

应变速率对压铸 AlSi10MnMg 合金力学性能的影响

郭俊伟¹ 苏玲珠² 吴孟武¹ 秦训鹏³

[1. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 武汉 430072; 2. 广东鸿特精密技术(台山)有限公司, 台山 529000; 3. 湖北隆中实验室, 襄阳 441000]

摘要 为研究压铸铝合金 AlSi10MnMg 在不同应变速率下的力学性能, 开展了 T6 热处理态下合金试样准静态和动态拉伸试验以及断口形貌分析。结果表明, 动态拉伸时试样发生了温度软化现象和应变率效应, 在较低应变速率下温度软化效应占主导地位, 相较于准静态拉伸, 合金强度降低, 塑性显著提高。随着应变速率提高, 材料硬化效应逐渐增强, 合金强度也随之增加, 塑性则逐渐下降。将试验得到的真实应力-应变数据与 Johnson-Cook 修正模型预测的数据进行对比, 二者吻合程度较高。建立的 Johnson-Cook 修正模型可用来准确描述压铸铝合金 AlSi10MnMg 中高应变速率下的力学特性, 为铸件的结构设计和安全评估提供参考。

关键词 压铸 AlSi10MnMg 铝合金; 应变速率; 力学性能; Johnson-Cook 本构模型

中图分类号 TG249.2; TG146.21

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250060

Effects of Strain Rate on Mechanical Properties of Die-cast AlSi10MnMg Alloy

GUO Junwei¹, SU Lingzhu², WU Mengwu¹, QIN Xunpeng³

[1. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan 430072; 2. Guangdong Hongte Precision Technology (Taishan) Co., Ltd., Taishan 529000; 3. Hubei Longzhong Laboratory, Xiangyang 441000]

Abstract: To investigate mechanical properties of die-cast AlSi10MnMg alloy under different strain rates, quasi-static and dynamic tensile tests were carried out, and fracture morphology was analyzed on T6 heat-treated specimens. The results indicate that specimens exhibit temperature softening and strain rate effects during dynamic tensile testing. At lower strain rates, temperature softening effect is dominant, leading to a reduction in strength and a significant increase in plasticity compared to quasi-static testing. As strain rate rises, hardening effect is gradually intensified, resulting in an increase in strength with plasticity reduction. The true stress-strain data obtained from experiments and predicted by modified Johnson-Cook model was compared, which shows a high degree of correlation. The established modified Johnson-Cook model can accurately describe mechanical characteristics of die-cast AlSi10MnMg alloy at medium to high strain rates, providing valuable references for the structural design and safety assessment of die-cast components.

Key Words: Die-cast AlSi10MnMg Alloy, Strain Rate, Mechanical Properties, Johnson-Cook Constitutive Model

铝合金由于具有良好的导电、导热性能, 较高的比强度等特点, 被广泛应用于汽车、航空航天、通信等行业^[1-4]。根据 C-NCAP 的划分, 将汽车典型碰撞工况分为 100% 正面碰撞、40% 偏置碰撞和侧面碰撞, 在这些典型碰撞工况中, 车身材料承受应变速率为 $10 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 的动态冲击, 从而产生较大的变形和复杂的应力行为^[5-6]。常见的准静态拉伸条件下获得的材料力学性能及断裂损伤行为并不能很好地应用于上述实际情况, 因此研究铝合金的动态力学性能和断裂损伤行为

具有积极的意义。

近年来, 针对铝合金动态力学性能的研究逐渐引起了研究者的关注, 应变速率对不同牌号铝合金动态力学性能的影响则有着不同的结论。ZHANG G H 等^[7]研究了 6008-T6 铝合金在动态冲击条件下的宏观力学响应、微观组织演变和动态力学行为变化, 并将损伤演化方程与动态冲击压缩条件下材料的本构模型相结合, 得到了动态冲击拉伸条件下材料的动态本构模型。ZHU Z W 等^[8]使用分离式霍普金森压杆 (SHPB)

收稿日期: 2025-02-14; 修订日期: 2025-03-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52275370); 湖北省技术创新计划资助项目 (2024BAB072); 武汉理工大学技术转移荆门中心产业基金资助项目 (WHUTJMXZ-2024JJ-13)

第一作者: 郭俊伟, 男, 1998 年出生, 硕士研究生, E-mail: 17639778640@163.com

通信作者: 吴孟武, 男, 1984 年出生, 教授, E-mail: wumw@whut.edu.cn

引用格式: 郭俊伟, 苏玲珠, 吴孟武, 等. 应变速率对压铸 AlSi10MnMg 合金力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(4): 570-575.

