

纯钛高应变率拉伸力学行为的实验研究

Experimental Study on Tension Behavior of
Pure Titanium at High Strain Rates

张银喜^{1,2}, 张 军^{1,2}, 黄 文³, 汪 洋^{1,2}, 夏源明^{1,2}

(1 中国科学技术大学 近代力学系, 合肥 230027;

2 中国科学技术大学 中科院材料力学行为和设计重点实验室,
合肥 230027; 3 深圳大学 土木工程学院, 广东 深圳 518060)

ZHANG Yin-xi^{1,2}, ZHANG Jun^{1,2}, HUANG Wen³,

WANG Yang^{1,2}, XIA Yuan-ming^{1,2}

(1 Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China,
Hefei 230027, China; 2 Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of
Materials, University of Science and Technology of China, Chinese Academy
of Sciences, Hefei 230027, China; 3 College of Civil Engineering, Shenzhen
University, Shenzhen 518060, Guangdong, China)

摘要: 利用 MTS809 材料试验机和旋转盘式间接杆杆型冲击拉伸实验装置, 对多晶纯钛进行了室温环境下应变率为 $0.001, 0.01 \text{ s}^{-1}$ 的准静态和 $300, 1400 \text{ s}^{-1}$ 的动态拉伸实验, 获得了纯钛等温和绝热拉伸应力-应变曲线; 实施了应变率为 300 s^{-1} 的冲击拉伸复元实验, 获得了纯钛在高应变率下的等温应力-应变曲线。结果表明: 纯钛的拉伸力学行为具有明显的应变硬化效应、应变率强化效应和绝热温升软化效应。采用修正的 KHL 模型较好地表征了纯钛在准静态和动态实验应变率范围内的拉伸力学行为。

关键词: 纯钛; 高应变率拉伸; 本构模型

中图分类号: O347.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2011)12-0006-04

Abstract: Quasi-static and dynamic tension tests for pure titanium were performed using MTS809 testing system and rotating disk bar-bar tensile impact apparatus, respectively. The isothermal tension stress-strain curves at 0.001 s^{-1} and 0.01 s^{-1} and adiabatic tension stress-strain curves at 300 s^{-1} and 1400 s^{-1} were obtained. The dynamic tensile recovery test was carried out at the rate of 300 s^{-1} and the isothermal stress-strain curve at the high strain rate was obtained. The results indicate that there exists the strain hardening, strain-rate strengthening and adiabatic temperature-rise softening phenomenon in the tension behavior of pure titanium. A modified KHL model can describe and characterize the tensile behavior of titanium at different strain rates including high strain rates. The simulated results agree well with the experimental data.

Key words: pure titanium; high strain-rate tension; constitutive model

钛及钛合金具有密度低、比强度高、耐腐蚀性好等优点, 因此其作为结构材料被广泛应用于航空、航天、汽车等军事和民用领域。这些材料及其结构在加工和使用过程中可能承受高速切削、高速撞击和爆炸等冲击加载作用, 因此准确了解材料在高应变率加载下的力学行为对材料设计和工程应用具有重要的意义。

关于钛及钛合金力学性能的应变率相关性研究主要集中在压缩加载方面, 分离式霍普金森压杆是测试

材料在高应变率加载下压缩力学行为的一种有效的实验方法^[1-3]。Chichili^[4]等, Nemat-Nasser^[5]等, Li^[6]等, 常亚喆^[7]等, Gurao^[8]等和孙智^[9]等分别对多晶纯钛实施了不同环境温度下的冲击压缩实验和冲击剪切实验, 结果表明: 纯钛的压缩力学性能具有温度和应变率相关性, 随着应变率的升高和温度的降低, 其屈服应力增加, 屈服后的应变硬化效应增强; 纯钛在高应变率下存在动态应变时效现象; 纯钛的塑性变形机制包含位错滑移和孪生变形; 绝热剪切带的形成和发展是材

