

Mn与Fe对Al-Cu-Ce合金显微组织和力学性能的作用机制

吴晓春

湖南惠同新材料股份有限公司麓谷分公司 湖南长沙 410205

摘要: 针对合金元素对金属材料作用机制复杂的问题, 研究以Al-Cu-Ce合金材料为试验对象, 通过金相显微镜进行微观组织观察、热分析以及力学性能测试, 探究合金元素Mn与Fe对合金材料的组织和力学性能的影响。结果显示: 在热处理后的微观组织中, Mn含量越高, 其在Al-Cu-Ce合金中分布越均匀, 而Fe含量越高, 针状组织越密集。在均添加0.6%Mn元素后, 与热处理前的合金相比, 经过热处理的合金伸长率、抗拉强度及屈服强度分别提升了30.03%、42.86%和25%; 在均添加0.4%Fe元素并进行热处理后, 合金抗拉强度与屈服强度分别提升4.33%与9.83%。结果表明: 本研究能根据合金材料的实际应用需求, 准确选择科学合适的优化方式与合金元素, 并清楚阐释了合金元素对合金材料的作用机制。

关键词: 合金元素; 金属材料; 微观组织; 稀土变质; 作用机制

Effects of Mn and Fe on the microstructure and mechanical characteristics of Al-Cu-Ce alloy

WU Xiaochun

Hunan Huitong Advanced Materials Co., Ltd., Lugu Branch Office, Changsha 410205, Hunan, China

Abstract: In response to the complex mechanism of alloy elements on metal materials, this study takes Al-Cu-Ce alloy material as the experimental object, and explores the influence of alloy elements Mn and Fe on the microstructure and properties of alloy materials through metallographic observation, thermal analysis, and mechanical property testing. The research results show that in the microstructure after heat treatment, the higher the content of Mn element, the more uniform the distribution in Al-Cu-Ce alloy, while the higher the content of Fe element, the denser the needle like structure. After adding 0.6% Mn element content, compared with the alloy before heat treatment, the elongation, tensile strength, and yield strength of the alloy after heat treatment increased by 30.03%, 42.86% and 25%, respectively. After adding 0.4% Fe element, the tensile strength and yield strength of the heat-treated alloy increased by 4.33% and 9.83%, respectively. The above results indicate that the research method can accurately select scientifically appropriate optimization methods and alloy elements based on the actual application needs of alloy materials, and clearly explain the mechanism of alloy elements on alloy materials.

Keywords: alloy elements; metallic materials; microstructure; rare earth metamorphism; mechanism of action

作者简介: 吴晓春, 高级工程师, 主要从事合金元素对金属材料组织和性能影响的研究、金属材料的压力加工和微米级金属纤维研究,

E-mail: hykq202312@163.com。

1 序言

合金作为现代工业的重要基础材料，被广泛应用于航空航天、机械制造与电子信息等领域^[1]。中国合金产业经过多年的发展，已形成较为完善的产业链，并在国内外市场均占据了一席之地^[2]。根据《2024—2029年中国合金产业链供需布局与招商发展策略深度研究报告》的数据显示，合金产业作为材料科学领域的重要分支，市场规模持续扩大，尤其是铝合金的发展，可以作为合金产业市场规模增长趋势的一个缩影^[3, 4]。全球铝合金市场规模已超过3000亿美元，并呈现稳步增长的趋势^[5]。然而，国内大部分铝合金材料尚存在生产能耗高、成本高、附加值低的问题，部分高端产品还需依赖从国外进口，这阻碍了中国制造业升级的步伐^[6]。在这种形势下，发展高端铝合金材料智能化与绿色化制备技术对于支撑中国关键制造业的可持续优质发展具有重大战略意义。其中Al-Cu合金材料的综合力学性能表现极佳，例如延展性与塑性优秀，高温性能良好，并且加工操作简单等，但其在铸造性方面效果较差，铸件非常容易产生热裂。因此如何利用合金元素改善铝合金材料的热裂倾向是目前研究的重点。PENG等^[6]分析了在永磁搅拌下不同稀土Ce添加量对B390铝合金凝固过程中Si相的演变、力学性能及摩擦性能的影响。结果发现，随着Ce含量从0增加到0.6%，合金的摩擦系数从0.56降低到0.49，摩擦性能得到显著改善。张梦晗等^[7]通过浸入式末端淬火技术，探究了Cu含量对超高强铝合金力学性能及淬火敏感性的影响。研究结果表明，淬火速率从400℃/s降低至70℃/s时，Cu含量几乎不影响合金的淬火敏感性；而当淬火速率从70℃/s降低至4℃/s时，随着Cu含量增加，合金的淬火敏感性也随之提高。

