

细晶 T2 纯铜动态力学性能及本构模型

吴尚霖¹, 鞠康¹, 段春争¹, 孔金星²

¹大连理工大学机械工程学院;²中国工程物理研究院机械制造工艺研究所

摘要: 晶粒大小是影响多晶金属材料力学性能的重要因素之一, 研究细晶 T2 纯铜在高温、高应变率下的动态力学性能并建立其本构模型对切削加工有着重要意义。通过电子力能测试仪进行 T2 纯铜试样准静态压缩试验, 并利用霍普金森压杆装置完成了不同应变率和不同温度的动态压缩试验。试验结果表明, 纯铜材料具有明显的应变强化效应和温度软化效应, 其动态压缩下的强度高于准静态压缩, 但在高应变率区域内, 并无明显的应变率强化效应。基于 Johnson-Cook 本构模型得到了细晶 T2 纯铜本构方程参数, 拟合曲线与试验结果吻合较好。

关键词: T2 纯铜; 高应变率; 应力-应变曲线; Johnson-Cook 本构模型

中图分类号: TG61; TH161.3

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2019.11.004

Dynamic Mechanical Properties and Constitutive Model of Fine-grained T2 Copper

Wu Shanglin, Ju Kang, Duan Chunzheng, Kong Jinxing

Abstract: Grain size is one of the important factors affecting the mechanical properties of polycrystalline metal materials. Studying the dynamic mechanical properties of fine-grained T2 copper at high temperature and high strain rate and establishing its constitutive model have important significance for cutting process. In this paper, the quasi-static compression tests of the T2 copper sample are carried out by electronic force tester, and dynamic compression tests at different strain rates and different temperatures are performed by Hopkinson pressure bar device. The results show that the pure copper material has obvious strain strengthening effect and temperature softening effect. Its strength under dynamic compression is higher than that under quasi-static compression. However, there is no obvious strain rate strengthening effect in the high strain rate region. The parameters of the constitutive equation of the fine-grained T2 pure copper are obtained based on the Johnson-Cook constitutive model. The fitting curves agree well with the experimental results.

Keywords: T2 copper; high strain rate; stress-strain curve; Johnson-Cook constitutive model

1 引言

纯铜具有高电导率、高热导率和耐腐蚀性等优点, 广泛应用于现代电子信息业和国防工业等领域, 如金刚石薄膜的制备、药型罩研制。相关研究表明: 随材料晶粒减小, 其晶界增多, 位错运动受阻, 材料的强度和硬度增大, 当工业纯铜的晶粒尺寸从 0.1mm 细化至 20~50 μm 时, 其退火状态屈服强度将从 50MPa 增大至 350MPa^[1]。细晶 T2 纯铜常用于制造大尺寸、低刚度的超光滑表面零件, 由于纯铜材料刚性较弱, 难以控制加工精度, 常采用精密切削加工方式。纯铜材料在切削过程中经历高温、高应变、高应变率耦合作用下的塑性变形, 其动态力学性能与准静态不同, 因此, 研究细晶 T2 纯铜在动态压缩载荷作用下的力学性能有着重要意义。

目前, 国内外学者对纯铜力学性能的研究主要集中在材料微观结构^[2]、变形温度和应变率^[3,4]。

研究表明, 纯铜晶体结构会对力学性能产生影响, 且材料的温度敏感性高于其应变率依赖性。丁淳形等^[5]提出用改进的路径线法进行拉格朗日实验分析, 拟合了紫铜材料的动态本构方程参数, 该方法拟合结果准确但不适合工程应用。现有关于纯铜本构模型的研究多集中在低应变率^[6]、大应变^[7]、常温^[8]等条件, 但针对细晶粒纯铜在高温、高应变率耦合条件下本构模型的研究较少。

本文针对晶粒度为 20 μm 的 T2 纯铜材料, 采用霍普金森压杆装置进行不同应变率 ($2 \times 10^3 \sim 4 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$) 和不同温度 (25 $^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$) 下的动态力学性能测试, 通过电子力能测试仪进行准静态压缩试验, 得到细晶 T2 纯铜材料的 Johnson-Cook 本构方程参数, 并对细晶 T2 纯铜材料的应变率效应、温度效应和应变强化效应进行了分析。

