

脉冲磁场对石墨型铸造 Mg-Y-Cu-Zr-Sr 合金凝固组织和力学性能的影响

谢东原 刘 峰 周 全 陈乐平
(南昌航空大学航空制造工程学院)

摘 要 利用 OM、SEM、EDS、XRD、拉伸试验机等手段,研究了不同的脉冲磁场参数对石墨型铸造长周期结构增强 Mg-Y-Cu-Zr-Sr 合金凝固组织和力学性能的影响。结果表明,脉冲磁场可改善石墨型铸造 Mg-Y-Cu-Zr-Sr 合金的组织 and 力学性能;当单次脉冲能量在 0~57.6 J 范围内或脉冲周期在 0.1~1 s 范围内时,随着单次脉冲能量的增加或脉冲周期的减小,合金晶粒尺寸逐渐减小,第二相体积分数逐渐增加,室温和高温力学性能逐渐提高;当单次脉冲能量为 57.6 J,脉冲周期为 0.1 s 时,与未处理合金相比,合金晶粒尺寸减小了 39%,第二相体积分数增加了 230%,室温抗拉强度、伸长率分别提高了 23%、47%,高温抗拉强度、伸长率分别提高了 29%、99%。

关键词 脉冲磁场;Mg-Y-Cu-Zr-Sr 合金;凝固组织;力学性能

中图分类号 TG146.22;TG113.25 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.09.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Pulsed Magnetic Field on Solidification Structure and Mechanical Properties of Mg-Y-Cu-Zr-Sr Alloy by Graphite Mold Casting

Xie Dongyuan, Liu Feng, Zhou Quan, Chen Leping

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

Abstract: Effects of pulsed magnetic field with different parameters on solidification structure and mechanical properties of Mg-Y-Cu-Zr-Sr alloy reinforced by long-period structure by graphite casting were explored by OM, SEM, EDS, XRD, and universal tensile testing machine. The results show that pulsed magnetic field can improve the solidification structure and mechanical properties of Mg-Y-Cu-Zr-Sr alloy effectively. When the single pulse energy is at 0~57.6 J or the pulse period is at 0.1~1 s, with the increase of single pulse energy or the decrease of pulse period, grain size in the alloy is decreased gradually, and volume fraction of the second phase is increased gradually, so mechanical properties of the alloy are increased gradually at room temperature and high temperature. When the single pulse energy is 57.6 J and the pulse period is 0.1 s, grain size in the alloy is reduced by 39%, and volume fraction of the second phase is increased by 230%, so tensile strength and elongation of the alloy at room temperature are increased by 23% and 47%, and those of ones at high temperature are increased by 29% and 99%, respectively.

Key Words: Pulsed Magnetic Field, Mg-Y-Cu-Zr-Sr Alloy, Solidification Structure, Mechanical Properties

镁合金因具有比强度高、电磁屏蔽性强、抗震效果好及密度小等特点,被广泛应用到交通、军事、航空等领域^[1,2]。相比其他第二相,长周期有序堆垛结构(LP-SO)具有高硬度、良好的热稳定性、高弹性模量等特点^[3],常被作为增强相,但传统铸造工艺导致含有 LP-SO 的镁合金晶粒尺寸较为粗大,限制了其应用范围,所以细化具有 LPSO 镁合金的组织,改善其性能,得到研究者重视。

细化镁合金晶粒有机械搅拌法、熔体过热法、电磁场处理等物理方法^[4]和氯化铁法、加碳变质法、合金化等化学方法^[5]。脉冲磁场处理具有瞬时高能、参数易控制、对合金本身无污染、操作简单、细化效果好等特

收稿日期:2021-01-21;修改稿收到日期:2021-02-15
基金项目:上海航天科技创新基金资助项目(SAST2019-130)
第一作者简介:谢东原,男,1996 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:xdy080300@163.com
引用格式:谢东原,刘峰,周全,等. 脉冲磁场对石墨型铸造 Mg-Y-Cu-Zr-Sr 合金凝固组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(9): 1 109-1 114.
XIE D Y, LIU F, ZHOU Q, et al. Effects of pulsed magnetic field on solidification structure and mechanical properties of Mg-Y-Cu-Zr-Sr alloy by graphite mold casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(9):1 109-1 114.

