

Zn-40Al 合金中微观缺陷和 3d 电子的正电子湮没

陈雪星¹, 郭秋娥², 韩艳玲², 黄宇阳², 邓文^{2,3}

- (1. 玉林师范学院 物理与信息科学系, 玉林 537000;
2. 广西大学 物理科学与工程技术学院, 南宁 530004;
3. 中国科学院 国际材料物理中心, 沈阳 110016)

摘要: 测量 Zn 单晶、Al 单晶、铸态 Zn₆₀Al₄₀ 合金以及冷轧 Zn、Al、Zn₆₀Al₄₀ 的符合正电子湮没辐射多普勒展宽谱和寿命谱。结果表明, 单晶 Zn 和铸态 Zn₆₀Al₄₀ 合金的商谱在约 $17.4 \times 10^{-3} m_0c$ 处出现一个峰, 主要是正电子与 Zn 中 3d 电子湮没的作用; 当 Zn 原子和 Al 原子形成 Zn₆₀Al₄₀ 合金时, Zn 原子和 Al 原子间主要以金属键结合; 轧制 Al 的商谱明显低于单晶 Al 的商谱, 冷轧 Zn₆₀Al₄₀ 合金商谱略低于铸态 Zn₆₀Al₄₀ 合金商谱; 而单晶 Zn 和轧制 Zn 的商谱几乎重叠; Al、Zn 金属和 Zn₆₀Al₄₀ 合金经冷轧后, 由于样品中产生了缺陷, 而导致正电子平均寿命增加, 轧制 Al 的增幅最大, 轧制 Zn₆₀Al₄₀ 合金的增幅次之, 而轧制 Zn 的增幅最小。

关键词: Zn₆₀Al₄₀ 合金; 3d 电子; 微观缺陷; 正电子湮没

中图分类号: TG 146.2

文献标识码: A

Positron annihilation of microdefects and 3d electrons in Zn-40Al alloy

CHEN Xue-xing¹, GUO Qiu-e², HAN Yan-ling², HUANG Yu-yang², DENG Wen^{2,3}

- (1. Department of Physics and Information Sciences, Yulin Normal College, Yulin 537000, China;
2. College of Physics Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China;
3. International Centre for Materials Physics, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: The coincidence Doppler broadening spectra and positron lifetime were measured in single crystals of Al, Zn, as-cast Zn₆₀Al₄₀, and cold-rolled Al, Zn, Zn₆₀Al₄₀. The results show that there is a peak at about $17.4 \times 10^{-3} m_0c$ in the ratio curves of the single crystal of Zn and the as-cast Zn₆₀Al₄₀ alloy, and it is due to the contribution of positron annihilation with 3d electrons of Zn atoms. The bonding nature in a Zn₆₀Al₄₀ alloy is metallic when Zn and Al atoms combine to form the alloy. The ratio curve of cold-rolled Al is obviously lower than that of the single crystal Al, and the ratio curve of cold-rolled Zn₆₀Al₄₀ is slightly lower than that of the as-cast Zn₆₀Al₄₀, while the ratio curve of cold-rolled Zn is almost super-imposed with that of the single crystal Zn. The microdefects in Al, Zn and Zn₆₀Al₄₀ are introduced after these samples are cold-rolled, which gives rise to the increase of positron lifetime. The magnitude of lifetime of cold-rolled Al is the largest, that of the cold-rolled Zn₆₀Al₄₀ is the second and that of the cold-rolled Zn is the smallest.

Key words: Zn₆₀Al₄₀ alloy; 3d electrons; microdefects; positron annihilation

锌铝合金是一种超塑性材料, 具有熔化温度低、成型方便以及加工性能优良等诸多优点^[1-2], 适合于多

种铸造方法。用其代替部分铜合金或铝合金具有很强的市场竞争力。目前, 锌铝合金在工业已得到广泛应

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10764001); 广西自然科学基金资助项目(桂科回 0832003)