2 试验方法

(1) 试验材料及试样

试验所用原材料为中铝洛阳铜业有限公司提供的粗晶粒 T2 纯铜, 晶粒度为 300 μm 。原材料经轧

制后,将其加热至 400℃,保温 8h,随炉冷却后得到晶粒度为 20 μm 的细晶粒 T2 纯铜材料。压缩试样的尺寸共 3 组: $\phi 6 \times 6\text{mm}$ 、 $\phi 3 \times 3\text{mm}$ 和 $\phi 1.5 \times 1.5\text{mm}$,分别用于压缩过程中应变率由低到高的不同试验中。为减小试样端面与压杆之间摩擦对试验精度的影响,其两端面表面粗糙度为 $R_a 1.2\mu\text{m}$,且两端面的平行度和端面与轴线的垂直度均控制在 0.01mm 以内。

(2) 准静态压缩试验

为分析材料的应变效应,采用准静态压缩试验可获得应变率为 $10^{-4} \sim 10^{-2}\text{s}^{-1}$ 时细晶 T2 纯铜材料的应力—应变曲线^[9]。准静态压缩试验采用大连理工大学材料学院的 DNS—电子力能测试仪(见图 1)。试样尺寸为 $\phi 6 \times 6\text{mm}$,应变率为 $2.22 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$,下压量为 4mm。

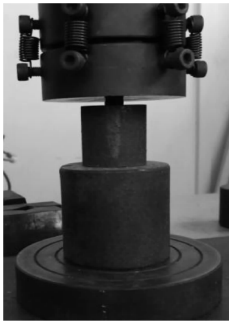


图 1 电子力能测试仪

(3) 霍普金森压杆试验

霍普金森压杆(SHPB)试验是获得动载荷作用下材料力学性能最为有效的实验手段。采用西北工业大学的分离式霍普金森压杆装置进行动态压缩实验,分析细晶 T2 纯铜的力学性能,得到了材料在不同温度与应变率下的真实应力—应变曲线。

在试验过程中,采用电炉对工件加热进行高温试验,并用热电偶监测加热温度。选取的试验温度分别为常温(25℃),50℃,100℃,150℃和 200℃,选取的试验应变率分别为 2000s^{-1} , 6000s^{-1} , 8000s^{-1} , 10000s^{-1} , 20000s^{-1} , 30000s^{-1} 和 40000s^{-1} 。

霍普金森压杆实验原理如图 2 所示。撞击杆在外界作用力下以一定速度撞击入射杆,在入射杆中产生压缩应力波,当应力脉冲波到达入射杆与试样的接触面时,一部分反射回入射杆形成反射波,另一部分则通过试样进入透射杆中,形成透射波。分别记录粘贴在入射杆和透射杆上的应变片随时间变化的脉冲信号,通过一维应力波理论可以得到试样的应力、应变和应变率随时间的变化关系,进一步计算得到材料真实应力—应变关系^[10]。

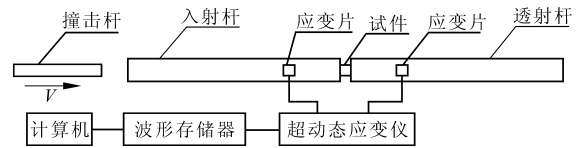


图 2 霍普金森压杆实验原理

3 试验结果及分析

3.1 准静态力学性能

细晶 T2 纯铜在室温和准静态压缩条件下的真实应力—应变曲线如图 3 所示。可以看出,材料在准静态压缩过程中,流动应力随应变增加迅速升高,当应力达到一定值后,材料进入稳定塑性流动状态,应变强化率($\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$)基本不变,随着应变的增大,材料流动应力呈直线增加,呈现显著的应变强化效应。

