

# AA 2037 新型连铸铝合金热轧板退火 的正电子湮没研究<sup>\*</sup>

吴世亮<sup>1)</sup> 陈叶清<sup>1)</sup> 吴奕初<sup>1)†</sup> 王少阶<sup>1)</sup> 温熙宇<sup>2)</sup> 翟同广<sup>3)</sup>

1) 武汉大学物理科学与技术学院, 武汉 430072)

2) 燕山大学材料工程学院, 河北秦皇岛 066002)

3) Chemical and Materials Engineering Department, University of Kentucky, Lexington, KY 40506-0046, USA)

(2006 年 4 月 3 日收到, 2006 年 5 月 16 日收到修改稿)

应用正电子湮没等技术对 AA 2037 连铸铝合金热轧板不同温度退火下空位-溶质相互作用及沉淀相进行了研究, 研究表明: 室温时效形成的主要是空位-铜复合体以及空位-镁-铜复合体, 温度为 200℃ 退火时由于过渡相的形成正电子平均寿命出现峰值, 符合多普勒展宽谱的商谱中观察到锰信号的存在, 表明形成了空位-镁-锰复合体或过渡相中可能存在锰, 温度高于 250℃ 时, 随着过渡相变粗、溶解, 锰信号消失, 而铜信号增强, 在 350℃ 后铜信号达到饱和, 温度为 450℃ 左右时, 稳定相形成.

关键词: 正电子湮没技术, 空位-溶质复合体, 沉淀, 退火

PACC: 7870B, 8130M, 8140C

## 1. 引 言

铝-铜系合金是应用较早, 用途很广的铝合金, 它有强烈的时效强化作用, 经时效处理后具有很高的硬度、强度, 该系合金作为航空航天工业中的基础材料已有几十年的历史, 但它还在进一步发展和完善, 而通过调整合金化元素的含量可以获得良好的综合性能, 即强度高, 耐磨性好且密度低等性能, 不断满足现在宇航工业迅速发展的要求. 在时效进程中, 合金内析出沉淀相而引起微结构及缺陷结构的变化, 研究这些变化有助于理解溶质偏聚的动力学及空位-溶质相互作用等重要信息.

正电子湮没技术在金属和合金空位型缺陷的研究中是十分有效的<sup>[1-6]</sup>. 缺陷处缺乏正电荷, 正电子极易被空位型缺陷俘获, 随后与周围电子湮没, 通过分析实验数据可以得到缺陷的状态及性质. 目前用于金属和合金缺陷研究的正电子湮没技术主要有三种: 正电子寿命谱, 正电子湮没辐射角关联, 正电子湮没辐射多普勒展宽<sup>[1-3]</sup>. 正电子寿命谱提供了缺陷种类、尺寸、大小及数量等信息, 而多普勒展宽和

角关联测量技术给出了同正电子湮没的电子动量分布信息. 符合多普勒展宽谱是最近新发展起来的一种正电子湮没技术, 由于有效地降低了本底, 可用于研究核心电子的动量信息, 鉴定缺陷周围的化学环境, 探讨空位-溶质的相互作用等<sup>[4]</sup>.

早期研究表明 Al-Cu 合金的时效进程为过饱和固溶体  $\rightarrow$  GH I 区  $\rightarrow$  GH II 区  $\rightarrow$   $\theta'$  相  $\rightarrow$   $\theta$  相 (CuAl<sub>2</sub>); 而 Al-Cu-Mg 合金的时效进程为过饱和固溶体  $\rightarrow$  S' 相  $\rightarrow$  S' 相  $\rightarrow$  S 相 (CuMgAl<sub>2</sub>). Dupasquier 等<sup>[7]</sup>研究了正电子湮没技术在轻合金中的应用, 指出该技术可以灵敏的探测时效硬化合金的微结构及缺陷变化. Melikhova 等<sup>[8]</sup>对 Al-Cu 合金的研究表明:  $\theta'$  相比母相对正电子有更大的亲和力, 很容易俘获正电子, 而  $\theta$  相与母相对正电子的亲和力几乎相等, 正电子主要在界面处而不是在  $\theta$  相内部被俘获. Somoza 等<sup>[9]</sup>研究表明 Al-Cu 合金中添加 Mg, 可以形成空位-镁-铜复合体, 影响了合金的微观结构和时效动力学, 同时 Mg 的存在稳定了 GP 带处的空位. Nagai 等<sup>[10, 11]</sup>采用符合多普勒展宽研究了 Al-Cu-Mg 合金以及 Al-Cu-Mg-Ag 合金的沉淀进程, 指出淬火空位主要以空位-镁复合体的形式存在, 随着时效的进行

