

DOI: 10.11973/jxgccl202010018

# C72900 铜合金与 15-5PH 不锈钢的动态力学性能及本构关系

朱 功<sup>1</sup>,苑铁兵<sup>1</sup>,周 丽<sup>1</sup>,孙 凯<sup>2</sup>

(1. 烟台大学机电汽车工程学院,烟台 264005;2. 东方蓝天钛金科技有限公司,烟台 264000)

**摘要:**采用霍普金森压杆试验研究了 C72900 铜合金与 15-5PH 不锈钢在不同应变速率下的动态力学性能;基于 Johnson-Cook 本构方程对应变-应力曲线进行拟合以确定材料参数,应用 ABAQUS 软件对压缩试验进行模拟以验证本构方程的准确性。结果表明:试验测得随着应变速率的增大,C72900 铜合金和 15-5PH 不锈钢的流变应力显著增大,二者的流变应力行为相近;模拟得到 C72900 铜合金与 15-5PH 不锈钢在塑性变形阶段的真应力-真应变曲线与试验结果相吻合,相对误差小于 3%,表明所建立的 Johnson-Cook 本构方程较好地描述了 C72900 铜合金和 15-5PH 不锈钢的流变应力特征;C72900 铜合金替代 15-5PH 不锈钢应用于 C919 大飞机保险销垫片是可行并可靠的。

**关键词:** C72900 铜合金;15-5PH 不锈钢;动态力学性能;本构方程

**中图分类号:** TG113.25+3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3738(2020)10-0087-05

## Dynamic Mechanical Properties and Constitutive Relation of C72900 Copper Alloy and 15-5PH Stainless Steel

ZHU Gong<sup>1</sup>, YUAN Tiebing<sup>1</sup>, ZHOU Li<sup>1</sup>, SUN Kai<sup>2</sup>

(1. School of Electromechanical and Automotive Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China;

2. Oriental Bluesky Titanium Technology Co., Ltd., Yantai 264000, China)

**Abstract:** Dynamic mechanical properties of C72900 copper alloy and 15-5PH stainless steel at different strain rates were studied by Hopkinson pressure bar test. The strain-stress curve was fitted on the basis of Johnson-Cook constitutive equation to determine material parameters. The compression test was simulated by ABAQUS software to verify the accuracy of the constitutive equation. The results show that the flow stresses of C72900 copper alloy and 15-5PH stainless steel increased significantly with increasing strain rate by tests, and both the materials had the similar flow stress behavior. The simulated true stress-true strain curves of C72900 copper alloy and 15-5PH stainless steel in the plastic deformation stage were consistent with the test results, and the relative errors were less than 3%, indicating that the established Johnson-Cook constitutive equations could describe the flow stress characteristics of C72900 copper alloy and 15-5PH stainless steel well. The application of C72900 copper alloy instead of 15-5PH stainless steel on the gasket of C919 aircraft safety pin was feasible and reliable.

**Key words:** C72900 copper alloy; 15-5PH stainless steel; dynamic mechanical property; constitutive equation

收稿日期:2019-10-12;修订日期:2020-08-06

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2019MEE074);烟台市“双百计划”支持项目(烟发办[2018]44号)

作者简介:朱功(1996—),男,安徽灵璧人,硕士研究生

通信作者(导师):周丽教授

## 0 引言

铜合金<sup>[1]</sup>是以纯铜为基体,并向其中加入其他合金元素而形成的一种合金材料。制造业与技术的发展对材料的综合性能、安全性、经济性提出了更高的要求。铜合金具有高温抗压能力强,导

电性、延展性和耐腐蚀性能良好等优点,在大多数情况下可以代替传统的钢铁材料而应用在航空工业、海洋工程、造船、石油化工和国防军工等领域<sup>[2-5]</sup>。