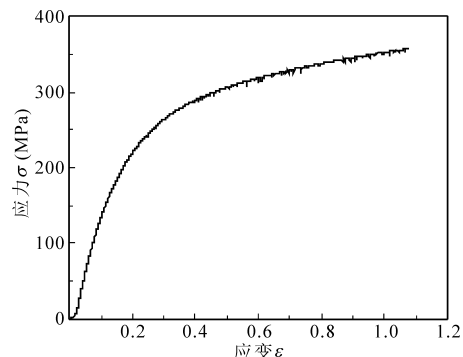


图 3 材料准静态压缩应力—应变曲线

3.2 材料的应变率效应

图 4 为细晶 T2 纯铜在常温下不同应变率时的真实应力—应变曲线。由图可知,纯铜在动态压缩条件下的曲线明显高于准静态压缩,当材料应变率由准静态($2.22 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$)增大为 40000s^{-1} 、压缩应变 $\varepsilon = 0.3$ 时,材料流动应力由 264MPa 增大至 393MPa,增加约 50%,表明材料存在应变率强化效应。比较动态压缩条件下(2000s^{-1} , 8000s^{-1} , 20000s^{-1} 和 40000s^{-1})的 4 条曲线,曲线形状无较大区别,即在相同应变下的流动应力基本相同,材料在高应变率区域内表现出对应变率的不敏感。

理论上,随着应变率的增加,材料变形过程中单位时间内的应变率将增加,位错密度和位错间的相互作用也会增加,从而造成材料的应变率强化效应,使细晶 T2 纯铜在动态压缩下的曲线明显高于准静态压缩。

在试验中,高应变率的动态压缩是一个绝热过程,材料塑性变形功转化为热能使温度升高,温升计算公式为^[11,12]

$$\Delta t = \frac{\beta}{\rho C_v} \int_0^{\varepsilon_f} \sigma d\varepsilon \quad (1)$$

式中, ρ 为材料密度; C_v 为材料比热容; ε_f 为最终应变量; β 为塑性功—热能转化系数(可近似为 1)。

由图 4 可见, 随着应变率的升高, 材料能达到的最大应变增加, 塑性变形功增加, 温升也随之增加。由于温度升高使材料出现软化效应, 直接导致高应变率区域内的细晶 T2 纯铜不存在明显的应变率强化效应。

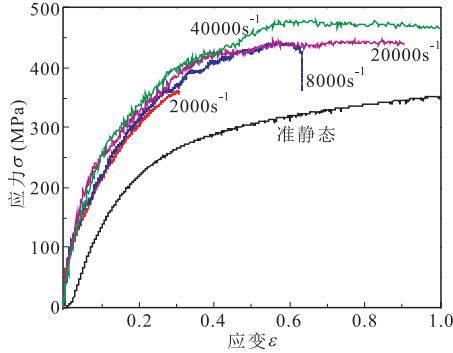
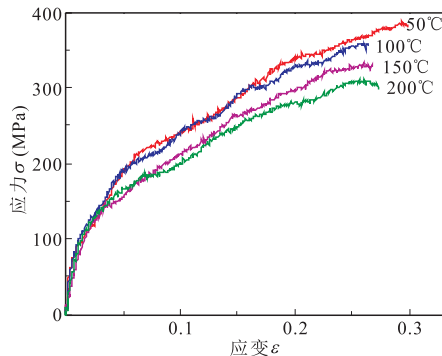


