硬钢模具铣削加工的研究进展[J].机械工程学报,2016,52(17): 35-49.
[2] 李合琴,石松礼,冯旭强.冷作模具材料及其热处理[J].模具工业,2020,46(12): 22-28.
[3] 张木,沈长斌,高云天.回火工艺对 K110 冷作模具钢组织性能的影响[J].大连交通大学学报,2020,41(3): 58-61.
[4] 元莎,白玉冰,周乐育,等.热处理工艺参数对 Cr8 冷作模具钢组织和性能的影响[J].锻压技术,2020,45(1): 168-172.
[5] RAHIM M A, MINHAT M B, HUSSEIN N, et al. A comprehensive review on cold work of AISI D2 tool steel[J]. Metallurgical Research & Technology, 2017, 115(1): 104-110.
[6] LI S S, LIU Y H, SONG Y L, et al. Microstructure, mechanical properties and strengthening mechanisms of 5Cr5MoV modified by aluminum[J]. Materials and Design, 2015, 83(15): 483-492.
[7] REHAN M A, MEDVE DE VA A, SVENSSON L E, et al. Retained austenite transformation during heat treatment of a 5% Cr cold work tool steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2017, 48(11): 5 233-5 243.

CeO₂对 Al-7Si-Mg 合金组织与性能的影响

董雪丹¹ 王爱琴² 谢敬佩^{1,2}

(1.河南科技大学材料科学与工程学院; 2.有色金属共性技术河南省协同创新中心)

摘 要 以稀土 CeO₂ 和 Al-7Si-Mg 合金粉末为原料,利用粉末冶金法制备了不同 CeO₂ 体积分数的 Al-Si 复合材料,研究了 CeO₂ 含量对 Al-7Si-Mg 合金组织与性能的影响。结果表明,适量的 CeO₂ 添加能显著细化 Al-Si 合金中的 Si 相尺寸,并改善 Si 相分布均匀性;添加 CeO₂ 后,Al-Si 合金的力学性能均有所提高。当 CeO₂ 含量为 0.2% 时,Al-Si 合金中的 Si 相尺寸最小,分布最均匀,此时合金的力学性能也最好,硬度(HV_{0.1})、抗拉强度、伸长率分别为 60.8、141.406 MPa 和 9.49%。

关键词 CeO₂ 含量;粉末冶金;微观组织;力学性能

中图分类号 TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.02.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of CeO₂ on Microstructure and Properties of Al-7Si-Mg Alloys

Dong Xuedan¹, Wang Aiqin², Xie Jingpei^{1,2}

(1.College of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology;
2.He'nan Province Nonferrous Metal General Technology Collaborative Innovation Center)

Abstract: CeO₂ and Al-7Si-Mg alloy powders were used as raw materials to prepare Al-Si composites with different volume fractions of CeO₂ by powder metallurgy method. The effects of CeO₂ content on the microstructure and properties of Al-7Si-Mg alloy were investigated. The results show that the addition of appropriate amount of CeO₂ can significantly refine Si phase and improve the distribution uniformity of Si particles in Al-Si alloy. With the addition of CeO₂, the hardness and tensile properties of Al-Si alloy are improved. When the content of CeO₂ is 0.2%, the size of Si phase in Al-Si alloy is the smallest and the distribution uniformity is desirable, where the mechanical properties of Al-Si alloy also reach the peak, which are 60.8 HV_{0.1}, 141.406 MPa and 9.49%, respectively.

Key Words: CeO₂ Content, Powder Metallurgy, Microstructure, Mechanical Properties

Al-Si 合金以其优良的铸造性能、高强度和耐腐蚀等,被广泛应用于航空航天、电子封装、汽车零部件等领

收稿日期: 2021-07-16; **修改稿收到日期:** 2021-08-25
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51771070,52171138)
第一作者简介: 董雪丹,女,1998 年出生,硕士研究生,河南洛阳(471023),E-mail: dongxd98@163.com
通信作者: 王爱琴,女,1964 年出生,教授,河南洛阳(471023),E-mail: aiqin_wang888@163.com
引用格式: 董雪丹,王爱琴,谢敬佩. CeO₂ 对 Al-7Si-Mg 合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(2): 204-208.
DONG X D, WANG A Q, XIE J P. Effect of CeO₂ on microstructure and properties of Al-7Si-Mg alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(2): 204-208.

[8] 吴红庆,魏金龙,邓志鹏,等.碳含量对 Cr5 型冷作模具钢显微组织及性能的影响[J]. 机械工程材料,2020, 44(S2): 107-112.

[9] 宁辉,吴红庆,邓志鹏,等.析出相对新型冷作模具钢强韧性的影响[J].机械工程材料,2020, 44(S2): 71-75.

[10] SCHNEIDER R, GRUNWALD R, SCHUELLER C. Microstructural changes during short-cycle heat treatment of cold work tool steels[J]. International Journal of Microstructure and Materials Properties, 2011, 6(6): 455-464.

[11] 丁瑞华.Cr12 高碳高铬冷作模具钢的热处理工艺研究[J].热加工工艺,2017,46(10): 200-202.

[12] HU B, TROTTER G, BAKER I, et al. The effects of cold work on the microstructure and mechanical properties of intermetallic strengthened alumina-forming austenitic stainless steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2015, A46(8): 3 773-3 785.

[13] 林鹏,马党参,迟宏宵,等. 热处理工艺对冷作模具钢 GYCRF 组织及力学性能的影响[J].金属热处理, 2019, 44(9): 98-102.

[14] 孙朋朋, 闵娜, 左鹏鹏, 等. 7Cr5Mo2V 冷作模具钢回火特性研究[J].材料导报,2019,33(S1): 377-381.

[15] REHAN M A, MEDVEDEVA A, HGMAN B, et al. Effect of austenitization and tempering on the microstructure and mechanical properties of a 5% Cr cold work tool steel[J]. Steel Research International, 2016, 87(12): 1 609-1 618.

[16] ZHOU L, WANG W, CHAO X, et al. An investigation of the mold-flux performance for the casting of Cr12MoV steel using a mold simulator technique[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2017, B48(1):1-10.

(编辑:刘卫)