目前,在国内外航空航天飞机的制造过程中采用了大量的先进铜合金材料<sup>[6-8]</sup>。为实现 C919 大飞机的国产化,需将其保险销与斜撑杆连接处的垫片材料由原来的 15-5PH 不锈钢改为 C72900 铜合金。15-5PH 不锈钢是在 17-4PH 钢的基础上为满足高强高韧性精密零件的要求而研制出的一种新型低碳马氏体沉淀硬化不锈钢,具有强度高、耐腐蚀性能较好等优点,适合于制造各种精密结构件<sup>[9-11]</sup>。C72900 铜合金是一种典型的沉淀析出强化型合金,具有热稳定性好、高温下抗形变能力强等特点<sup>[12-13]</sup>。在飞机飞行过程中,其结构部件处于高压状态<sup>[14]</sup>,因此考虑采用 C72900 铜合金代替 15-5PH 不锈钢生产 C919 大飞机保险销垫片。为研究 C72900 铜合金代替 15-5PH 不锈钢的可行性,需要对比研究二者的动态力学性能。

本构关系可以描述应变、应变速率、温度对流变应力的影响,适用于多种金属材料的变形研究。目前,在材料的动态本构模型中,应用较为广泛的为 Johnson-Cook(JC)模型<sup>[15]</sup>、Zerilli-Armstrong 模型及 Steinberg 模型(又称 SCG 模型)<sup>[16]</sup>。随着有限元方法的发展,不少研究者采用有限元数值模拟方法来验证材料本构方程的准确性<sup>[17]</sup>。刘丽娟等<sup>[18]</sup>对 Ti-6Al-4V 合金进行了霍普金森压杆(SHPB)试验,基于试验数据拟合出该合金的修正 JC 本构模型;肖寒等<sup>[19]</sup>对半固态铜合金进行单向压缩试验,得到 ZCuSn10 铜合金的本构关系模型;刘建波等<sup>[20]</sup>构建了 BFe10-1-1 铜合金的高温流变应力本构方程。基于此,作者通过霍普金森压杆试验研究

了 C72900 铜合金与 15-5PH 不锈钢在不同应变速率下的动态力学性能;基于 JC 本构方程对应变-应力曲线进行拟合,从而确定材料参数,应用 ABAQUS 有限元软件对压缩试验进行模拟以验证 JC 本构方程的准确性,并确定 C72900 铜合金替代 15-5PH 不锈钢的可行性。

## 1 试样制备与试验方法

试验材料为 C72900 铜合金与 15-5PH 不锈钢,化学成分分别见表 1 与表 2。在试验材料上均截取尺寸为  $\phi 4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$  的试样,采用如图 1 所示的霍普金森压杆装置对试样进行压缩试验,试验温度均为室温。在霍普金森压杆压缩试验中,由于试样材料的不同,在相同条件变形过程中横截面增加和材料应变硬化的作用下,应变速率不会保持为恒定值;但在低应变速率下,应变速率可保持恒定值,可视为静态压缩。将对 C72900 铜合金进行压缩试验时的应变速率设定为 0.007, 795, 1 320, 2 350  $\text{s}^{-1}$ ,对 15-5PH 不锈钢进行压缩试验时的应变速率设定为 0.007, 1 316, 2 000, 3 320  $\text{s}^{-1}$ 。

表 1 C72900 铜合金的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of C72900 copper

| alloy (mass) |         |      |       |       |           |      |      |    | % |
|--------------|---------|------|-------|-------|-----------|------|------|----|---|
| Zn           | Sn      | Fe   | Pb    | Mg    | Ni        | Nb   | Mn   | Cu |   |
| ≤0.5         | 7.5~8.5 | ≤0.5 | ≤0.02 | ≤0.15 | 14.5~15.5 | ≤0.1 | ≤0.3 | 余  |   |

表 2 15-5PH 不锈钢的化学成分(质量分数)

Table 2 Chemical composition of 15-5PH stainless

| steel (mass) |      |      |           |         |         |           |       |       | % |
|--------------|------|------|-----------|---------|---------|-----------|-------|-------|---|
| C            | Si   | Mn   | Cr        | Ni      | Cu      | Nb+Ta     | P     | S     |   |
| ≤0.07        | ≤1.0 | ≤1.0 | 14.0~15.5 | 3.5~5.5 | 2.5~4.5 | 0.15~0.45 | ≤0.04 | ≤0.03 |   |