综上所述，目前国内外在铝合金的性能改善方面取得了较多的成果，但对于合金元素如何优化铝合金特定性能及具体作用机制还不明确。尤其在合金元素对铝合金的性能优化中，Mn元素能提高该类金属材料的抗拉强度与屈服强度，Fe元素可增加该类金属材料的硬度与耐高温性能等。因此研究以Al-Cu-Ce合金为试验对象，设计了微观组织观察、热分析方法与力学性能测试方法进行分析，进行优

化的合金元素选择Mn与Fe。研究的创新性在于，利用微合金化优化金属材料的组织与性能，以辅助相关人员根据实际应用需求选择合适的合金元素及含量。通过研究以期推动生产领域的高质量与绿色发展。

2 试验部分

2.1 原材料

Al-Cu-Ce合金的开发有利于降低制造成本，并且符合绿色环保和循环经济的发展要求，因此本研究以Al-Cu-Ce合金为试验对象。其制备所需原材料如下：质量分数为99.9%的纯Al；块状Al-50Cu中间合金，规格为每块400g；粒度为100μm的Al-10Mn中间合金；粒度为100μm的Al-20Ce中间合金；Al-25Y中间合金；稀土Ce含量为5%。试验具体操作步骤为：首先设计合金材料的成分；然后完成配制。其中，试验材料名义化学成分见表1。

表1 试验材料名义化学成分（质量分数）（%）

试验材料编号	合金元素					
	Cu	Ce	Fe	Y	Mn	Al
A	5	0.0	—	—	—	余量
B		0.1	—	—	—	
C		0.3	—	—	—	
D		0.7	—	—	—	
E		0.9	—	—	—	
F		0.0	—	—	—	
G		0.1	—	—	0.6	
H		0.3	—	—		
I		0.7	—	—		
J		0.9	—	—	0.9	
K		0.0	—	—		
L		0.1	—	—		
M		0.3	—	—		
N		0.7	—	—		
O		0.9	—	—		
P	0.1	—	—	—		
Q		—	0.1	—		
R		0.4		—		
S		0.6		—		
T		0.8		—		
U		1.0	—			

2.2 试验流程

在试验开始前，首先使用电子秤将中间合金进行称取，然后对后续熔炼操作中的设备进行预热处理以及涂刷处理，具体操作如下^[8, 9]。预热熔炼中所需设备及铸钢模具至约200℃，再在设备与模具表面均匀刷上ZnO涂料，可以重复涂刷2~3次，以获取更加均匀、紧密且结实的涂层^[10]。在操作过程中，若工具表面出现缺损情况，则需要及时进行补刷操

作,以避免熔炼工具的损坏。在此之后,就可进入熔炼材料阶段,熔炼设备选择30kg电阻炉,将坩埚置于电阻炉中,加热至约500℃。然后放入预先配制完成的中间合金、纯Al及铁屑等材料,继续加热至860℃,直至所有材料完全熔化。在此温度下,加入用铝箔包裹的Al-25Y等中间合金后进行静置操作,直到变质剂也完全熔化。随后可降低温度至750℃,并通入高纯氩气进行除气操作。同时,使用扒渣勺将表面的废渣与杂质撇去,继续放置15min。在上述操作完成后,将经过处理的熔融材料浇注到铸钢模具中,待其冷却成形后即可得到铸件。将铸件加工成标距与直径分别为40mm与8mm的拉伸试样。最后进行热处理操作,是指材料在固态下,通过加热、保温和冷却的手段,以获取预期材料组织和性能的一种金属热加工工艺^[11]。试验使用T5热处理工艺进行操作,包含预热,加热850℃,回火280℃×1h。这种工艺适用于高温成形后冷却的工件及单件或小批量生产的工件。

2.3 试验方法

微观组织分析方法如下:首先是观察金相组织,从制备完成的试验样本中部截取10mm长的金相试样;其次使用砂纸、金刚研磨片等材料打磨试样表面,直到获取完整且无划痕的表面;再使用精细研磨膏或纳米氧化铝等材料进行抛光,使试样表面光滑;然后将试样浸泡在5%NaOH水溶液中腐蚀,以去除试样表面的氧化层或其他污染物,使金属微观组织更加清晰;最后利用KEYENCE金相显微镜进行观察与记录。

微观组织、成分与热分析方法如下:首先将经过打磨与抛光后的试样放入8%NaOH水溶液中进行腐蚀处理;再使用场发射扫描电镜观察合金相的分布与形貌,并利用能谱仪(EDS)对区域各

相元素构成与分布比例进行测定;再利用配置的EQUINOX3000型X射线衍射分析仪对铸态和经过热处理的金属材料物相组成进行分析;最后使用TGA/DSC-3型同步热分析仪对金属材料的固相线温度进行分析,加热速率为10℃/min。此外,EDS分析采用的是铜靶。

