

特种成形

2219 铝合金高应变速率本构模型及其电磁成形应用评估

唐天宇, 黄 亮, 徐佳辉, 谢冰鑫, 孙怡然, 时 恬

(华中科技大学 材料科学与工程学院 材料成形与模具技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为探究 2219 铝合金电磁成形的高应变速率变形行为, 采用分离式霍普金森拉杆和热模拟实验机, 分别进行了高应变速率和高温准静态的铝合金拉伸实验, 分析了不同温度和应变速率对 2219 铝合金流动应力的影响, 并对传统 J-C 本构模型的应变速率项进行修正和优化。基于传统和优化的 J-C 本构模型分别建立了电磁成形有限元模型, 并与电磁成形实验结果进行对比。结果表明: 2219 铝合金的抗拉强度随应变速率的提高先增后降, 流动应力随温度的增加而逐渐降低。优化的 OP J-C 本构模型的拟合效果最佳, 线性相关系数 R 和平均相对误差 $AARE$ 分别为 0.9975 和 1.06%。相比于传统 J-C 本构模型, 优化的本构模型电磁成形模拟结果与实验值的吻合度更高, 证实了优化的本构模型能够准确描述 2219 铝合金的高速率变形行为。

关键词: 2219 铝合金; 本构模型; 高应变速率; 热变形行为; 电磁成形

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.05.016

中图分类号: TG391

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 05-0125-10

High strain rate constitutive model and electromagnetic forming application evaluation for 2219 aluminum alloy

Tang Tianyu, Huang Liang, Xu Jiahui, Xie Bingxin, Sun Yiran, Shi Tian

(State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to explore the high strain rate deformation behavior of 2219 aluminum alloy during electromagnetic forming, the high strain rate and high temperature quasi-static tensile experiments of aluminum alloy were conducted by separate Hopkinson tensile rods and thermal simulation testing machine, and the influences of different temperatures and strain rates on the flow stress of 2219 aluminum alloy were analyzed. Then, the strain rate term of traditional J-C constitutive models was corrected and optimized. Furthermore, based on the traditional and optimized J-C constitutive model, the finite element models of electromagnetic forming were established respectively, and the experimental results of electromagnetic forming were compared. The results show that the tensile strength of 2219 aluminum alloy increases first and then decreases with the increasing of strain rate, and the flow stress gradually decreases with the increasing of temperature. The optimized OP J-C constitutive model has the best fitting effect, and linear correlation coefficients R and $AARE$ are 0.9975 and 1.06%, respectively. Compared with the traditional J-C constitutive model, the electromagnetic forming simulation results of the optimized constitutive model are more consistent with the experimental values, which confirms that the optimized constitutive model can accurately describe the high-rate deformation behavior of 2219 aluminum alloy.

Key words: 2219 aluminum alloy; constitutive model; high strain rate; hot deformation behavior; electromagnetic forming

2219 铝合金属于 Al-Cu-Mg 系强化合金, 因其具有较高的比强度, 良好的焊接性能、导热性能和抗腐蚀性能, 已成为航空航天领域首选的轻量化材

料之一^[1-3]。然而, 传统冲压工艺下铝合金的室温成形性能较差, 使得加工后的试件表面易出现开裂、起皱等缺陷, 且成形后会严重回弹^[4-5]。因此, 如何提高铝合金室温成形性能成为工业制造领域的研究热点之一。

大量研究表明, 铝合金在电磁力驱动的高应变速率变形条件下的抗断裂性、延展性及成形性能均得到显著提升^[6-9]。电磁成形作为一种先进的高应变速率成形工艺, 因其模具结构简单、加工精度高被广泛用于复杂铝合金结构件的成形^[10-13]。而在实际电磁成形工艺的生产过程中, 铝合金材料除了在

收稿日期: 2023-06-06; 修订日期: 2023-09-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51975229); 湖北省重点研发计划项目 (2020BAB139); 武汉市应用基础前沿项目 (2020010601012178)

作者简介: 唐天宇 (1999-), 男, 硕士研究生

E-mail: tangtianyu@hust.edu.cn

通信作者: 黄 亮 (1981-), 男, 博士, 教授

E-mail: huangliang@hust.edu.cn

脉冲电磁力作用下产生高速率变形外,不可避免地会受到因高速变形^[14]和感应涡流^[15-17]造成的温升影响。因此,为了确保铝合金构件生产过程的可靠性,研究铝合金在不同变形温度和应变速率下的应力应变行为具有极其重要的意义。Ye T 等^[18]对同时时效处理后的 6063 铝合金进行动态压缩实验,结果表明,3 种热处理条件下 6063 铝合金均表现出正应变速率敏感性,且在峰时效条件下铝合金的应变速率敏感系数最大。Shamchi S P 等^[19]通过动态和准静态拉伸实验分析了不同应变速率下 2024 铝合金的力学性能,并利用热成像仪观测到当应变速率超过 500 s^{-1} 时,试样产生较大的绝热温升,材料表现出一定的负应变速率敏感性。郭元恒等^[20]通过研究 2124 铝合金热拉伸过程中的力学行为,建立了相应的粘塑性本构模型,并以双 C 件为对象,结合模拟与实验对本构模型进行了验证。王晨宇等^[21]针对高强 2A12 铝合金建立高温本构模型时,考虑了应变率与温度之间的耦合影响,并基于经典 Johnson-Cook 模型进行了修正,修正后模型对流动应力预测值与实验数据的误差显著降低。Wang H 等^[22]对 2219 铝合金在 $0.01\sim 25\text{ s}^{-1}$ 应变速率范围内进行不同温度的热压缩实验,并对原始 Arrhenius 模型进行优化,所得新的应变补偿本构模型更为简洁且具有更高的预测精度,但该模型考虑应变速率范围较小,不适用于描述 2219 铝合金的高速率变形行为。综合上述研究,目前针对 2219 铝合金高应变速率本构模型的研究较少,这大大限制了高速率成形工艺在 2219 铝合金中的工程化应用。

为此,本文依据电磁成形工艺特征,采用霍普金森拉杆和 Gleeble-3500 热模拟实验机分别进行 2219 铝

合金室温高应变速率和准静态-高温拉伸实验,分析不同条件下铝合金的力学行为,并基于实验数据对传统 Johnson-Cook 模型进行修正优化,建立了能准确描述 2219 铝合金高速率变形行为的优化本构模型,最后结合数值模拟、放电实验及理论计算对本构模型进行应用和验证,确保模型的工程推广价值和可靠性。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

本文中使用的 2219 铝合金材料为完全退火态,以保证较高的塑性,其主要合金元素为铜。2219 铝合金的化学成分如表 1 所示。

表 1 2219 铝合金的元素组成(%,质量分数)