图 4 材料在常温与不同应变率下的应力—应变曲线

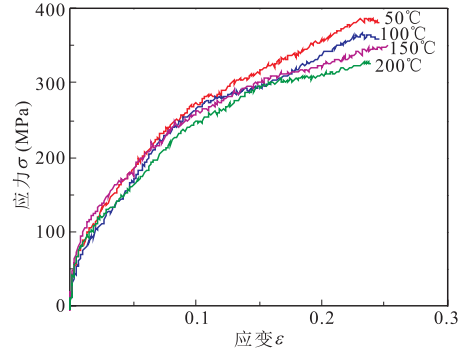
3.3 材料的温度效应

细晶 T2 纯铜在同一应变率(分别取 $6000s^{-1}$, $10000s^{-1}$ 和 $30000s^{-1}$)、不同温度(50℃, 100℃, 150℃和 200℃)下的真实应力—应变曲线见图 5。由试验结果可知, 细晶 T2 纯铜具有较强的温度软化效应, 即随着温度升高, 材料的屈服应力与塑性流动应力均有所降低, 应变率较大时温度软化效应更加明显。这是由于随着温度和应变率的升高, 对位错运动有促进作用的热能增加, 更易于位错滑移的进行, 导致材料软化。

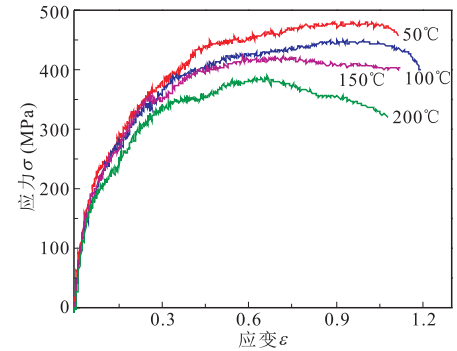
材料在塑性变形过程中存在温度软化效应和应变强化效应共同作用的机制, 并最终决定材料力学性能。当应变率较低时, 应变硬化作用占优, 此时材料应变硬化率为正, 即流动应力随应变增加而增大; 当应变率变高, 温度软化作用占优, 此时材料应变硬化率出现负值(见图 5c 的 150℃和 200℃的曲线)。



(a) 应变率 $6000s^{-1}$



(b) 应变率 $10000s^{-1}$



(c) 应变率 $30000s^{-1}$

图 5 材料在不同温度下的应力—应变曲线

4 建立本构方程

Johnson-Cook 模型^[13]是一种常见的动态本构模型, 适用于描述金属材料由低应变率到高应变率过程中的动态行为。该模型考虑了应变率强化、温度软化和应变强化等因素, 形式简单, 具有清晰的物理解释, 同时参数较少, 容易测试标定^[14,15], 其基本表达式为

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (2)$$

式中, A, B, C, n, m 为材料常数; ε 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率, 取 $\dot{\varepsilon}_0 = 2.22 \times 10^{-3} s^{-1}$; T 为试验温度; T_r 为室温(取 25℃); T_m 为材料熔点(1083℃)。

采用上述模型, 通过试验结果拟合模型中各参数, 得到细晶粒 T2 纯铜的 Johnson-Cook 本构模型。通过准静态压缩试验得到的结果拟合材料的应变硬化常数为 $A = 50MPa$, $B = 312.4MPa$ 和 $n = 0.3572$ 。

为得到材料应变率敏感系数 C , 取试验中常温下材料以不同应变率压缩时的屈服应力 σ_i , 则 Johnson-Cook 本构方程可简化为

$$\sigma_i = A \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \quad (3)$$

令 $Y = \frac{\sigma_i}{A} - 1$, $X = \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)$, 式(3)可转换成 $Y =$

CX,使用最小二乘法拟合得到应变率硬化常数 $C = 0.0438$ 。

通过温度分别为 25°C 、 50°C 、 100°C 、 150°C 和 200°C ,应变率为 6000s^{-1} 的动态压缩试验结果(每组参数进行3次试验,共15组试验结果)来拟合材料温度项常数 m 。不同温度条件下,Johnson-Cook本构方程可简化为

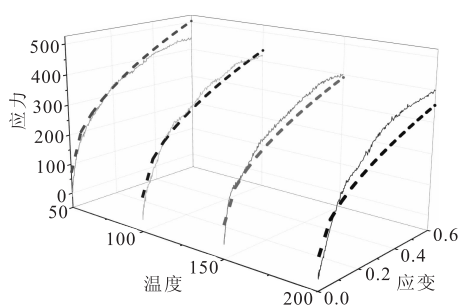
$$\sigma(T^*) = \sigma(T_r) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (4)$$