料损伤和破坏的主要机制。对弹塑性材料而言,其在高应变率下的绝热变形过程是一个热力耦合的过程。Nemat-Nasser^[10]等首次实现了冲击压缩复元实验技术,并利用该技术获得了纯钛在高应变率下的等温压缩应力-应变曲线,从而对纯钛在高应变率下的热力耦合行为实现了实验解耦^[5]。

本工作拟对多晶纯钛在室温环境下拉伸力学行为的应变率相关性进行实验研究,采用冲击拉伸实验技术和冲击拉伸复元实验技术来获得纯钛在高应变率下的绝热和等温拉伸应力-应变曲线,实现动态拉伸加载下应变硬化效应和绝热温升软化效应的实验解耦,在此基础上采用宏观唯象本构模型来表征纯钛的应变率相关的拉伸塑性变形行为。

1 实验材料和测试方法

试件所用材料为西北有色金属研究所提供的轧制多晶纯钛板,其化学成分(质量分数/% ,下同)为 $\text{Fe} \leq 0.12, \text{C} \leq 0.04, \text{N} \leq 0.02, \text{H} \leq 0.007, \text{O} \leq 0.07$,余量为 Ti。在加工成试样之前将原材料在 977K 下真空退火 2h,然后在真空环境中冷却至室温。准静态拉伸实验在 MTS809 材料试验机上进行,应变率为 0.001s^{-1} 和 0.01s^{-1} 。动态拉伸实验在旋转盘式间接杆杆型试验机上进行,应变率为 300s^{-1} 和 1400s^{-1} 。实验环境温度均为室温。

高应变率拉伸实验所使用的旋转盘式间接杆杆型冲击拉伸试验装置由旋转盘加载系统、入射杆、透射杆和应变信号测量和采集系统组成。图 1 所示为实验装置的示意图及一维实验原理的 Lagrange $X-t$ 图。通过锤头高速打击撞块,使前置金属短杆发生弹塑性变形直至断裂,从而在入射杆中产生拉应力方波脉冲。前置金属短杆的作用既相当于脉冲发生器,又相当于机械滤波器,使得产生的拉伸脉冲光滑、平稳;通过选用不同直径和长度的前置金属短杆和不同的打击速率,则拉伸入射脉冲的幅值、持续的时间和入射脉冲上升段的时间可控,从而可实施不同应变率的冲击拉伸实验^[11]。入射杆和透射杆中的入射波、反射波和透射波应变信号分别由杆上的应变片测量,依据一维应力波理论和试件中应力、应变均匀假定,对于具有相同横截面尺寸且由同种材料制成的入射杆和透射杆而言,试件中的平均应力、应变和应变率可由杆上应变片所测量到的入射应变信号 $\epsilon_i(t)$ 和透射应变信号 $\epsilon_t(t)$ 获得。而式(1)和式(2)则是由实测的入射波形和透射波形经数据处理后获得的试件中工程应力 σ_s 、工程应变 ϵ_s 和工程应变率 $\dot{\epsilon}_s$ 的测试原理式。

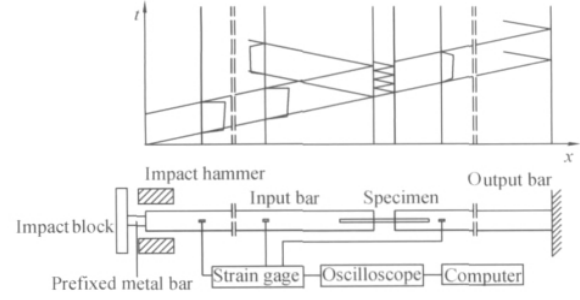


图 1 高应变率拉伸实验装置示意图

Fig. 1 High strain rate tension testing system

$$\sigma_s(t) = \frac{EA}{A_s} \epsilon_i(t) \quad (1)$$

$$\epsilon_s(t) = \frac{2C_0}{l_s} \int_0^t [\epsilon_i(\tau) - \epsilon_t(\tau)] d\tau \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_s(t) = \frac{2C_0}{l_s} [\epsilon_i(t) - \epsilon_t(t)] \quad (3)$$