收稿日期: 2009-03-25; 修订日期: 2009-05-26

通信作者: 陈雪星, 讲师; 电话: 13907758713; E-mail: ylch248@sina.com

用^[3], 并已成为材料科学的研究热点^[4-5]。

与 NiAl 系金属间化合物具有本征脆性不同, 锌铝合金在一定条件下可表现出良好的超塑性, 其中 Zn₆₀Al₄₀ 共析合金的超塑性最好、应用最广、研究也最深入^[5]。但至今人们对 Zn-Al 合金所表现出的奇特力学性能的微观机理仍不甚了解。

合金中的 3d 电子和微观缺陷是决定 Zn-Al 合金力学性能的深层次因素。人们采用理论方法计算了合金中的电子结构, 进而探讨材料性能与微结构间的关系。但尚缺乏深入到电子结构层次的实验研究。

正电子湮没技术(寿命谱和 Doppler 展宽谱)可探测固体中的开空间和负电中心。正电子寿命谱能提供正电子湮没前所在处电子密度的信息, 可区分具有不同开空间的缺陷。正电子湮没前所在处的电子密度越低, 正电子的寿命越长^[6-7]。正电子湮没辐射 Doppler 展宽谱可提供一维正-负电子湮没对的动量分布信息^[8-12]。近年来, 本课题组采用高分辨双探头符合正电子湮没辐射多普勒展宽技术, 大幅度降低多普勒展宽谱的本底, 谱线峰高和本底之比高于 10⁵, 从谱线的高能量部分可提取原子内层电子状态的信息^[12]。该技术对合金中 3d 电子态的变化非常敏感, 可提取一般实验手段难以得到的重要信息。采用正电子湮没技术研究 Zn₆₀Al₄₀ 中的微观缺陷和 3d 电子行为有助于理解 Zn-Al 合金奇特的力学性能。

本文作者测量 Zn 单晶、Al 单晶、Zn₆₀Al₄₀ 合金以及冷轧 Zn、Al、Zn₆₀Al₄₀ 的符合正电子湮没辐射多普勒展宽谱和寿命谱, 通过分析获得这些样品中的 3d 电子和缺陷信息, 从深层次因素揭示材料微结构与其力学性能的关系。

1 实验

1.1 样品制备

用纯度为 99.99% 的金属 Zn 和纯度为 99.97% 的金属 Al, 按 60%Zn 和 40%Al(摩尔分数)的化学配比配制成 Zn₆₀Al₄₀ 合金, 将该合金在电阻炉内重熔、除气、扒渣后于 550 °C 浇注成直径为 12 mm, 长度约为 120 mm 金属型试棒。同时制备了单晶 Si、Al 和 Zn 样品。用线切割机从每种试样上切出两片直径约为 10 mm, 厚度为 1 mm 的薄片。把薄片样品的表面磨平并抛光后置于真空炉中(压强低于 1×10⁻⁴ Pa)在不同温度(其中 Zn₆₀Al₄₀ 合金在 300 °C, 纯 Si 样品在 1 000 °C, 纯 Al 和 Zn 样品在 500 °C) 下退火 2 h。

将厚度为 2 mm 的 Zn₆₀Al₄₀ 合金、纯 Al 和 Zn 金

属片冷轧成厚度为 0.7 mm 的薄片, 压下率为 65%。

1.2 正电子湮没寿命谱测量

正电子湮没试验在室温(25 °C)下进行。正电子寿命谱采用 ORTEC 公司的快-快符合谱仪测量。以 Kapton 膜为衬底的 ²²Na 正电子源的强度为 3.7×10⁵ Bq。用两块相同的样品把这个源夹起构成“样品-源-样品”三明治结构, 每条谱测量的总计数约为 10⁶。

1.3 正电子湮没辐射 Doppler 展宽谱测量

正电子从 ²²Na 放射源产生进入固体样品热化后, 与固体中的电子湮没, 主要产生两个能量大约为 511 keV 的 γ 光子。湮没前由于正负电子对具有纵向动量 p_L, 这时湮没光子相对于 511 keV 产生 Doppler 能移(511±ΔE)。电子的纵向动量 p_L 与 Doppler 能移 ΔE 的关系为 ΔE=cp_L/2, 其中 c 为光在真空中的传播速度。

正电子湮没辐射 Doppler 展宽谱采用双高纯锗探头——多参数分析器符合装置测量。利用本装置测得的 Doppler 展宽谱的低能端和高能端的本底都很低, 谱线峰高与本底之比均高于 10⁵^[12]。谱线的本底越低, 越有利于从谱线中获取正电子与高动量电子的湮没信号。