式中, $\sigma(T^*)$ 为不同温度下材料的屈服应力, $\sigma(T_r)$ 为室温下材料的屈服应力,令 $Y = \ln\left(1 - \frac{\sigma(T^*)}{\sigma(T_r)}\right)$, $X = \ln\left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)$,则式(4)转换为 $Y = mX$,使用最小二乘法拟合得到 $m = 0.6261$ 。

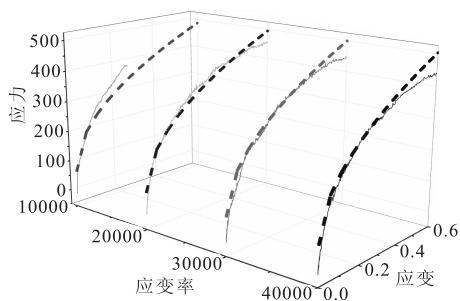
建立细晶 T2 纯铜 Johnson-Cook 本构方程为

$$\sigma = (50 + 312.4\epsilon^{0.3572}) \left[1 + 0.0438 \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^{0.6261} \right] \quad (5)$$

将拟合结果与试验结果进行比较得到图6。应变率为 40000s^{-1} 时,不同温度下的拟合结果与试验结果对比见图6a;温度为 50°C 时,不同应变率下的拟合结果与试验结果对比见图6b,图中粗虚线为拟合结果,细实线为试验结果。由图可知,Johnson-Cook模型得到的本构曲线与试验结果吻合较好,说明该Johnson-Cook本构模型可有效预测细晶粒T2纯铜在高温高应变率下的塑性流动应力。



(a) 应变率 40000s^{-1}



(b) 温度 50°C

图6 Johnson-Cook模型预测结果与试验结果的对比

5 结语

通过对晶粒尺寸为 $20\mu\text{m}$ 的 T2 纯铜进行准静态和动态压缩试验,得到以下主要结论:

(1) 常温准静态压缩时,细晶 T2 纯铜的塑性流动应力随应变的增加而增大,具有显著的应变强化效应。

(2) 试验结果表明,细晶 T2 纯铜存在温度软化效应,在高应变率区域内不存在明显的应变率强化效应。

(3) 通过试验数据拟合,获得了基于 Johnson-Cook 本构模型的细晶 T2 纯铜本构方程参数,试验数据与本构模型拟合得到的数据吻合较好,表明该模型可以较好地预测 T2 纯铜材料在高温与动态载荷作用下的塑性流动应力。

参考文献

- [1] 胡师鹤. 纯铜的微观组织与力学性能的晶粒尺寸效应研究[D]. 南京:南京理工大学,2016.
- [2] 李磊,史志铭,赵晗. 退火温度对 T2 纯铜微结构演变及力学性能的影响[J]. 材料热处理学报,2017,38(12): 12-18.
- [3] 赵瑞龙,刘勇,田保红,等. 纯铜的高温变形行为[J]. 金属热处理,2011,36(8):17-20.
- [4] 江德斐,林国标,舒大禹,等. T2 铜的动态力学性能及本构关系[J]. 中国有色金属学报,2016,26(7):1437-1443.
- [5] 丁淳彤,张宝平,姜春兰,等. 用拉格朗日实验分析技术研究紫铜材料的动态本构关系[J]. 兵工学报,1995(1): 54-59.
- [6] 郭伟国. 高导无氧铜在大变形、不同温度和不同应变率下的流动应力和本构模型[J]. 爆炸与冲击,2005(3): 244-250.
- [7] 贾存威,侯延军,陈大年,等. Hopkinson 拉杆试验的优化与高导无氧铜拉伸本构关系的确定[J]. 固体力学学报,2011,32(1):57-63.
- [8] 刘清风,程鑫,王宁昌,等. 动态冲击载荷下无氧铜的力学性能研究[J]. 机械强度,2015,37(4):607-612.
- [9] 田杰,胡时胜. 准静态压缩应力-应变曲线测量方法的探索[J]. 实验力学,2005,20(2):265-269.
- [10] Ai Mousaei M M, Reid S R, Denas W F. The use of the split Hopkinson pressure bar techniques in high rate materials testing [J]. Mechanical Engineering Science, 1997, 211(4):273-292.
- [11] 孔金星,陈辉,何宁,等. 纯铁材料动态力学性能测试及本构模型[J]. 航空学报,2014,35(7):2063-2071.

