

文章编号: 1007-7294(2024)11-1721-10

JDA1b 铝合金动态力学性能和预变形行为研究

王雪强^a, 彭立明^b, 李四平^a

(上海交通大学 a. 船舶海洋与建筑工程学院; b. 材料科学与工程学院, 上海 200240)

摘要: 铝合金因其低密度、高比强度和大比刚度等优点在船舶工业中得到了大量应用。但是相比于钢材, 铝合金的强度偏低。为了提高铝合金材料的强度, 以常用于船舶压铸件和舾装件的 JDA1b 铝合金为研究对象, 开展预变形拉伸和弯曲试验以及动态拉伸试验, 研究预应变、预弯曲对 JDA1b 合金力学性能的影响, 同时也研究应变率对合金流体力学行为的影响。结果表明: 提高应变率能增加材料的流动应力和抗拉强度; 随着预应变的增加, 材料的屈服应力和抗拉强度会增大, 但延伸率会降低; 预弯量的增加有利于提高材料的弯曲屈服载荷、弯曲刚度和破坏位移。提出考虑极限强度和临界应变的新动态本构模型, 该模型能够准确地预测 JDA1b 合金在不同应变率(1~800/s)时的流动应力, 拟合优度值达到了 0.999。本文的研究可为提高铝合金强度提供方法参考, 新提出的本构模型有助于提高零件力学性能仿真计算的精度。

关键词: 铝合金; 预应变; 预弯曲; 动态; 本构模型; 力学性能

中图分类号: U668.2

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.11.009

Dynamic mechanical performance and pre-deformation behavior of JDA1b alloy

WANG Xue-qiang^a, PENG Li-ming^b, LI Si-ping^a

(a. School of Ocean and Civil Engineering; b. School of Materials Science and Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Aluminum alloys have been widely used in the ship industry for their low density, high specific strength and specific stiffness. However, compared with steel, the strength of aluminum alloy is low. To improve its strength, JDA1b aluminum alloy, which is often used in die casting and outfitting parts of ships, was taken as the research object. Pre-strain tensile, pre-bend tests and dynamic tensile tests were carried out to investigate the effects of pre-strain and pre-bend on the mechanical performance of JDA1b alloy, and the effects of strain rate on the flow behaviors of the alloy were also investigated. The results show that increasing the strain rate can increase the flow stress and tensile strength of the material; the yield stress and tensile strength of this material increase with the increase of pre-strain, and the elongation decreases, and that the increase of pre-bend is favorable to improve the bending yield load, bending stiffness and damage displacement of the material. A new dynamic constitutive model considering ultimate stress and critical strain was proposed, which allows the flow stress to be predicted more precisely at various strain rates over a wide range of 1~800/s, and the fitting goodness-of-fit value reached 0.999. This study provides methods to improve the strength of aluminum alloys, and the proposed constitutive model is conducive to the improvement of the accuracy of the simulation of mechanical performance of parts.

收稿日期: 2024-05-28

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB3701000); 国家自然科学基金资助项目(51878407)

作者简介: 王雪强(1993-), 男, 博士研究生; 彭立明(1972-), 男, 教授, 博士生导师;

李四平(1965-), 男, 副教授, 博士生导师, 通讯作者, E-mail: lisp@sjtu.edu.cn。

Key words: aluminum alloy; pre-strain; pre-bend; dynamic; constitutive model; mechanical performance

0 引言

船舶轻量化有利于提升航行速度和单位重量的载重量,有效节能减排,增强经济效益。采用高强轻质材料是实现船舶轻量化的主要途径之一。随着全球造船业的迅猛发展和海防竞争加剧,船舶轻量化日益受到关注。铝合金以其低密度、高韧性、高比强度及良好的耐腐蚀性而著称。使用铝合金建造的船舶比钢材船舶要轻15%~20%,具有显著的经济优势和更长的使用寿命^[1]。铝合金既可以作为型材,也可以铸造加工,满足船舶各类零部件的设计需求。这些优点促使铝合金在船舶制造中有大量应用。从远洋商船、高速客船、邮轮、快艇到军用舰艇和工作船,都有铝合金的使用。无论是航空母舰和战船的大型部件,如起降甲板、发动机台座、升降机、船侧和船底外板,还是普通舰船的舱口、天窗、托架、护栏梯子,乃至舱室装饰、厨房设备、管道设备、桅杆天线等,铝合金都发挥着重要作用^[2]。对速度有较高要求的高速船和工作船,在不增加动力的情况下,采用铝制船身能够显著减轻重量,从而有助于提高航速。

铝合金材料中的压铸铝合金具有出色的可塑性,能够被加工成各种形状复杂的零件^[3],以适应船舶上不同设备的需求。作为船舶的核心部件,发动机常采用压铸铝合金制造,尤其是高速船,铝制发动机可以显著降低船只的总重量。此外,压铸铝合金也常用于制造船舶舾装件。尽管铝合金在船舶领域拥有广泛应用,但与钢材相比,其强度仍有提升的空间。

随着船舶、车辆等交通运输产业铸件尺寸的增大和零件复杂程度的提高,对压铸铝合金材料的铸造充型能力和力学性能的需求也相应提高^[4-5]。JDA1b(上海交大铝的简称)合金是一款高强高韧的铝硅合金,具有优异的流动性和力学性能^[6]。这种合金采用的成分设计和成型工艺保证了它具有较高的抗拉强度和延伸率,同时该材料压铸后的产品无需热处理,在常规压铸后4~72小时自然时效后,即可达到与经过T6热处理的德国Silafont36材料相当的性能水平^[7]。这一特点使得JDA1b合金能够满足发动机、变速器等精密结构件对合金材料强度和塑性的高要求。