GUO J W, SU L Z, WU M W, et al. Effects of strain rate on mechanical properties of die-cast AlSi10MnMg alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(4): 570-575.

研究了 5083 铝合金在不同应变率下的应力-应变曲线,发现 5083 铝合金没有明显的应变率效应。WANG X 等^[9]研究了 6063-T5 铝合金的不同温度和应变速率对材料力学性能的影响,发现 6063-T5 铝合金表现出明显的温度软化效应和应变率硬化效应,并通过改进拟合方法得到修正 Johnson-Cook 本构模型,成功预测了 6063-T5 铝合金的力学行为。WAN J 等^[10]研究了高应变率下 7A04-T6 铝合金的动态力学性能,并基于广泛使用的 Johnson-Cook 模型和 Cowper-Symonds 模型提出了一种改进的本构模型,该模型能准确地描述 7A04-T6 铝合金的动态本构行为。目前,研究者对汽车用铝合金的动态力学性能研究主要集中在 5、6、7 系变形铝合金,而针对铸造铝合金的研究报道较少。同时,大多数铝合金都表现出应变速率效应,但是应变速率与动态力学性能之间的关系仅能通过试验得到,而应变速率与合金微观组织及力学性能之间的关联机制尚未明晰,因此揭示不同应变速率下铝合金微观组织和力学性能的演变规律有助于指导铝合金产品结构设计。

本研究以汽车结构件用压铸铝合金 AlSi10MnMg 为对象,系统研究 T6 热处理下的动态力学性能,通过不同应变速率下的拉伸试验及断口形貌分析,揭示应变速率对合金微观组织与力学性能的影响机理。同

时,基于试验获得的真实应力-应变数据,构建考虑应变速率和塑性应变的 Johnson-Cook 修正模型,旨在为相关材料开发提供参考。

1 试验材料与方法

本研究使用的压铸 AlSi10MnMg 合金成分见表 1,各元素含量均在许可范围之内。试验用的压铸试样采用东洋 BD-350V5 型卧式冷室压铸机进行生产,主要工艺参数见表 2。压铸试样包含 3 个标准力学性能拉伸试棒和一个片状试样。利用线切割从片状试样上切下动态拉伸试样,具体位置及尺寸见图 1。然后将标准力学性能拉伸试棒和动态拉伸试样放入 SG2-3-12 箱式电阻炉和电热鼓风干燥箱中进行 T6 热处理,当固溶处理完成后立即进行水淬,随即进行时效处理。T6 热处理工艺参数为 480 ℃ 固溶 1 h, 180 ℃ 时效 12 h。

表 1 压铸铝合金 AlSi10MnMg 的化学成分

Tab.1 Chemical composition of die-cast AlSi10MnMg alloy %

成分	w_B					
	Si	Fe	Mn	Mg	Sr	Ti
许用成分	9.5~11.5	<0.15	0.5~0.8	0.1~0.5	0.01~0.025	0.05~0.15
实际成分	10.55	0.12	0.71	0.33	0.02	0.07

表 2 压铸主要工艺参数

Tab.2 Main process parameters for die casting

模具温度/℃	浇注温度/℃	真空位置/mm	高速位置/mm	增压位置/mm	低速速度/($m \cdot s^{-1}$)	高速速度/($m \cdot s^{-1}$)	增压压力/MPa
150	690	110	270	280	0.2	2.25	13.7

