

QCr0.8 铜合金动态力学性能研究

马继山¹, 孟宪国¹, 于海平², 刘大卫¹, 王手龙¹

(1. 西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100;

2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 通过准静态单向拉伸试验和霍普金森拉杆试验, 对 QCr0.8 铜合金的动态力学性能进行了研究, 得到了材料高速率下变形行为的 Johnson-Cook 材料模型, 为开展 QCr0.8 铜合金产品电磁成形工艺研究打下基础。

关键词: QCr0.8 铜合金; Johnson-Cook 模型; 动态力学性能; 电磁成形

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 06-0057-05

Research on dynamic mechanical properties of QCr0.8 copper alloy

MA Jishan¹, MENG Xianguo¹, YU Haiping², LIU Dawei¹, WANG Shoulong¹

(1. Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The dynamic mechanical properties of QCr0.8 copper alloy were studied by means of the quasi static unidirectional tension test and the Hopkinson pull-rod test. The Johnson-Cook material model of the deformation behavior of the material at high speed was obtained, which laid a foundation for the research of electromagnetic forming technology of QCr0.8 copper alloy.

Keywords: QCr0.8 copper alloy; Johnson-Cook material model; dynamic mechanical property; electromagnetic forming

0 引言

QCr0.8 铜合金具有高强度、高导热、冷热态良好的塑性成形性、良好的焊接性、切削性等特点, 在某型号发动机中广泛应用。由于发动机性能提高, 其结构具有复杂性、紧凑性、异形化的特点, 一些复杂产品采用常规的冲压成形工艺无

法成形出高质量的合格产品。例如, 某型号发动机半球形铜钢夹层结构的涡轮壳体, 其球面侧壁上法向翻边圆孔的结构设计要求 QCr0.8 铜合金内壁采用翻边成形工艺贴合至不锈钢外壁。由于翻边孔壁过高, 翻边变形量已接近材料的成形极限, 采用常规的钢模翻边成形工艺极易出现翻边孔破裂, 造成球壳产品报废。寻找一种可靠的成

收稿日期: 2016-07-29; 修回日期: 2016-09-28

作者简介: 马继山 (1970—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机钣金成形

形工艺,实现发动机特殊结构下 QCr0.8 铜合金产品的可靠成形是发动机研制中的一个重要技术难题。

电磁成形是一种高能高速率的塑性加工方法,其原理是利用脉冲电容器突然释放其储存的能量,通过线圈产生强而短促的磁场,当金属工件处于线圈产生的磁场中,就会在工件中产生感应磁场,利用磁场力使工件发生变形。与常规成形方法相比,电磁成形具有模具简单、零件精度高、表面质量好,可提高材料塑性变形能力,利于采用复合工艺等特点^[1]。目前电磁成形技术已被广泛用于航空、航天、汽车、电子、兵器等工业领域^[2-3]。球壳组件 QCr0.8 铜合金翻边采用电磁成形工艺,可提高铜合金材料的成形极限,提高球壳产品翻边成形的可靠性。

很早以前人们就发现高速率成形能提高材料的成形性,如 Balanethiram 等人^[4]和 Daehn 等人^[5]就提出了 3 种导致材料成形性提高的机理^[4-6]:①材料高速变形导致应变强化或者说应变速率敏感性的提高;②惯性效应有可能增强了对颈缩发展的抑制,提高了材料的延伸率;③工件与模具的高速冲击导致材料放射性塑性展开。QCr0.8 铜合金材料的电磁成形是在脉冲磁场力作用下的高速率变形过程,材料在高速率下的变形行为与准静态下存在很大的区别,而高速率动态变形性能直接关系到变形参数研究及变形质量控制。然而,高速率成形中材料本构关系的研究仍然不够完善,还缺乏高速率成形中不同材料的本构方程,以指导高速率成形工艺^[7]。为了给后续的研究提供准确的材料模型,本文对 QCr0.8 铜合金的动态力学性能开展试验和研究,即材料高速率下变形行为的 Johnson-Cook 材料模型。该材料模型的建立需要同时考虑材料在准静态下及不同应变速率下的应力应变行为。

1 准静态单向拉伸试验

为了得到材料的 Johnson-Cook 材料模型,需要测得该材料准静态的力学性能。取铜合金板材制成标准拉伸试样,试样数量 3 件,试样的加工方式采用线切割,对切割出来的试样进行打磨,

消除拉伸试样表面的氧化皮及划痕等。应用电子万能试验机进行单向拉伸试验,试验执行标准依据 GB/T 228.1-2010《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》,最后得到该材料在室温下的应力应变数据,根据所得数据绘制该材料的真实应力应变曲线如图 1 所示。从图中可以得到该 QCr0.8 铜合金的屈服强度约为 92 MPa 左右,断裂强度约为 390 MPa 左右,最大延伸率为 46% 左右。