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 10575077, 10475062)和湖北省自然科学基金(2004ABA006)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: ycwu@whu.edu.cn

空位-镁俘获铜原子形成了空位-镁-铜复合体;而在 Al-Cu-Mg-Ag 合金中,银的存在进一步稳定了空位-镁复合体,形成了空位-镁-银复合体. Takeda 等<sup>[12]</sup>研究表明锰的存在抑制了 Al-Cu-Mn 合金中 GP 区的形成,稳定了  $\theta'$  相的结构.

本实验研究的 AA 2037 连铸轧铝合金是美国 Aleris International 公司应用连铸轧技术生产的铝合金热轧板. 由于在连铸轧技术中,省去了铸锭、刨皮、均匀化处理及开坯等工序,相比传统的直冷铸锭技术生产的铝合金板材,连铸轧技术节约能耗约 25%,降低成本 15%,且连铸轧铝合金板材的性能与传统的直冷铸锭技术生产的铝合金板材相差无几<sup>[13]</sup>. 因此,该技术在过去 20 年的发展中受到极大重视. 此前,应用连铸轧技术已成功生产 1000, 3000, 5000 及 6000 系列铝合金板材. 本研究所用 AA 2037

合金为世界首次应用连铸轧技术生产的铝-铜合金,关于它在退火过程中内部微结构及缺陷变化有待进一步研究. 本实验主要目的是用正电子湮没等技术研究此合金在不同退火温度下的空位-溶质相互作用及沉淀相析出过程.

## 2. 实 验

### 2.1. 样 品

实验所用材料为 AA 2037 连铸轧铝合金热轧板,由 Aleris International 公司提供,其合金成分见表 1. 样品切割为 20mm × 20mm × 2mm,分为十组,每组两个样品,从 100℃ 到 500℃,以 100℃/h 的速率升温,每隔 50℃ 退火一组样品,并在不同退火温度下保温 3h,在空气中自然冷却.

表 1 AA 2037 铝合金化学成分(重量百分比)

元素	Al	Cu	Mg	Mn	Si	Zn	Ti	V	Fe	Cr	其他	
											每种	合计
含量%	余	1.48	0.45	0.24	0.06	0.02	0.02	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.05	< 0.15

### 2.2. 符合多普勒展宽能谱测量(CDB)

符合多普勒展宽设备采用两个高纯锗(HPGe)探头,它们的能量分辨率略有差别:对 1.33 MeV 的  $\gamma$  光子的能量分辨率分别为 1.76keV 和 1.64keV. 两个探头在同一直线上,相距 20cm,样品和源采用夹心式结构,所有测量在室温下进行. 实验采用的是  $^{22}\text{NaCl}$  (5.6 × 10<sup>5</sup> Bq) 的放射源, Ti 膜封装,半衰期为 2.6 年. 实验每组样品收集的总计数为 1500 万,计数率为 60/s. 由于有效的降低了本底,因此符合多普勒展宽技术可鉴定不同样品中的缺陷化学环境及研究空位-溶质的相互作用. 关于符合多普勒展宽谱更详细的描述可参阅文献 [4].

### 2.3. 正电子寿命谱测量(PALS)

实验设备为快-快符合正电子寿命谱仪,时间分辨率为 270ps,实验采用同符合多普勒展宽测量相同的放射源,实验在室温下进行,每组样品收集的总计数为 400 万,计数率为 400/s. 实验收集的数据用 PATFIT 程序拟合,我们用正电子寿命的平均寿命  $\tau$  来描述缺陷性质,这是由于 AA 2037 铝合金化学成分很多,且时效硬化引起的微结构及缺陷变化比较复杂,而平均寿命受寿命谱成分细节变化影响很小,

可信度较高. 此外,实验结果也便于与前人工作进行比较,如 Melikhova 等<sup>[8]</sup>对 Al-Cu 合金, Nagai 等<sup>[10, 11]</sup>对 Al-Cu-Mg, Al-Cu-Mg-Ag 合金,以及 Dlubek 等<sup>[15]</sup>对 2024 及 7010 铝合金的时效和沉淀过程的研究,他们分析寿命谱都是采用正电子平均寿命来描述和讨论.