Table 1 Chemical compositions of 2219 aluminum alloy
(%, mass fraction)

Cu	Mn	Ti	Zr	V	Al
6.20	0.30	0.06	0.15	0.08	余量

1.2 霍普金森拉杆实验

为探究应变速率效应对材料力学性能的影响,利用分离式霍普金森拉杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)对 2219 铝合金进行高应变速率拉伸,所用试样尺寸与实验装置如图 1 所示。试样中段长度为 8 mm,宽度为 4 mm,厚度 t 为 1 mm。本文所用试样的拉伸方向均与板料轧制方向(RD)平行,同时,为避免高速加载过程中螺纹紧固产生的应力波动,试样的夹持段通过胶接方式固定。本实验中分别设置低、中、高 3 个加载应变条件,应变速率分别为 300、650 和 1400 s^{-1} ,每组条件进行两次重复实验。

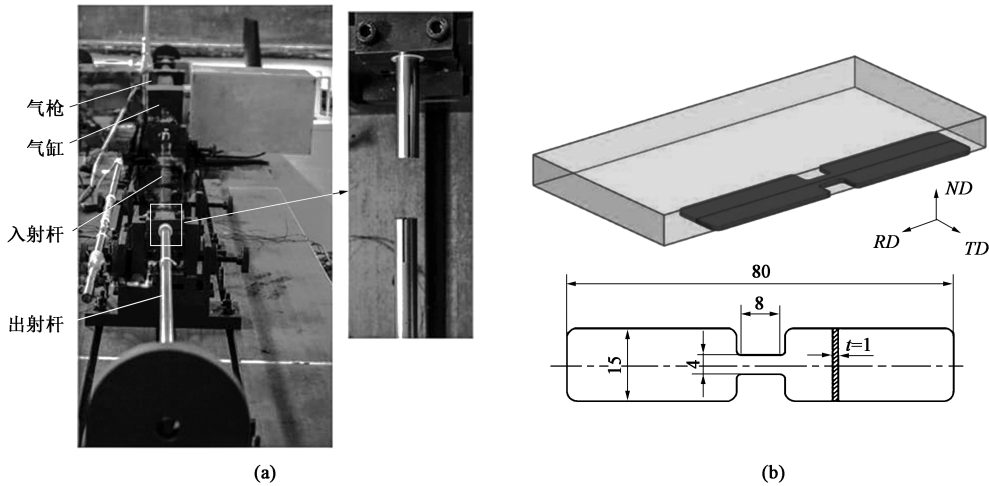
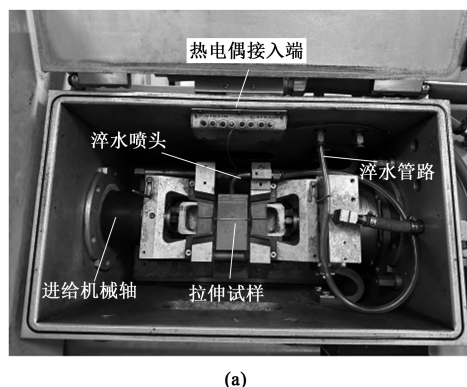


图 1 SHPB 加载装置 (a) 及高应变速率拉伸试样示意图 (b)

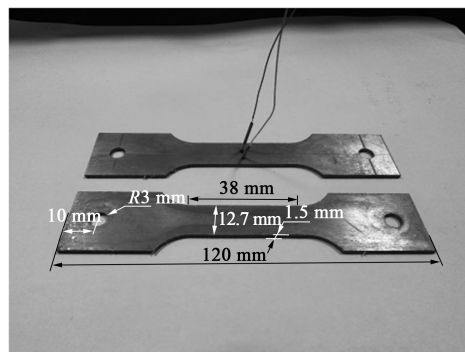
Fig. 1 SHPB loading device (a) and schematic diagram of high strain rate tensile sample (b)

1.3 准静态拉伸实验

电磁成形过程中, 涡流通过金属截面产热, 同时, 成形过程中高应变速率导致材料内绝热升温, 因此, 在电磁成形过程中材料温度发生较大的改变。为考虑温度变化对材料流动应力的影响, 本文利用 Gleeble-3500 热模拟实验机分别在室温和高温下对 2219 铝合金板料进行准静态拉伸, 拉伸速率均为 $1.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。Gleeble-3500 热模拟实验机的工作窗口及准静态拉伸试样如图 2 所示,



(a)



(b)

图2 Gleeble 装置工作窗口 (a) 及准静态拉伸试样示意图 (b)

Fig. 2 Work window of Gleeble device (a) and schematic diagram of quasi-static tensile sample (b)

1.4 实验结果

对高应变速率拉伸实验及不同温度的准静态拉伸实验中获得力-位移曲线进行处理, 得到对应的真实应力-真实应变曲线, 分别如图 3 和图 4 所示。图 3 中 2219 铝合金的动态拉伸结果显示, 其抗拉强度并非随着应变速率的增加而不断提升, 而是呈现先增后降的趋势。基于先前研究, 这是由于完全退火态的铝合金基体中缺少弥散细小的第二相, 导致在高应变速率条件下对材料强化作用不足以抵消应变速率提升所带来的软化效果^[24]。

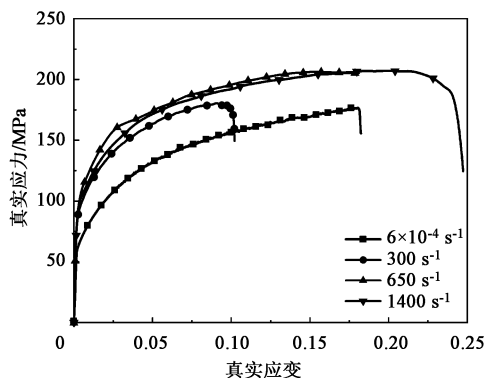


图3 室温下 2219 铝合金在不同应变速率时的真实应力-真实应变曲线

Fig. 3 True stress-true strain curves of 2219 aluminum alloy under different strain rates at room temperature

通过数字控制系统编写子程序中的时间-位移曲线来精准控制拉伸速度^[23]。为确保试样与模具稳定夹持, 试样中段长度设计为 38 mm, 厚度为 1.5 mm。此外, 高温拉伸中试样通过热电偶加热, 变形温度分别为 150、250、300、350、350 和 500 $^{\circ}\text{C}$, 为保证中段拉伸区域温度的均匀一致性, 首先以 $5 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 的温升速率将试样加热到预设变形温度, 保温 3 min, 然后以预设变形速率拉伸至试样断裂, 随后立即水淬。