本文作者测量了 Si 单晶、Zn 单晶、Al 单晶、Zn₆₀Al₄₀ 合金以及冷轧 Zn、Al、Zn₆₀Al₄₀ 的符合正电子湮没辐射多普勒展宽谱和寿命谱。

2 结果与讨论

2.1 Zn₆₀Al₄₀ 合金中的 3d 电子

因正电子与高动量核心电子湮没而引起的多普勒展宽谱的形状差异较小。为了区分不同展宽谱之间的差别, 以充分退火单晶 Si Doppler 展宽谱中的每一道计数作为参考, 将其它样品的 Doppler 展宽谱中的相应道址的计数与之相比, 获得试验样品的商谱^[13]。

在作商谱之前, 先对每条原始 Doppler 展宽谱进行 9 点光滑, 再把能量范围从 511 到 530 keV (p_L 从 0 到 74.3×10⁻³ m₀c) 的谱线面积归一到 10⁶。最后得到的商谱如图 1 所示。商谱的横坐标为正-负电子对湮没前的纵向动量 p_L(单位为 10⁻³ m₀c, m₀ 为电子的静止质量, c 为光在真空中的传播速度)。

以单晶 Si 为参考所作出的单晶 Zn、单晶 Al 和铸态 Zn₆₀Al₄₀ 合金的商谱分别记为 Zn(单晶)、Al(单晶)和 Zn₆₀Al₄₀(铸态)(见图 1(a)); 而以单晶 Si 为参考所作出的单晶 Zn、轧制 Zn、铸态 Zn₆₀Al₄₀ 合金、轧制

Zn₆₀Al₄₀ 合金、单晶 Al 和轧制 Al 的商谱分别记为 Zn(单晶)、Zn(冷轧)、Zn₆₀Al₄₀(铸态)、Zn₆₀Al₄₀(冷轧)、Al(单晶)和 Al(冷轧)(见图 1(b))。

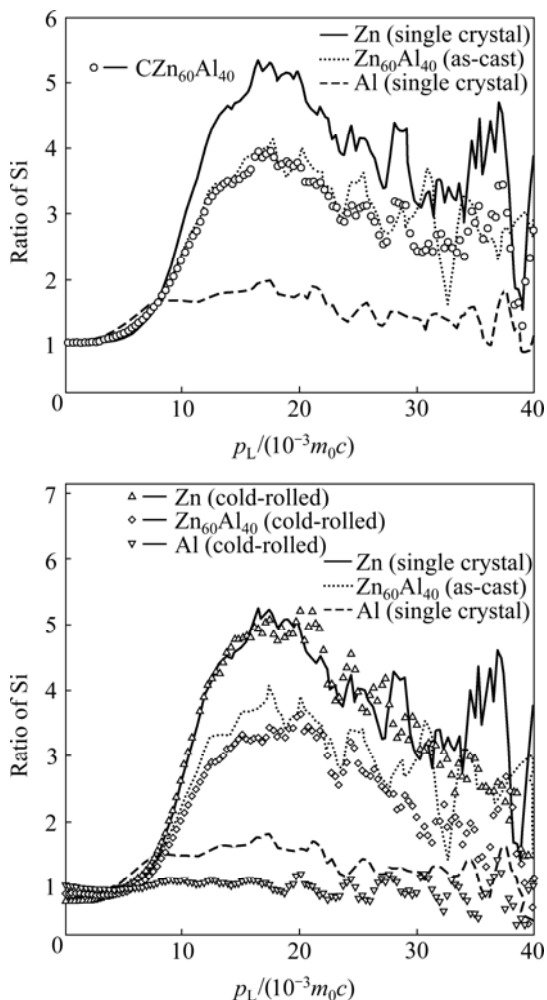


图 1 以单晶 Si 为参考所作出的样品的商谱
Fig.1 Ratio curves of samples by using Si as reference sample

为便于讨论和比较, 本文作者还构造了 CZn₆₀Al₄₀ 商谱, 该商谱由 60%单晶 Zn 和 40%单晶 Al 的商谱组合而成。CZn₆₀Al₄₀ 商谱如图 1(a)所示。