许多学者通过调整材料成分和晶粒细化,提高了铝合金的强度^[8-10]。预变形处理也是提高强度的一种有效方式。已有工作从成分设计和晶粒细化的角度对JDA1b合金强度的提高展开了研究^[11],而关于该合金的预变形行为研究尚未见报道。另外,在船舶航行和设备运行过程中,不可避免地会受到冲击载荷的作用,如碰撞、加减速等^[12-15]。经验表明,材料在冲击载荷下与静态载荷下的力学性能存在差异^[16]。不同材料在不同应变率下的力学性能也会有所不同^[17-20]。因此,JDA1b合金的动态力学性能亦亟待研究。

本文通过试验方法研究JDA1b合金的动态力学性能,同时,设计预变形试验,研究预应变、预弯曲对JDA1b合金硬化行为的影响。基于试验现象,提出一种适用于压铸铝合金的动态本构模型,与J-C模型相比,提出的模型能更准确地预测压铸铝合金的动态力学行为。

1 材料和试样

本文使用的JDA1b合金的材料成分如表1所示。合金中高含量的Si和Mg不仅确保了其出色的力学性能,而且增强了熔融态合金的流动能力,改善了切削性能。加入的稀土元素可以细化晶粒,强化材料,满足了大型结构件对合金材料强度和塑性的要求。

表1 JDA1b合金的化学成分(wt.%)

Tab.1 Chemical compositions of the JDA1b alloy (wt.%)

元素	Si	Mg	Cu	Mn	Ti	Fe	V	Sr	RE	Al
含量	8.8019	0.2894	0.1205	0.6821	0.1719	0.0993	0.0111	0.0319	0.0523	余量

在研究中,根据试验需求制备了不同的试样,详细的试验铸件、试样及尺寸如图 1 所示。图 1(a) 为 JDA1b 合金铝锭,将其在 75 MPa 压力下压铸成铸件(图 1(b))。去掉铸件上的流道和渣包后,可以得到厚度为 3.0 mm 的平板(图 1(c))。通过计算机数控线切割技术可从平板上获得所需试样,试样的长度方向与金属流动方向一致,如图 1(d)所示。零件预变形的主要形式是预拉伸和预弯曲,因此试验的试样包括准静态拉伸试样和弯曲试样,图 1(e)、(f)和(g)分别为预应变拉伸试样、预弯曲试样和高速拉伸试样的图片,试样的具体尺寸分别见图 1(h)、(i)~(j)。部分试样照片展示在了图 1(k)~(l)中。

采用 ZEISS Axio Observer A1 光学显微镜观察了断裂后试样的显微组织,结果如图 2 所示。压铸后的 JDA1b 合金呈现出压铸材料典型的分层形貌(图 2(a))。在试样边缘处存在明显的过冷层,如图 2(b)中绿色虚线之间的区域。在次边缘位置, α -铝基体和硬质共晶 Si 相均匀分布(图 2(c))。在中心位置有两种形式的 α -铝,一种是小而圆的组织(图 2(d)和(e)中绿色线包围区域),另一种是较大颗粒的预结晶组织(ESC)(图 2(d)和(e)中黄色线包围区域),平均晶粒尺寸为 20~30 μm 。ESC 是由于熔融态金属在进入料筒时温度下降形成的,在随后的充型过程中被压入型腔并继续长大,因此尺寸相对较大。