从图 4 中可知, 在同一真实应变下, 2219 铝合金的真实应力随着温度的增加而降低, 且高温拉伸下的真实应力随着应变增加先增大, 而后增幅变缓, 特别当温度超过 250 $^{\circ}\text{C}$ 后, 真实应力在后续变形中趋于稳定, 这是由于随着温度的增加, 温度软化效应与加工硬化达到动态平衡。

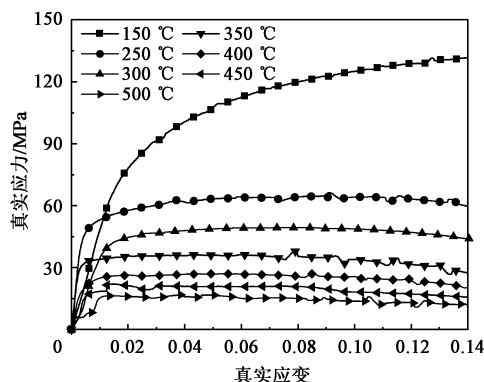


图4 2219 铝合金在高温下准静态拉伸时的真实应力-真实应变曲线

Fig. 4 True stress-true strain curves of 2219 aluminum alloy during quasi-static tensile at high temperature

2 本构模型建立与优化

2.1 传统 J-C 模型建立

Johnson G R 和 Cook W H^[25] 为准确表征材料高

应变速率变形过程中的本构行为,提出了一种考虑应变硬化、应变速率硬/软化以及温升软化效应的普适本构模型。该模型采用乘积形式将各项联立耦合,结构简洁,因此,被广泛嵌入到 Ls-dyna、Abaqus 等动力学仿真软件中。传统 Johnson-Cook (J-C) 本构模型的表达式为:

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

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \quad (3)$$

式中: σ 和 ε 分别为等效塑性应力与等效塑性应变; A 为在参考条件下 ($6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 20°C) 材料的屈服强度; B 为应变硬化系数; n 为应变硬化指数; C 为应变速率硬化系数; $\dot{\varepsilon}$ 为变形时的应变速率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变速率 (即准静态拉伸时的应变速率); $\dot{\varepsilon}^*$ 为相对应变速率; m 为温度软化指数; T 为变形温度; T_r 为参考变形温度 (20°C); T_m 为材料熔点, 本文取 638°C [1]; T^* 为相对温开比。

由式 (1) 可知, J-C 模型中所描述的材料力学性能变化是以材料塑性应力-应变关系为基础提出的, 因此, 需要进一步将单向拉伸中的真实应力-真实应变曲线转换为塑性应力-塑性应变曲线, 其中塑性应力以真实应力中的屈服点为起点, 塑性应变可通过式 (4) 进行转换 [26]。

$$\varepsilon_p = \varepsilon_T - \frac{\sigma_T}{E} \quad (4)$$

式中: ε_p 为塑性应变; ε_T 为真实应变; σ_T 为真实应力; E 为弹性模量。

传统 J-C 模型中各参数的获取, 需先将本构方程中各项解耦, 再对每项逐次进行拟合。应变硬化项中的参数可通过室温准静态 (参考条件) 拉伸曲线求解, 其中参考条件下 2219 铝合金的屈服强度为 66.84 MPa , 再将式 (1) 简化且两边取对数得到式 (5), 通过对式 (5) 线性拟合得到 B 值为 357.78 MPa , n 值为 0.5982 。拟合过程如图 5 所示。

$$\ln(\sigma - A) = \ln B + n \ln \varepsilon \quad (5)$$

求得应变硬化项中各系数后, 基于室温高应变速率拉伸实验数据, 应变速率硬化系数 C 可通过简化式 (6) 拟合得到。考虑到 C 值在不同实验条件下非恒定, 因此, 最终拟合值取多个塑性应变条件对应计算结果的平均值, 即 $C = 0.028$, 拟合过程如图 6 所示。

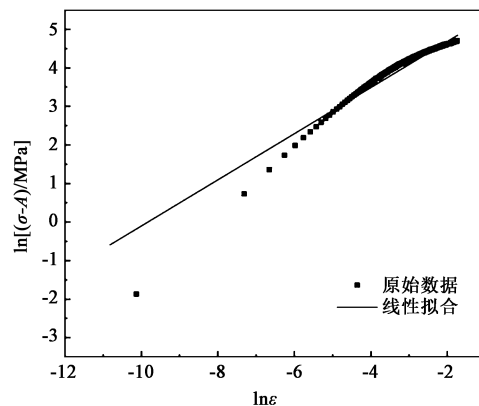


图 5 参考条件下 $\ln(\sigma - A) - \ln \varepsilon$ 拟合关系

Fig. 5 Fitting relationship of $\ln(\sigma - A)$ and $\ln \varepsilon$ under reference conditions

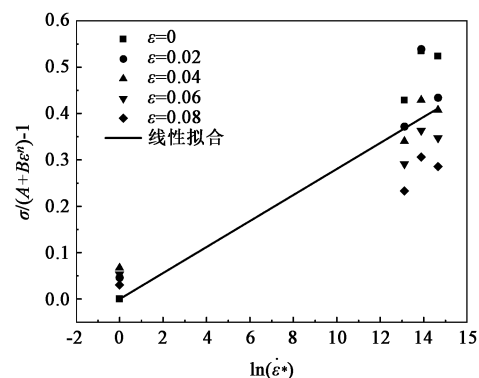


图 6 不同应变速率下 $\sigma/(A+B\varepsilon^n) - \ln \dot{\varepsilon}^*$ 拟合关系

Fig. 6 Fitting relationship of $\sigma/(A+B\varepsilon^n)$ and $\ln \dot{\varepsilon}^*$ at different strain rates

$$\frac{\sigma}{A + B\varepsilon^n} - 1 = C \ln \dot{\varepsilon}^* \quad (6)$$

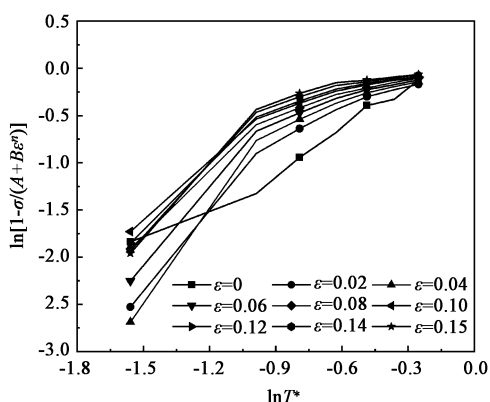
同样, 温升软化指数 m 可进一步基于简化式 (7) 求得, 利用高温准静态拉伸实验的数据, 选取不同塑性应变条件进行计算拟合, 求平均值, 得到 $m = 0.975$ 。拟合过程如图 7 所示。

$$\ln\left(1 - \frac{\sigma}{A + B\varepsilon^n}\right) = m \ln T^* \quad (7)$$

考虑到材料在高应变速率拉伸过程中, 由于瞬时加载, 材料整体的塑性变形能会部分转变为热能, 导致内部绝热温升, 且温升值与应变呈正相关。为了保证 2219 铝合金高速率本构模型的准确性, 可利用式 (8) 计算高应变速率下铝合金材料不同塑性变形量下对应的温升 [27]。

$$\Delta T_p = \frac{\beta}{\rho c_p} \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon \quad (8)$$