力学性能测试方法如下:使用CMT-4105电子拉伸试验机进行测试,并对合金材料的抗拉强度、伸长率以及屈服强度进行测试。而试验条件设定需要满足GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》规定的拉伸速率,并且需要在相同试验条件下完成5次测试,同时计算平均值,以保证测试结果的可靠性与准确性。

3 试验结果与分析

3.1 微观组织

目前,铝合金材料中通常会加入微量Mn、Fe等合金元素,能在一定程度上提升金属材料的硬度、强度、耐热性与延展性,因此研究使用合金元素Mn与Fe来探究其对铝合金组织与性能影响。首先通过金相显微镜观察、获取不同合金元素及热处理工艺处理的金属材料微观金相组织,如图1所示。

图1所示为不同Mn含量的金属材料微观金相组织。从图1可知,加入0.6%Mn元素后,合金组织连续且明显形成网状结构,同时分布也更为均匀,搭接水平也随之提高。在加入0.9%Mn元素的微观组织中,共晶组织的形成更为密集。图2所示为不同Fe含量的金属材料微观金相组织。从图2可知,随着Fe含量的不断增长,Al₃(Cu, Fe)对应的组织及层片生长趋势更为明显。图3所示为热处理下不同Fe含量的金属材料微观组织。从图3可知,随着Fe含量的增长,细长的针状结构开始增多。