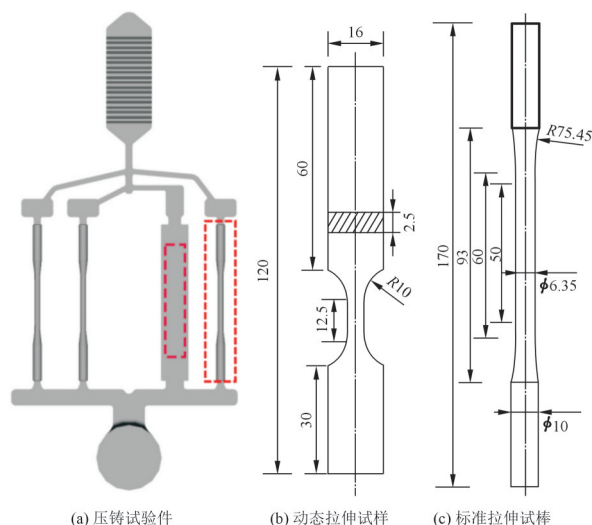


图 1 试验用压铸试样及拉伸试样

Fig.1 Die-cast and tensile specimens for experiments

使用 SANS CMT6000 电子万能试验机对 AlSi10MnMg 合金进行准静态拉伸试验,试样标距长度为 50 mm,准静态拉伸速率为 5 mm/min,准静态应变

速率为 0.001 67 s^{-1} 。使用 Instron VHS 160/100-20 高速试验机进行室温动态拉伸试验,应变速率分别为 100、200、500 和 1 000 s^{-1} 。在整个过程中通过高速摄像机拍摄动态拉伸试样变形前后的图像。在试样的标距区域内标记不规则分布的散斑,并采用数字图像相关法(DIC)测试高速拉伸过程中试样的变形轨迹从而获得材料的应变变化数据。同时,高速拉伸试验机记录相对应的载荷。使用 DK7735 线切割设备从动态拉伸试样上截取 5 mm 左右的拉伸断口,使用无水乙醇在 GA008C 超声清洗仪中清洗 10 min,然后利用 Zeiss Ultra Plus JSM IT800 扫描电镜(SEM)进行形貌观察。

2 试验结果与讨论

2.1 力学性能

不同材料在准静态拉伸和动态拉伸下表现出不同的力学性能变化规律。为了研究 AlSi10MnMg 合金的动态力学性能和断裂损伤行为,有必要进行准静态和

动态拉伸试验,获得其在不同加载速率下的力学响应。图 2 为 AlSi10MnMg 合金在不同应变速率下得到的真应力-真应变曲线。可以看出,不同应变速率下的真应力-真应变曲线在弹性阶段基本重合,而当曲线过了屈服点之后便进入了塑性变形阶段,在此阶段随着真应变的逐渐增加,真应力则有不同程度的上升,最终达到峰值时真应力急剧下降随即材料发生断裂,材料颈缩阶段很短。对于动态拉伸试样而言,在塑性阶段,流动应力随着应变速率的增加而显著增加,这说明材料表现出明显的应变率效应。材料在动态拉伸下发生了明显的应变硬化现象,这是因为当金属变形程度增加时,材料内部晶粒发生畸变和破碎,位错密度增加,进而阻碍了材料内部晶体滑移,增大了金属塑性变形抗力^[11]。试样强度的应变速率效应则受到加工硬化和热激活效应的共同影响。一方面,随着拉伸应变速率的提高,位错变形时材料的位错密度随应变量的加大而增加进而产生加工硬化,使流动应力提高;另一方面,应变速率对屈服强度的影响还与热激活效应相关,热激活效应有利于合金产生屈服变形,使材料软化,降低屈服强度,两者相互耦合,构成了铝合金复杂的应变率效应^[12]。