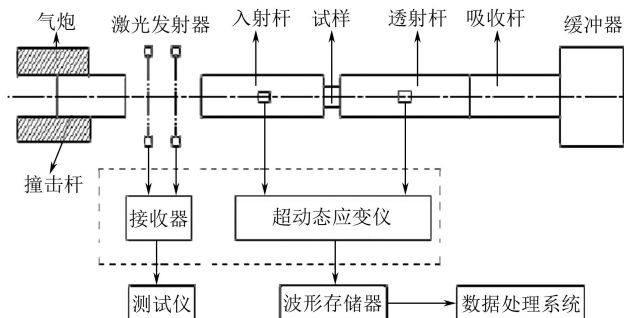


图 1 霍普金森压杆装置示意

Fig. 1 Diagram of Hopkinson pressure bar device

## 2 试验结果与讨论

由图 2 可以看出: C72900 铜合金和 15-5PH 不锈钢在低应变速率下的屈服强度都在 1 100 MPa 左右, 在高应变速率下的屈服强度都在 1 200 MPa 左右, 说明这 2 种材料的屈服强度相近; 在低应变速率

下, C72900 铜合金和 15-5PH 不锈钢的应变硬化过程都较缓慢, 而高应变速率下, 应变硬化过程都较迅速, 说明这 2 种材料在不同应变速率下的应变硬化特性接近。由此可知, 不同应变速率下, C72900 铜合金和 15-5PH 不锈钢的流变应力行为相近。

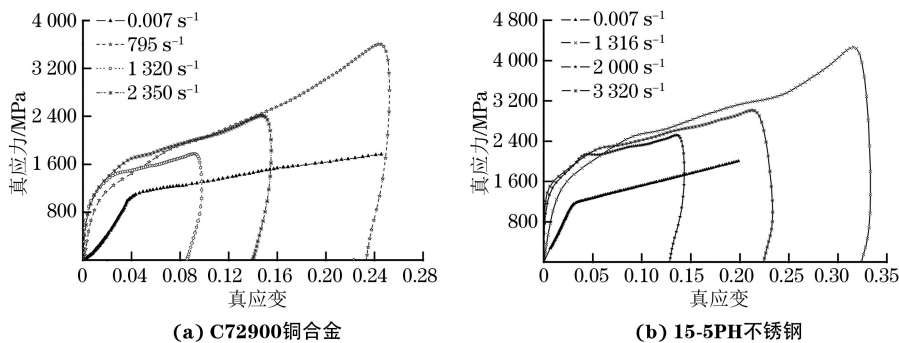


图 2 试验测得 C72900 铜合金与 15-5PH 不锈钢在不同应变速率下的真应力-真应变曲线

Fig. 2 True stress-true strain curves of C72900 copper alloy (a) and 15-5PH stainless steel (b) at different strain rates obtained by tests

## 3 JC 本构方程的确定

由于压缩试验均在常温下进行, 因此不需考虑温度对流变应力的影响。材料的 JC 本构方程<sup>[21]</sup>表示为

$$\sigma = (A + B\epsilon_p^n) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_r} \right) \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为流变应力;  $A$  为参考应变速率下材料的屈服强度;  $B$  为应变硬化系数;  $C$  为应变速率硬化系数;  $n$  为应变硬化指数;  $\epsilon_p$  为等效塑性应变;  $\dot{\epsilon}_p$  为等效塑性应变速率;  $\dot{\epsilon}_r$  为参考塑性应变速率。

在 JC 本构模型中, 材料参数  $A, B, n, C$  均为常数, 不随温度和应变速率而变化, 因此该本构模型适用于不同应变速率下的变形。在 C72900 铜合金和 15-5PH 不锈钢本构模型材料参数的求解过程中, 考虑到材料应用在飞机垫片上, 可视静态抗压条件, 因此以低应变速率  $0.007 \text{ s}^{-1}$  下的应力-应变曲线为例进行分析。