### 2.4. 电阻测量及差示扫描量热法测量(DSC)

电阻测量是缺陷测量的一种有效方法,实验中使用 SIGMASCOPE SMP1 型电导测试仪测量了合金电阻随退火温度的变化. 为验证样品内沉淀相析出的过程,我们还测量了样品的 DSC 曲线,实验采用的设备是德国制造 NETZSCH 200 PC 型 DSC 测量仪,升温速率为 10℃/min.

## 3. 实验结果及讨论

早期工作表明,金属在淬火或形变过程中会有大量的空位型缺陷产生,退火可以消除金属材料的缺陷,在退火过程中,随着退火温度升高材料中空位发生迁移、聚集,最后消失,但是合金满足以下两个基本性质: 1) 主要合金元素的溶解度随温度的升高而增加,即淬火形成过饱和固溶体; 2) 在室温或稍高

温有细微而密集的非平衡析出物时,有析出强化行为,即在某些合金中,随着温度的变化,溶质会发生偏析、沉淀,同时伴随有新相的生成以及再结晶等,从而引入了大量的界面等缺陷.因此有些合金在退火过程中缺陷的变化是十分复杂的,不仅是空位的聚集后减少,而且在一定温度下会出现空位-溶质复合体,导致缺陷化学环境的变化.

图 1 给出了 AA 2037 铝合金热轧板电阻随退火温度的变化.由图 1 可知:在温度低于 250℃ 时,与其他金属及合金材料一样,在退火过程中空位和位错等发生了迁移、聚集、回复,阻碍电子运动的缺陷减少,从而电阻变小.250℃ 到 350℃ 之间,电阻开始缓慢增大,350℃ 后电阻增大很快,这主要有两方面的原因:一是由于沉淀相的形成引入了新的缺陷;二是由于合金的再结晶生成的晶粒很细小,晶界增多,阻碍电子的运动,使电阻增大.林少非等<sup>[16]</sup>研究了质子辐照对纯铝和铝合金电阻率的影响,指出质子辐照产生了大量嬗变杂质保留了缺陷团,使电阻增大,辐照产生的点缺陷有利于沉淀相的溶解,将减小电阻,即沉淀相的形成会增大电阻;张克勤等<sup>[17]</sup>研究了退火温度对铁合金电阻的影响,指出由于金属退火时将产生回复导致电阻减小,当退火温度高于再结晶温度后,由于合金再结晶,晶界增多,电阻增大.我们的结果与他们的分析一致.

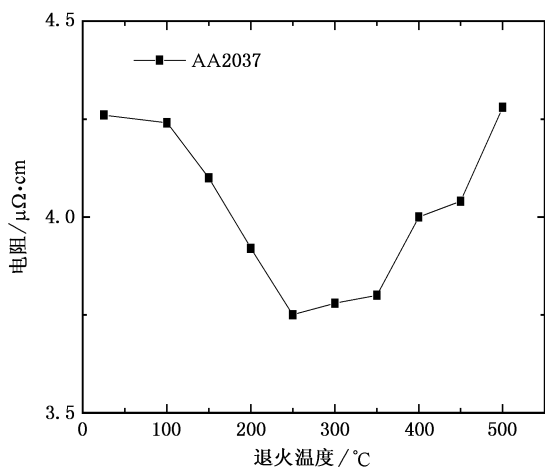


图 1 电阻随退火温度的变化

图 2 给出了 AA 2037 铝合金  $S$  参数随退火温度的变化.由图中看出:温度低于 350℃ 时, $S$  参数呈下降趋势,当温度高于 350℃ 时, $S$  参数增大.这是由于退火过程中空位和位错等缺陷回复,正电子和自由电子湮没概率变小, $S$  参数下降.随着退火温度

的升高,由于沉淀相的形成以及合金再结晶引入了缺陷,使得缺陷浓度增大,正电子在缺陷处被俘获,与自由电子湮没概率增大, $S$  参数增大.比较图 1 和图 2,可以看到电阻和  $S$  参数随退火温度变化的趋势总体上是一致的:在温度低于 250℃ 时,变化的趋势都是下降,350℃ 以后,电阻和  $S$  参数都随温度升高而增大,但在 250℃ 到 350℃ 之间,电阻开始缓慢增大,而  $S$  参数却在下降. Dupasquier 等<sup>[7]</sup>指出在时效硬化合金中,正电子湮没反映的主要是时效引起的微结构及缺陷的变化,而不是合金形核和再结晶引起的结构变化.所以在 250℃ 到 350℃ 之间, $S$  参数下降反映的是与时效相关的缺陷浓度降低,而此时合金可能已经开始形核并部分发生再结晶<sup>[13]</sup>,引入了缺陷,使得总缺陷浓度开始增大,阻碍电子运动.