点^[6]。近年来,在镁合金凝固过程中施加脉冲磁场,可有效细化合金组织,改善其力学性能。杨院生等^[7]发现,脉冲磁场对 AZ31、AZ91D、AM60、AS31、AZ80 和 Mg-Gd-Y-Zr 镁合金细化效果显著;施加脉冲磁场后,初生 α -Mg 形态由粗大的枝晶变为细小蔷薇状晶体,且溶质偏析大幅度降低。周维等^[8]发现,在 0~300 V 范围内,随着脉冲电压增加,Mg₉₃Zn₆Y₁ 合金晶粒尺寸逐渐减小,平均宽度由 26 μm 细化至 10 μm ,其抗拉强度和伸长率也由 102.0 MPa 和 1.0% 提升至 172.1 MPa 和 1.6%。李鹏等^[9]发现,当脉冲电压在 0~300 V 或脉冲频率在 0~5 Hz 范围内,随着脉冲电压或脉冲频率提高,Mg-Y-Zn-Ca 合金晶粒逐渐细化,其晶粒尺寸最多减小了 82%。张磊等^[6]发现,在 0~300 V 范围内,随着脉冲电压增加,Mg-0.6Cu 合金平均晶粒尺寸由 520 μm 细化至 190 μm ,合金的屈服强度、抗拉强度和伸长率分别提高了 49%、46% 和 114%。除此之外,脉冲磁场对 Al、Zn、Cu 等合金及高温合金组织细化效果同样显著^[10~14]。

近年来,大量试验表明,脉冲磁场细化粗晶镁合金凝固组织效果显著,但对具有 LPSO 增强结构的细晶镁合金的组织及高温性能影响的研究较少。为此,本课研究了脉冲磁场对具有 LPSO 增强结构的石墨型铸造 Mg-Y-Cu-Zr-Sr 合金凝固组织及室温和高温力学性能的影响,希望为该合金性能的进一步改善提供参考。

1 试验材料与方法

试验采用高纯 Mg 锭(>99.9%,质量分数),Mg-30Y、Mg-30Cu、Mg-30Zr 和 Mg-25Sr 中间合金制备成 Mg-6.84Y-2.46Cu-0.6Zr-0.05Sr 镁合金。采用自制脉冲磁场设备对熔体进行处理,该设备主要由脉冲电源、磁场线圈等装置组成,设备示意图见图 1。

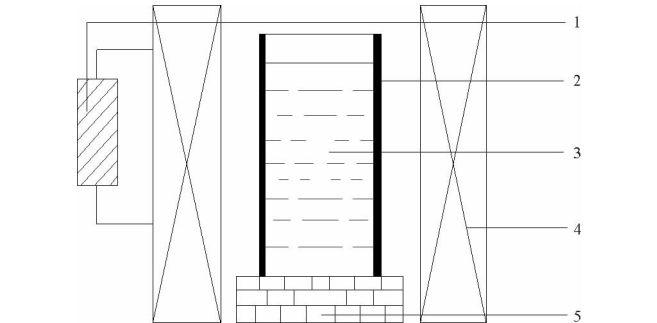


图 1 自制脉冲磁场装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of self-made pulsed magnetic field device

1.脉冲电源 2.石墨铸型 3.金属熔体 4.磁场线圈 5.耐火砖底座

采用坩埚电阻炉对材料进行熔炼,待纯 Mg 熔体温度达到 750 $^{\circ}\text{C}$ 后加入 Mg-30Y、Mg-30Cu 中间合金,充

分熔化后加入 Mg-30Zr 中间合金并保温 10 min,最后加入 Mg-25Sr 中间合金。待熔体温度降到 720 $^{\circ}\text{C}$ 时浇入预热至 600 $^{\circ}\text{C}$ 的石墨型中,随后启动脉冲磁场,直至合金完全凝固,试验参数见表 1。

表 1 试验工艺参数

Tab.1 Experimental process parameters

编号	单次脉冲能量/J	脉冲周期/s
1	0	0
2	6.4	0.1
3	25.6	0.1
4	57.6	0.1
5	57.6	1.0
6	57.6	0.4
7	57.6	0.2

距铸锭底部 20 mm 处截取试样进行打磨、抛光、腐蚀。腐蚀液采用体积分数为 2% 的硝酸乙醇溶液。利用 XJP-6A 型金相显微镜观察试样初生相并通过 S-Viewer 软件采用截线法对晶粒尺寸进行测量;利用 Nova Nano SEM450 型场发射扫描电镜对试样第二相形貌、元素组成进行分析,并通过 Image Pro 软件计算第二相体积分数;利用 D8ADVANCE-A25 型 X 射线衍射仪对合金物相组成进行分析;利用 WDW-200D 型万能试验机进行室温和高温(200 $^{\circ}\text{C}$)拉伸性能测试。按照 GB/T6397-86 制备拉伸试样,其尺寸见图 2 和图 3。利用 Quanta200 型电镜对断口形貌进行观察。