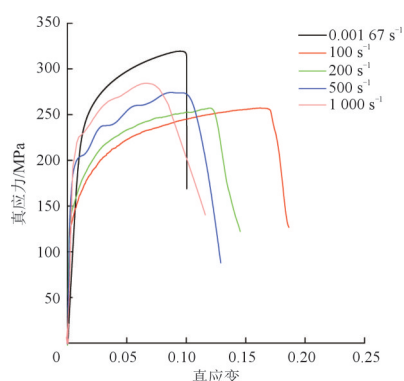


图 2 AlSi10MnMg 合金不同应变速率下的真应力-真应变曲线
Fig.2 True stress-strain curves of AlSi10MnMg alloy at different strain rates

基于 AlSi10MnMg 合金准静态与动态拉伸试验,得到其不同应变速率下的力学性能数据见表 3。可以看出,与准静态拉伸力学性能相比,动态拉伸下的抗拉强度和屈服强度大幅下降,而伸长率则大幅提高,说明相较于准静态拉伸,动态拉伸时试样发生了温度软化

现象和应变率效应,并且在较低应变速率下温度软化效果占主导地位。对于动态拉伸试样而言,抗拉强度和屈服强度随着应变速率的变化呈现两阶段特性。当应变速率小于 200 s^{-1} 时,抗拉强度和屈服强度随着应变速率的增加而缓慢增大,伸长率也随之下降;当应变速率大于 200 s^{-1} 时,应变速率强化效应大幅增强,抗拉强度和屈服强度随着应变速率的提高有着明显的增大,同时伸长率下降也较为明显。金属材料的拉伸过程在准静态或低应变速率下被认为是一个等温过程,而在中高应变速率下则认为是绝热升温过程,在高应变速率和高温相互耦合下,铝合金材料表现出复杂的应变率效应^[13]。对于大部分金属而言,发生塑性变形主要由孪晶和位错滑移共同作用,由于铝合金为面心立方晶体结构,其发生孪晶时所需的临界分解剪切应力比滑移大^[14],一般情况下可以忽略孪晶对其塑性变形行为的影响。因此可以认为位错的滑移主导了压铸铝合金 AlSi10MnMg 的塑性变形机制。随着应变速率增加,位错生成、增殖的速度加快并产生塞积,位错运动阻力增加,进而影响了材料的宏观力学性能^[15],合金的流动应力随之增加,而塑性有所降低。

表 3 不同应变速率下 AlSi10MnMg 合金的力学性能

Tab.3 Mechanical properties of AlSi10MnMg alloy at different strain rates

应变速率/ s^{-1}	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
0.001 67	291.28	223.03	8.07
100	222.08	158.82	20.49
200	228.86	168.97	15.66
500	251.97	186.33	13.78
1 000	272.13	200.96	12.30

2.2 拉伸断口形貌

为了揭示 AlSi10MnMg 合金的变形机理,通过 SEM 来观察不同应变速率下拉伸断口形貌的变化,见图 3。可以看出,动态拉伸试样断口整体呈现出凹凸不平的特征,断口表层区域断面较为平整,但是在心部 ESCs(压室预结晶组织)富集区观察到大量细小的孔洞缺陷,随着塑性变形的不断增加,这些孔洞的体积分数逐渐增大并相互聚合^[16],导致应力集中而率先断裂,进而造成断面起伏较大。

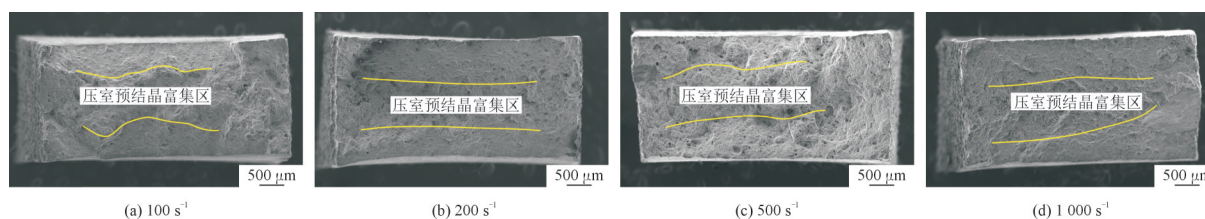


图 3 不同应变速率下试样拉伸断口的宏观形貌

Fig.3 Macro morphologies of tensile fracture of specimens at different strain rates