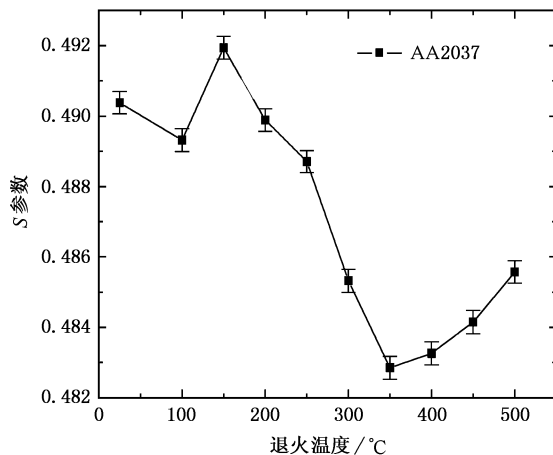


图 2  $S$  参数随退火温度的变化

图 3 给出了 AA 2037 铝合金正电子平均寿命随退火温度的变化.与图 2 中  $S$  参数随退火温度的变化不同,正电子平均寿命随退火温度的变化比较复杂.最初随着退火温度的升高,正电子平均寿命增大,温度为 200℃ 时出现峰值,正电子平均寿命达 202 ps,然后开始降低,到 350℃ 时,正电子平均寿命为 193 ps,温度继续升高,正电子平均寿命又开始增大.事实上,在退火过程中由于溶质的偏聚、沉淀相的形成,可能有多种因素影响正电子湮没(例如,母相和沉淀之间的界面,某类原子富集区对正电子有较强的亲和力,热处理或沉淀时产生的空位-杂质对以及正电子在沉淀处的局域化等<sup>[18]</sup>),使正电子平均寿命发生复杂的变化.在温度低于 200℃ 时平均寿命  $\tau$  总体上是增大的,这是由于过渡相(如  $S'$  相,

$\theta'$ 相等)的形成以及退火过程中空位周围铜原子的减少,200℃到350℃之间 $\tau$ 的减小是由于过渡相的变粗、溶解,正电子俘获率降低;350℃后,平均寿命 $\tau$ 增大是由于稳定相(如S相, $\theta$ 相等)的形成产生了大量的界面缺陷.这和Dlubek等<sup>[15]</sup>的研究结果基本一致,只是AA 2037铝合金正电子平均寿命更大一些(图3,最低平均寿命为193ps).由于锰分散在基体中并不影响正电子寿命<sup>[19]</sup>,同时Dlubek等<sup>[15]</sup>研究还表明Al-Cu-Mg合金中随着镁原子含量的增加(镁单空位寿命为253ps),正电子平均寿命增大,由此可以推断在镁含量相当的情况下,AA 2037铝合金正电子平均寿命更大是由于合金中含有更少的铜原子(铜单空位寿命为180ps).