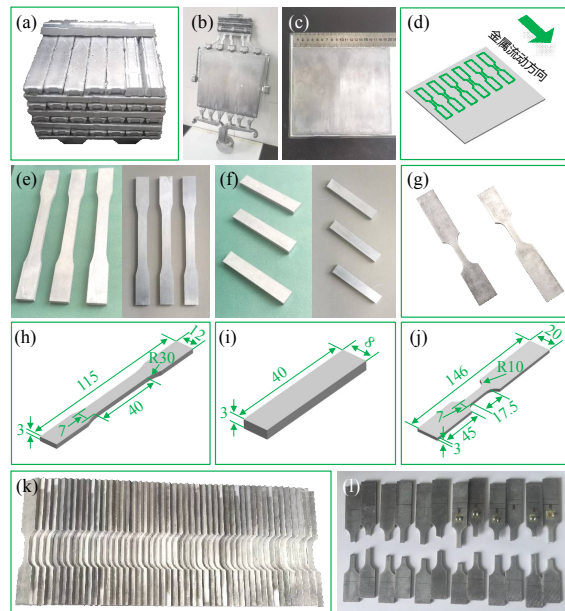


图 1 试验铸件、试样及尺寸

Fig.1 Cast, specimen, and dimension

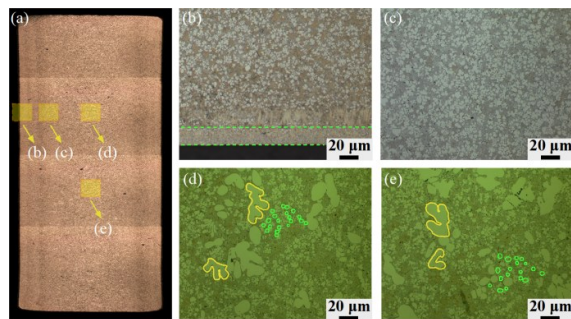


图 2 JDA1b 铝合金的金相组织

Fig.2 Metallographic structure of JDA1b alloy

2 试验和结果

2.1 试验设备与方法

对试样开展了准静态拉伸试验、高速拉伸试验和三点弯曲试验:准静态拉伸试验遵照国标 GB/T 2281-2021,在 Zwick Roell Z100 万能电子试验机(100 kN)上进行(图 3(a));高速拉伸试验遵照国际标准 ISO 26203-2-2011,在 Zwick Roell HTM 5020 高速拉伸试验机上进行(图 4(b));弯曲试验遵照国标 GB/T 232-2010,在 Zwick Roell Z050 万能电子试验机(50 kN)上进行(图 3(c))。通过室内恒温系统把实验时的环境温度控制为 27 $^{\circ}\text{C}$ 。准静态拉伸加载装置如图 3(d)所示,采用的应变率为 0.01/s。高速拉伸试验测试了 6 个不同应变率(1/s, 10/s, 50/s, 100/s, 500/s 和 800/s)下材料的力学性能,参考应变率为 1/s,并使用了高速摄像机和非接触变形测量系统测量了应变和应力(图 3(e))。弯曲加载装置如图 3(f)所示,加载速率为 1 mm/min,支辊间距离为 20 mm。各试验每个工况下测试 5 个试样,取平均值作为试验结果。图 3(g)~(i)分别展示了准静态拉伸试验、高速拉伸试验和弯曲试验的数据处理系统。

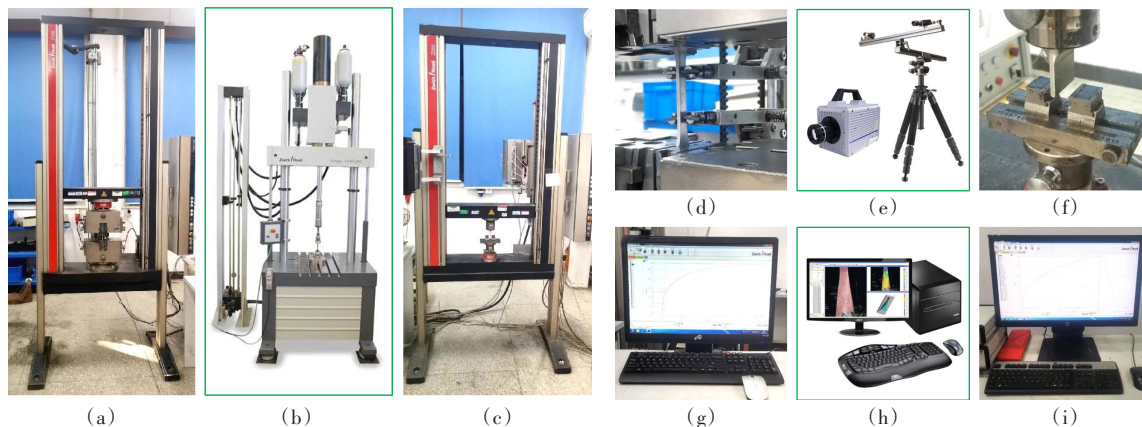


图3 拉伸和弯曲试验设备

Fig.3 Equipment for tensile and bending tests

为了研究预变形对JDA1b合金硬化行为的影响,设计了不同预应变量和预弯曲量的力学性能试验。在预应变实验中,预应变分别设置为2%、4%和6%,以无预应变的情况作为对照试验。在预弯曲实验中,预弯曲量分别设置为0.5 mm、1.0 mm和1.5 mm,以无预弯曲的情况作为对照试验。

评定材料预变形后硬化特性的方法如图4所示,图4(a)为拉伸试验,图4(b)为弯曲试验。图中绿色曲线代表无预变形的试验结果,蓝色曲线代表预变形后的试验结果。硬化值(H)、屈服应力(YS)、抗拉强度(YTS)和延伸率(E)是评价材料力学性能的重要参数。试验流程如下:

- (1) 对试样施加一定的预应变(或预弯曲量),然后卸载,模拟零件的初步变形过程;
- (2) 把预变形后的试样在室温下放置24小时,模拟自然时效过程;
- (3) 对试样进行拉伸(弯曲)试验。

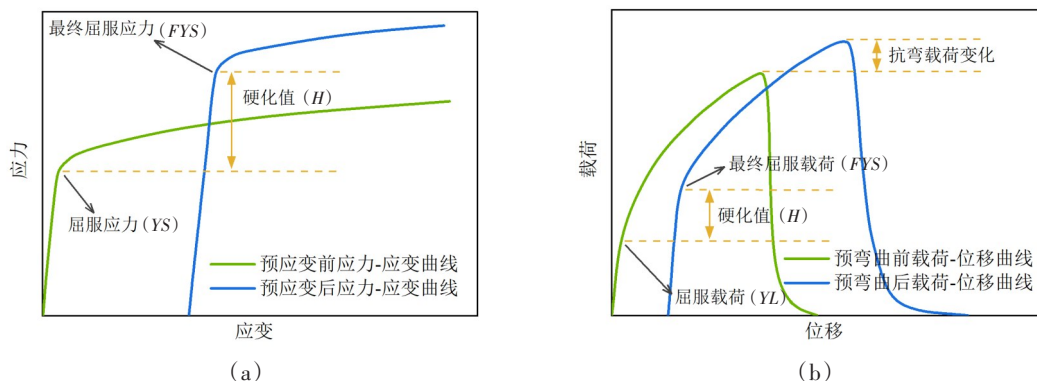


图4 评定材料预变形硬化特性的方法

Fig.4 Method of evaluating the pre-deformation hardening characteristics of materials