式中: ΔT_p 为塑性变形产生的绝热温升; ρ 为材料密度; β 为塑性变形能与内能转换比例, 通常取 $\beta =$

图7 不同温度下 $\ln[1-\sigma/(A+B\epsilon^n)]-\ln T^*$ 拟合关系Fig. 7 Fitting relationship of $\ln[1-\sigma/(A+B\epsilon^n)]$ and $\ln T^*$ at different temperatures

$0.9^{[27]}$; c_p 为材料的比热容, 对于 2219 铝合金, 根据文献 [1] 取 $c_p = 864 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。

将拟合好的材料参数带入传统 J-C 本构模型中, 并拟合不同应变速率下的等效应力-等效应变曲线, 流动应力的预测值与实验值的对比结果如图 8 所示。从结果可知, 传统 J-C 模型仅在小应变、低应变速率时拟合效果较好, 而在高应变速率下预测结果与实验值相差较大, 尤其是当应变速率达到 1400 s^{-1} 时, 未能描述出流动应力的衰减趋势。因此, 传统 J-C 模型不适用于描述 2219 铝合金高速率动态力学行为。

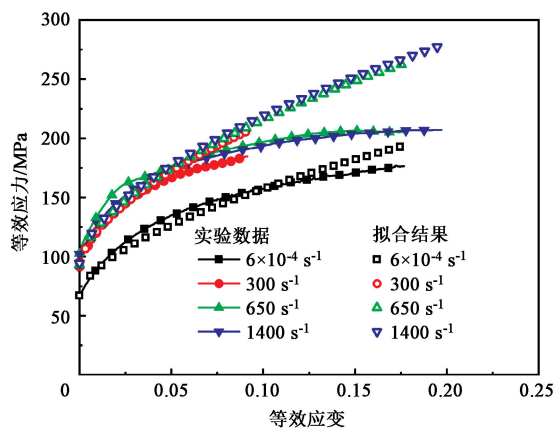


图8 不同应变速率下传统 J-C 模型的拟合结果与实验结果对比

Fig. 8 Comparison between fitting results of traditional J-C model and experimental results under different strain rates

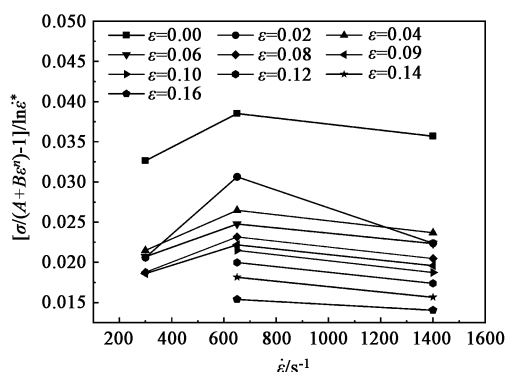
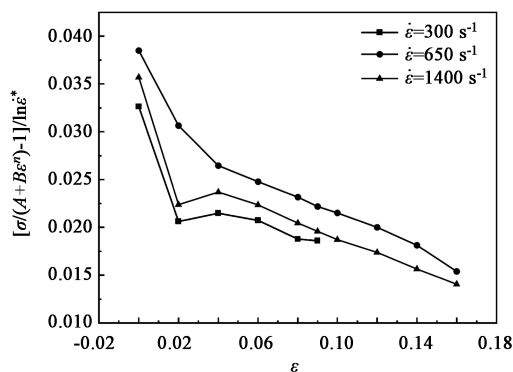
2.2 J-C 模型应变速率项修正

上述传统 J-C 本构模型的拟合结果并不理想, 这是由于实际变形中应变速率硬化系数 C 并非常数, 应该考虑与其他变量之间的耦合关系, 因此, 需进一步对应变速率项进行修正。图 9 和图 10 分别为应变速率和塑性应变与 C 值的关系曲线。从图 9 中可知, C 值随应变速率增加呈现先上升后下降的

趋势, 当应变速率超过 650 s^{-1} 后, C 值开始下降; 而从图 10 中可看出, C 值随应变增加呈现非线性下降关系, 这也解释了上述传统 J-C 模型精度不足的原因。因此, 需将应变速率强/硬化项形式进行转变, 同时考虑应变和应变速率的影响, 进一步建立修正的非线性速率系数 J-C 本构模型 (NR J-C 模型)。

$$SRHS = 1 + C_{NR} \epsilon^{s_{NR}} \ln \epsilon^* \quad (9)$$

式中: $SRHS$ 为修正后的应变速率强/软化项; C_{NR} 为修正后的应变速率硬化系数; s_{NR} 为修正后的应变敏感系数。

图9 C 值与应变速率的关系图Fig. 9 Relationship diagram of C value with strain rate图10 C 值与塑性应变的关系图Fig. 10 Relationship diagram of C value with plastic strain

为进一步提高 NR J-C 模型的拟合精度, 采用优化工具将 B 和 n 值重新进行最佳参数拟合, 其余参数重复前述方法迭代更新, 修正后的 NR J-C 本构模型的拟合曲线与实验曲线对比如图 11 所示, 本构方程中, 各参数拟合结果如表 2 所示。其中, A_{NR} 、 B_{NR} 、 n_{NR} 、 m_{NR} 分别为修正后的材料屈服强度、应变硬化系数、应变硬化指数和温度软化指数。

从修正后的对比结果可知, NR J-C 模型的拟合精度大幅提升, 当应变速率不超过 300 s^{-1} 时, 与实验结果基本一致, 但对于应变速率为 650 和 1400 s^{-1} 条件下材料流动应力的拟合, 虽然与实验