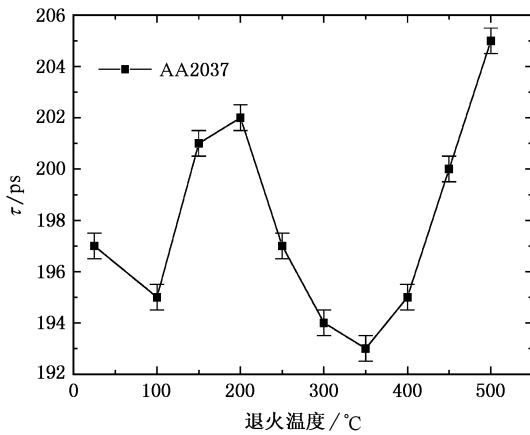


图3 平均寿命随退火温度的变化

由于实验所用AA 2037铝合金是连铸热轧板,热加工形成的独立空位移动到表面消失,并且大的空位团的崩溃形成了位错缺陷,因此正电子湮没技术反映的并不是最初的自由空位浓度,而是较难运动的空位-溶质复合体浓度.符合多普勒展宽谱的高动量区域反映的是核心电子的湮没,不同原子周围的电子壳层分布不同,正电子在不同原子周围的特点也不一样,仅从线性参数无法得到这一信息,而通过适当的选择参考样品,作出归一化的商谱曲线就可以得到缺陷周围元素信息,从而起到元素鉴别作用.对于铝合金一般都以纯铝多普勒展宽谱作参考谱,在此参考谱下各元素的商谱可参阅文献[4].图4给出了以纯铝多普勒展宽谱为参考谱,纯铜,纯镁以及纯锰的符合多普勒展宽谱的商谱曲线.由图可知,纯铜的商谱中动量在 $15 \times 10^{-3} m_0 c$ (由3d电子贡献)后有一个长的尾巴;纯锰的商谱在动量为 $10 \times 10^{-3} m_0 c$ (由3d电子贡献)处有一个宽峰;纯镁的

商谱在 $7 \times 10^{-3} m_0 c$ 处有一个最小值,在 $11 \times 10^{-3} m_0 c$ 处有一个小峰;但相对于纯铜和纯锰,纯镁的商谱相对强度变化很小,因此在镁含量较低时,可能很难观察到镁的信号.

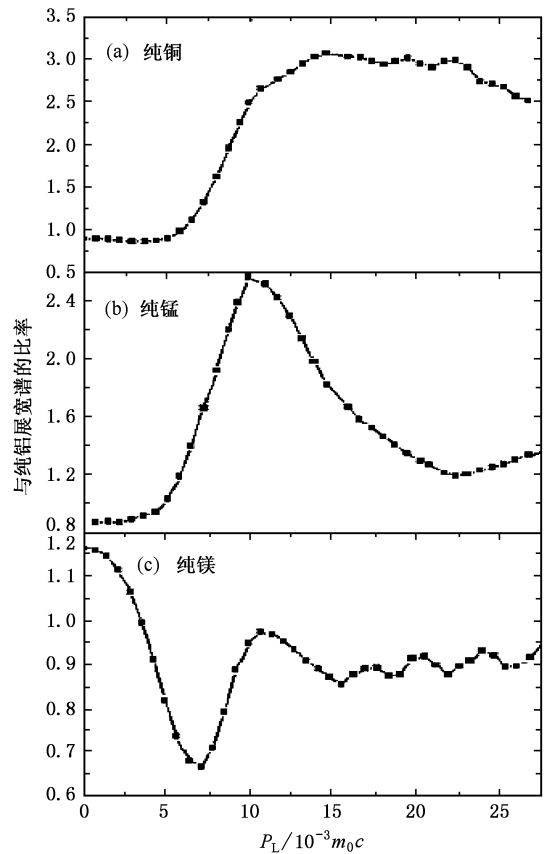


图4 纯铜(a)纯锰(b)纯镁(c)的符合多普勒展宽谱的商谱曲线(b数据引自文献[20])

图5给出了以纯铝多普勒展宽谱为参考谱,AA 2037铝合金在不同温度退火后的符合多普勒展宽谱的商谱曲线.图5(a)是从室温到250℃的商谱曲线,(b)是从250℃到500℃的商谱曲线.如图5(a)所示,室温时铜的信号比较明显(参照图4(a)),即此时形成的空位-溶质复合体中必有铜的存在,但在图中几乎没有观察到镁的信号.Nagai等<sup>[10,11]</sup>以及Somoza等<sup>[3,9]</sup>对铝-铜-镁合金的研究表明:由于镁原子比铝原子更大,同时镁的添加改变了影响溶质偏聚动力学的激活能,空位-镁复合体更易于形成,随着时效的进行,空位-镁俘获了铜原子形成了空位-镁-铜复合体,作为铜进一步偏聚的晶胚,本实验所用样品已经在室温下时效了很长的时间,又根据图5(a)中观察到明显铜的信号,因此我们认为合金中存在空位-镁-铜复合体.只是由于镁的电子壳层结