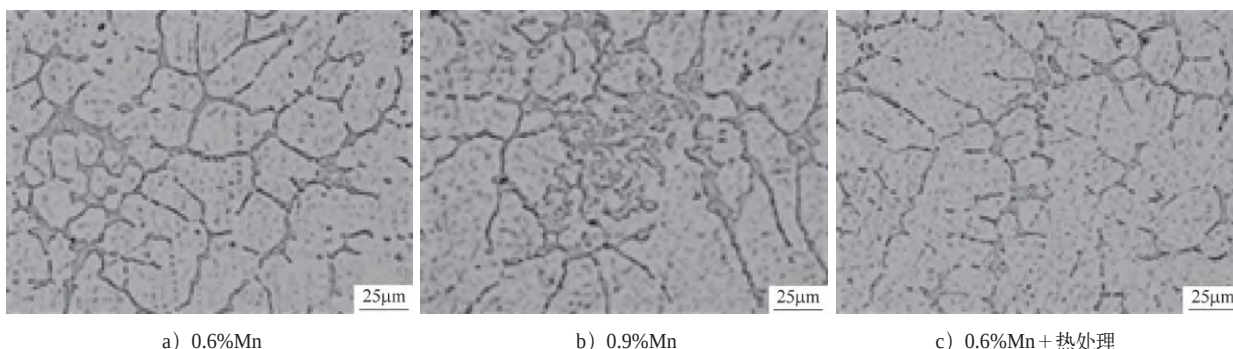


图1 不同Mn含量的金属材料微观金相组织

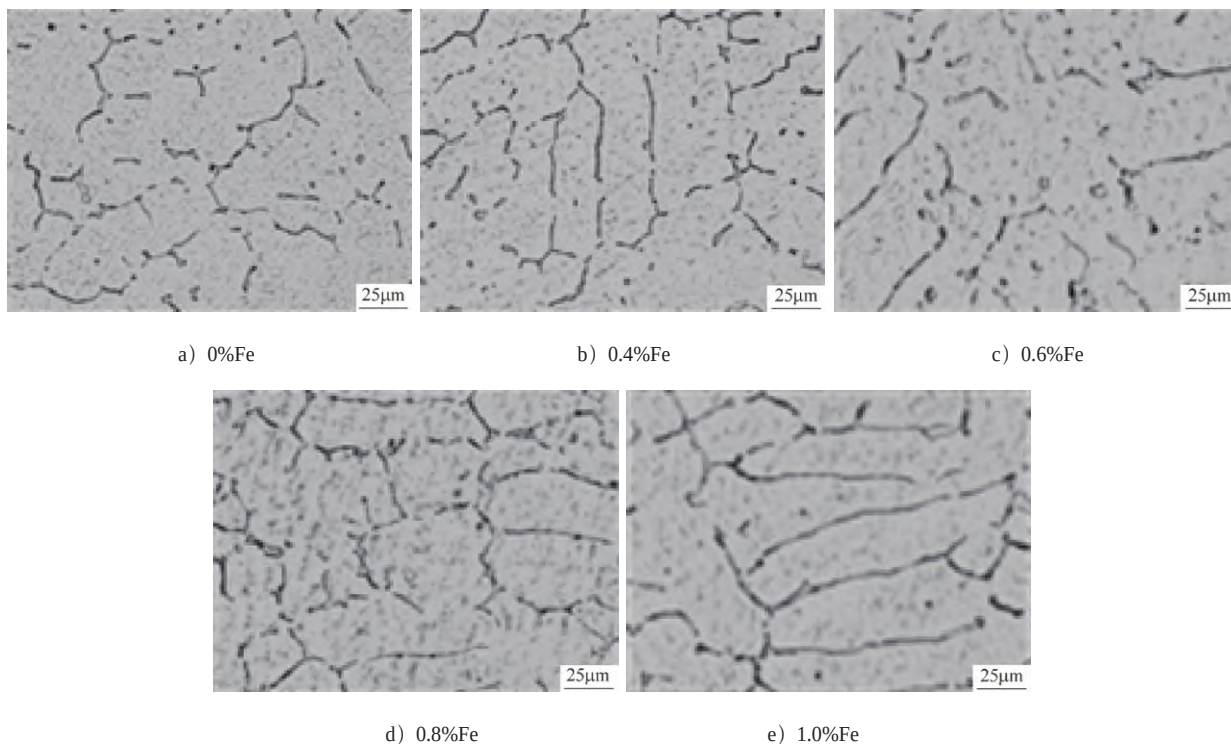


图2 不同Fe含量的金属材料微观金相组织

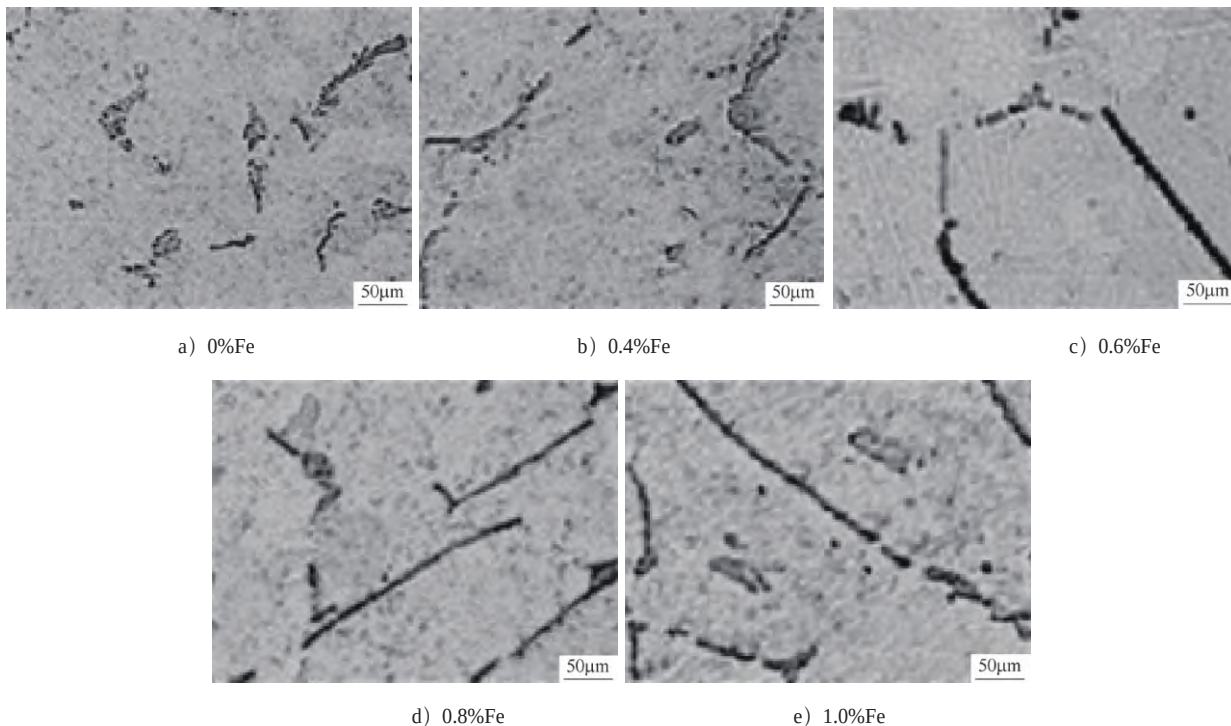


图3 热处理下不同Fe含量的金属材料微观金相组织

根据上述分析，微观形态下各元素对Al-Cu-Ce合金影响的原因如下。

Mn元素作为一种合金化元素，能改变Al-Cu-Ce合金材料的凝固特性，促进共晶相的形核与生长，进而增加共晶组织的数量与均匀性，且Mn含量越

高，形成的共晶组织也更为密集，这导致共晶相的生长速率加快；Fe元素的加入，改变了合金的凝固特性与相变行为，促进了特定相的形成与生长。铸态下不同Mn含量及热处理前后的金属材料X射线衍射图谱，如图4所示。