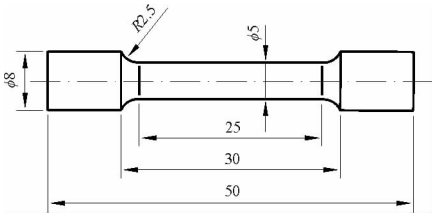


图 2 室温拉伸试样尺寸示意图

Fig.2 The size diagram of tensile specimen at room temperature

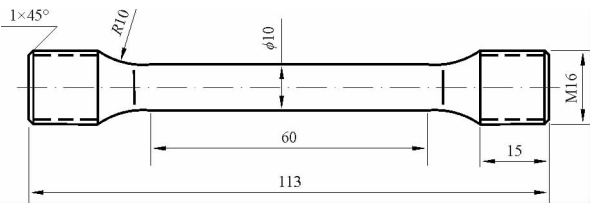


图 3 高温拉伸试样尺寸示意图

Fig.3 The size diagram of tensile specimen at high temperature

2 试验结果与分析

2.1 脉冲磁场对合金凝固组织的影响

图 4 为未处理和脉冲磁场处理条件下石墨型铸造 Mg-Y-Cu-Zr-Sr 合金典型的初生相和第二相形貌,对应试样分别为 1 号试样和 4 号试样。可以看出,未处理时,合金的初生相呈蔷薇状,尺寸较大,其第二相呈半连

续较窄条纹状,分布不均匀,偏聚现象明显,见图 4a 和图 4c;脉冲磁场处理后,合金的初生相仍呈蔷薇状,但

尺寸明显变小,条纹状第二相变宽,分布变得更加连续、均匀,体积分数增加,见图 4b 和图 4d。

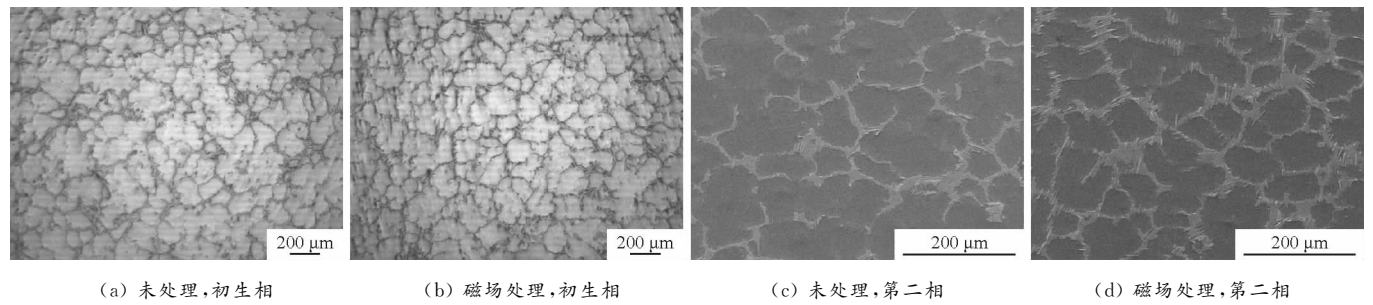


图 4 Mg-Y-Cu-Zr-Sr 合金典型的凝固组织

Fig.4 Typical solidification structure of Mg-Y-Cu-Zr-Sr alloy

图 5 为脉冲磁场处理前后合金的 X 射线衍射图,对应试样分别为 1 号试样和 4 号试样。可以看出,合金

在脉冲磁场作用下,并未产生新的第二相,主要由 α -Mg 基体、 $Mg_{12}Y_1Cu_1$ 相和少量的 $CuZr_2$ 、 $Mg_{17}Sr_2$ 相组成。