图4为不同应变速率下试样拉伸断口的微观形貌。可以看到,在应变速率为 100 s^{-1} 的试样中,断口的特征主要表现为存在大量圆形或椭圆形的韧窝及其周围的撕裂棱,并且由于 ESCs 在心部富集的原因,断面起伏处存在较多的孔洞,整个试样的断裂形式为明显的韧性断裂。在应变速率为 200 s^{-1} 和 500 s^{-1} 的试样中,既能观察到韧窝和撕裂棱的存在,同时也能观察到

断面上存在光滑的 ESCs 以及大尺寸的富铁相,并且韧窝的数量和尺寸有一定程度下降,说明随着拉伸应变速率的提高,材料的塑性逐渐降低。而在应变速率为 $1\,000\text{ s}^{-1}$ 的试样中,韧窝分布在局部区域并变浅,并且尺寸进一步减小,表面观察到较多解理面。随着应变速率不断提高,合金的塑性随之下降,这与表3中的结果一致。

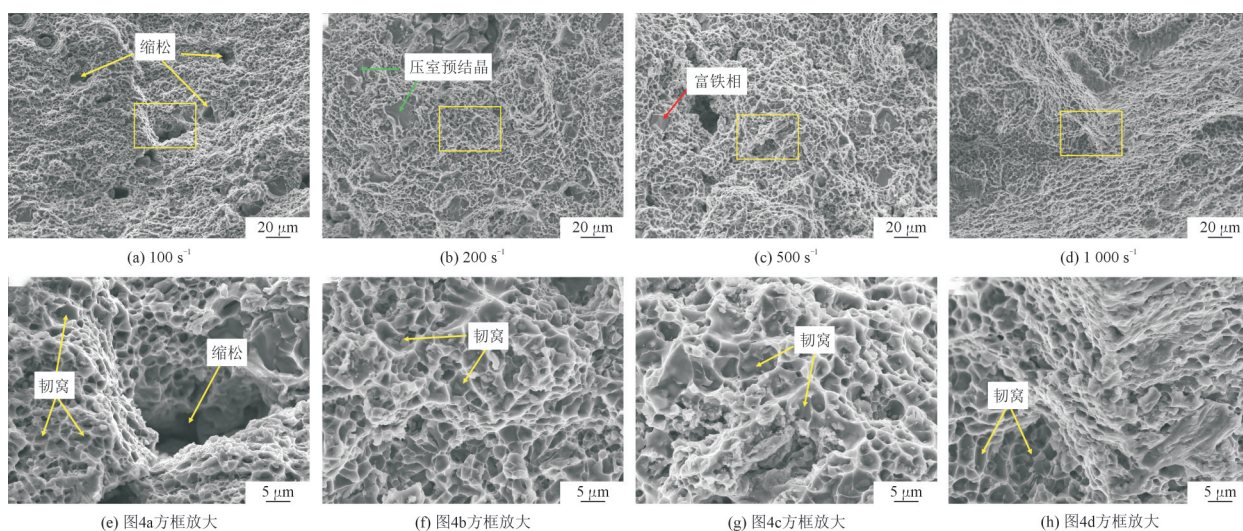


图4 不同应变速率下试样拉伸断口的微观形貌

Fig.4 Micro morphologies of tensile fracture of specimens at different strain rates

2.3 本构模型的建立

材料本构模型的正确性对于数值模拟结果的可靠性具有重要的影响。为了准确地预测 AlSi10MnMg 合金的动态力学性能,必须构建合适的本构模型。金属材料本构模型一般从材料的微观机理和宏观响应两种角度进行构建^[17]。从材料的微观机理角度,本构模型的构建需要从位错密度、晶粒细化、变形机制等方面出发,通过一系列的数学公式进行推导。此类模型通常结构复杂、变量多、计算量大,因此在工程实际中往往通过分析材料的宏观力学响应,引入一定的变量来表征应变、应变速率、温度等因素对材料动态力学性能的影响。