构与铝的电子壳层结构非常接近, 镁的商谱曲线变化很小(参看图 4(c)), 并且镁的含量较低(0.45wt%), 因此通过商谱很难发现镁的信号<sup>[10]</sup>. 但是如果只形成空位-镁-铜复合物, 继续退火, 由于铜的偏析、聚集, 铜的信号将会继续增强<sup>[11]</sup>, 而从图 5 看到铜信号在 100℃ 时有所增强, 随后明显减弱, 这说明 100℃ 时样品中还存在空位-铜复合物, 在退火过程中由于空位浓度的降低, 铜信号减弱. 综上所述, 室温时效后合金内空位主要以空位-铜复合物以及空位-镁-铜复合物的形式存在. 在 200℃ 和 250℃ 退火时, 从符合多普勒商谱中观察到锰的信号(参看图 4(b)), Nagai 等<sup>[10]</sup> 利用符合多普勒研究 Al-Cu-Mg-Ag 合金时, 得出由于银的存在形成了空位-镁-银复合物, 在商谱曲线中观察到明显的银的信号, 由此可以推断图 5(a) 中锰的信号可能是由于形成了空位-镁-锰复合物引起的. 此外, 最近 Li 等<sup>[21]</sup> 在研究 AA 2026 铝合金疲劳性能时, SEM 及 EDS 结果表明沉淀相中有大量锰的存在. 而 AA 2037 铝合金与 AA 2026 铝合金成分相似, 所以 AA 2037 铝合金在时效过程中生成的沉淀相中可能有锰的存在, 正电子在沉淀相中与锰核心电子湮没也可能是引起图 5(a) 中锰信号的因素, 这还有待于用高分辨率 TEM 及 EDS 等实验方法作进一步研究. 如图 5(b) 所示, 退火温度高于 250℃ 时锰信号开始消失; 而铜信号逐渐增强并在 350℃ 后趋于饱和. 我们认为锰信号的消失是由过渡相的变粗、溶解导致了锰的溶解引起的, 而铜信号的增强一方面是由过渡相变粗, 但同时稳定相开始形成, 引入了界面缺陷, 正电子在界面处被俘获, 和此处铜原子的核心电子湮没概率增大引起的; 另外, 在讨论电阻和  $S$  参数随退火温度变化时提到: 在 250℃ 后, 合金可能已经开始形核并部分发生再结晶<sup>[13]</sup>, 虽然正电子在晶界附近被俘获的概率不大, 但由于退火样品在冷却过程中产生的空位促进了铜原子的移动, 使之可能在晶界上偏聚, 因此在晶界附近被俘获的正电子和铜原子核心电子湮没概率相对较大, 这也可能是 250℃ 后商谱中铜信号增强的原因.

为了证实 AA 2037 铝合金不同温度退火沉淀相析出过程, 我们进一步测量了 DSC 曲线, 其结果如图 6 所示, 由图可知, 在温度为 220℃ 以及 450℃ 左右时分别出现了放热峰, 说明此时有沉淀相的形成. 这个结果证实我们对正电子湮没结果分析的推测, 其中峰  $a$  是由过渡相(如  $\theta'$ ,  $S'$  相等)的形成引起