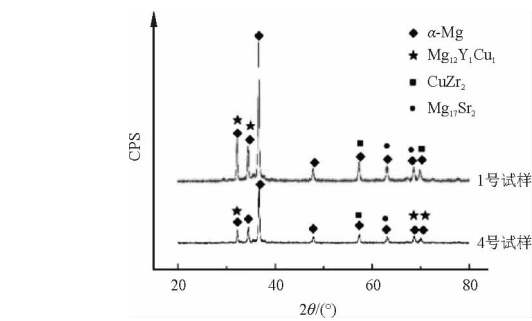


图 5 Mg-Y-Cu-Zr-Sr 合金的 X 射线衍射图

Fig.5 X-ray diffraction pattern of Mg-Y-Cu-Zr-Sr alloy

图 6 为经过脉冲磁场处理合金(4 号试样)铸态组织的 EDS 微区成分分析面及扫描图。对图 6a 中谱图 1、2 两处进行 EDS 点元素分析,结果见表 2,可见灰色衬度相的谱图 1 主要是由 Mg 元素组成,即为基体 α -Mg;浅白色衬度相的谱图 2 中的 Mg、Y、Cu 元素的摩尔比接近 12 : 1 : 1,结合 X 射线衍射图可知,浅白色衬度相为具有 LPSO 结构的 $Mg_{12}Y_1Cu_1$ 相。由图 6b~图 6f 可以看出,Mg 主要分布在基体中,晶界处含量降低;Y、Cu 主要分布在晶界处;Zr 主要分布在晶粒内部,Sr 主要分布在晶界处且含量极低。

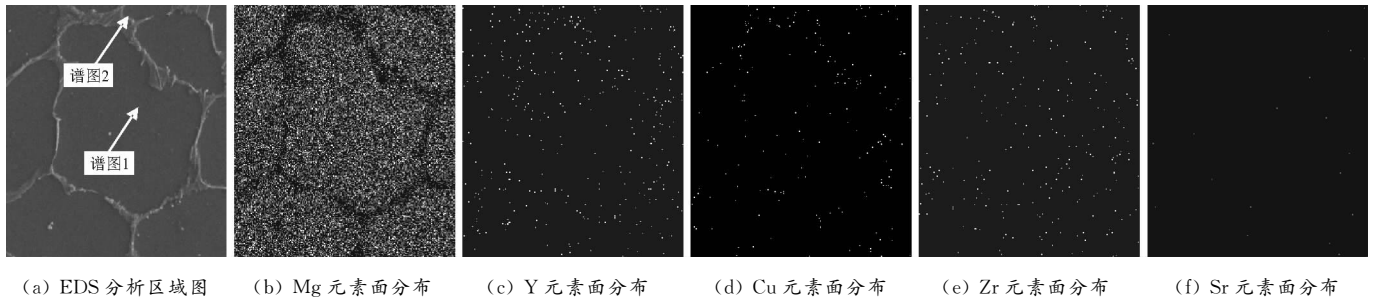


图 6 Mg-Y-Cu-Zr-Sr 合金第二相的 EDS 分析

Fig.6 EDS analysis of the second phase in Mg-Y-Cu-Zr-Sr alloy

表 2 谱图 1、2 的元素含量

谱图	x B			%
	Mg	Y	Cu	
1	100	—	—	
2	86.07	7.08	6.85	

图 7 和图 8 分别为单次脉冲能量和脉冲周期对合金晶粒尺寸、第二相体积分数的影响。从图 7 可以看出,在 0~57.6 J 范围内,随着单次脉冲能量增加,合金晶粒尺寸逐渐减小,第二相体积分数逐渐增大。从图 8 可以看出,在 0.1~1 s 范围内,随着脉冲周期增大,合金晶粒尺寸逐渐增大,第二相体积分数逐渐减小。当单次脉冲能量为 57.6 J,脉冲周期为 0.1 s 时,与未处理的合

金相比,合金晶粒尺寸减小了 39%,第二相体积分数提高了 230%。

Sr 在 Mg 基体合金中的固溶度为 0.03%,多余的 Sr 被排挤到固/液界面前沿,阻碍 α -Mg 相的生长,从而起到细化作用^[15]。Zr 在镁合金熔体中作为异质形核核心,可提高形核率,使合金的初生相得到细化^[16]。脉冲磁场对熔体可产生电磁力、电磁振荡、焦耳热等多种作用^[17],通过影响晶粒的生长过程和形核率两个方面达到细化合金组织的目的。

经过 Zr、Sr 细化后的石墨型 Mg-Y-Cu 合金初生晶粒较小,枝晶也不发达,晶粒呈蔷薇状,脉冲磁场产生的电磁力很难将初生枝晶和次生枝晶臂折断及破碎,因此

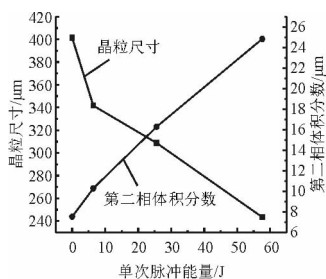


图 7 单次脉冲能量对合金晶粒尺寸和第二相体积分数的影响
Fig.7 Effects of single pulse energy on grain size and volume fraction of second phase in the alloy