转向架非常规焊缝的自动打磨刀具设计与试验研究

李亚南, 田仁勇, 吴向阳, 张志毅, 徐锋

中车青岛四方机车车辆股份有限公司

摘要: 轨道车辆转向架的焊缝表面形状影响着焊缝的质量性能与承载能力。本文针对转向架结构特点和现有自动打磨设备对燕尾、环形等非常规焊缝打磨的局限性,自主研发了圆盘形打磨头和球头棒形打磨头两种金刚石打磨工具。选用 HSK-A63 高速高精度快速更换接口以及山高(steadyline)重金属加长减振、橡胶阻尼、液压平衡块阻尼三种减振方式,设计组装了五种硬质合金铣刀类打磨工具。通过对打磨工具的选型以及对比打磨试验的预期结果,确定了不同打磨阶段使用的打磨工具系列。选用设计的打磨工具进行了横梁曲面、燕尾、切面以及对接焊缝的打磨试验,最终确定了横梁组成自动打磨的最优工艺方案。

关键词: 自动打磨;非常规焊缝;磨具设计

中图分类号: TG74+9;TH162

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2019.11.005

Design and Experimental Study of Automatic Grinding Tool for Unconventional Weld of Bogie

Li Yanan, Tian Renyong, Wu Xiangyang, Zhang Zhiyi, Xu Feng

Abstract: The weld surface shape of railway vehicle bogie affects the quality and bearing capacity of the weld. In view of the structural characteristics of bogie frame and the limitation of existing automatic grinding equipment for abnormal weld grinding, such as swallow tail and ring, two kinds of diamond grinding tools of disc grinding head and ball-end rod grinding head are independently developed. Five kinds of grinding tools for cemented carbide milling cutters are designed and assembled by using HSK-A63 high-speed, high-precision and fast replacement interface with three vibration reduction modes of steady line heavy metal lengthening and reducing, rubber damping and hydraulic balance block damping. By selecting grinding tools and comparing the expected results of grinding experiments, the series of grinding tools used in different grinding stages are determined. The designed grinding tool is selected to carry out the grinding experiments on the cross-beam surface, swallow tail, cut surface and weld seam. Finally, the optimum technological scheme of automatic grinding for cross beam composition is determined.

Keywords: automatic grinding; unconventional weld; tool design

1 引言

轨道车辆转向架在工作过程中承受着安装部件

的工作载荷、制动、牵引和惯性力,对行车安全起着至关重要的作用。转向架构架大部分结构都由钢板焊接而成,而焊缝表面的几何形状会影响焊缝周围的应力及焊缝的疲劳强度,因此,转向架之间的焊缝质量直接影响转向架的性能。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0304600)

收稿日期: 2019年4月

- [12] 包卫平, 赵昱臻, 李春明, 等. 纯铁高温高应变率下的动态本构关系试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(4): 74-79.
- [13] G R Johnson, W H Cook. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]. Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, 19-21 April 1983: 541-547.
- [14] 贾宝华, 刘思勇, 李革, 等. 基于 J-C 模型的 TC18 钛合金动态本构方程构建[J]. 钛工业进展, 2018, 35(5): 24-28.
- [15] 郭子涛, 高斌, 郭钊, 等. 基于 J-C 模型的 Q235 钢的动态

本构关系[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(4): 804-810.

第一作者: 吴尚霖, 硕士研究生, 大连理工大学机械工程学院, 116024 辽宁省大连市

First Author: Wu Shanglin, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

通信作者: 段春争, 教授, 大连理工大学机械工程学院, 116024 辽宁省大连市

Corresponding Author: Duan Chunzheng, Professor, School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China