对于拉伸试验, H 值为无预应变时的屈服应力与施加预应变后的屈服应力(即最终屈服应力, FYS)之差。对于弯曲试验, H 值为无预弯曲时的屈服载荷与施加预弯曲后的屈服载荷(即最终屈服载荷, FYL)之差。

2.2 高速拉伸结果

通过高速拉伸试验得到JDA1b铝合金的真应力-真应变曲线结果如图5。在变形初始阶段,由于位错的不断增殖导致加工硬化,材料的流动应力迅速增加。随着应变的增大,材料呈现应变硬化特性,应力趋于稳定。此外,随着应变率的增大,最大应力也会增大。这是由于在高应变率下,完成变形的时间减少,从而导致位错的快速增加和积累。

2.3 预应变试验结果

图 6 给出了 JDA1b 合金在完成不同预应变后,再进行准静态拉伸的应力-应变曲线。其中,作为对照的无预应变试样的平均屈服应力为 137.6 MPa,抗拉强度为 291.2 MPa,延伸率为 15.3%。在施加预应变后,应力-应变曲线均出现明显的屈服平台。当预应变分别为 2%、4% 和 6% 时,平均屈服应力分别提高到 235.7 MPa、277.4 MPa 和 305.7 MPa,抗拉强度分别增加到 328.3 MPa、346.2 MPa 和 359.4 MPa,而延伸率则相应降低到 12.1%、10.9% 和 10.4%。总硬化值 H 也随着预应变量的增加而增加,分别为 98.1 MPa、139.8 MPa 和 168.1 MPa。综上所述,预应变处理使 JDA1b 合金的屈服应力和抗拉强度显著提高,但同时会导致延伸率的降低。

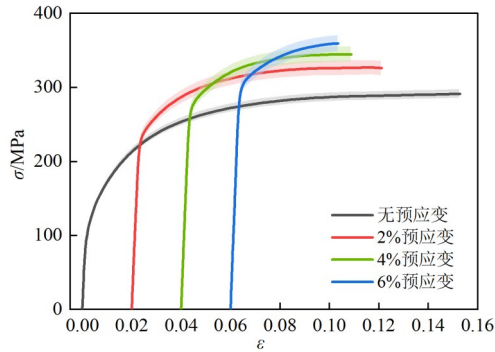


图 6 JDA1b 铝合金在不同预应变下的真应力-应变曲线
Fig.6 True stress-strain curves of JDA1b alloy at different pre-strains

2.4 预弯曲试验结果

在对试样施加不同预弯曲量后,进行弯曲试验,得到的载荷-位移曲线如图 7 所示。JDA1b 合金的屈服载荷和抗弯刚度随预弯曲量的增大而增加。尽管预弯曲量不同,极限抗弯载荷却基本保持不变,约在 960 N 附近。当试样达到极限抗弯载荷后,会进入软化阶段,所承受的载荷会迅速下降,而位移却没有发生明显变化。以载荷-位移曲线出现明显转折时的载荷(约 100 N)作为破坏载荷,随着预弯曲量的增大,破坏载荷也相应增大。当载荷低于 100 N 时,变形迅速增加。

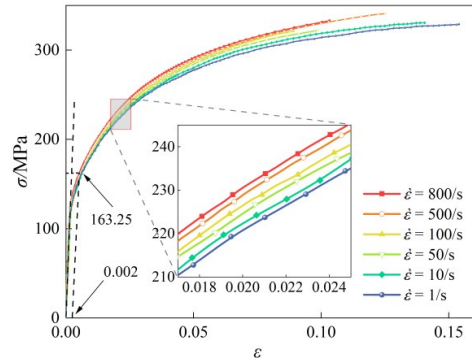


图 5 JDA1b 铝合金在不同应变率下的真应力-应变曲线
Fig.5 True stress-strain curves of JDA1b alloy at different strain rates

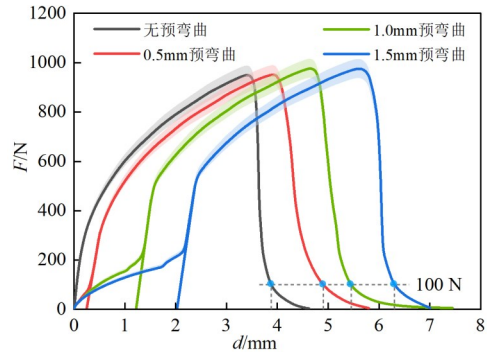


图 7 JDA1b 铝合金在不同预弯曲下的载荷-位移曲线
Fig.7 Load-displacement curves of JDA1b alloy at different pre-bends

3 本构模型及参数分析

3.1 J-C 模型和新的本构模型

J-C 模型是由 Johnson 和 Cook 于 1983 年针对金属材料在大变形、高应变率和高温条件下的流变行为提出的一种经验模型,其表达式如下:

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

式中: A 为初始屈服应力; B 、 n 为应变硬化参数; C 为应变率硬化参数; m 为热软化参数; ϵ 为塑性应变; $\dot{\epsilon}^*$ 为无量纲的应变率, $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$, $\dot{\epsilon}$ 为应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率; $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ 为无量纲温度, T 为试验温度, T_r 为室温温度, T_m 为材料熔点。