Johnson-Cook 本构模型一般用来描述金属在高应变速率和高温条件下发生大变形时的塑性变形行为,被广泛应用于冲击动力学领域,其表达式为^[18]:

$$\sigma = (A + B\epsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - \dot{T}^m) \quad (1)$$

式中, σ 为材料流动应力; A 为材料在准静态拉伸条件下的屈服强度; B 、 n 为材料加工硬化参数; C 为应变速率敏感系数; m 为温度敏感系数; ϵ 为塑性应变; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}_p / \dot{\epsilon}_0$ 为无量纲化等效塑性应变速率 ($\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变速率,一般可取 0.001 s^{-1} , 本研究取 $0.001\,67\text{ s}^{-1}$); $\dot{T}^* = (T - T_r) / (T_s - T_r)$ 为无量纲温度参数, T_r 为参考温度,

一般可取为室温, T_s 为材料熔点。该模型耦合了应变强化项、应变率效应项和温度影响项三者对材料动态力学性能的影响,使用范围较广且被大多数有限元软件所采纳^[19]。采用 Johnson-Cook 本构模型描述压铸铝合金 AlSi10MnMg 的动态力学行为,同时对模型中的各项参数进行标定和修正^[20],将修正后的模型称为 Johnson-Cook 修正模型。由于本研究中的动态拉伸试验是在室温下进行的,所以可以不考虑温度项的影响,将本构模型简化为:

$$\sigma = (A + B\epsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (2)$$

针对 AlSi10MnMg 合金,利用准静态拉伸条件下得到的应力-应变曲线对 Johnson-Cook 本构模型的应变强化项进行拟合,从准静态拉伸下的应力-应变曲线中可以得到 $A=223.03$,然后对准静态拉伸试验得到的真应力-真应变曲线中的屈服点与颈缩点之间的数据进行非线性拟合得到 B 和 n 值,拟合曲线见图5。可以看到,拟合曲线和试验曲线的吻合度较高, $R^2=0.990\,15$,证明此时的拟合结果是有效的, B 和 n 的值分别为 $312.015\,61$ 和 $0.447\,06$ 。此时的本构模型为:

$$\sigma = (223.03 + 312.015\,61\epsilon_p^{0.447\,06})(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (3)$$

Johnson-Cook 本构模型中应变率效应项的拟合需

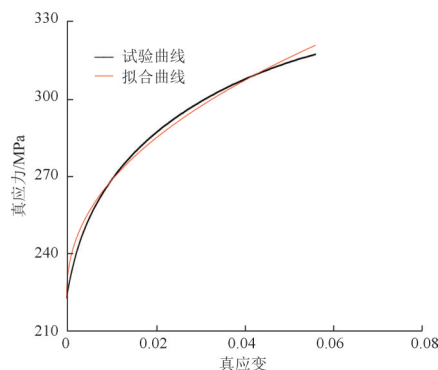


图5 准静态曲线的拟合

Fig.5 Fitting of quasi-static curves

要借助不同应变速率下材料的真应力-真应变曲线。此时式(3)中仅存在一个未知量 C , 分别利用 100、200、500 和 1 000 s^{-1} 应变速率下的真应力-真应变曲线并采用非线性拟合方法得到不同应变速率下 C 的拟合结果, 见图 6。可以看出, 在不同应变速率下拟合得到的