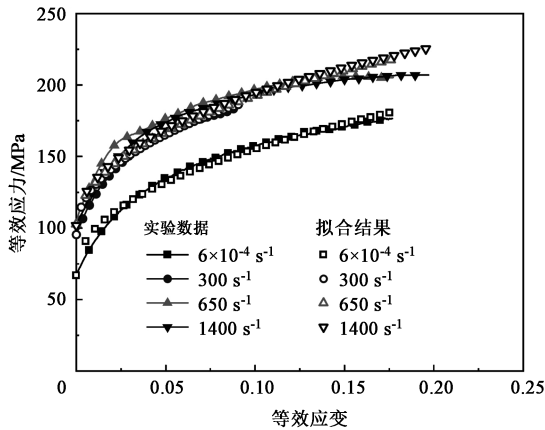


图 11 不同应变速率下修正的 NR J-C 模型拟合结果与实验结果对比
Fig. 11 Comparison between fitting results of modified NR J-C model and experimental results under different strain rates

表 2 NR J-C 本构模型中各参数拟合结果
Table 2 Fitting results of each parameter in NR J-C constitutive model

参数	A_{NR}/MPa	B_{NR}/MPa	n_{NR}	C_{NR}	s_{NR}	m_{NR}
数值	66.84	247.88	0.4474	0.01547	-0.0959	0.818

值的偏差降低,但仍未能预测出高应变速率时流动应力的反常下降现象。这是因为:在 NR J-C 模型中,虽然考虑了应变和应变速率的耦合作用,但 $SRHS$ 项系数始终与应变速率呈正相关。要想进一步提高模型预测精度,需要改变 $SRHS$ 的方程形式。为此,进一步提出嵌套式应变速率项优化 J-C 本构模型 (OP J-C 模型),该模型首先将应变速率嵌套进应变项系数进行关联,再通过构建应变速率硬化系数的多项式函数 $C(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ 实现耦合,其形式如式 (10) ~ 式 (12) 所示。

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (10)$$

$$C(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = C_i + C_j \varepsilon + C_k \varepsilon^2 \quad (11)$$

$$\begin{cases} C_i = C_0 + C_1 \dot{\varepsilon} + C_2 \dot{\varepsilon}^2 \\ C_j = C_3 + C_4 \dot{\varepsilon} + C_5 \dot{\varepsilon}^2 \\ C_k = C_6 + C_7 \dot{\varepsilon} + C_8 \dot{\varepsilon}^2 \end{cases} \quad (12)$$

式中: C_i 、 C_j 、 C_k 为应变速率内嵌函数; C_0 为材料常数; C_1 、 C_2 为与应变速率相关的材料系数; C_3 、 C_6 为与应变相关的材料系数; C_4 、 C_5 、 C_7 、 C_8 为与应变速率及应变耦合相关的优化系数。

优化后的 OP J-C 模型中多项式函数的各项系数拟合值如表 3 所示。

表 3 多项式中各项系数拟合结果

Table 3 Fitting results of each coefficient in polynomial

系数	拟合值	系数	拟合值	系数	拟合值
C_0	0.00147	C_3	0.41278	C_6	-3.36039
C_1	6.64012×10^{-5}	C_4	-0.00108	C_7	0.00716
C_2	-3.64362×10^{-8}	C_5	5.5394×10^{-7}	C_8	3.53715×10^{-6}

基于嵌套式应变速率项优化 J-C 模型的拟合结果和实验结果的对比如图 12 所示。由图 12 可见,优化后的 OP J-C 模型相比与传统及修正的 NR J-C 模型,能很好地反应出应变速率变化对 2219 铝合金材料流动应力的影响趋势,同时该模型的预测值与实验值也更为接近。

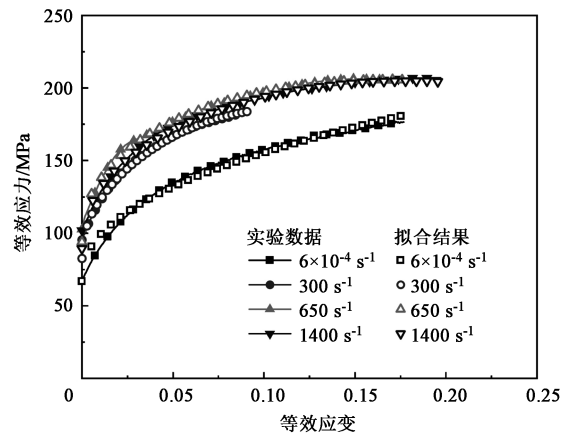


图 12 不同应变速率下优化的 OP J-C 模型拟合结果与实验结果对比
Fig. 12 Comparison between fitting results of optimized OP J-C model and experimental results under different strain rates

2.3 本构模型的对比与评价

根据 2219 铝合金的等效应力-等效应变曲线,分别构建了传统 J-C 本构模型、修正的 NR J-C 本构模型以及优化的 OP J-C 本构模型,并将各模型预测结果与实验值进行了对比。为了进一步精确量化各模型的预测能力,分别使用线性相关系数 R 和平均相对误差 $AARE$ 两个统计学的指标对各本构模型的精度进行评判。线性相关系数 R 和平均相对误差 $AARE$ 计算式分别如下:

$$R = \frac{\sum_{q=1}^N (E_q - \bar{E})(P_q - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{q=1}^N (E_q - \bar{E})^2 (P_q - \bar{P})^2}} \quad (13)$$

$$AARE = \frac{1}{N} \sum_{q=1}^N \left| \frac{E_q - P_q}{E_q} \right| \times 100\% \quad (14)$$

式中: E_q 为第 q 个实验值; P_q 为第 q 个预测值; \bar{E} 和 \bar{P} 分别为实验应力和预测应力的平均值; $q = 1$,

2, 3, ..., N ; N 为实验的数据值总数。

图 13a~图 13c 为不同本构模型对应的实验应力和预测应力的线性关系, 图 13d 为不同本构模型对应的相关系数及平均相对误差。通过对比可知, 传统 J-C 模型的拟合精度不佳, 其不同变形条件下的线性相关系数 R 与平均相对误差 $AARE$ 分别为

0.9615 和 8.3%。而优化的 OP J-C 本构模型在不同变形条件下的线性相关系数最高, $R=0.9975$; 同时其平均相对误差最小, $AARE=1.06\%$ 。这进一步说明, 优化后的 OP J-C 模型能够较好地描述 2219 铝合金高应变下的变形行为, 这也为后续 2219 铝合金材料的高速率成形工艺仿真研究奠定了基础。