该式右边三项分别描述了材料的加工硬化效应、应变率效应和温度软化效应,材料参数获取方法可参考文献[21-22]。JDA1b 合金的熔点为 875 K,室温可设定为 300 K(相当于 27 °C)。参考应变率可

设定为 1/s。本文未研究材料的热软化现象,故本构模型中与热软化相关的参数均为 0。计算后可以得到 JDA1b 的 J-C 模型的参数如表 2 所示。J-C 模型对流动应力的预测结果与试验数据的对比如图 8 所示。J-C 模型的预测值与试验结果只有较少的重合区域,与实际的硬化特性存在较大偏差。J-C 模型的拟合优度值(R^2)为 0.925,显然,该模型的预测精度较低。

表 2 JDA1b 铝合金的 J-C 模型材料常数

Tab.2 Material constants in the J-C model of JDA1b alloy

	A/MPa	B/MPa	C	n
值	163.25	392.93	0.007 36	0.413 45
方差	13.948	127.91	3.6952×10^{-6}	0.012 07

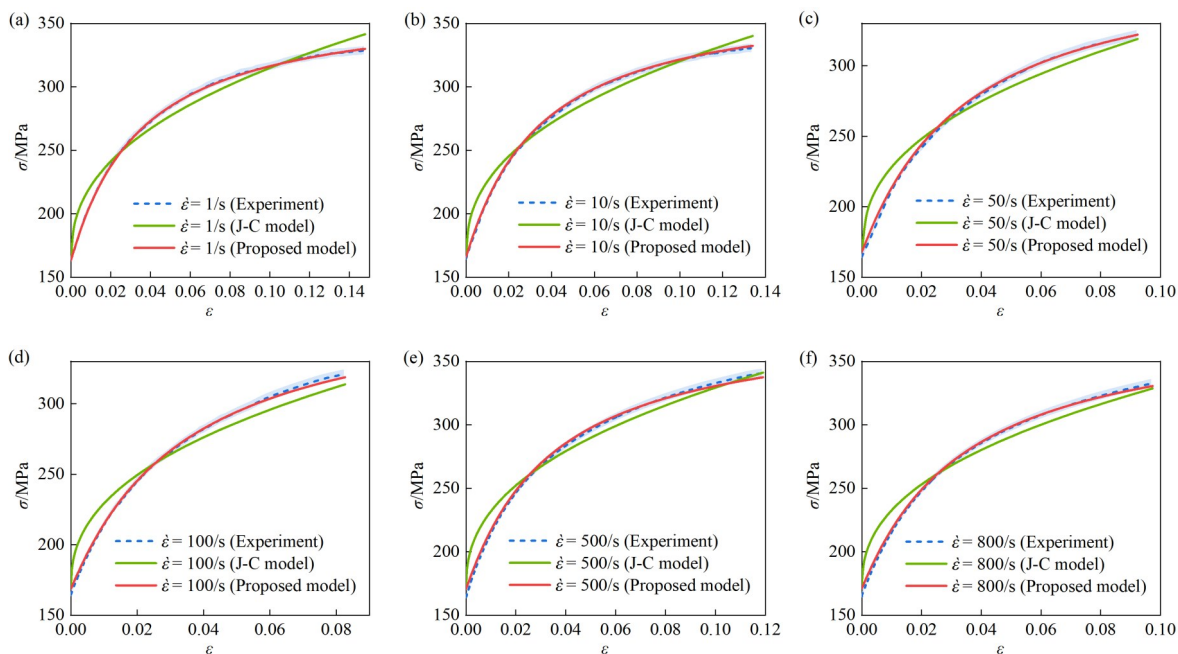


图 8 JDA1b 铝合金在不同应变率下流变应力值与 J-C 模型预测值和提出模型的预测值的比较

Fig.8 Comparisons among experimental flow stress values as well as values predicted by the J-C model and the proposed model for JDA1b alloy at different strain rates

从图 8 可以发现, JDA1b 的流动应力最终趋于稳定, 应力值也趋于收敛, 而 J-C 模型没有体现出这种收敛性。因此, 随着应变量的增加, J-C 模型的预测值与试验数据之间的偏差也会逐渐增大。造成这种偏差的主要原因是原本构模型缺乏收敛性, 因此, 本文提出一个新的模型, 旨在降低这种偏差。新的本构模型为

$$\sigma = \left[Q - \frac{Q - A}{1 + \left(\varepsilon / \varepsilon_0 \right)^p} \right] (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m}) \tag{2}$$

式中: Q 为应力趋势的极限值; ε_0 为临界应变; p 为待定系数, 初始值为 1。

新提出的模型中, 除了新增的参数外, 其余参数含义与原 J-C 模型相同, 参数 Q 、 ε_0 和 p 的值如表 3 所示(参数的确定方法将在下文进行讨论)。图 8 给出了新模型的流动应力的预测结果。在较宽的应变范围和应变率范围内, 新模型预测结果与试验数据吻合均很好。新的模型能够准确地反映 JDA1b 合金的流动应力, 拟合优度值(R^2)为 0.999, 与 J-C 模型相比, 精度显著提高。

表 3 JDA1b 铝合金在新提出的模型中的材料常数

Tabl.3 Material constants in the proposed model of the JDA1b alloy

	A/MPa	Q/MPa	ε_0	p	C
值	163.25	366.70	0.034 25	1.035 29	0.007 32
方差	13.948	13.948	5.9675×10^{-6}	0.00598	8.0528×10^{-7}