不同元素正电子湮没辐射 Doppler 展宽谱的形状不同, 特别是金属或合金中原子的核心电子的动量分布仍保持该原子特有的性质, 使采用正电子与核心电子的湮没信号来区分不同元素的原子成为可能。多普勒展宽谱的高动量部分的形状依赖于正电子与原子各层电子湮没的作用。

Zn 和 Al 原子的电子构型分别为(Kr)3d¹⁰4s² 和 (Ne)3s²3p¹, 即 Zn 原子有 10 个 3d 电子和 2 个 4s 电子, 而 Al 原子有 2 个 3s 电子和 1 个 3p 电子。从图 1(a) 可以看出, Zn(单晶)的商谱在 17.4 × 10⁻³ m₀c 处出现一个较高的峰, 主要是正电子与 Zn 中 3d 电子湮没的作

用^[14]; 由于 Al 没有 3d 电子, 而导致 Al(单晶)的商谱较平; 铸态 Zn₆₀Al₄₀ 合金的商谱在 17.4 × 10⁻³ m₀c 处出现一个低于 Zn(单晶)的峰。由此可见, 对铸态 Zn₆₀Al₄₀ 合金, Zn₆₀Al₄₀(铸态)与 CZn₆₀Al₄₀ 商谱几乎重叠。

正电子在具有超塑性的 Zn₆₀Al₄₀ 合金中的行为与其在具有本征脆性的 Ni₅₀Al₅₀ 合金中的行为有很大的区别^[9]: 二元 Ni₅₀Al₅₀ 合金的商谱明显低于 CNi₅₀Al₅₀ 商谱(CNi₅₀Al₅₀ 商谱由 50%的单晶 Ni 和 50%的单晶 Al 的商谱组合而成), 即在二元 Ni₅₀Al₅₀ 合金中正电子与 Ni 的 3d 电子湮没概率相对较低。当 Ni 原子和 Al 原子形成 Ni₅₀Al₅₀ 合金时, Ni 原子(其电子构型为 (Kr)3d⁸4s²)中尚未配对的 3d 电子与 Al 的 3p 电子发生杂化, 形成共价键, 减少了正电子和 Ni 原子 3d 电子湮没的概率。由于二元 Ni₅₀Al₅₀ 合金中金属键与共价键共存, 因而使 Ni₅₀Al₅₀ 合金具有本征脆性的特征。

Zn 原子的电子构型为(Kr)3d¹⁰4s², Zn 原子的 5 个 3d 亚轨道被 10 个电子填满, 1 个 4s 亚轨道被 2 个电子填满(按泡利不相容原理, 每个亚轨道最多可填 2 个电子), 即 Zn 原子中没有尚未配对的电子。因此, 当 Zn 原子和 Al 原子形成 Zn₆₀Al₄₀ 合金时, Zn 原子和 Al 原子间主要以金属键结合。

铸态 Zn₆₀Al₄₀ 和 CZn₆₀Al₄₀ 商谱几乎重叠的结果表明, 在 Zn₆₀Al₄₀ 合金中, Zn 原子和 Al 原子间主要以金属键结合, 当正电子被注入到 Zn₆₀Al₄₀ 合金时, 正电子在合金中均匀分布, 且正电子分别出现在合金晶格中 Zn 和 Al 原子位置的概率分别为 60%和 40%。

从图 1(b)中可以看出, 单晶 Zn 和轧制 Zn 的商谱几乎重叠, 即 Zn(单晶)曲线与 Zn(冷轧)曲线几乎重叠, 这说明金属锌被冷轧后虽然产生了空位、位错和晶界等缺陷, 但由于 Zn 原子 3d 亚轨道的角量子数较大 (l=2), 3d 电子的轨道伸展较远, 3d 电子的波函数在空位等缺陷处没有明显减弱, 被空位捕获的正电子与 Zn 原子的 3d 电子湮没的概率没有明显的变化, 因此, 单晶 Zn 和轧制 Zn 的商谱相当。