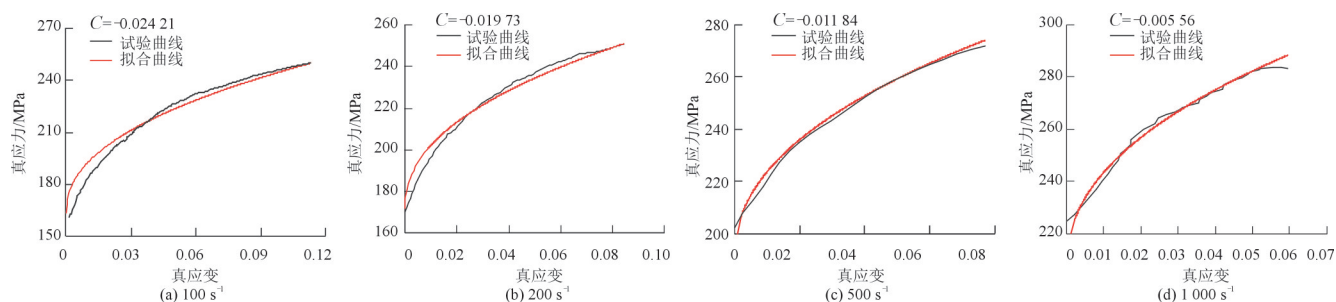
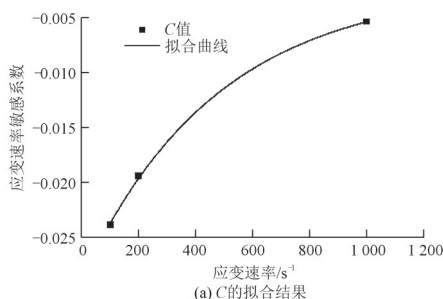
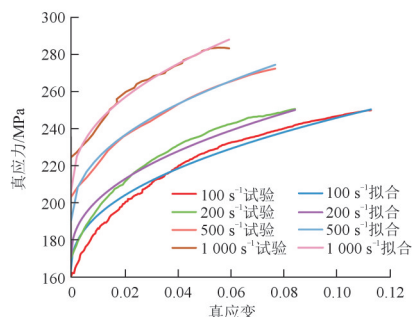

 图6 不同应变速率下 C 值的拟合

 Fig.6 Fitting of C values at different strain rates

 (a) C 的拟合结果


(b) 不同应变速率下真应力-真应变曲线试验结果与计算结果的对比

 图7 C 的拟合结果以及真应力-真应变曲线试验结果与计算结果的对比图

 Fig.7 Fitting results of C and comparison of experimental and calculated results of true stress-strain curves

C 值存在一定的差异, 为了提高本构模型的精度, 根据材料的特性对 C 值作进一步的拟合, 见图 7。从图 7a 可以看到 C 值随着应变速率的增加而增加, 拟合曲线吻合程度较高, $R^2=0.999\ 58$, 此时 C 的表达式为:

$$C = -0.002\ 34 - 0.026\ 85 \times 0.997\ 9^x \quad (4)$$

式中, x 为应变速率, 将 C 代入, 最终的 Johnson-Cook 修正模型表达式为:

$$\sigma = (223.03 + 312.015\ 61\epsilon^{0.447\ 06}) \times [1 + (-0.002\ 34 - 0.026\ 85 \times 0.997\ 9^x) \times \ln \dot{\epsilon}^*] \quad (5)$$

根据 Johnson-Cook 修正模型计算得到的不同应变速率下压铸铝合金 AlSi10MnMg 的真应力-真应变曲线见图 7b。可以看到计算曲线与试验曲线非常接近, 绝大部分区域的误差在 3% 以内, 说明采用所建立的 Johnson-Cook 修正模型可以用来描述压铸铝合金 AlSi10MnMg 的动态力学性能变化规律。

3 结 论

(1) 相较于准静态拉伸, 动态拉伸时压铸 AlSi10MnMg 合金发生了温度软化现象和应变率效应。在较低应变速率下温度软化效应占主导地位, 此时合金强度降低, 塑性显著提升。随着应变速率的提高, 材料硬化效应逐渐增强, 合金强度随之增加, 塑性则逐渐下降。

(2) 动态拉伸试样断口整体呈现出凹凸不平的特征, 断口表层区域较为平整, 断面中心区域起伏较大且存在较多的孔洞。随着拉伸应变速率提高, 断面韧窝的数量和尺寸有一定程度的下降。

(3) 利用准静态和动态拉伸试验得到的真实应力-应变数据对 Johnson-Cook 本构模型中的各项参数进行标定和拟合, 最终得到 AlSi10MnMg 合金的 Johnson-Cook 修正模型。模型计算得到的真实应力-应变数据与试验结果之间的误差较小, 表明该模型能够用来准确地描述 AlSi10MnMg 合金的动态力学行为。