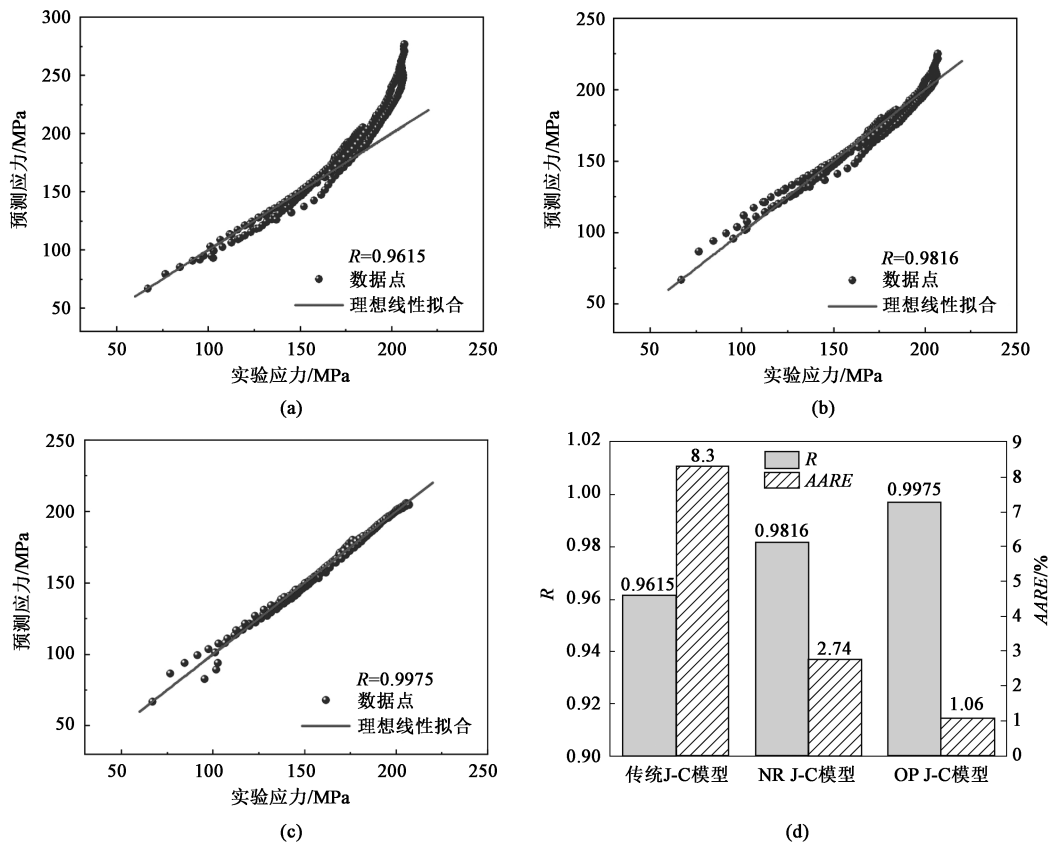


图 13 不同本构模型拟合效果评价对比

(a) 传统 J-C 模型 (b) NR J-C 模型 (c) OP J-C 模型 (d) 3 种模型评估对比

Fig. 13 Comparison of fitting effect evaluation for different constitutive models

(a) Traditional J-C models (b) NR J-C models (c) OP J-C models (d) Evaluation comparison of three models

3 本构模型应用评估

3.1 本构模型评估思路

以 2219 铝合金板电磁成形工艺为例, 基于 Ls-dyna 软件建立 2219 铝合金电磁-结构-温度多能场耦合的电磁成形仿真模型, 并分别将传统 J-C 本构方程和优化的 OP J-C 本构方程应用到模型中, 其中优化的 OP J-C 本构模型方程可通过自定义材料卡片嵌入到有限元模型中, 再输入材料基本参数及施加边界条件进行模拟。提取两种本构方程所对应的模拟结果中变形板料特征轮廓位移与电磁成形实验测量值进行对比。电磁成形验证模型及分析标注信息

如图 14 所示。

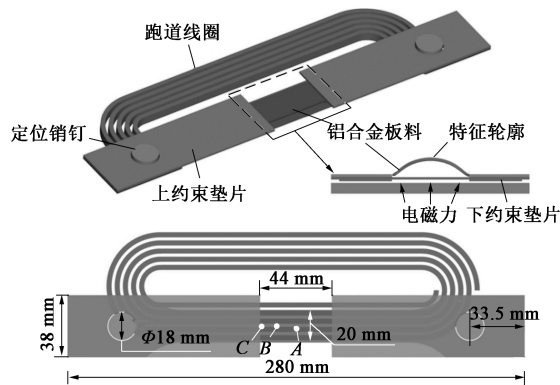


图 14 电磁成形验证模型

Fig. 14 Electromagnetic forming verification model

3.2 结果评估与讨论

采用图 15a 中的模具进行电磁成形实验, 2219 铝合金在瞬时电磁力的作用下发生高速率变形, 通过调整放电电压的大小, 可改变成形过程中铝合金板料的应变速率及应变量。从图 15b 中可知, 随着放电电压的增加, 板料特征轮廓位移量不断增大。

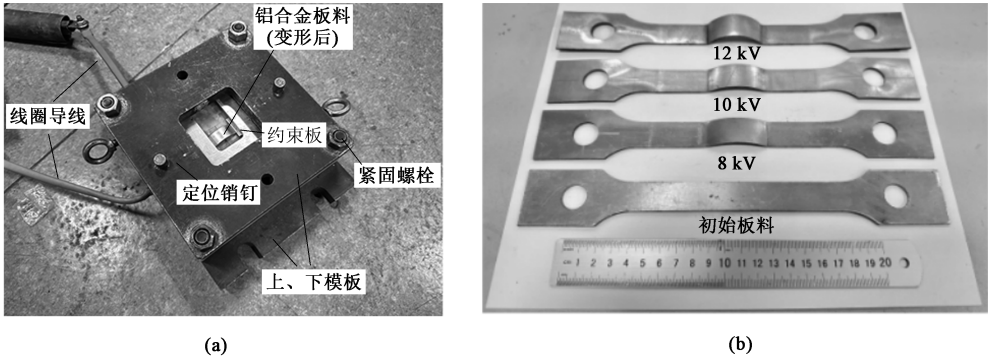


图 15 电磁成形验证实验
(a) 实验模具 (b) 成形试样

Fig. 15 Electromagnetic forming verification experiment
(a) Experimental molds (b) Forming samples

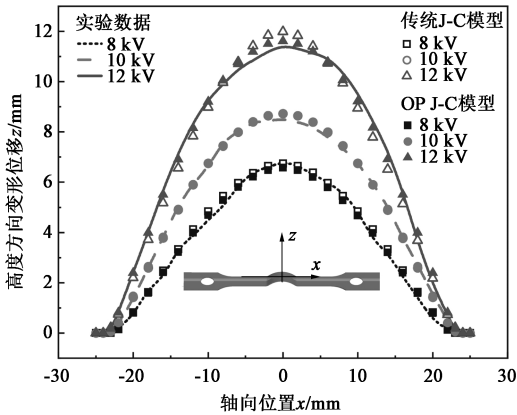


图 16 模拟与实验结果对比图
Fig. 16 Comparison diagram of simulation and experimental results