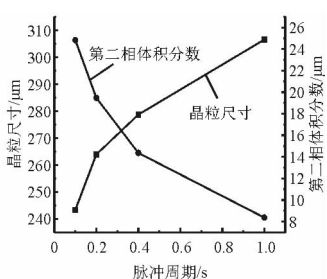


图 8 脉冲周期对合金晶粒尺寸和第二相体积分数的影响
Fig.8 Effects of pulse period on grain size and second phase volume fraction in the alloy

脉冲磁场对 Mg-Y-Cu-Zr-Sr 合金晶体生长过程影响较小,主要通过提高合金形核率来细化其合金凝固组织。脉冲磁场提高该合金形核率主要有 3 个方面:第一,在脉冲磁场作用下,电磁振荡和电磁力引起的电磁搅拌使型壁处异质形核振落,并使其散落在熔体内部,提高了形核率;第二,电磁力引起的对流使液相温度梯度的斜率降低,增大了合金过冷度,提高了形核率^[18];第三,脉冲磁场产生的焦耳热使形核过程持续进行,提高了形核率^[19,20]。因此,随着单次脉冲能量增加,电磁搅拌作用、焦耳热效应及过冷度均有所增强,使得形核率逐渐提高,合金晶粒逐渐细化。随着脉冲周期降低,单位时间内脉冲磁场对熔体作用次数逐渐增加,一方面脉冲磁场引起的电磁搅拌作用逐渐增强,使铸型型壁处晶核脱落速率逐渐提高,另一方面合金熔体内部散热速度加快,使其冷却速度逐渐增加,导致合金过冷度增加,提高了形核率,使得晶粒逐渐细化。

Mg-Y-Cu-Zr-Sr 合金的第二相受脉冲磁场和合金晶粒尺寸的共同影响。未处理合金中溶质原子 Y 和 Cu 扩散较慢,向晶界处偏聚的能力较差,从而导致第二相体积分数较小,分布不连续,同时合金晶粒比较粗大,第二相分布的均匀性也比较差。在脉冲磁场作用下,一方面脉冲磁场产生的电磁力可以加快溶质原子 Y 和

Cu 的流动,提高了液相原子向固相扩散的能力,促进溶质原子向晶界处的偏聚,使第二相体积分数增加,分布也变得更加连续;另一方面,合金的第二相主要分布在 α -Mg 基体的晶界处,因此均匀、细小的等轴晶或蔷薇状晶粒有利于改善第二相的形态和分布;晶粒尺寸越小,分布在晶界处的第二相就越均匀。因此,随着单次脉冲能量的增加或脉冲周期的减小,溶质原子向晶界处扩散的能力逐渐增强,合金晶粒尺寸逐渐减小,进而使第二相体积分数逐渐增大且分布变得更连续、均匀。

2.2 脉冲磁场对合金力学性能的影响

图 9 和图 10 分别为单次脉冲能量和脉冲周期对合金室温和高温(200 ℃)抗拉强度、伸长率的影响。可以看出,在 0~57.6 J 范围内,随着单次脉冲能量提高,合金室温抗拉强度、伸长率和高温抗拉强度逐渐提高,高温伸长率先下降后上升,但总体呈上升趋势;在 0.1~1 s 范围内,随着脉冲周期降低,合金室温和高温抗拉强度、伸长率逐渐提高;当单次脉冲能量为 57.6 J,脉冲周期为 0.1 s 时,与未处理的合金相比,合金室温抗拉强度、伸长率分别提高了 23%、47%,合金高温抗拉强度、伸长率分别提高了 29%、99%。

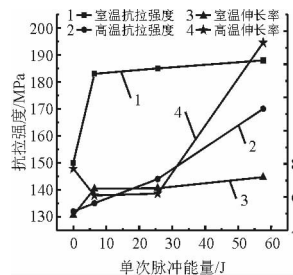


图 9 不同单次脉冲能量下合金室温和高温力学性能
Fig.9 Tensile properties of the alloy at room and high temperature under different single pulse energy

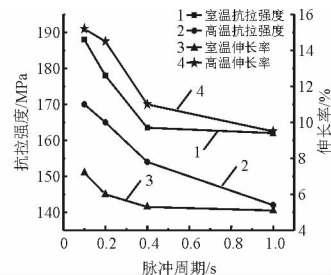


图 10 不同脉冲周期下合金室温和高温力学性能
Fig.10 Tensile properties of the alloy at room and high temperature under different pulse period