参 考 文 献

- [1] 卢信学, 邓益民, 束学道, 等. 铝合金发动机端盖压铸数值模拟与工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(3): 424-427.
- [2] 孙佳孝, 杨可, 王秋雨, 等. 5356 铝合金 TIG 电弧增材制造组织与力学性能[J]. 金属学报, 2021, 57(5): 665-674.
- [3] BAKEDANO A, NIKLAS A, ISABEL F, et al. Comparative study of the metallurgical quality of primary and secondary AlSi10MnMg aluminium alloys[J]. Metals, 2021, 11(7): 1 147.
- [4] GUO Y L, HAN Q F, HU J L, et al. Comparative study on wire-arc additive manufacturing and conventional casting of Al-Si alloys: Porosity, microstructure and mechanical property[J]. Acta Metallurgica Sinica(English Letters), 2022, 35(3): 475-485.
- [5] 吴昊, 孟宪明, 田杰斌, 等. C-NCAP 工况下铝合金动态力学与失效特性仿真分析[J]. 新技术新工艺, 2020(9): 53-57.
- [6] 周青, 夏勇, 聂冰冰, 等. 汽车碰撞安全与轻量化研发中的若干挑战性课题[J]. 中国公路学报, 2019, 32(7): 1-14.
- [7] ZHANG G H, ZHU Z W, NING J G, et al. Dynamic impact constitutive relation of 6008-T6 aluminum alloy based on dislocation density and second-phase particle strengthening effects[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 932: 167 718.
- [8] ZHU Z W, KANG G Z, RUAN D, et al. Experimental research on dynamic mechanical properties of 5083 aluminum alloy [J]. Key Engineering Materials, 2013, 535-536: 497-500.
- [9] WANG X, JIANG T, JI C, et al. Mechanical properties and constitutive modeling of 6063-T5 aluminum alloy over a wide range of strain rates and temperatures[J]. International Journal of Thermophysics, 2023, 44(9): 1-23.
- [10] WAN J, ZHU Y, ZHANG Y, et al. Strain rate effect and dynamic constitutive model of 7A04-T6 high-strength aluminium alloy [J]. Structures, 2023, 53: 1 250-1 266.
- [11] 舒畅, 程礼, 许煜. Johnson-Cook 本构模型参数估计研究[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(5): 1 073-1 083.
- [12] 高宁, 朱志武. 铝合金应变速率效应综述及其机理研究[J]. 应用数学和力学, 2014, 35(S1): 208-212.
- [13] EZUBER H, EL-HOUD A, EL-SHAWESH F. A study on the corrosion behavior of aluminum alloys in seawater[J]. Materials and Design, 2008, 29(4): 801-805.
- [14] AUSTIN R A, MCDOWELL D L. A dislocation-based constitutive model for viscoplastic deformation of fcc metals at very high strain rates [J]. International Journal of Plasticity, 2011, 27(1): 1-24.
- [15] FAN H D, WANG Q Y, EL-AWADY J A, et al. Strain rate dependency of dislocation plasticity [J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 1 845.
- [16] CHUVIL'DEEV V N, GRYAZNOV M Y, SHOTIN S V, et al. Investigation of superplasticity and dynamic grain growth in ultrafine-grained Al-0.5%Mg-Sc alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 877: 160 099.
- [17] 丁浩谱. 6005-T6 铝合金本构模型及断裂失效模型研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [18] 杨增宇, 陈华燕, 赵黎, 等. Ti-6Al-4V 合金动态本构模型参数敏感性及其优化[J]. 钛工业进展, 2017, 34(5): 12-17.
- [19] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1983, 21: 7 944-7 956.
- [20] 高帅. 挤压态 6063 铝合金动态力学性能研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2021.

(编辑:张正贺)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16 开,邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元,全年 240 元。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺 1001 大厦 10 楼

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024,

85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