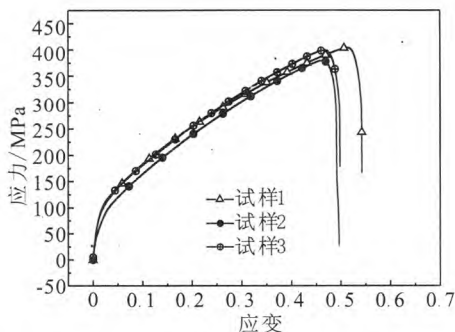


图 1 3 个拉伸试样准静态的真实应力应变曲线

Fig. 1 Quasi static true stress and strain curves of three tensile specimens

2 动态霍普金森拉杆试验

自 1949 年 Kolsky 发明分离式霍普金森压杆装置 (SHPB) 以来^[8],它一直被认为是测试材料在高应变率下的力学行为的最有效的试验方法,SHPB 能获得材料在 $100 \sim 10\,000 \text{ s}^{-1}$ 应变速率下的应力应变曲线。采用分离式霍普金森拉杆试验装置 (SHTB) 对 QCr0.8 铜合金的动态力学性能进行测试,试验原理图如图 2 所示^[9]。首先将试样夹持在入射杆和透射杆之间,然后用高压气枪进行充气。当达到一定气压时气枪发射子弹,子弹会撞击与入射杆相连的后座,产生一个沿杆传播的一维应力波。该应力波通过与入射杆相连的过渡杆向前传播,在到达与试样相连处时,入射杆带动在入射杆与透射杆之间的试样产生伸长变形,同时由入射杆与透射杆上的应变片记录试样的变形信息。由于整个过程变形极快,试样会在很高的应变速率下发生伸长变形,改变气压的大小会改变试样的应变速率,从而可以得

到试样在不同应变速率下的应力应变行为。

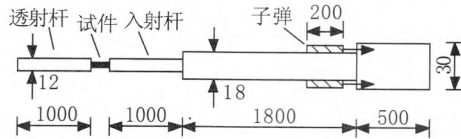


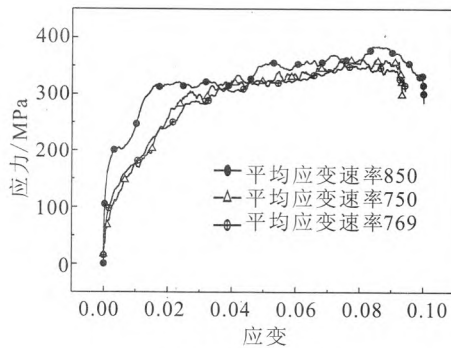
图 2 分离式霍普金森拉杆原理图

Fig. 2 Schematic diagram of split Hopkinson tensile bar (SHTB)

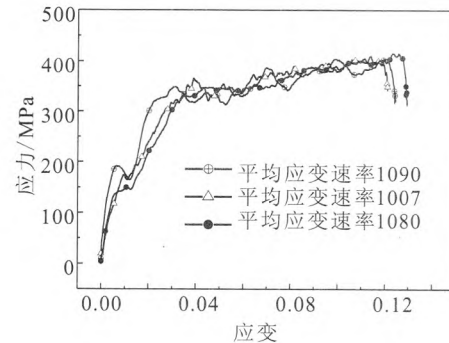
为了得到在不同应变速率下该材料的应力应变曲线, 选择 4 组冲击气压分别进行试验, 气压分别为 0.4 MPa, 0.5 MPa, 0.6 MPa 和 0.7 MPa, 每组气压下的试验重复 3 次。由于试样尺寸不可

能做到完全一致, 同时试验过程中还存在一定的误差, 使得即使在相同的气压下所得到的应变速率也不尽相同, 但相差不会很大。试验过后, 将数据导出并进行相关的处理, 并对每组气压下的试验曲线拟合, 获得不同应变速率下的应力-应变曲线如图 3。

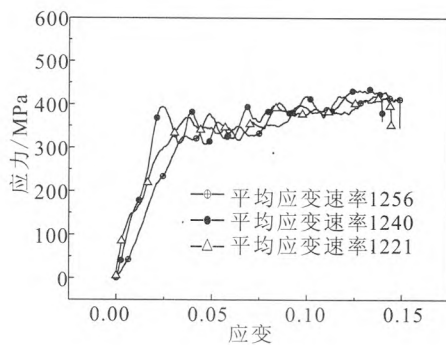
从图中可以看出, 在相同气压下得到的材料的平均应变速率并不是完全一样的, 但是相差不明显。上述曲线的末端表示在该应变速率下试样达到的最大应变变量, 由于在试验中试样并未发生断裂, 所以无法得到在不同应变速率时材料的最大延伸率和断裂强度, 但是可以从中得到各个应变速率下材料的屈服强度。