3.2 模型参数及敏感性分析

根据材料应力-应变曲线的特性,可以将材料的拉伸分为四个阶段:(I)弹性阶段;(II)均匀塑性变形阶段;(III)缓慢塑性变形阶段;(IV)断裂阶段。如图 9 所示,在第 I 阶段,材料为弹性变形,总应变小于 0.01。材料内部的位错随着应变的增加而增大,从而导致应力的快速增加。第 II 阶段,材料开始流动,应力-应变曲线的斜率略有下降,流动应力增长速度减慢,均匀塑性变形开始产生并伴随加工硬化。第 III 阶段,曲线逐渐趋于水平,加工硬化速率逐渐接近于零。当变形进入到第 III 阶段时,材料中的微孔洞、微裂纹等缺陷进一步发展,从而导致材料颈缩。随后,应力在颈缩阶段迅速下降,最终材料断裂,即第 IV 阶段。

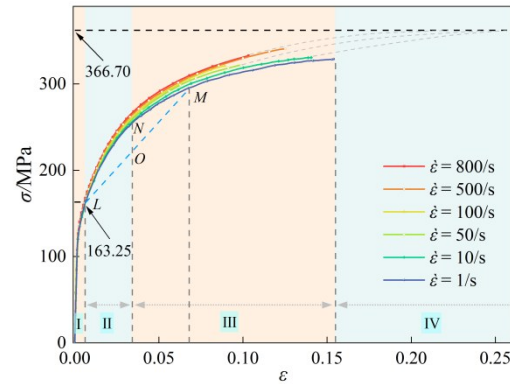


图 9 JDA1b 铝合金拉伸过程应力-应变曲线的四个阶段
Fig.9 Four stages of stress-strain curves of JDA1b alloy during tensile process

图 9 中,拉伸过程的第 I 阶段和第 II 阶段的转折折点为 L 点。第 II 阶段和第 III 阶段之间,存在一个明显的临界应变点 ε_0 (塑性应变),标记为 N 点,在 2 倍临界应变 $2\varepsilon_0$ 处,标记为 M 点。确定 N 点的方法是:割线 LM 与流动应力之间的应力差在 N 点达到最大值,可以通过最小均方差算法得到。在 N 点之后,流动应力的趋势发生变化,因此,本文将临界应变 ε_0 作为一个参数纳入本构关系中。由于实际的流动应力最终会趋于稳定,所以本文也将流动应力极限值 Q 纳入本构关系中,该值可以通过曲线的收敛性来确定。原有的 J-C 模型及其改进都是宏观唯象的,没有考虑材料微观结构的变化。而新提出的模型中的 ε_0 和 Q 值,是材料微观结构变化的宏观表现。因此,将这两个参数纳入本构关系中是合理的。 p 为待定系数,其初始值设定为 1。

图 10 给出了临界应变的敏感性研究结果,其中 $p=1$ 。在确定 Q 值后,由于 ε_0 代表第 II 阶段和第 III 阶段的分界点,所以随着临界应变的增大,此分界点会向更高的应变变量移动。观察发现,当临界应变落在 0.030~0.040 区间时,预测曲线与试验结果吻合度最高。经过计算,JDA1b 铝合金的临界应变为 0.034 25。对参数 p 的灵敏度的研究结果如图 11 所示,其中 $\varepsilon_0=0.034 25$ 。当 p 值偏离理想值时,模型的

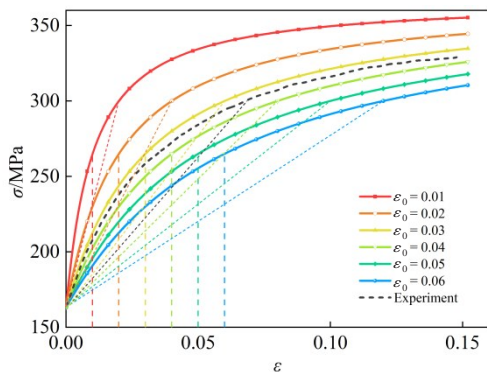


图 10 提出的模型在不同临界应变下的变化
Fig.10 Proposed model at different critical strains

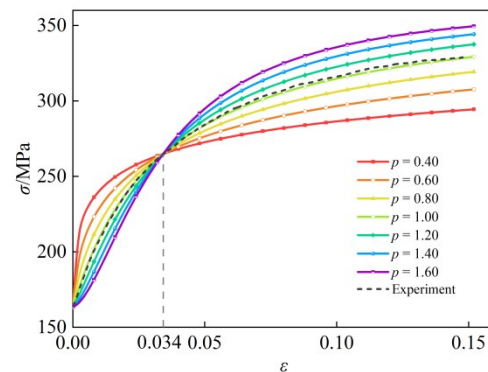


图 11 提出的模型在不同参数 p 下的变化
Fig.11 Proposed model at different values of p

预测值与试验值偏差较大。通过调整参数 p 的值,可使所提模型的理论值与试验值一致。对于 JDA1b 铝合金,最佳的 p 值为 1.035 29。

4 结果讨论

4.1 本构模型预测结果分析

采用平均绝对相对误差 (average absolute relative error, E_r) 来评估本构模型的准确度,见式(3)。 E_r 值越小,表示模型预测效果越好。

$$E_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \times 100\% \tag{3}$$

式中, N 为试验数据量, E_i 为试验值, P_i 为期望值。

表 4 列出了 J-C 模型和提出模型的 E_r 值。J-C 模型的 E_r 值在 2.11%~3.11% 之间,所提出模型的 E_r 值在 0.21%~0.37% 之间。J-C 模型的平均 E_r 值为 2.65%,而提出模型的平均 E_r 值为 0.29%,仅为 J-C 模型的 1/9。这表明,提出的模型显著提高了 JDA1b 铝合金流动应力的预测精度。