图 11 为脉冲磁场处理前后,合金室温和高温(200 ℃)拉伸断口的 SEM 形貌。分别对应 1 号试样和 4 号

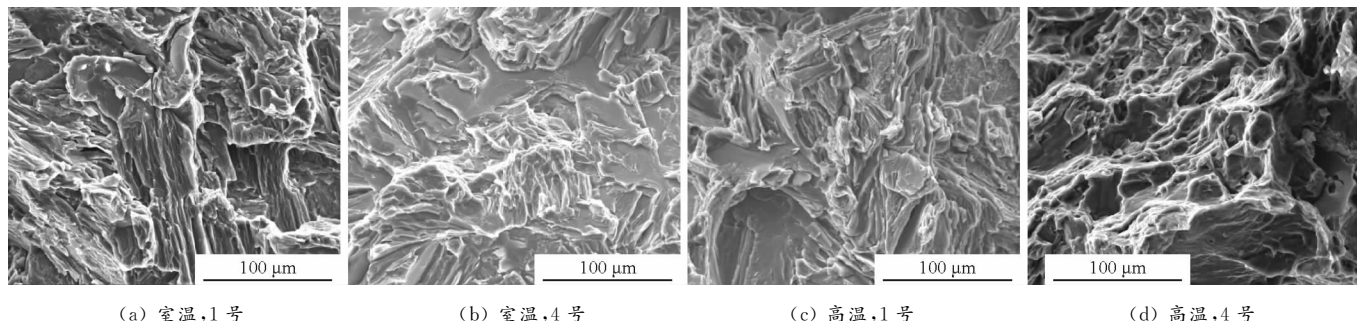


图 11 脉冲磁场处理前后合金室温和高温拉伸断口的 SEM 形貌

Fig.11 SEM morphology of tensile fracture surface of the alloy at room temperature and high temperature before and after pulsed magnetic field treatment

试样。可以看出,室温下,未处理的合金断口处存在较多的解理台阶和解理面,撕裂棱较少,属于解理断裂;经脉冲磁场处理后,合金断口处解理台阶和解理面减少,撕裂棱增多,属于准解理断裂。高温下,未处理的合金断口处存在较大的解理面和解理台阶,撕裂棱较多,属于解理断裂;经脉冲磁场处理后,解理面和解理台阶减少,断口处撕裂棱增多且呈各向异性,出现大量韧窝且韧窝底部有小韧窝,属于韧性断裂。

Mg-Y-Cu-Zr-Sr 合金室温与高温力学主要受其晶粒尺寸和第二相体积分数及分布情况的影响。晶粒尺寸越小,第二相体积分数越多且其连续性、均匀性越好,合金力学性能越高。这是因为:一方面,合金平均晶粒尺寸越小,合金强度越高;另一方面,LPSO 因其界面能较低而具有良好的稳定性^[3],分布在晶界处的 LPSO 能够有效地阻碍位错滑移的进行,起到一定的钉扎作用,使晶界移动受阻,晶界处的 LPSO 体积分数越大,连续性、均匀性越好,钉扎作用越强,合金强度越高;同时,LPSO 相也具有良好的塑性,分布在晶界处的 LPSO 连续性、均匀性越好,合金塑性也越高。因此在室温下,随着单次脉冲能量的增加或脉冲周期的减小,合金晶粒尺寸逐渐减小,具有 LPSO 结构的 $Mg_{12}Y_1Cu_1$ 相体积分数逐渐增大,连续性与均匀性逐渐改善,合金室温抗拉强度和伸长率逐渐提高。在高温(200 ℃)下,合金的晶界强化作用减弱,第二相强化作用增强。在 0~25.6 J 范围内,随着单次脉冲能量提高,合金晶粒逐渐细化,第二相的体积分数逐渐增加,但由于第二相体积分数较低,不能形成连续的网络状,只是分布均匀性得到了改善,导致合金的高温抗拉强度提高,而高温伸长率有所降低;在 25.6~57.6 J 范围内,随着单次脉冲能量的进一步提高,合金晶粒进一步细化,第二相体积分数进一步增加,可以形成连续的网络状,同时第二相分布均匀性进一步改善,导致合金的高温抗拉强度和伸长率均进一步提高。当脉冲周期在 0.1~1 s 范围内,由于单次脉冲能量为 57.6 J,合金第二相体积分数均比较高,可以形成连续的网络状,因此随着脉冲周期减小,合金晶粒尺寸逐渐减小,第二相的连续性和均匀性逐渐改善,合金的高温抗拉强度和伸长率均逐渐提高。