### 3.1 C72900 铜合金的本构方程

在应变速率一定时, 式(1)可表示为

$$\sigma = A + B\epsilon_p^n \quad (2)$$

对式(2)两端取对数, 得到:

$$\ln(\sigma - A) = \ln B + n\epsilon_p \quad (3)$$

式(3)中  $\sigma$  与  $\epsilon_p$  均为已知量,  $A$  取塑性应变为 0.002 时的真应力, 即将真应力-真应变曲线弹性阶段的直线段向右平移标距的 0.2%, 该直线与应力-应变曲线的交点对应的真应力。由此得出,

C72900 铜合金 JC 本构方程中材料参数  $A$  为 1 100 MPa。

对  $\ln(\sigma - A)$  和  $\ln \epsilon_p$  进行线性拟合, 拟合结果如图 3 所示, 可知拟合曲线的斜率  $n$  为 1.358 6, 截距  $\ln B$  为 8, 计算得到  $B$  为 2 980 MPa。

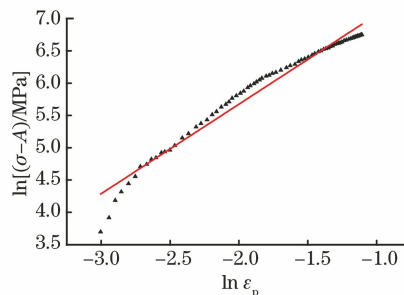


图 3 C72900 铜合金的  $\ln(\sigma - A) - \ln \epsilon_p$  线性拟合曲线

Fig. 3 Linear fitting curve of  $\ln(\sigma - A) - \ln \epsilon_p$  of C72900 copper alloy

将式(1)转化为

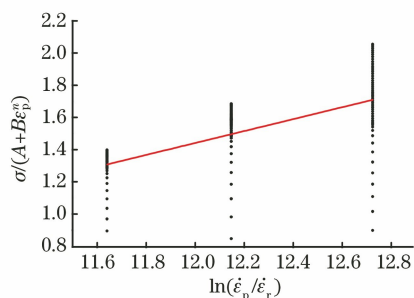
$$\frac{\sigma}{A + B\epsilon_p^n} = 1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_r} \quad (4)$$

式(4)中  $A, B, n$  为已知量, 由真应力-真应变曲线可求得  $\sigma/(A + B\epsilon_p^n)$  的值。在应变相同、应变速率不同条件下, 对  $\sigma/(A + B\epsilon_p^n)$  和  $\ln(\dot{\epsilon}_p/\dot{\epsilon}_r)$  进行线性拟合, 结果如图 4 所示, 可知拟合曲线的斜率  $C$  为 0.37。由此得到 C72900 铜合金的本构方程为

$$\sigma = (1\,100 + 2\,980\epsilon_p^{1.358\,6}) \left( 1 + 0.37 \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_r} \right) \quad (5)$$

### 3.2 15-5PH 不锈钢的本构方程

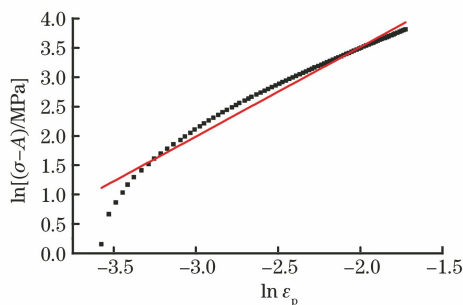
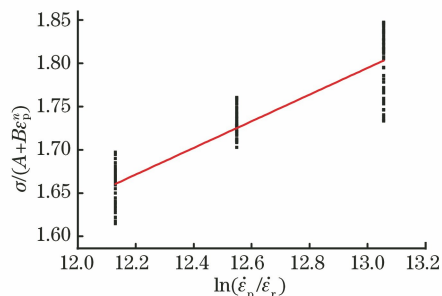
将 15-5PH 不锈钢的真应力-真应变曲线弹性