轧制 Al 的商谱明显低于单晶 Al 的商谱(见图 1(b))。金属 Al 被冷轧后也产生了空位、位错和晶界等缺陷, 但由于原子的 3p 亚轨道的角量子数相对较小 (l=1), 其 3p 电子的轨道靠离子实较近, 3p 电子的波函数在空位等缺陷处有明显减弱, 被空位捕获的正电子与 Al 原子的 3p 电子湮没的概率明显的减小, 因此, 轧制 Al 的商谱明显低于单晶 Al 的商谱。

根据上述分析, 同样可以理解图 1(b)中冷轧 Zn₆₀Al₄₀ 合金商谱略低于铸态 Zn₆₀Al₄₀ 合金商谱的原因。

2.2 Zn₆₀Al₄₀合金中的微观缺陷

采用三寿命拟合正电子寿命谱^[15], 扣除源成分和本底后得到正电子三组分的寿命(τ_1, τ_2, τ_3)和相应的强度(I_1, I_2, I_3)。它们的值随不同的样品而变化。每条谱中的第三组分寿命 τ_3 (约为 1 200 ps) 较长, 相应的强度 I_3 比较小(小于 1%), 是正电子在样品和正电子源的表面上湮没的结果。不考虑表面因素, 对第一和第二组分的强度(I_1, I_2)重新归一化, 并分别记为 I_1 和 I_2 。第二组分寿命 τ_2 是正电子在合金缺陷态湮没的寿命。正电子的平均寿命 τ_m 由 $\tau_m = I_1\tau_1 + I_2\tau_2$ 给出。表 1 所列为单晶 Zn、轧制 Zn、单晶 Al、轧制 Al、铸态 Zn₆₀Al₄₀ 合金和轧制 Zn₆₀Al₄₀ 合金的正电子寿命谱参数。

表 1 试样的正电子寿命谱参数

Table 1 Parameters of positron lifetime spectra of samples tested

Sample	τ_1 /ps	τ_2 /ps	I_1 /%	I_2 /%	τ_m /ps
Single crystal Zn	148±1	—	100.0	—	148.00
Cold-rolled Zn	146±1	341±17	86.9	13.1	171.55
Single crystal Al	165±1	—	100.0	—	165.00
Cold-rolled Al	160±1	267±7	30.8	69.2	245.56
As-cast Zn ₆₀ Al ₄₀	134±3	280±5	58.0	42.0	195.32
Cold-rolled Zn ₆₀ Al ₄₀	141±5	297±7	41.4	58.6	232.42

分析经充分退火的单晶 Al 和单晶 Zn 样品的正电子寿命谱, 获得了单一寿命(见表 1), 说明单晶 Al 和单晶 Zn 样品中的缺陷很少。本研究的寿命谱测量结果与 MACKENZIE^[16]和 SEEGER 等^[17]报道的相符。

铸态 Zn₆₀Al₄₀ 合金是多晶样品, 其第二组分的寿命和相应的强度分别为 $\tau_2=280\pm 5$ ps 和 $I_2=42.0\%$, 这说明铸态 Zn₆₀Al₄₀ 合金中存在较多的微观缺陷。由表 1 中的数据表明, Al、Zn 金属和 Zn₆₀Al₄₀ 合金经冷轧后, 由于样品中产生了空位、位错和晶界等缺陷, 而导致正电子平均寿命增加, 但增幅不同。轧制 Al 的正电子平均寿命 τ_m 比单晶 Al 的高 80.56ps; 轧制 Zn₆₀Al₄₀ 合金的平均寿命 τ_m 比铸态 Zn₆₀Al₄₀ 合金的高 37.1 ps; 轧制 Zn 的正电子的平均寿命 τ_m 比单晶锌的高 23.55 ps。轧制 Al 的正电子平均寿命 τ_m 增幅最大, 而轧制 Zn 的正电子平均寿命 τ_m 增幅最小。

Zn 原子的 3d 轨道伸展较远, 3d 电子的波函数在空位等缺陷处没有明显减弱, 3d 电子在空位等缺陷处出现的概率没有明显的变化。但对 Zn 原子的 4s 电子, 由于 Zn 原子的 4s 亚轨道的角量子数小($l=0$), 其 4s 电子的轨道靠离子实较近, 4s 电子的波函数在空位等