3 结 论

(1)脉冲磁场可有效改善石墨型铸造 Mg-Y-Cu-Zr-Sr 合金的凝固组织和力学性能,使初生相尺寸减小,第二相体积分数增加且分布更加连续、均匀,合金室温、高温力学性能提高。

(2)当单次脉冲能量在 0~57.6 J 或脉冲频率在 0.1~1 s 范围内,随着单次脉冲能量的增加或脉冲周期

的减小,Mg-Y-Cu-Zr-Sr 合金平均晶粒尺寸逐渐减小,第二相体积分数逐渐增加;当单次脉冲能量为 57.6 J,脉冲周期为 0.1 s 时,与未处理的合金相比,合金晶粒尺寸减小了 39%,第二相体积分数提高了 230%。

(3)Mg-Y-Cu-Zr-Sr 合金力学性能主要受其晶粒尺寸和具有 LPSO 结构的 $Mg_{12}Y_1Cu_1$ 相体积分数的影响。随着单次脉冲能量的增加或脉冲周期的减小,合金室温和高温抗拉强度、伸长率逐渐提高;当单次脉冲能量为 57.6 J,脉冲周期为 0.1 s 时,与未处理的合金相比,合金室温抗拉强度、伸长率分别提高了 23%、47%,高温抗拉强度、伸长率分别提高了 29%、99%。

参 考 文 献

- [1] 李志宏,李克志,张晋涛,等. 合金元素对 Mg-Er-Zn-Zr 合金铸态组织和力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2015, 36(12): 2 843-2 845.
- [2] JU Y L, KIM D H, LIM H K. Effects of Zn/Y ratio on microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Y alloys[J]. Materials Letters, 2005, 59(29/30): 3 801-3 805.
- [3] 李响,毛萍莉,王峰,等. 长周期有序堆垛相(LPSO)的研究现状及在镁合金中的作用[J]. 材料导报, 2019, 33(7): 107-114.
- [4] 贾征,李又佳,席玖瑞,等. 镁合金晶粒细化技术研究进展之一—物理细化技术[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(6): 607-613.
- [5] 贾征,李又佳,席玖瑞,等. 镁合金晶粒细化技术研究进展之二—化学细化技术[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(6): 614-618.
- [6] 张磊,刘翔瑞,黄浩,等. 脉冲磁场对镁铜合金组织、力学性能及生物腐蚀行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(11): 2 540-2 548.
- [7] 杨院生,付俊伟,罗天骄,等. 镁合金低压脉冲磁场晶粒细化[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2 639-2 649.
- [8] 周维,邓鹏,胡鹏鹤,等. 脉冲磁场对 Mg-Zn-Y 合金组织及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(6): 653-656.
- [9] 李鹏,周全,陈柯,等. Zr 和脉冲磁场对 Mg-Y-Zn-Ca 合金组织及压缩性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(4): 431-435.
- [10] HAGHAYEGHI R, KAPRANOS P. Grain refinement of AA7075 alloy under combined magnetic fields[J]. Materials Letters, 2015, 151: 38-40.
- [11] MANUWONG T, ZHANG W, KAZINCZI P L, et al. Solidification of Al alloys under electromagnetic pulses and characterization of the 3D microstructures using synchrotron X-ray tomography[J]. Metallurgical & Materials Transactions, 2015, A46(7): 2 908-2 915.
- [12] LI L, LIANG W, BAN C, et al. Effects of a high-voltage pulsed magnetic field on the solidification structures of biodegradable Zn-Ag alloys[J]. Materials Characterization, 2020, 163: 110 274-110 282.
- [13] ZHANG L, WANG E, ZUO X, et al. Effect of high magnetic field on solidified structure of Cu-80% Pb hypermonotectic alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(2): 165-171.
- [14] XIE X H, ZHOU Q, XIAO C B, et al. Effect of low-voltage pulsed magnetic field on solidified structure of superalloy K4169[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 423-426: 725-729.