式中: E , A 和 C_0 分别是杆的弹性模量、横截面积和弹性纵波波速; A_s 和 l_s 分别是试件实验段的横截面积和实验段的长度。

高应变率拉伸加载过程是一个绝热过程,对弹塑性材料而言,不可逆塑性功将导致试件产生绝热温升,该绝热温升将对试件材料的塑性变形行为产生影响,通过实施高应变率复元实验,可实现高应变率下材料应变硬化效应和绝热温升软化效应的实验解耦^[10]。通过产生短拉伸加载脉冲,并在入射杆和透射杆系统上加装吸波装置以抑制二次加载波对试件的作用(防止试件的二次塑性变形),对试件进行了高应变率的拉伸加卸载实验。通过对同一试件进行反复多次加卸载,从而实现高应变率下的冲击拉伸复元实验。

拉伸实验所使用的试件形状为哑铃形扁平状,厚度 1.2mm,尺寸如图 2 所示。

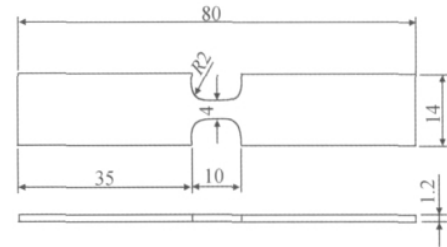


图 2 试件形状及尺寸

Fig. 2 Specimen shape and dimension

2 结果和分析

图 3 为多晶纯钛在应变率 $0.001, 0.01\text{s}^{-1}$ 下的等温应力-应变曲线和应变率 $300, 1400\text{s}^{-1}$ 下的绝热应

力-应变曲线。从图 3 可知,多晶钛的拉伸力学行为呈现明显弹塑性变形特征,且其屈服强度、极限强度和应变硬化率具有显著的应变率相关性,动态屈服强度和应变硬化率较准静态有明显增大。

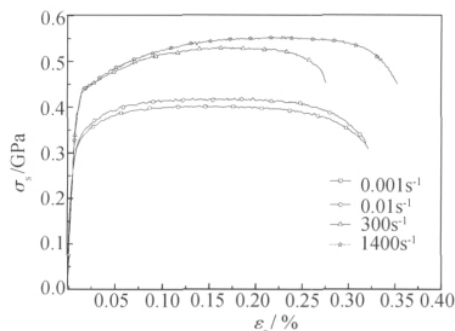


图 3 纯钛在不同应变率下的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of titanium at different strain rates

图 4 为高应变率加载下等温应力-应变曲线与绝热应力-应变曲线的比较。虚线为对同一试件实施反复加卸载所获得的材料在不同应变区间的应力-应变实验结果,由于材料在弹性变形阶段,外界所做的功都转化成了可恢复的弹性变形能,不会在试件中产生绝热温升,依次连接各应变区间应力-应变曲线的屈服点得到的包络线就可认为是动态加载条件下的等温应力-应变曲线。由图 4 可见,纯钛等温应力-应变曲线塑性应变硬化段的应力水平较绝热应力-应变曲线相应段的应力水平高,其绝热应力-应变曲线中包含了绝热温升导致材料软化效应。