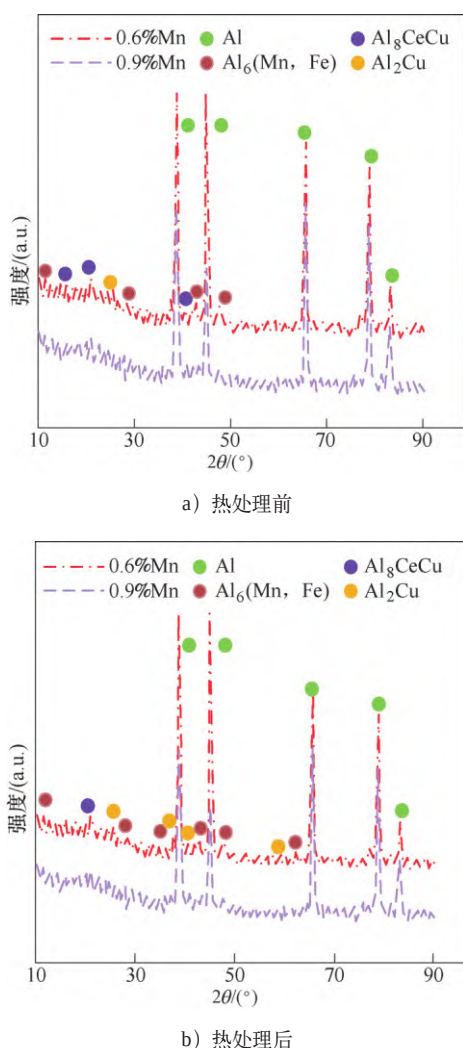


图4 不同Mn元素处理前后的金属材料XRD图谱结果对比

图4a所示为不同Mn含量的金属材料热处理前XRD图谱结果。从图4a可看出，在整个凝固过程中，合金会逐渐形成 $\text{Al}_6(\text{Mn}, \text{Fe})$ 相，同时0.9%Mn含量时，形成该相的数量更多，最终使金属材料基体的共晶组织数量飞速增长。为更准确地识别 $\text{Al}_6(\text{Mn}, \text{Fe})$ 相，研究参考标准XRD数据库，确认其与此次研究的特征峰一致。图4b所示为经过热处理后的不同Mn含量金属材料的XRD图谱结果。从图4b可看出，热处理并不会改变金属材料的相组成，但有少数相的衍射峰呈现出减弱的情况，这是因为合金进行固溶处理后，实际上为不完全人工时效过程，因此在535℃中溶入基体的 $\text{Al}_6(\text{Mn}, \text{Fe})$ 相与 Al_2Cu 相在1755℃下没有完全以平衡相形态析出。为进一步分析Mn元素在金属材料中的分布情况及热处理产生的影响，研究使用0.6%Mn含量进行试验，可得随机3个位置的能量色散X射线图谱结果，