图4 C72900 铜合金的  $\sigma/(A+B\epsilon_p^n)-\ln(\epsilon_p/\epsilon_r)$  线性拟合曲线Fig. 4 Linear fitting curve of  $\sigma/(A+B\epsilon_p^n)-\ln(\epsilon_p/\epsilon_r)$  of C72900 copper alloy

阶段的直线段向右平移标距的 0.2%, 得到 JC 本构方程中材料参数  $A$  为 1 282 MPa。

对  $\ln(\sigma-A)$  和  $\ln \epsilon_p$  进行线性拟合, 拟合结果如图 5 所示, 可知拟合曲线的斜率  $n$  为 1.931 3, 截距  $\ln B$  为 6.56, 计算得到  $B$  为 706 MPa。

对  $\sigma/(A+B\epsilon_p^n)$  和  $\ln(\epsilon_p/\epsilon_r)$  进行线性拟合, 结果如图 6 所示, 可知拟合曲线的斜率  $C$  为 0.154 14。

图5 15-5PH 不锈钢的  $\ln(\sigma-A)-\ln \epsilon_p$  线性拟合曲线Fig. 5 Linear fitting curve of  $\ln(\sigma-A)-\ln \epsilon_p$  of 15-5PH stainless steel图6 15-5PH 不锈钢的  $\sigma/(A+B\epsilon_p^n)-\ln(\epsilon_p/\epsilon_r)$  线性拟合曲线Fig. 6 Linear fitting curve of  $\sigma/(A+B\epsilon_p^n)-\ln(\epsilon_p/\epsilon_r)$  of 15-5PH stainless steel

由此得到 15-5PH 不锈钢的本构方程为

$$\sigma = (1\,282 + 706\epsilon_p^{1.931\,3}) \left( 1 + 0.154\,14 \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_r} \right) \quad (6)$$

#### 4 有限元模拟

利用 ABAQUS 有限元分析软件对压缩试验进行模拟。模型的几何尺寸为  $\phi 4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ , 采用 Hex(六面体单元)对模型进行网格划分, 节点数为 9 387 个, 单元数为 8 420 个, 有限元模型如图 7 所示。C72900 铜合金的密度为  $8.8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 弹性模量为 110 GPa, 泊松比为 0.3; 15-5PH 不锈钢的密度为  $7.78\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 弹性模量为 190 GPa, 泊松比为 0.3。

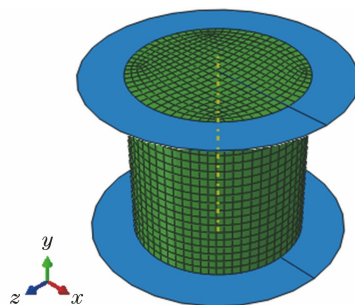


图7 压缩试样的有限元模型

Fig. 7 Finite element model of the compression sample

将 C72900 铜合金、15-5PH 不锈钢本构方程材料参数导入软件中, 对不同应变速率下的动态压缩力学试验进行模拟, 得到真应力-真应变曲线, 并与试验结果进行对比。由图 8 可以得出: 在不同应变速率下, 模拟得到 C72900 铜合金与 15-5PH 不锈钢在塑性变形阶段的流变应力曲线与试验得到的相吻合, 相对误差小于 0.03。由此可知, 所建立的 JC 本构方程可以较好地描述 C72900 铜合金和 15-5PH 不锈钢的流变应力特征。

#### 5 结 论

(1) 由霍普金森压杆压缩试验得到, C72900 铜合金与 15-5PH 不锈钢在应变速率为  $0.007\text{ s}^{-1}$  时的屈服强度分别为 1 100, 1 282 MPa, 随着应变速率的增大, 其屈服强度均略有增大, 并且应变硬化过程加快; C72900 铜合金与 15-5PH 不锈钢的流变应力都随着应变速率的增大而显著增加。