表 4 J-C 模型和提出模型的 E_r 值

Tab.4 E_r of the J-C model and proposed model

应变率/s ⁻¹	E_r (%)	
	J-C 模型	提出模型
1	2.66	0.21
10	2.34	0.31
50	2.95	0.25
100	3.11	0.35
500	2.11	0.37
800	2.75	0.28

4.2 预变形试验结果讨论

随着预应变量的增加, JDA1b 合金的屈服应力增加,硬化值也同步增加(如图 12 所示)。施加 6% 预应变时的屈服应力比初始状态的屈服应力提高了 122%,即预应变的方法可以显著提高材料的屈服应力。但是,随着预应变量的增加,材料的延伸率出现了降低,且预应变程度越大,延伸率降低越明显。因此,在通过提高预应变的方法来提高材料强度的同时,还需要考虑延伸率的变化。

随着预弯曲量的增加, JDA1b 合金的屈服载荷和硬化值均增加(如图 13 所示)。以图 7 中载荷下降到 100 N 时的位移作为破坏位移,可以发现破坏位移随着预弯曲量的增加而增大。即预弯曲方法可以提高材料弯曲时的屈服载荷、破坏位移。对照试验试样弯曲刚度 1171 N/mm,在施加 0.5 mm、1 mm、1.5 mm 后,试样的弯曲刚度分别提升至 1261 N/mm、1352 N/mm 和 1340 N/mm,即预弯曲也可以提高材料的弯曲刚度。

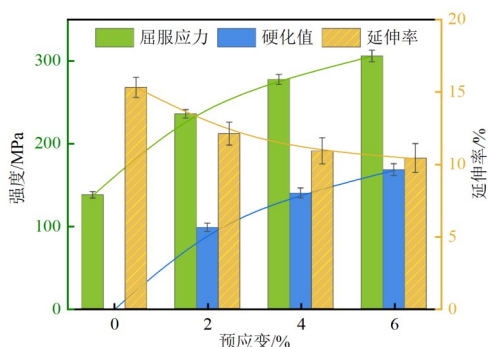


图 12 JDA1 铝合金在不同预应变下的力学性能变化
Fig.12 Mechanical performance of JDA1 alloy at different pre-strains

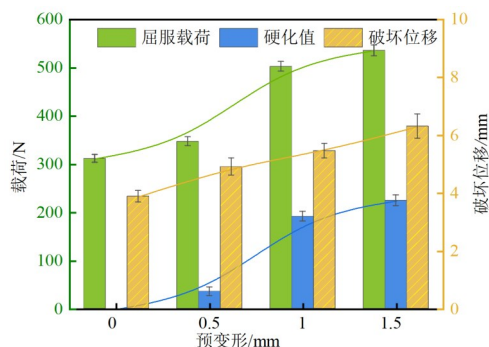


图 13 JDA1 铝合金在不同预弯曲下的力学性能变化
Fig.13 Mechanical performance of JDA1 alloy at different pre-bends

5 结 论

本文通过试验方法,探讨了预变形对 JDA1b 铝合金硬化特性的影响,并研究了该合金的动态力学性能。根据试验现象,本文提出了一个新的本构模型来预测合金的流动应力。主要研究结论如下:

(1) 在室温下, JDA1b 铝合金的流动行为对应变率有敏感性。随着应变的增加,其流动应力逐渐增大,并最终达到一个稳定值。同时,随着应变率的提升, JDA1b 铝合金的流动应力也相应增加。本文提出的新的本构模型融合了极限强度和临界应变的概念,该模型不仅物理意义明确,而且能够准确地捕捉 JDA1b 铝合金流动应力的变化趋势。与原有的 J-C 模型相比,新模型在预测精度上有显著提高,拟合优度高达 0.999。即便在应变较大的情况下,新模型的预测精度依然保持高水平。

(2) JDA1b 铝合金有明显的应变强化特性。随着预应变量的增加,该材料的屈服应力、抗拉强度和应变强化值均有所提高,而延伸率则呈现下降趋势。此外,随着预弯曲量的增长,材料的弯曲屈服载荷、弯曲硬化值、破坏位移和弯曲刚度亦随之增加。这表明,预变形处理有助于提升材料的抵抗变形能力和载荷承载能力。

本文提供了一种建立高精度的材料动态本构关系的研究方法,该方法有助于提高零件力学性能仿真的计算精度。同时,研究了预变形如何影响材料的强化行为,进一步丰富了船用铝合金力学性能的研究。

参 考 文 献:

- [1] 董安锐. 铝合金高速船碰撞搁浅损伤机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2023.
Dong Anrui. Research on collision and grounding damage mechanism of aluminum alloy high-speed ship[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [2] 胡海亮. 船舶与海洋工程中铝合金的运用研究[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(4): 45-48.
Hu Hailiang. Research on application of aluminum alloy in ship and marine engineering[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(4): 45-48. (in Chinese)
- [3] 车俊琦. 真空压铸改善铸件气孔缺陷及力学性能的规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
Che Junqi. Law of vacuum die casting to improve the porosity defects and mechanical properties of castings[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022. (in Chinese)
- [4] 李先洲. 铝合金一体化压铸技术[J]. 汽车工艺与材料, 2023(7): 17-21.
Li Xianzhou. Integrated die casting technologies of aluminum alloy[J]. Automobile Technology and Material, 2023(7): 17-21. (in Chinese)
- [5] 李文杰. 铝硅合金半固态流变压铸成形工艺及机理研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
Li Wenjie. Study on forming technology and mechanism of rheodiecasting of Al-Si alloy[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021. (in Chinese)
- [6] Zhang Peng, Li Zhenming, Liu Baoliang, et al. Effect of chemical compositions on tensile behaviors of high pressure die-casting alloys Al-10Si-yCu-xMn-zFe[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 661: 198-210.
- [7] 付彭怀, 彭立明, 丁文江. 汽车轻量化技术: 铝/镁合金及其成型技术发展动态[J]. 中国工程科学, 2018, 20(1): 84-90.
Fu Penghuai, Peng Liming, Ding Wenjiang. Automobile lightweight technology: Development trends of aluminum/magnesium alloys and their forming technologies[J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(1): 84-90. (in Chinese)
- [8] 柯 彬, 叶凌英, 王鹏宇, 等. 晶粒组织对 7020-T5 铝合金型材强度和抗腐蚀性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(7): 2618-2629.
Ke Bin, Ye Lingying, Wang Pengyu, et al. Effect of grain structures on strength and corrosion resistance of 7020-T5 aluminum alloy profiles[J]. Journal of Central South University, 2023, 54(7): 2618-2629. (in Chinese)
- [9] 贾伟杰. 800 MPa 级超强铝合金成分设计、制备技术及组织性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
Jia Weijie. Composition design, preparation, microstructure and properties of 800 MPa grade super strength aluminum alloy

- [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)
- [10] 柏鑫鑫. Al-Mn-Mg系可阳极氧化压铸铝合金的成分设计及压铸模拟[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
Bai Xinxin. Composition design and die-casting simulation of anodized Al-Mn-Mg die-casting aluminum alloy[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [11] Zhang Peng, Li Zhenming, Liu Baoliang, et al. Improved tensile properties of a new aluminum alloy for high pressure die casting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 651: 376-390.
- [12] 郑植, 耿波, 董俊宏, 等. 不同碰撞角度下水-船-墩流固耦合数值模拟研究[J]. *船舶力学*, 2023, 27(4): 558-572.
Zheng Zhi, Geng Bo, Dong Junhong, et al. Numerical simulation of water-ship-pier fluid-structure coupling in different impact angles[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2023, 27(4): 558-572. (in Chinese)
- [13] 胡志强, 崔维成. 船舶碰撞机理与耐撞性结构设计研究综述[J]. *船舶力学*, 2005, 9(2): 131-142.
Hu Zhiqiang, Cui Weicheng. Review of the researches on the ship collision mechanisms and the structural designs against collision[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2005, 9(2): 131-142. (in Chinese)
- [14] 王铭刚. 船用齿轮传动装置抗冲击特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
Wang Minggang. Research on the shock resistance of marine gear transmission system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021. (in Chinese)
- [15] 张敏, 张祥, 赵延杰, 等. 船体壳板撞击破裂后撕裂特征试验和数值模拟研究[J]. *船舶力学*, 2022, 26(8): 1171-1179.
Zhang Min, Zhang Xiang, Zhao Yanjie, et al. Experimental and numerical studies of tearing characteristics of ship plates after fracture subjected to impact loads[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2022, 26(8): 1171-1179. (in Chinese)
- [16] 余同希, 朱凌, 许骏. 结构冲击动力学进展(2010-2020)[J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(12): 4-64.
Yu Tongxi, Zhu Ling, Xu Jun. Progress in structural impact dynamics during 2010-2020[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(12): 4-64. (in Chinese)
- [17] Cui Yehui, Zeng Xiangguo, Tan Vincent, et al. Experimental and numerical studies of NiTi dynamic fracture behaviors under the impact loading[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 235: 107724.
- [18] Xiao Yue, Tang Qi, Hu Yumei, et al. Flow and fracture study for ZK60 alloy at dynamic strain rates and different loading states[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 724: 208-219.
- [19] Li Zhejian, Chen Wensu, Hao Hong. Mechanical properties of carbon foams under quasi-static and dynamic loading[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 161-162: 105039.
- [20] Wang Zhen, Ma Dayou, Suo Tao, et al. Investigation into different numerical methods in predicting the response of aluminosilicate glass under quasi-static and impact loading conditions[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 196: 106286.
- [21] 董福青, 于培师, 张超锋, 等. 1420铝锂合金改进的Johnson-Cook本构模型[J]. *金属功能材料*, 2021, 28(6): 28-36.
Dong Fuqing, Yu Peishi, Zhang Chaofeng, et al. Modified Johnson-Cook constitutive model and damage model for 1420 Al-Li alloy[J]. *Metallic Functional Materials*, 2021, 28(6): 28-36. (in Chinese)
- [22] 田宪华, 闫奎呈, 赵军, 等. GH2132高温高应变率下力学性能分析与Johnson-Cook本构模型的建立[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(7): 872-881.
Tian Xianhua, Yan Kuicheng, Zhao Jun, et al. Properties at elevated temperature and high strain rate and establishment of Johnson-Cook constitutive model for GH2132[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(7): 872-881. (in Chinese)