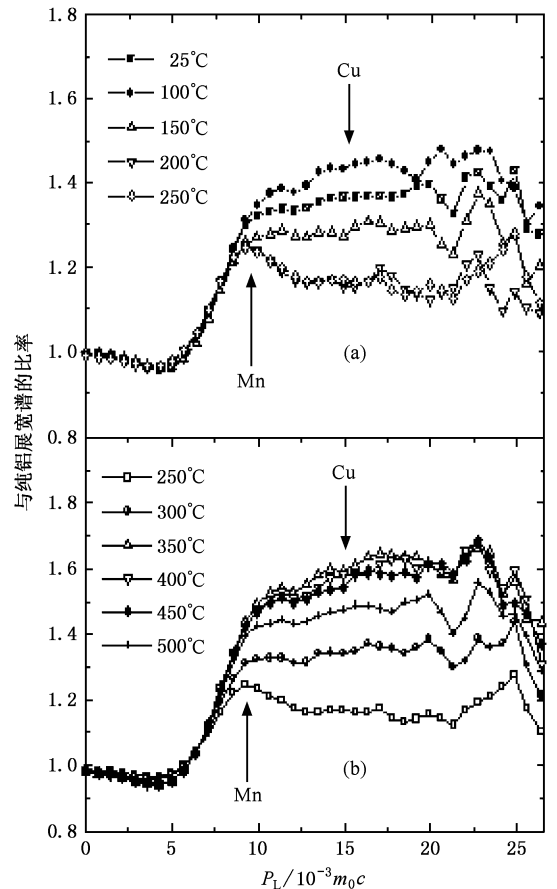


图 5 AA 2037 铝合金不同温度退火后的符合多普勒展宽谱的商谱曲线

的峰  $b$  是由稳定相(如  $\theta$ ,  $S$  相等)的形成引起的, 由于实验样品是连铸热轧板, 已经在室温下时效了很长时间, GP 区早已形成, 因此在 DSC 曲线中并没有看到由 GP 区形成引起的放热峰.

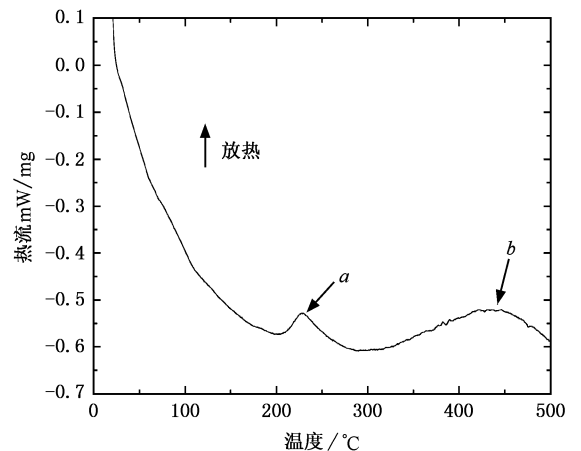


图 6 AA 2037 铝合金的 DSC 曲线

## 4. 结 论

本文采用正电子湮没技术,电阻测量及 DSC 方法,研究了 AA 2037 连铸轧铝合金热轧板不同温度下退火后的沉淀相析出及缺陷变化,得出以下结论:

1. 电阻与多普勒展宽  $S$  参数随退火温度的变化趋势基本一致.退火温度低于 250℃ 时,电阻和  $S$  参数的下降是由于退火过程中空位型缺陷的迁移,聚集,回复;当温度高于 350℃ 时,电阻和  $S$  参数的增大主要是由于合金内析出了稳定相(如  $\theta$ ,  $S$  相等),界面缺陷增多.

2. 正电子平均寿命及 DSC 曲线分析表明:样品低温退火时首先析出过渡相(如  $\theta'$ ,  $S'$  相等),随着

退火温度的升高,进一步析出稳定相.正电子平均寿命在 200℃ 出现峰值,对应于过渡相形成及随后的长大变粗、溶解;350℃ 后寿命的增大,对应于稳定相的析出,这与电阻,  $S$  参数的变化规律一致.

3. 符合多普勒展宽谱分析表明:室温时效样品中空位主要以空位-铜以及空位-镁-铜复合体的形式存在.随着退火温度的升高,铜信号减弱;200℃ 退火时出现明显的锰信号,这表明析出的过渡相中含有锰或形成了空位-镁-锰复合体;退火温度进一步升高,锰信号逐渐减弱,而铜信号再次出现并在 350℃ 后达到饱和.

本实验研究所用 AA 2037 连铸轧铝合金样品为美国 USAFOS 资助的研究项目(FA9550-04-1-0457)所加工.