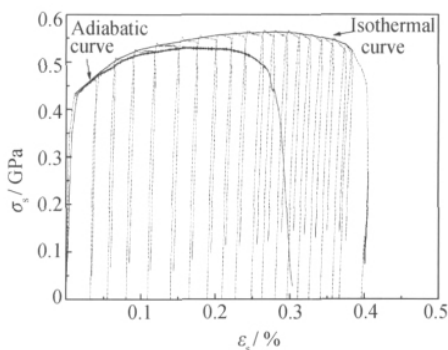


图 4 纯钛在 300 s⁻¹ 下的等温与绝热应力-应变曲线的比较

Fig. 4 Comparison of isothermal with adiabatic results of titanium at 300 s⁻¹

3 拉伸力学行为的表征

Khan^[12]等提出了一种能够描述钛合金在压缩加载下不同应变率和温度下力学行为的宏观本构模型

(Khan-Huang-Liang 模型, KHL)。由于 KHL 模型计及了应变率对初始屈服和应变硬化的不同影响,因此该模型较 Johnson-Cook 模型可以更好地表征材料在压缩加载下的塑性变形行为。根据纯钛在拉伸加载下所表现出的明显的应变率强化效应和绝热温升软化效应,本工作提出一个修正的 KHL 模型来表征纯钛计及应变率效应的拉伸力学行为。

修正的 KHL 模型为

$$\sigma = \left[A + B \left(1 - \frac{\ln(\dot{\epsilon})}{\ln(D_0^p)} \right)^{n_1} (\epsilon_p)^{n_0} \right] \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}^*} \right) e^{-\lambda \Delta T} \quad (4)$$

式中: σ , ϵ_p 和 $\dot{\epsilon}$ 分别是流动应力(真应力)、塑性应变(真应变)和应变率; $\dot{\epsilon}^*$ 是参考应变率; A 为屈服应力; B 和 n_0 为应变硬化系数; D_0^p 为应变率上限; n_1 为表征应变率对应变硬化影响的因子; C 为应变率强化系数; λ 为温度软化系数; ΔT 为绝热温升,可表示为:

$$\Delta T = \frac{\chi}{\rho C_v} \int_0^{\epsilon_p} \sigma d\epsilon_p \quad (5)$$

式中: ρ 是材料密度; C_v 是定容比热; χ 是热功转化系数。对于大多数金属材料该系数可取为 0.9。参考应变率 $\dot{\epsilon}^*$ 取为 0.001 s^{-1} , 应变率上限 D_0^p 取为 10^6 s^{-1} [12]。纯钛的密度为 $\rho = 4500 \text{ kg/m}^3$, 定容比热 $C_v = 544 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。

由不同应变率下的屈服应力值 $\sigma_{0.2}$, 可确定模型参数 A 和 C 的初始值; 依据准静态和高应变率下的等温应力-应变曲线, 可确定参数 B , n_0 和 n_1 的初始值; 根据高应变率 300 s^{-1} 下的绝热和等温应力-应变曲线的比较, 确定参数 λ 。对 4 个应变率下的全部真应力-真应变曲线的塑性变形段进行非线性拟合, 得到的最终模型参数值: $A = 0.297 \text{ GPa}$, $B = 0.468$, $n_0 = -0.346$, $n_1 = 0.452$, $C = 0.390$ 和 $\lambda = 0.001 ^\circ\text{C}^{-1}$ 。图 5 为模型拟合结果与实验结果的比较, 由图 5 可知, 拟