为了进一步量化两种本构模型的数值模拟精度, 表 4 分别计算了不同放电电压下两种本构模型电磁成形位移模拟值与实验值的平均相对误差。从表 4 中可知, 传统 J-C 本构模型对应的 3 组不同放电条件下的最大平均相对误差为 13.33%, 而优化后的本构模型的最大平均相对误差仅为 5.55%。证实优化的本构模型在电磁成形中具有更高的可靠性。

图 17 展示了不同放电电压下, 板料各典型位点 A、B、C 的 (同图 14) 应变和应变速率的变化信息。当放电电压 $U \leq 10$ kV 时, 板料峰值应变低于 0.06, 应变速率集中在 $400 \sim 500 \text{ s}^{-1}$; 而在放电电压 $U = 12$ kV 条件下, 峰值应变和应变速率分别达到

电磁成形模拟与实验对比结果如图 16 所示, 从图 16 可知, 优化后的 OP J-C 本构模型在 3 组放电电压下的模拟曲线与实验曲线基本吻合, 而传统 J-C 模型在低电压下板料位移的模拟结果与实验结果相近, 但当放电电压 $U = 12$ kV 时, 模拟值与测量值存在明显偏差。

表 4 不同放电电压下的平均相对误差 (%)

Table 4 AARE at different discharge voltages (%)

放电电压/kV	8	10	12	最大值
传统 J-C 模型	3.63	9.27	13.33	13.33
OP J-C 模型	2.08	5.55	4.02	5.55

0.1 和 1500 s^{-1} 以上, 根据前文对图 8 中对比结果的描述, 传统 J-C 模型仅在小应变、低应变速率下能实现较好的预测, 这也解释了高放电电压下, 传统 J-C 本构模拟结果与实验偏差较大的原因。综合上述分析, 本文建立的优化本构模型具有更广的适用范围, 且能够精准地描述 2219 铝合金的高速率变形行为。

4 结论

(1) 通过室温高应变速率和准静态-高温拉伸实验, 分析了不同应变速率和温度对 2219 铝合金力学性能的影响, 结果表明, 随着应变速率的提升, 铝合金的抗拉强度呈现先增后降的趋势; 同时 2219 铝合金对温度有一定的敏感性, 随着温度的增加, 其流动应力值逐渐下降。

(2) 基于拉伸实验所得数据, 分别建立了传统 J-C 本构模型、修正的 NR J-C 本构模型以及优化的 OP J-C 本构模型, 并分析了传统和修正的 J-C 本构模型存在的问题, 最后通过统计学方法对 3 种模型的预

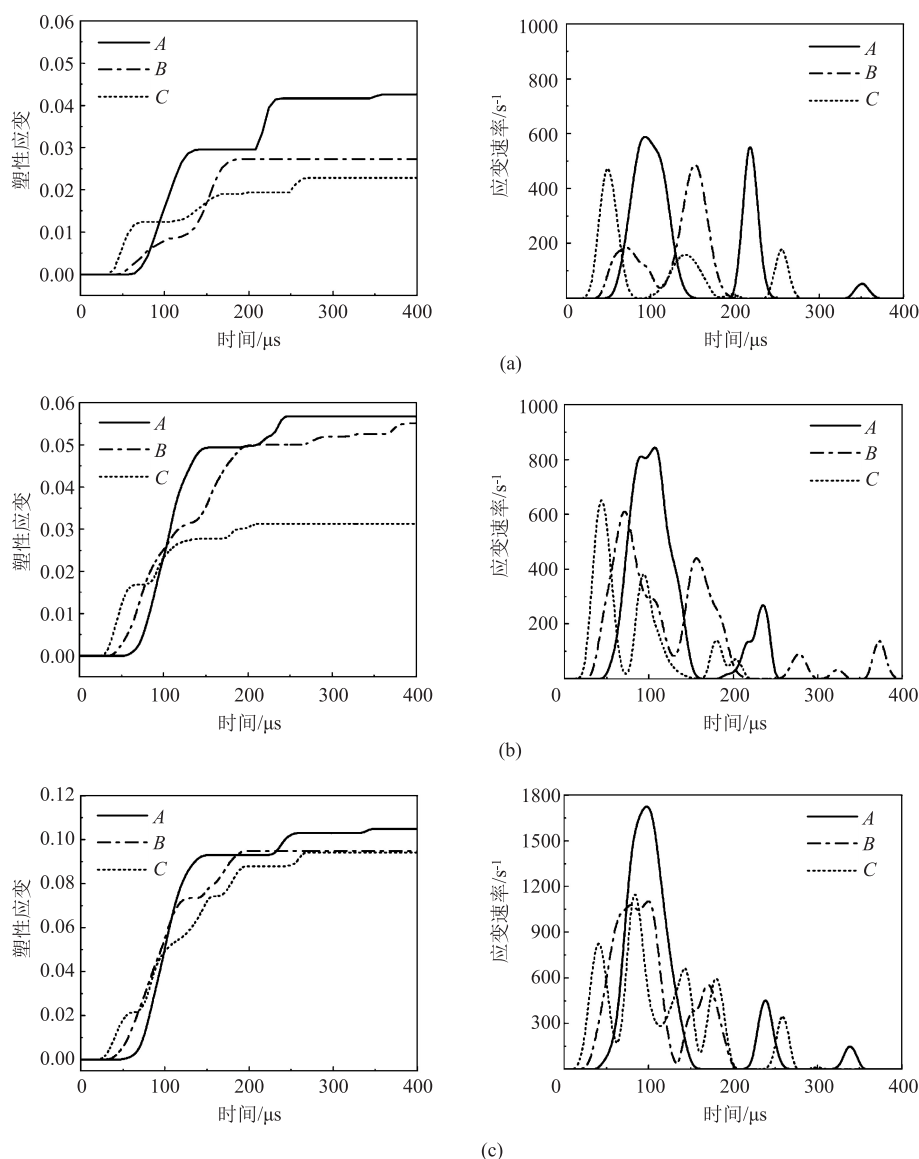


图 17 不同放电电压下典型位点的变形信息

(a) $U=8\text{ kV}$ (b) $U=10\text{ kV}$ (c) $U=12\text{ kV}$

Fig. 17 Deformation information of typical points under different discharge voltages

测精度进行量化评价, 修正后的 OP J-C 本构模型的相关系数和平均相对误差分别为 0.9975 和 1.06%。

(3) 将构建的本构模型嵌入电磁成形有限元模型中, 并将模拟结果获得的板料变形位移与电磁成形实验值对比。结果表明, 相比于应用传统 J-C 本构模型进行模拟, 采用优化后的本构模型使得模拟结果与实验值的最大平均相对误差从 13.33% 降低到 5.55%, 进一步证实了所优化的 OP J-C 本构模型的可靠性, 为后续具体结构件成形仿真提供参考。

参考文献:

- [1] 苏红亮. 2219 铝合金电磁成形宏微观机理及电磁翻边工艺基础研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
Su H L. Research on the Macro and Micro Mechanisms of 2219

Aluminum Alloy Under Electromagnetic Forming and the Basis of Electromagnetic Flanging Process [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.