如图5所示。

图5a所示为0.6%Mn含量的金属材料热处理

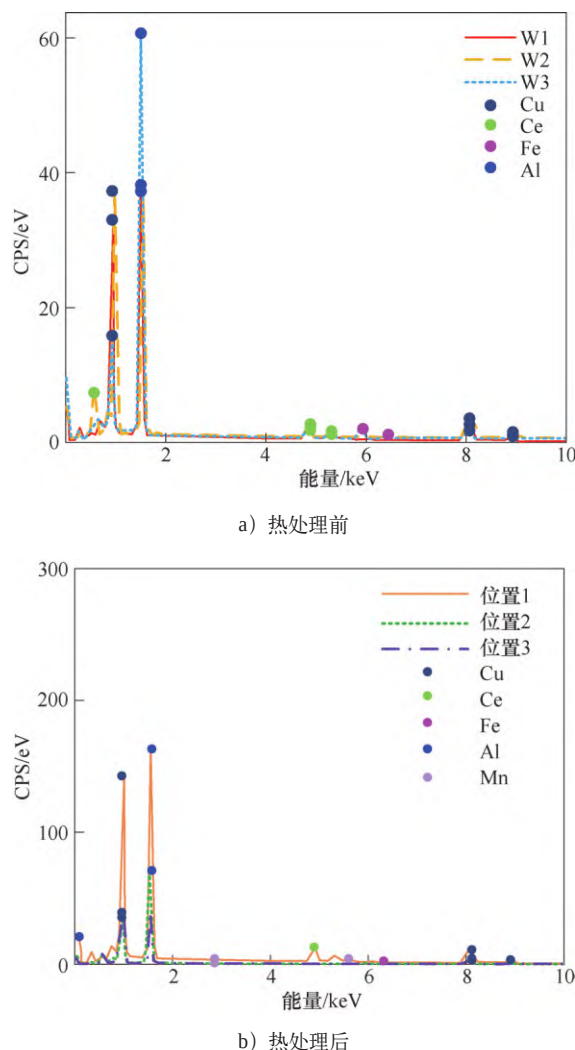


图5 基于0.6%Mn含量与热处理的金属材料在不同位置的EDS图谱结果

前不同位置的EDS图谱结果对比，Mn在晶界位置（W3）的分布量更多。除此之外，金属材料中还存在杂质Fe，其促进了 $\text{Al}_6(\text{Mn}, \text{Fe})$ 相的形成，这与上述XRD图谱的结果分析一致。在W1位置，Al、Ce、Cu与Fe的EDS分别为59.29、6.26、34.03与0.48；在W2位置，Al、Ce、Cu与Mn的EDS分别为72.75、3.84、16.14与5.98；在W3位置，Al与Cu的EDS分别对应65.71与34.33。图5b所示为经过热处理的金属材料在不同位置的EDS图谱结果，基体中Mn与Cu的含量得到显著提升。具体量化标准如下，位置1处，Al、Ce、Cu与Fe的EDS分别为59.63、6.59、33.31与0.53；位置2处，Al、Fe、Cu与Mn的EDS分别为73.93、1.96、0.47与22.96；位置

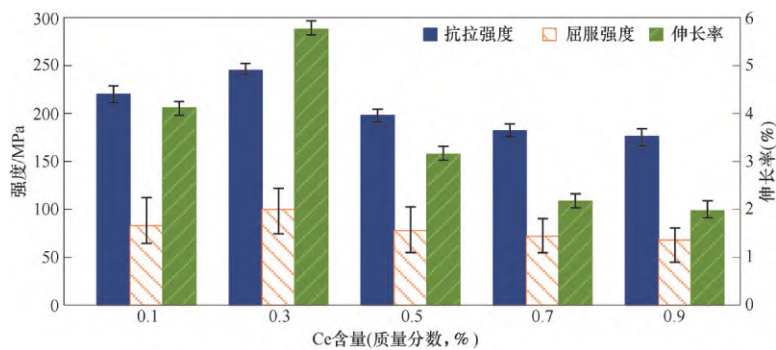
3处, Al与Cu的EDS分别对应96.26与3.35。

3.2 力学性能

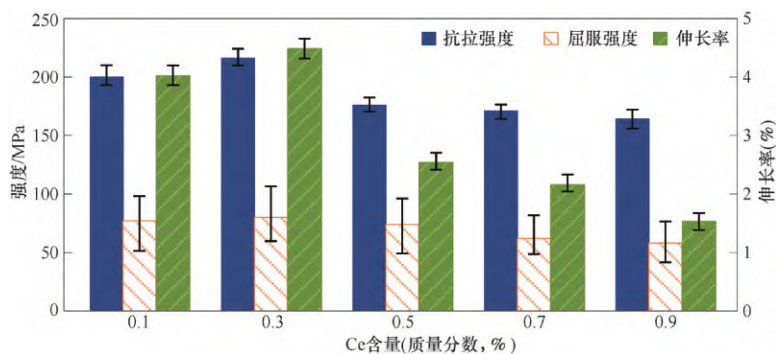
为进一步分析合金元素对合金力学性能的影响, 研究首先使用0.6%与0.9%Mn含量的金属材料进行试

验, 并加入不同Ce含量进行分析, 同时也将经热处理的金属材料进行对比试验, 结果如图6所示。

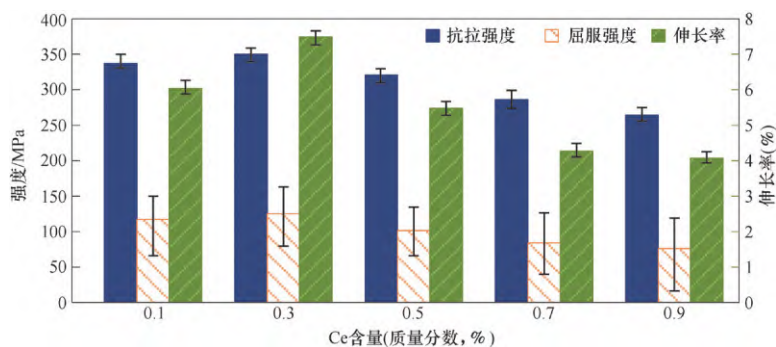
图6a与图6b所示分别为0.6%与0.9%Mn含量的金属材料性能结果, 二者的力学性能结果整体上都