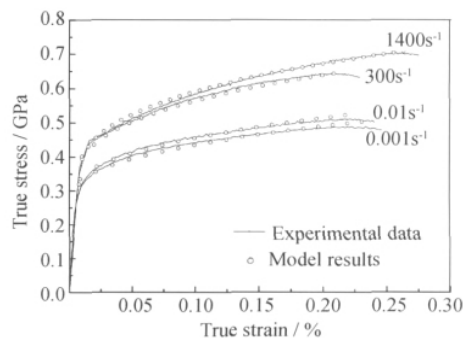


图 5 高应变率拉伸模型结果与实验数据比较

Fig. 5 Correlation of the model results with the experimental data in titanium

合结果与实验结果吻合较好,表明该模型(式(4))可以较好地表征纯钛在实验应变率范围内的拉伸力学行为。

4 结论

(1)纯钛拉伸力学行为在本工作实施的应变率范围内具有明显的应变硬化效应、应变率强化效应和绝热温升软化效应。

(2)高应变率实验过程可以近似为一个绝热过程,通过冲击拉伸复元实验获得了纯钛的高应变率等温应力-应变曲线,实现了应变硬化效应与绝热温升软化效应的实验解耦。

(3)采用修正的 KHL 模型对纯钛的应力-应变曲线进行数值拟合,结果表明,该模型可以较好地表征纯钛在准静态和动态实验应变率范围内的拉伸力学行为。

参考文献

- [1] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [2] GRAY G T. Mechanical testing and evaluation: classic split-Hopkinson pressure bar testing. metals handbook [M]. Ohio: American Society for Metals,2000. 462—476.
- [3] RODNEY J C. Response of materials under dynamic loading [J]. International Journal of Solids and Structures,2000,37(1):105—113.
- [4] CHICHILI D R, RAMESH K T, KEMKER K J. The high-strain-rate response of alpha-titanium: experiments deformation mechanisms and modeling [J]. Acta Materialia, 1998, 46(3): 1025—1043.
- [5] NEMAT-NASSER S, GUO W G, CHENG J Y. Mechanical properties and deformation mechanisms of a commercially pure titanium [J]. Acta Materialia, 1999, 47(13): 3705—3720.
- [6] LI Q, XU Y B, BASSIM M N. Dynamic mechanical behavior of pure titanium [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155—156: 1889—1892.
- [7] 常亚喆, 刘楚明, 詹从堃, 等. 高应变率下纯钛动态压缩力学性能各向异性[J]. 湖南有色金属, 2008, 24(4): 33—36.
- [8] GURAO N P, KAPOOR R, SUWAS S. Deformation behaviour of commercially pure titanium at extreme strain rates [J]. Acta Materialia, 2011, 59(9): 3431—3446.
- [9] 孙智, 苏铁健, 李淑华, 等. 高应变率下工业纯钛 TA2 变形与失效研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2007, 30(3): 43—47.
- [10] NEMAT-NASSER S, ISSACS J B, STARRETT J E. Hopkinson techniques for dynamic recovery experiments [J]. Proc R Soc London, 1991, A20: 371—391.
- [11] XIA Y M, WANG Y. Dynamic testing of materials with the rotating disk indirect bar-bar tensile impact apparatus [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2007, 35(1): 31—35.
- [12] KHAN A S, SUH Y S, KAZMI R. Quasi-static and dynamic loading responses and constitutive modeling of titanium alloys [J]. International Journal of Plasticity, 2004, 20(12): 2233—2248.
- [13] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [14] GRAY G T. Mechanical testing and evaluation: classic split-Hopkinson pressure bar testing. metals handbook [M]. Ohio: American Society for Metals,2000. 462—476.
- [15] RODNEY J C. Response of materials under dynamic loading [J]. International Journal of Solids and Structures,2000,37(1):105—113.
- [16] CHICHILI D R, RAMESH K T, KEMKER K J. The high-strain-rate response of alpha-titanium: experiments deformation mechanisms and modeling [J]. Acta Materialia, 1998, 46(3): 1025—1043.
- [17] NEMAT-NASSER S, GUO W G, CHENG J Y. Mechanical properties and deformation mechanisms of a commercially pure titanium [J]. Acta Materialia, 1999, 47(13): 3705—3720.
- [18] LI Q, XU Y B, BASSIM M N. Dynamic mechanical behavior of pure titanium [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155—156: 1889—1892.
- [19] 常亚喆, 刘楚明, 詹从堃, 等. 高应变率下纯钛动态压缩力学性能各向异性[J]. 湖南有色金属, 2008, 24(4): 33—36.
- [20] GURAO N P, KAPOOR R, SUWAS S. Deformation behaviour of commercially pure titanium at extreme strain rates [J]. Acta Materialia, 2011, 59(9): 3431—3446.
- [21] 孙智, 苏铁健, 李淑华, 等. 高应变率下工业纯钛 TA2 变形与失效研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2007, 30(3): 43—47.
- [22] NEMAT-NASSER S, ISSACS J B, STARRETT J E. Hopkinson techniques for dynamic recovery experiments [J]. Proc R Soc London, 1991, A20: 371—391.
- [23] XIA Y M, WANG Y. Dynamic testing of materials with the rotating disk indirect bar-bar tensile impact apparatus [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2007, 35(1): 31—35.
- [24] KHAN A S, SUH Y S, KAZMI R. Quasi-static and dynamic loading responses and constitutive modeling of titanium alloys [J]. International Journal of Plasticity, 2004, 20(12): 2233—2248.
- [25] 张新平, 史耀武, 任耀文. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [26] 张新平, 史耀武, 任耀文. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [27] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册第2卷 变形高温合金 铸造高温合金[M]. 北京:中国标准出版社,2002.
- [28] 张新平, 史耀武, 任耀文. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [29] 张新平, 史耀武, 任耀文. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [30] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [31] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [32] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [33] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [34] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [35] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [36] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [37] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [38] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [39] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [40] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [41] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [42] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [43] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [44] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [45] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [46] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [47] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [48] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [49] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [50] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [51] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [52] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [53] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [54] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [55] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [56] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [57] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [58] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [59] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [60] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [61] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [62] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [63] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [64] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [65] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [66] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [67] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [68] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [69] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [70] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [71] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [72] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [73] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [74] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [75] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [76] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [77] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [78] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [79] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [80] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [81] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [82] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [83] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [84] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [85] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [86] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [87] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [88] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [89] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [90] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [91] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [92] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [93] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [94] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [95] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [96] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [97] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [98] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [99] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.
- [100] 李晓红. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究[J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.