- [ 1 ] Puska M J, Nieminen R M 1994 *Rev. Mod. Phys.* **66** 841
- [ 2 ] Dupasquier A, Folegati P, Diego N de, Somoza A 1998 *J. Phys. Condens. Matter* **10** 10409
- [ 3 ] Somoza A, Dupasquier A, Polmear I J, Folegati P, Ferragut R 2000 *Phys. Rev. B* **61** 14454
- [ 4 ] Brusa R S, Deng W, Karwasz G P, Zecca A 2002 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **194** 519
- [ 5 ] Wu Y C, Zhu Z Y 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 406 (in Chinese) [ 吴奕初、朱梓英 1997 物理学报 **46** 406 ]
- [ 6 ] Chen Z P, Zhang J C, Cheng G S, Li X G, Zhang X S 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 550 (in Chinese) [ 陈镇平、张金仓、程国生、李喜贵、章讯生 2001 物理学报 **50** 550 ]
- [ 7 ] Dupasquier A, Kögel G, Somoza A 2004 *Acta Materialia* **52** 4707
- [ 8 ] Melikhova O, Čížek J, Procházka I et al 2001 *Materials Structure* **8** 2
- [ 9 ] Somoza A, Petkov M P, Lynn K G 2002 *Phys. Rev. B* **65** 094107
- [ 10 ] Nagai Y, Honma T, Tang Z, Hono K, Hasegawa M 2002 *Philosophical Magazine A* **82** 1559
- [ 11 ] Nagai Y, Murayama M, Tang Z, Nonaka T, Hono K, Hasegawa M 2001 *Acta Materialia* **49** 913
- [ 12 ] Takeda M, Komatsu A, Ohta M, Shirai T, Endo T 1998 *Scripta Materialia* **39** 1295
- [ 13 ] Yu X F, Wen X Y, Zhao Y M, Zhai T 2005 *Mater. Sci. Eng. A* **394** 376
- [ 14 ] Szpala S, Asoka-Kumar P, Nielsen B, Peng J P, Hayakawa S, Lynn K G 1996 *Phys. Rev. B* **54** 4722
- [ 15 ] Dlubek G, Lademann P, Krause H, Krause S, Unger R 1998 *Scripta Materialia* **39** 893
- [ 16 ] Lin S F 1999 *Atomic Energy Science and Technology* **33** 30 (in Chinese) [ 林少非 1999 原子能科学技术 **33** 30 ]
- [ 17 ] Zhang K Q, Zhang X Y 2000 *Physics Examination and Testing* **3** 5 (in Chinese) [ 张克勤、张湘义 2000 物理测试 **3** 5 ]
- [ 18 ] Wang J C, You F Q, Yin J L, Gao G H, Liang L, Duan Y 2001 *Chin. Phys.* **10** 974
- [ 19 ] Puska M J, Lanki P, Nieminen R M 1989 *J. Phys. Condens. Matter* **1** 6081
- [ 20 ] Sato K, Baier F, Rempel A A, Sprengel W, Schaefer H E 2003 *Phys. Rev. B* **68** 214203
- [ 21 ] Li J X, Zhai T, Garratt M D, Bray G H 2005 *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgical and Materials Science* **36** 2529

# Positron annihilation study of hot band of a continuous cast AA 2037 Al alloy after annealing \*

Wu Shi-Liang<sup>1)</sup> Chen Ye-Qing<sup>1)</sup> Wu Yi-Chu<sup>1)†</sup>

Wang Shao-Jie<sup>1)</sup> Wen Xi-Yu<sup>2)</sup> Zhai Tong-Guang<sup>3)</sup>

1) *Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072, China*

2) *School of Materials Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066002, China*

3) *Chemical and Materials Engineering Department, University of Kentucky, Lexington, KY 40506-0046, USA*

( Received 3 April 2006 ; revised manuscript received 16 May 2006 )

## Abstract

Hot band of a continuous cast AA 2037 Al alloy was annealed at different temperatures ranging from room temperature to 500°C for 3h. Vacancy-solute interaction and precipitates in the hot band samples during annealing were investigated by positron annihilation techniques, coincidence Doppler broadening (CDB) of positron annihilation radiation and positron lifetime spectroscopy, and other methods. The experimental results indicated that there existed V-Cu and V-Cu-Mg complexes at room temperature. At 200°C, positron mean lifetime shows a peak value because of the formation of semicoherent particles. The characteristic shape of Mn was observed in the CDB ratio curve, which indicated the formation of V-Mg-Mn complexes or the existence of Mn clusters in the semicoherent particles. Above 250°C, coarsening and dissolution of semicoherent particles resulted in the decrease of mean lifetime and disappearance of the Mn signal, but the Cu signal increased clearly with annealing temperature. After 350°C, the Cu signal tended to saturation, which reflected that the Cu dissolved might agglomerate and cluster with vacancies during cooling the sample to room temperature, while new increase of mean lifetime might be attributed to the formation of incoherent phase, which was verified by DSC curve.

**Keywords** : positron annihilation technique, vacancy-solute complex, precipitation, anneal

**PACC** : 7870B, 8130M, 8140C

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10575077, 10475062 ) and the Natural Science Foundation of Hubei Province, China ( Grant No. 2004ABA006 ).

† E-mail : ycwu@whu.edu.cn