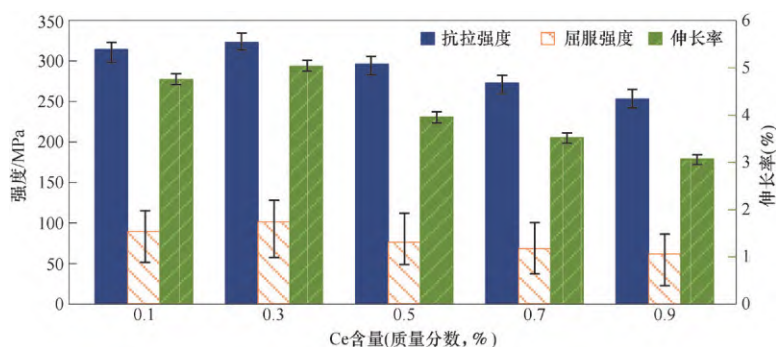
a) 0.6%Mn含量的金属材料



b) 0.9%Mn含量的金属材料



c) 热处理下0.6%Mn含量的金属材料



d) 热处理下0.9%Mn含量的金属材料

图6 基于不同Mn含量及热处理的金属材料性能对比

表现出先增长后降低的趋势,当Ce元素的加入量为0.3%时,金属材料的性能都达到最优秀状态,此时对应的伸长率、抗拉强度及屈服强度分别为5.76%、245MPa与100MPa。而在此后,Ce含量的增加并不能优化金属材料的性能,产生上述结果是因为稀土加入含量过多,阻碍了 Al_4Ce 相的生成过程,转变为生成Al与Mn等合金元素的脆性金属间化合物,最终导致金属材料的整体性能降低。而在同样条件下,随着Mn含量增加到0.9%,对应金属材料的性能却在一定范围内下降。Mn含量高时,极易导致Mn元素偏析,并进一步对屈服强度与抗拉强度两项性能指标带来不利影响。图6c与图6d所示分别为经过热处理的0.6%与0.9%Mn含量的金属材料性能对比,两种处理的性能总体上也表现出先增长后下降的趋势,并且加入0.6%Mn元素的合金性能更为优秀。当Ce含量为0.3%时,0.6%Mn含量的金属材料性能达到最优的状态,此时伸长率、抗拉强度及屈服强度分别对应7.49%、350MPa与125MPa。与未经热处理工艺的金属材料性能相比,热处理后的金属材料各项性能指标的评价效果均得到显著提升。上述结果是由于生成的 $\text{T}(\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3)$ 相具有更小的

软化率与更高的显微硬度,能有效改善金属材料的高温性能。热处理对不同Fe含量合金材料的性能影响,如图7所示。

图7a与图7b所示分别为热处理前后不同Fe含量合金材料的性能结果。从图7可看出,未经过热处理的合金材料随着Fe含量不断增多,抗拉强度及屈服强度两项性能指标表现出先上升后下降的趋势,而伸长率则一直呈现出下降趋势。整体来看,合金材料的性能最佳时Fe含量为0.4%,此时抗拉强度及屈服强度分别为187MPa与89MPa,与未加入Fe元素的合金材料性能相比,其分别提高了5.06%与17.11%。产生上述结果可能是因为过多的Fe元素会造成合金材料产生较多的 $\text{Al}_3(\text{Cu}, \text{Fe})$ 相与 $\beta\text{-Fe}$ 相,这些相的形貌较大,使合金材料的流动性受到限制,最终导致合金材料的性能降低。除此之外,由于Cu元素在该合金基体中的溶解较低,使得Al-Cu合金的基体更为脆弱,进一步降低了其力学性能。而尺寸较小的共晶 $\beta\text{-Fe}$ 相在合金基体中并未产生明显的割裂作用,并表现出较好的高温性能,添加适量的Fe元素能进一步提升合金的力学性能。经过热处理的合金材料整体上的变化趋势与未经过热