(上接第5页)

- [3] GELL M, DUHL D N, GIAMEI A F. The development of single crystal superalloy turbine blades [A]. Superalloys 1980 [C]. Warrendale, PA: TMS, 1980. 205—214.
- [4] GELL M, DUHL D N, GUPTA D K, et al. Advanced superalloy airfoils [J]. J of Metals, 1987, (7): 11—15.
- [5] ERICKSON G L. The development and application of CMSX-10 [A]. Superalloys 1996 [C]. Warrendale, PA: TMS, 1996. 35—44.
- [6] GIAMEI A F, SALKED R W, HAGERS C W. Energy efficient engine high-pressure turbine single crystal vane and blade fabrication technology report [R]. NASA-CR-164500, 1981.
- [7] FORD D A, ARTHEY R P. Development of single crystal alloys for specific engine application [A]. Superalloys 1984 [C]. Warrendale, PA: TMS, 1984. 115—124.
- [8] 吴仲棠, 温仲元, 陈德厚. DD3 单晶合金的成分设计和实验研究

收稿日期: 2011-05-19; 修订日期: 2011-09-27

作者简介: 张银喜(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事材料动态力学行为研究, 联系地址: 中国科学技术大学近代力学系(230027), E-mail: zhyxz@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 汪洋(1968—), 男, 理学博士, 教授, 主要从事极端条件下的材料力学行为和冲击动力学的研究工作, 联系地址: 安徽省合肥市中国科学技术大学近代力学系(230027), E-mail: yangwang@ustc.edu.cn

[J]. 金属学报, 1987, 23(4): 171—178.

- [9] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册第2卷 变形高温合金 铸造高温合金 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [10] 张新平, 史耀武, 任耀文. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材溶解模型特性的研究 [J]. 航空材料学报, 1995, 15(4): 34—40.
- [11] 张新平, 史耀武, 任耀文. 镍基非晶态及晶态钎料真空钎焊时母材在钎料中溶解特性的研究 [J]. 航空材料学报, 1996, 16(3): 50—56.

收稿日期: 2011-03-18; 修订日期: 2011-09-12

作者简介: 李晓红(1962—), 男, 博士, 研究员, 主要从事新型材料及结构件钎焊、扩散焊方面研究工作, 联系地址: 北京市朝阳区曙光西里甲5号院20号楼E座1123(100028), E-mail: lixiaohong621@yahoo.com