(2) 基于 JC 本构方程对应变-应力曲线进行拟合后确定材料参数, 模拟得到 C72900 铜合金与 15-5PH 不锈钢在塑性变形阶段的真应力-真应变曲线与试验结果相吻合, 相对误差小于 3%, 表明所建立的 JC 本构方程可以较好地描述 C72900 铜合金和 15-5PH 不锈钢的流变应力特征。C72900 铜合金代替 15-5PH 不锈钢应用于 C919 大飞机保险销垫片是可行且可靠的。

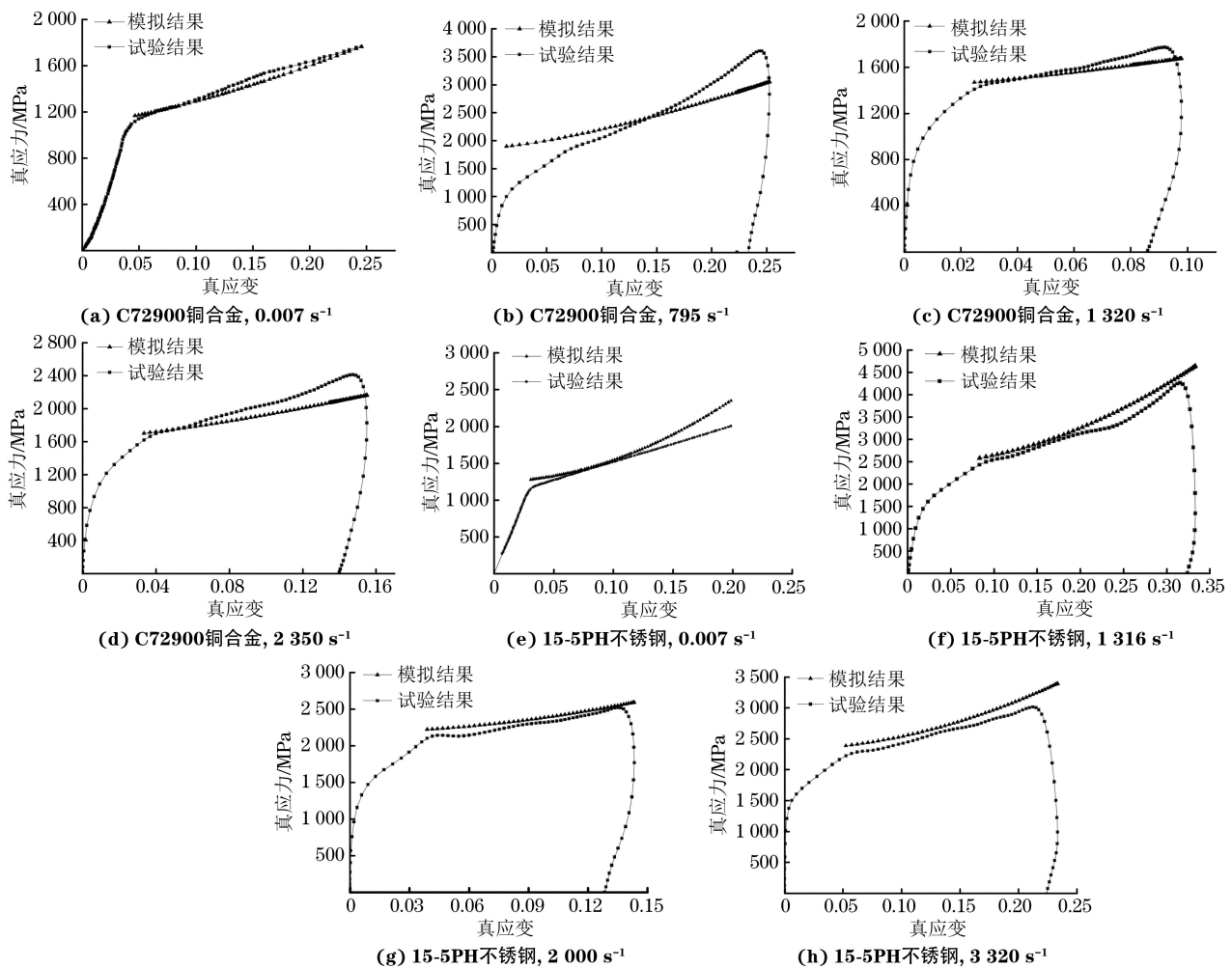


图8 模拟得到 C72900 铜合金与 15-5PH 不锈钢在不同应变速率下的真应力-真应变曲线与试验结果的对比

Fig. 8 Comparison between true stress-true strain curves of C72900 copper alloy (a-d) and 15-5PH stainless steel (e-h) at different strain rates and the test results

#### 参考文献:

- [1] 刘德宝,崔春翔. 高强度高导电铜基复合材料制备技术回顾与展望[J]. 天津理工学院学报, 2003, 19(4): 29-33.
- [2] SHYAM R, GHODKE, BIJAN K. Analytical development and experimental verification of empirical correlations to determine mechanical properties of copper alloys using small punch test data [J]. Fusion Engineering and Design, 2020, 111786.
- [3] 郑明新. 工程材料[M]. 北京:清华大学出版社, 1991: 198-208.
- [4] 戴志强,李运刚,齐艳飞,等. Cu-Ni 合金的研究现状[J]. 合成材料老化与应用, 2015, 44(2): 136-140.
- [5] 闵立辉,宋立,于化顺,等. 高强度高导电铜基复合材料[J]. 功能材料, 1997, 28(4): 342-345.
- [6] CHEN C Y, CHEN H L, HWANG W S. Influence of interfacial structure development on the fracture mechanism and bond strength of aluminum/copper bimetal plate [J]. Materials Transaction, 2006, 47(4): 1232-1239.