缺陷处有明显减弱, 4s 电子在空位等缺陷处出现的概率明显减小。轧制 Zn 中空位等缺陷处的电子密度总体减小, 正电子寿命增长, 但增幅较小。

Al 原子的 3s 和 3p 轨道靠离子实较近, 3s 和 3p 电子的波函数在空位等缺陷处有明显减弱, 它们在空位等缺陷处出现的概率明显减小。轧制 Al 中空位等缺陷处的电子密度锐减, 正电子寿命增长的幅度很大。

同样可以理解由 Zn 和 Al 组成的 Zn₆₀Al₄₀ 合金经冷轧后, 正电子寿命增幅介于轧制 Al 和轧制 Zn 之间。正电子湮没寿命谱测量结果与正电子湮没辐射 Doppler 展宽谱测量结果相符, 但根据正电子湮没辐射 Doppler 展宽谱所作出的商谱反映的主要是正电子与角量子数 l 较大的价电子(如 p 或 d 电子)的湮没的情况, 而正电子湮没寿命谱反映的主要是正电子与所有价电子湮没的信息。分析正电子湮没辐射 Doppler 展宽谱所作出的商谱发现: 当 Zn 原子和 Al 原子形成 Zn₆₀Al₄₀ 合金时, Zn 原子和 Al 原子间主要以金属键结合。以金属键结合的晶体通常具有较好的韧性, Zn₆₀Al₄₀ 合金的这种键结构特征, 可能是其具有良好的超塑性的主要原因。

3 结论

1) 单晶 Zn 和铸态 Zn₆₀Al₄₀ 合金的商谱在 $17.42 \times 10^{-3} m_0c$ 处出现一个峰, 主要是正电子与 Zn 中 3d 电子湮没的作用, 单晶 Zn 的商谱的谱峰高于铸态 Zn₆₀Al₄₀ 合金的。

2) Zn 原子的 5 个 3d 亚轨道被 10 个电子填满, 1 个 4s 亚轨道被 2 个电子填满, Zn 原子中没有尚未配对的电子。正电子湮没辐射 Doppler 展宽谱结果表明, 当 Zn 原子和 Al 原子形成 Zn₆₀Al₄₀ 合金时, Zn 原子和 Al 原子间主要以金属键结合。Zn₆₀Al₄₀ 合金的这种键结构特征, 主要是其具有良好的超塑性所致。

3) 轧制 Al 的商谱明显低于单晶 Al 的商谱, 冷轧 Zn₆₀Al₄₀ 合金商谱略低于铸态 Zn₆₀Al₄₀ 合金商谱, 而单晶 Zn 和轧制 Zn 的商谱几乎重叠。

4) Al、Zn 金属和 Zn₆₀Al₄₀ 合金经冷轧后, 由于样品中产生了空位、位错和晶界等缺陷, 而导致正电子平均寿命增加, 但其增幅不同。轧制 Al 的正电子平均寿命 τ_m 增幅最大, 轧制 Zn₆₀Al₄₀ 合金的正电子平均寿命 τ_m 增幅次之, 而轧制 Zn 的正电子平均寿命 τ_m 增幅最小。