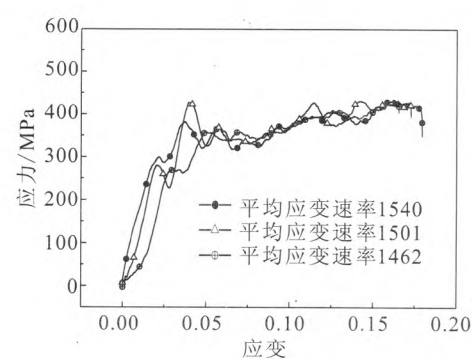
(a) 气压 0.4 MPa



(b) 气压 0.5 MPa



(a) 气压 0.6 MPa



(b) 气压 0.7 MPa

图 3 高应变速率下的真实应力应变曲线

Fig. 3 True stress and strain curves at high strain rate

取不同应变速率下该材料的真实应力应变曲线, 并将其与准静态下的应力应变曲线比较, 如图 4 所示。从图中可看出, 与准静态相比, 随着应变速率的提高, 材料的屈服强度得到了明显的提高, 体现了材料的应变速率强化效应。但在高

应变速率条件下, 随着应变速率的提高, 材料的屈服强度上升并不是很明显, 说明在高应变速率下, 材料本身对应变速率的提高已经不太敏感了。从图 3 中可得到高应变速率下材料的屈服强度如表 1 所示。

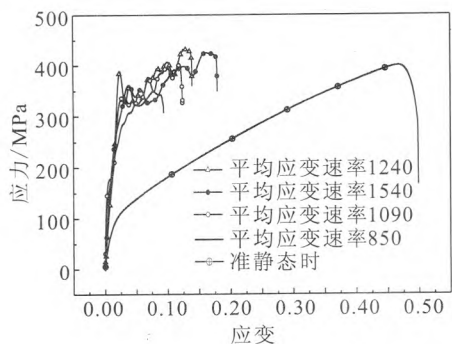


图 4 高应变速率与准静态条件真实应力应变曲线对比

Fig. 4 Comparison of the true stress and strain curves under quasistatic and high strain rate

表 1 高应变速率下材料的屈服强度

Tab. 1 Yield strength of the material at high strain rates

气压/MPa	应变速率/s ⁻¹	屈服强度/MPa
0.4	789	170
0.5	1 059	188
0.6	1 239	194
0.7	1 501	200

3 材料本构模型

由于电磁成形是一种高速率的成形方式，后续研究时模拟过程中所选用的材料模型需要考虑应变速率对其的影响。通过霍普金森拉杆试验建立考虑应变速率的 Johnson-Cook 模型作为本研究所用的材料模型。模型的具体形式如下：

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

$$\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \tag{2}$$

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \tag{3}$$

式中： σ 为材料的流动应力； $\dot{\epsilon}$ 为应变速率； ϵ 为等效塑性应变； $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变速率； T 为试验温

度； T_r 为室温； T_m 为熔点温度。

A 、 B 、 C 、 m 和 n 是与材料自身性质相关的系数。其中， A 为材料在准静态下的屈服强度； B 和 n 为与应变硬化相关的常数； C 为应变率敏感指数； m 为温度软化系数。

由于试验在常温下进行，所以可以不用考虑温度项的影响，式 (1) 可简化为

$$\sigma = [A + B\epsilon^n] [1 + C \ln \dot{\epsilon}^*] \tag{4}$$

上述参数的确定过程中， A 、 B 和 n 主要与材料在准静态下的应力应变行为有关，由准静态下的单向拉伸试验确定；参数 C 主要与应变速率有关，由霍普金森杆试验得到的相关数据确定。式中的参考应变速率取准静态下的应变速率，即 $\dot{\epsilon}_0 = 0.001 \text{ s}^{-1}$ 。当 $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0$ ，即在准静态下式 (4) 可简化为

$$\sigma = A + B\epsilon^n \tag{5}$$

当 $\epsilon = 0$ 时，也即准静态拉伸时的应变为零，则 $A = \sigma$ ， A 即为准静态屈服强度。

对上式进行简单的数学处理得：

$$\ln(\sigma - A) = \ln B + n \ln \epsilon \tag{6}$$

准静态拉伸所得的应力-应变数据点 ($\ln \epsilon$ ， $\ln(\sigma - A)$) 满足上式，对准静态下材料的应力应变数据用最小二乘法在 Origin 软件中拟合出成直线，其中 n 为直线斜率， $\ln B$ 为直线截距，最终得到 $n = 0.904$ ， $B = 648.4$ 。