- [7] 王威,胡一东,王增辉,等. 航空航天用铜铝复合金属导体电缆

的可靠性评价[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2015, 5: 1-3.

- [8] 朱岳麟,周健,熊常健,等. 航空燃料中硫醇对铜合金的腐蚀行为[J]. 材料保护, 2002, 35(9): 10-12.
- [9] 谢静,张睿,罗恒军,等. 15-5PH 不锈钢的热变形行为及热加工图[J]. 金属热处理, 2018, 43(5): 45-49.
- [10] 李伟,杜楠,樊兆宝. 15-5PH 马氏体时效钢的工艺性能[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(1): 78-81.
- [11] AGHAIE-KHAFRI M, ADHAMI F. Hot deformation of 15-5PH stainless steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(4/5): 1052-1057.
- [12] 祁红璋,安建军,严彪,等. Cu-15Ni-8Sn 合金的开发与应用[J]. 金属功能材料, 2009, 16(4): 57-60.
- [13] PENG G W, GAN X P, JIANG Y X, etc. Effect of dynamic strain aging on the deformation behavior and microstructure of Cu-15Ni-8Sn alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 5: 182-187.
- [14] 顾永刚,潘应刚,陈琴,等. C72900 锡白铜合金的研究现状及浅析[C]//中国铜加工产业年度大会暨中国铜产业黄石高峰论坛论文集. 北京:中国有色金属加工工业协会, 2018.

(下转第 97 页)

大和变形温度的升高而减小,软化机制为动态回复与再结晶相结合。

(2) 合金在变形道次间的停留阶段,静态软化程度随变形温度的升高、应变速率的增大和道次间停留时间的延长而增大,同时静态软化速率随着道次间停留时间的延长而逐渐减缓,最大软化率可达 97.82%;该阶段的软化行为由静态回复与再结晶共同主导,主次关系取决于变形条件。

(3) 合金在第二道次热压缩变形阶段,动态回复与再结晶持续进行而形成的软化作用与加工硬化作用迅速达到动态平衡状态,使得流变软化率(不高于 5%)及流变应力峰值均低于第一道次变形时的,同时该变形阶段的动态平衡交替作用程度随应变速率的降低和变形温度的升高而加剧。