弥散强化 6XXX 铝合金热变形行为研究

王孝国¹ 张孝元² 孙瑞娟¹ 王 斌¹ 王嘉伟¹
(1.山西农业大学农业工程学院; 2.晋中信息学院机电工程系)

摘 要 对均匀化态含 Mn/Cr 弥散强化 6XXX 铝合金(WQ 合金)在不同变形温度和应变速率下进行轴向热压缩试验。应用双曲正弦本构方程求得合金材料参数和激活能;基于动态材料模型获得变形合金热加工图;根据热加工图确定安全加工窗口,优化变形参数;WQ 合金安全加工区域动态软化机制主要为动态回复,亚晶旋转和(亚)晶界迁移受阻于 α 弥散相;加工失稳区微观组织存在裂纹,主要与微孔形成和第二相开裂、脱相有关。

关键词 6XXX 铝合金;热变形;本构分析;热加工图; α 弥散相

中图分类号 TG146.21;TG113.26

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.09.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Hot Deformation Behavior of Dispersion Strengthened 6XXX Al Alloy

Wang Xiaoguo¹, Zhang Xiaoyuan², Sun Ruijuan¹, Wang Bin¹, Wang Jiawei¹

(1.College of Agricultural Engineering, Shanxi Agricultural University;

2.Department of Mechanical and Electrical, Jinzhong College of Information)

Abstract: The hot deformation behaviors of homogenized Mn/Cr-containing aluminum alloys denoted as WQ were investigated systematically by uniaxial compression tests at various deformation temperature and strain rates. The hyperbolic-sine constitutive equation was employed to determine the parameters and activation energies of materials. Based on dynamic material model, the processing maps of WQ alloys were also constructed to reveal safe processing domain and optimize deformation parameters. Attributed to pinning effect of α -Al(MnCr)Si dispersoids, sub-grain rotation and sub-grain boundaries migration are suppressed. Hence, the softening mechanism in WQ alloy is dominated by dynamic recovery at safe processing domain. Cracks are observed in the microstructure of the machining instability zone, which is related to micro void formation, cracks and debonding of the second phase.

Key Words: 6XXX Alloy, Hot Deformation, Constitutive Analysis, Hot Processing Map, α Dispersoids

6XXX 铝合金(Al-Mg-Si-Cu 合金)因其高比强度、良好的成形性能和抗腐蚀能力,广泛应用于制造汽车零部件,包括车身、座椅及底板等^[1]。6XXX 合金中加入

过渡族元素如 Mn 和 Cr,适当热处理,以形成 α -Al(Mn,Cr)Si 弥散相,可以显著提高其室温和高温性能^[2]。锻造铝合金在均匀化热处理后一般需要热变形,

收稿日期:2021-02-22;修改稿收到日期:2021-03-16

基金项目:山西省优秀博士来晋工作奖励资金科研项目(SXBYKY2021021);山西农业大学博士科研启动项目(2020BQ80)

第一作者简介:王孝国,男,1985 年出生,讲师,山西晋中(030800),E-mail:wxg315550@163.com

通信作者:王嘉伟,男,1984 年出生,讲师,山西晋中(030800),E-mail:wjwzzz@163.com

引用格式:王孝国,张孝元,孙瑞娟,等.弥散强化 6XXX 铝合金热变形行为研究[J].特种铸造及有色合金,2021,41(9):1 114-1 118.

WANG X G, ZHANG X Y, SUN R J, et al. Hot deformation behavior of dispersion strengthened 6XXX Al alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(9):1 114-1 118.

[15] ZHANG S, ZHOU Q, ZHANG H. Effects of minor Sr addition on solidified structure and mechanical properties of Mg-Y-Cu alloy reinforced by long period ordered structure[A]. Proceedings of the 3rd International Conference on Material, Mechanical and Manufacturing Engineering[C]. Guangzhou, 2018.

[16] 李淑波,杜文博,王旭东,等. Zr 对 Mg-Gd-Er 合金晶粒细化机理的影响[J]. 金属学报, 2018, 54(6): 911-917.

[17] 菅炳涛,姚可夫,许光明,等. 脉冲磁场下金属熔体凝固流场的数值模拟[J]. 物理学报, 2003(1): 115-119.

[18] WANG B, YANG Y S, ZHOU J X, et al. Microstructure refinement of AZ91D alloy solidified with pulsed magnetic field[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(3): 536-540.

[19] GUO S, CUI J Z, LE Q C. The effect of alternating magnetic field on the process of semi-continuous casting for AZ91 billets[J]. Materials Letters, 2005, 59(14): 1 841-1 844.

[20] GUO S, LE Q C, ZHAO Z, et al. Microstructural refinement of DC cast AZ80 Mg billets by low frequency electromagnetic vibration[J]. Materials Science & Engineering, 2005, A404(1-2): 323-329.

(编辑:张正贺)