为了拟合得到系数 C ，当塑性应变 ϵ 为 0 时，式 (4) 可简化为式 (7)，此时对应的流动应力刚好是材料在该应变速率下的屈服强度。

$$\sigma = A \left[1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right] \tag{7}$$

取 $\dot{\epsilon}_0 = 0.001 \text{ s}^{-1}$ ，将霍普金森拉杆试验各应变速率 $\dot{\epsilon}$ 及其对应的屈服应力 σ 代入，求得各应变速率下平均值得到 $C = 0.0788$ 。

最终所得 J-C 模型为 $\sigma = [92 + 648.4\epsilon^{0.904}] [1 + 0.0788 \ln \dot{\epsilon}^*]$ 。此模型可作为 QCr0.8 铜合金电

磁成形研究所用的材料本构模型。

4 结论

通过准静态单向拉伸试验和霍普金森拉杆试验建立了考虑应变率的 QCr0.8 铜合金的 Johnson-Cook 本构模型:

$$\sigma = [92 + 648.4 \varepsilon^{0.904}] [1 + 0.0788 \ln \dot{\varepsilon}^*]$$

该本构模型可用于发动机具有特殊结构的 QCr0.8 铜合金产品及其他行业相同材料产品的电磁成形工艺研究。

参考文献:

- [1] 李春峰. 高能率成形技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [2] 訾炳涛, 巴启先, 崔建忠. 电磁成形设备的国内外概况[J]. 锻压机械, 1998(3): 8-10.
- [3] PSY K, RISCH V, KINSEY D, et al. Electromagnetic forming-A review[J]. Journal of materials processing technology, , 2011, 211(5): 787-829.
- [4] BALANETHIRAM V S, DAEHN G S. Hyperplasticity-increased forming limits at high workpiece velocity [J]. Scripta metall, 1994 (31): 515-520.
- [5] BALANETHIRAM V S, HU X, ALTNOV M, DAEHN G S. Hyperplasticity: enhanced formability at high rates [J]. Material processing technologies, 1994, 45 (1/4): 595-600.
- [6] DAEHN G S, ALTNOVA M, BALANETHIRAM V S, et al. High velocity metal forming-an old technology addresses new problems[J]. JOM, 1995, 47(7): 42-45.
- [7] 李风. 高速率成形中材料本构关系的研究进展[J]. 材料研究与应用, 2008(3): 165-168.
- [8] KOLSKY H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J]. Processings of the Physical Society of London, 1949, B62: 676-700.
- [9] 韩玉杰. 5A02 铝合金板材磁脉冲成形流动规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [7] COON J, YASUHARA W. Solid propulsion approaches for terminal steering: AIAA 1993-2641 [R]. USA: AIAA, 1993.
- [8] CAVENY L H, GEILER R L, ELLIS R A, et al. Solid rocket enabling technologies and milestones in the United States[J]. Journal of propulsion and power, 2003; 19(6): 1038-1065.
- [9] CAUBET P. Attitude control systems for interceptors[C]// Proceedings of 1st AAAF International Conference on Missile Defense. Arcachon, France: AAAF, 2003: 111-121.
- [10] LAFOND A. Numerical simulation of the flowfield inside a hot gas valve: AIAA 1999-1087[R]. USA: AIAA, 1999.
- [11] AUSSIGNAC P, UHRIG G.. Theatre BMD: A DACS design for the ASTER Block 2 Kill Vehicle [C]// Proceedings of 4th AAAF International Conference on Missile Defence. Heraklion, Greece, 2007: 22-29.
- [12] JONER S, QUINQUIS I. Control of an exoatmospheric Kill Vehicle with a solid propulsion attitude control system: AIAA 2006-6572[R]. USA: AIAA, 2006.
- [13] TAO Z J, WANG Y B, LIU Y, et al. Simulation on dynamic response characteristics of electromagnetic gas valve[J]. Computer simulation, 2013, 30(5): 68-71.
- [14] CARY L C, ALBERT S D. Rocket thruster comprising load-balanced pintle valve: US8215097[P/OL]. 2010-12-13[2012-07-22]. <http://xueshu.baidu.com>.
- [15] CHANG H, WANG Y B, LIU Y, et al. Experimental investigation of solid attitude control system using proportional pintle thrusters [J]. Applied mechanics and material, 2015, 723(3): 131-135.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 24 页)

(编辑: 马 杰)