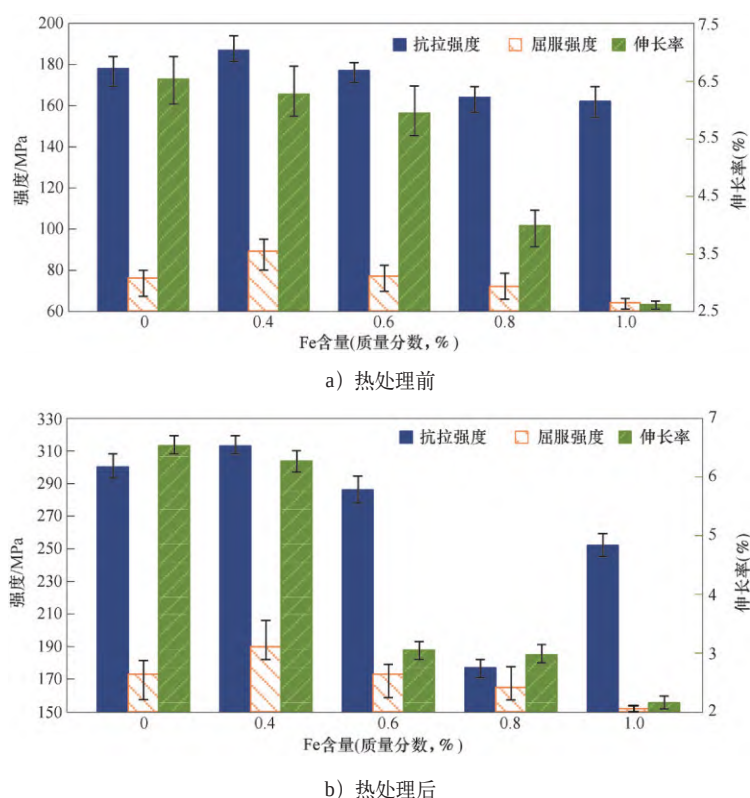


图7 热处理前后不同的Fe含量合金材料的性能对比

处理的合金材料变化趋势一致,但其抗拉强度及屈服强度两项性能明显得到提升。这是因为合金材料中部分 Al_2Cu 相溶入基体,并在后续弥散析出。在没有Fe元素的合金材料中,抗拉强度及屈服强度分别为300MPa与173MPa,而加入0.4%Fe元素后,抗拉强度及屈服强度分别增长到313MPa与190MPa,增长率分别为4.33%与9.83%。这是由于经过热处理的合金材料转换了较多的脆性 β -Fe相,上述富Fe相会造成合金材料基体包含的增强相分布减少。根据上述内容汇总各元素对合金材料影响的原因,Mn元素的加入能有效减少合金材料中富铁相数量,并且通过细化共晶组织来提高合金材料的力学性能。除此之外,Mn元素还可通过形成金属间化合物来减少有害相的数量。而Fe元素作为合金中最强的 β 相稳定元素之一,能降低合金中 α/β 相变点,进而有利于提高合金材料的结晶温度,最终使铸态晶粒得到细化。

4 结束语

合金元素能提高金属材料的硬度等性能,但不同合金元素及含量对金属材料的作用机理分析较为复杂。因此,研究以Al-Cu-Ce作为试验对象,设计了试验流程及试验方法,以探究Mn元素与Fe元素对Al-Cu-Ce合金材料组织与性能的影响。微观组织结果显示,随着Mn元素加入量的增多,合金材料形成了更为密集的共晶组织,且热处理后的材料分布更为均匀;Fe含量的增加,使层片生长趋势更为明显。在性能结果中,0.6%Mn含量且经热处理的材料性能最佳,此时伸长率、抗拉强度及屈服强度分别为7.49%、350MPa与125MPa。而热处理后0.4%Fe含量的金属材料性能最佳,抗拉强度及屈服强度分别为313MPa与190MPa。综上所述,研究方法通过科学调整合金元素含量,能有效且快速优化合金材料的性能,使其在实际应用中具有更佳的适用性。但研究仍存在不足,试验发现富铁相的效果不佳,这可能是因为处理工艺较为简单,在未来研究中可以引进更为复杂的处理方式,以减少低富铁材料的危害。

参考文献:

- [1] 赵立杰,张芳,彭军,等.多孔金属材料的制备工艺研究进展及应用[J].粉末冶金工业,2022,32(5):110-116.

- [2] 甘俊旗,潘梦鹤,王锋,等.高导热(电)/高强度铸造Al-Si合金的开发及研究进展[J].金属功能材料,2022,29(3):53-61.
- [3] 杨宇辉,魏昕,隆志力,等.形变强化金属材料表面状态特征的疲劳演变研究进展[J].表面技术,2023,52(6):112-125,234.
- [4] 舒超,潘梓文,陈陟,等.基于集成学习及多源数据适配的液态金属材料计算软件平台[J].稀有金属,2022,46(5):607-618.
- [5] 苏向阳.非稳态条件下暖通空调系统传感器金属材料故障诊断[J].金属功能材料,2024,31(3):99-106.
- [6] PENG J, WANG W, ZENG J, et al. Evolution of the Si phase and mechanical and tribological properties of a B390 aluminum alloy under the addition of Ce element[J]. International Journal of Metalcasting, 2022, 17(3):1917-1925.
- [7] 张梦晗,刘胜胆,蒋靖宇,等.铜元素含量对超高强铝合金力学性能淬火敏感性的影响[J].中国有色金属学报,2023,33(3):715-728.
- [8] SUWARNO S, DICKY G, SUYUTHI A, et al. Machine learning analysis of alloying element effects on hydrogen storage properties of AB₂ metal hydrides[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(23):11938-11947.
- [9] 陈燕蕊,吕科,李岩,等.烧结温度对2:17H型高性能SmCo合金微观结构和磁性能的影响[J].金属热处理,2023,48(9):35-41.
- [10] 耿书阳,姜泽毅,张欣茹.均混预热电石熔炼新工艺的能耗特征与热经济成本分析[J].化工进展,2023,42(4):1787-1796.
- [11] 罗达,江锋浩,陈黎,等.高压CO₂水处理对香蕉假茎理化性质和燃烧特性影响[J].煤炭学报,2023,48(6):2369-2377.

(收稿日期:20241220)