5) 根据正电子湮没辐射 Doppler 展宽谱所作出的商谱反映的主要是正电子与角量子数 l 较大的价电子

(如 p 或 d 电子)的湮没的情况, 而正电子湮没寿命谱反映的是正电子与所有价电子湮没的信息。

REFERENCES

- [1] CARVALHO P A, VILAR R. Laser alloying of zinc with aluminum: Solidification structures[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1997, 91: 158–166.
- [2] 付 沛, 李承魁, 韩雅如, 邱嘉杰. 粉末锌铝合金时效行为的研究[J]. *上海有色属*, 2008, 29(1): 17–19.
FU Pei, LI Cheng-kui, HAN Ya-ru, QIU Jia-jie. Ageing behavior of powder metallurgical zinc-aluminum alloy[J]. *Shanghai Nonferrous Metals*, 2008, 29(1): 17–19.
- [3] 闫承俊, 王吉岱. 锌铝合金的研究现状及应用[J]. *中国铸造装备与技术*, 2005, 4: 4–7.
YAN Cheng-jun, WANG Ji-dai. Status and application of Zn-Al alloy research[J]. *China Foundry Machinery & Technology*, 2005, 4: 4–7.
- [4] 沈焕祥, 赵 品. 高强度锌铝合金研究[J]. *河北冶金*, 2001, 124(4): 14–17.
SHEN Huan-xiang, ZHAO Pin. Study of zinc-aluminium alloy with high intensity[J]. *Hebei Metallurgy*, 2001, 124(4): 14–17.
- [5] 刘永红, 张忠明, 刘宏昭, 吴子英. 锌铝合金的研究现状及应用概况[J]. *铸造技术*, 2001, 1: 42–44.
LIU Yong-hong, ZHANG Zhong-ming, LIU Hong-zhao, WU Zi-ying. Investigation actuality and general application in situation of in zinc-aluminium alloys[J]. *Foundry Technique*, 2001, 1: 42–44.
- [6] WEST R N. Positron studies of condensed mater[J]. *Adv Phys*, 1973, 22(3): 263–383.
- [7] DENG Wen, ZHONG X P, HUANG Y Y, XIONG L Y, WANG S H, GUO J T, LONG Q W. Effects of Nb and Si on densities of valence electrons in bulk and defects of Fe₃Al alloys[J]. *Science in China A*, 1999, 42(1): 87–92.
- [8] ALATALO M, KAUPPINEN H, SAARINEN K, PUSKA M J, MÄINEN J, HAUTOJÄVI P, NIEMINEN R M. Identification of vacancy defects in compound semiconductors by core-electron annihilation: application to InP[J]. *Phys Rev B*, 1995, 51(7): 4176–4185.
- [9] DENG W, HUANG Y Y, BRUSA R S, KARWASZ G P, ZECCA A. The 3d-shell electrons in NiAl-based alloys containing Cr and Co studied by positron annihilation[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2005, 386(1/2): 103–106.
- [10] DENG W, HUANG Y Y, BRUSA R S, KARWASZ G P, ZECCA A. Positron annihilation in B-doped and undoped single and polycrystalline Ni₃Al alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, 421: 228–231.
- [11] SZPALA S, ASOKA-KUMAR P, NIELSEN B, PENG J P, HAYAKAWA S, LYNN K G, GOSSMANN H J. Defect identification using the core-electron contribution in doppler-broadening spectroscopy of positron-annihilation radiation[J]. *Phys Rev B*, 1996, 54(7): 4722–4731.
- [12] 邓 文, 黄宇阳, 熊 超, 孙顺平, 温新竹. 低本底符合正电子湮没辐射多普勒展宽装置的研制[J]. *实验技术与管理*, 2008, 25(12): 61–64.
DENG Wen, HUANG Yu-yang, XIONG Chao, SUN Shun-ping, WEN Xin-zhu. Developing a system for measuring coincidence doppler broadening spectrum of positron annihilation radiation with very low background[J]. *Experimental Technology and Management*, 2008, 25(12): 61–64.
- [13] DENG W, PLISZKA D, BRUSA R S, KARWASZ G P, ZECCA A. Systematic measurements of doppler-coincidence spectra for positron annihilation in pure metals and semiconductors[J]. *Acta Phys Pol*, 2002, 101: 875–892.
- [14] GHOSH V J, ALATALO M, ASOKA-KUMAR P, NIELSEN B, LYNN K G. Calculation of the doppler broadening of the electron-positron annihilation radiation in defect-free bulk materials[J]. *Phys Rev B*, 2000, 61(15): 10092–10099.
- [15] KIRKEGAARD P. Positronfit extended: A new version of a program for analysing positron lifetime spectra[J]. *Comput Phys Commun*, 1974, 7(7): 401–409.
- [16] MACKENZIE I K. Experimental methods of annihilation time and energy spectrometry[C]//BRANDT W, DUPASQUIER A. *Positron Solid-State Physics*. Amsterdam: North Hollan, 1983: 196–264.
- [17] SEEGER A, BARNHART F, BAUER W. Positron annihilation rates in metals and semiconductors[C]//DORIKENS-VANPRAET L, DORIKENS M, SEEGER D. *Positron Annihilation*. Singapore: World Scientific, 1988: 275–277.

(编辑 李艳红)