- [2] 任东超, 邱娟, 杨涛, 等. 2219 铝合金热加工及组织演化 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (5): 211-216.
Ren D C, Qiu J, Yang T, et al. Thermal working and microstructure evolution for 2219 aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 47 (5): 211-216.
- [3] 管仁国, 娄花芬, 黄晖, 等. 铝合金材料发展现状、趋势及展望 [J]. 中国工程科学, 2020, 22 (5): 68-75.
Guan R G, Lou H F, Huang H, et al. Development of aluminum alloy materials: Current status, trend, and prospects [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22 (5): 68-75.
- [4] 谢冰鑫, 黄亮, 黄攀, 等. 铝合金板料电磁翻边全流程工艺研究 [J]. 中国机械工程, 2021, 32 (2): 220-226.

- Xie B X, Huang L, Huang P, et al. Research on whole process route of electromagnetic flanging of aluminum alloy sheets [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32 (2): 220-226.
- [5] Li C, Liu D, Yu H, et al. Research on formability of 5052 aluminum alloy sheet in a quasi-static-dynamic tensile process [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49 (2): 117-124.
- [6] 金淳, 黄亮, 李建军, 等. 不同热处理状态下成形速率对 2219 铝合金成形极限的影响 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (1): 125-132.
- Jin C, Huang L, Li J J, et al. Influence of forming rate on forming limit of 2219 aluminum alloy under different heat treatment conditions [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (1): 125-132.
- [7] Xu J H, Huang L, Xie B X, et al. High strain rate deformation behavior of 2195 Al-Li alloy: Constitutive behavior and grain fragmentation [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 936: 168265.
- [8] Xu J H, Huang L, Xie B X, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of as-annealed and solution treated Al-Cu-Li alloy 2195 under dynamic compression [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 303: 117516.
- [9] Xie B X, Huang L, Xu J H, et al. Microstructure evolution and strengthening mechanism of Al-Li alloy during thermo-electromagnetic forming process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 315: 117922.
- [10] 苏红亮, 黄亮, 李建军, 等. 推进剂贮箱零件侧翻孔电磁成形数值模拟 [J]. 锻压技术, 2016, 41 (12): 53-61.
- Su H L, Huang L, Li J J, et al. Numerical simulation on the side hole flanging electromagnetic forming for propellant tank parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2016, 41 (12): 53-61.
- [11] 王紫旻, 赵淘, 马伯洋, 等. 基于多场耦合仿真的时效态铝合金电磁翻孔成形 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (10): 191-197.
- Wang Z M, Zhao T, Ma B Y, et al. Electromagnetic flanging of aging aluminum alloy based on multi-field couplingsimulation [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (10): 191-197.
- [12] 崔丽, 杜建宁, 张超, 等. 2B06 铝合金电磁成形试验研究 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (1): 106-114.
- Cui L, Du J N, Zhang C, et al. Experimental study on electromagnetic forming for 2B06 aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (1): 106-114.
- [13] Su H L, Huang L, Li J J, et al. Two-step electromagnetic forming: A new forming approach to local features of large-size sheet metal parts [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 124: 99-116.
- [14] Li J J, Qiu W, Huang L, et al. Gradient electromagnetic forming (GEMF): A new forming approach for variable-diameter tubes by use of sectional coil [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 135: 65-77.
- [15] Nieto-Fuentes J C, Rittel D, Osovski S. On a dislocation-based constitutive model and dynamic thermomechanical considerations [J]. International Journal of Plasticity, 2018, 108: 55-69.
- [16] Xie B X, Huang L, Wang Z Y, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of 2219 aluminum alloy from different aging treatments to subsequent electromagnetic forming [J]. Materials Characterization, 2021, 181: 111470.
- [17] Su H L, Huang L, Li J J, et al. Formability of AA 2219-O sheet under quasi-static, electromagnetic dynamic, and mechanical dynamic tensile loadings [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 70: 125-135.
- [18] Ye T, Wu Y Z, Liu A M, et al. Mechanical property and microstructure evolution of aged 6063 aluminum alloy under high strain rate deformation [J]. Vacuum, 2019, 159: 37-44.
- [19] Shamchi S P, Queiros d M F J M, Tavares P J, et al. Thermomechanical characterization of Alclad AA2024-T3 aluminum alloy using split Hopkinson tension bar [J]. Mechanics of Materials, 2019, 139: 103198.
- [20] 郭元恒, 谢延敏, 王东涛, 等. 2124 铝合金热成形本构模型及工艺分析 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (2): 213-219.
- Guo Y H, Xie Y M, Wang D T, et al. Constitutive model and process analysis on thermoforming of 2124 aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (2): 213-219.
- [21] 王晨宇, 许进升, 李辉, 等. 高强 2A12 铝合金修正 Johnson-Cook 本构模型 [J]. 中国有色金属学报, 2023, 33 (1): 78-87.
- Wang C Y, Xu J S, Li H, et al. Modified Johnson-Cook constitutive model of high strength 2A12 aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33 (1): 78-87.
- [22] Wang H, Qin G, Li C G. A modified Arrhenius constitutive model of 2219-O aluminum alloy based on hot compression with simulation verification [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19: 3302-3320.
- [23] Zeng R, Huang L, Li J J, et al. Quantification of multiple softening processes occurring during multi-stage thermoforming of high-strength steel [J]. International Journal of Plasticity, 2019, 120: 64-87.
- [24] 张会萍, 黄亮, 王泽宇, 等. 不同热处理状态的 2219 铝合金动态加载下的力学行为和断裂机制 [J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51 (7): 2560-2569.
- Zhang H P, Huang L, Wang Z Y, et al. Mechanical behavior and fracture mechanism of 2219 aluminum alloy under dynamic loading under different heat treatment states [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51 (7): 2560-2569.
- [25] 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: 541-548.
- [26] 方进秀, 张兴权, 王会廷, 等. 5052 铝合金的动态拉伸性能及其本构模型 [J]. 机械工程学报, 2022, 58 (8): 160-169.
- Fang J X, Zhang X Q, Wang H T, et al. Dynamic tensile properties and constitutive model of 5052 aluminum alloy [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58 (8): 160-169.
- [27] André M M. Dynamic Behavior of Materials [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994.