#### 参考文献:

- [1] DING L P, JIA Z H, NIE J F, et al. The structural and compositional evolution of precipitates in Al-Mg-Si-Cu alloy [J]. *Acta Materialia*, 2018, 145: 437-450.
- [2] LUO J, LI M Q, WU B. The correlation between flow behavior and microstructural evolution of 7050 aluminum alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 530: 559-564.
- [3] LIU W Y, ZHAO H, LI D, et al. Hot deformation behavior of AA7085 aluminum alloy during isothermal compression at elevated temperature [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 596: 176-182.
- [4] ZHANG H, LIN G, PENG D, et al. Dynamic and static softening behaviors of aluminum alloys during multistage hot deformation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 148(2): 245-249.
- [5] LIU Y G, LI M Q, LUO J. The modelling of dynamic recrystallization in the isothermal compression of 300M steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 574: 1-8.
- [6] WANG M H, LI Y F, WANG W H, et al. Quantitative analysis of work hardening and dynamic softening behavior of low carbon alloy steel based on the flow stress [J]. *Materials & Design*, 2013, 45: 384-392.
- [7] JIANG F L, ZHANG H, LI L X, et al. The kinetics of dynamic and static softening during multistage hot deformation of 7150 aluminum alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 552: 269-275.
- [8] LI L X, WANG G, LIU J, et al. Flow softening behavior and microstructure evolution of Al-5Zn-2Mg aluminum alloy during dynamic recovery [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(1): 42-48.
- [9] ZHANG H, LIN G, PENG D, et al. Dynamic and static softening behaviors of aluminum alloys during multistage hot deformation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 148(2): 245-249.
- [10] LIU W Y, ZHAO H, LI D, et al. Hot deformation behavior of AA7085 aluminum alloy during isothermal compression at elevated temperature [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 596: 176-182.
- [11] RAO K, PRASAD Y, HAWBOLT E. Study of fractional softening in multi-stage hot deformation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, 77(1/2/3): 166-174.
- [12] LAASRAOUI A, JONAS J J. Prediction of steel flow stresses at high temperatures and strain rates [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1991, 22(7): 1545-1558.
- [13] LIU Y G, LI M Q, LUO J. The modelling of dynamic recrystallization in the isothermal compression of 300M steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 574: 1-8.
- [14] PEDERSEN K O, WESTERMANN I, FURU T, et al. Influence of microstructure on work-hardening and ductile fracture of aluminium alloys [J]. *Materials & Design*, 2015, 70: 31-44.
- [15] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C]//7th International Symposium on Ballistics. Hague, Netherlands: [s. n.], 1983: 541-547.
- [16] 贾翠玲, 陈芙蓉. 7A52 铝合金 Johnson-Cook 本构模型的有限元模拟 [J]. *兵器材料与工程*, 2018, 41(7): 30-32.
- [17] 董菲, GERMAIN G, LEBRUN J L, 等. 有限元分析法确定 Johnson-Cook 本构方程材料参数 [J]. *上海交通大学学报*, 2011, 45(11): 1657-1660.
- [18] 刘丽娟, 吕明, 武文革. Ti-6Al-4V 合金的修正本构模型及其有限元仿真 [J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(7): 73-79.
- [19] 肖寒, 陈泽邦, 胡海莲, 等. 半固态铜合金单向压缩变形本构模型研究 [J]. *材料导报*, 2016, 30(10): 139-143.
- [20] 刘建波, 宁爱林, 刘顺同. BFe10-1-1 铜合金的热压缩本构方程 [J]. *邵阳学院学报*, 2016, 13(2): 95-101.
- [21] 马继山, 孟宪国, 于海平, 等. QCr0.8 铜合金动态力学性能研究 [J]. *火箭推进*, 2016, 42(6): 57-61.

(上接第 91 页)