

热处理对 2519 铝合金接头组织及性能的影响*

洪张飞¹ 国旭明¹ 杨成刚¹ 张劲松¹ 张亚东²

1. 中国科学院金属研究所 沈阳 110016

2. 沈阳科仪视讯系统工程有限公司 沈阳 110003

摘 要 研究了焊后时效及固溶 + 时效热处理对 2519 铝合金焊接接头组织和力学性能的影响。结果表明, 时效处理后, 处于欠时效态的焊缝析出强化相增加, 硬度升高, 而过时效态的热影响区软化区组织和硬度没有明显变化, 焊接接头的强度略微提高, 塑性下降。固溶 + 时效处理后, 焊缝中网状共晶减少, 焊缝和热影响区软化区内的析出相形态变为细小的针状, 且数量增加, 焊缝金属硬度明显提高, 热影响区的软化现象消失, 焊接接头的强度和塑性显著增加。

关键词 金属材料, 2519 铝合金, 焊接接头, 焊后热处理

分类号 TG113

文章编号 1005-3093(2006)02-0171-05

Effect of heat treatment on the microstructures and properties of welded joint of 2519 aluminum alloy

HONG Zhangfei¹ GUO Xuming^{1**} YANG Chenggang¹

ZHANG Jinsong¹ ZHANG Yadong²

1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

2. Shenyang Science Apparatus & Visual Communication System Engineering co., LTD., Shenyang 110003

* Supported by National Hi-Tech Research and Development Program of China No.2002AA305402.

Manuscript received December 12, 2005; in revised form January 17, 2006.

** To whom correspondence should be addressed, Tel:(024)23971912, E-mail:xmguo@imr.ac.cn

ABSTRACT Effect of both post-weld aging and solid solution plus aging treatment on the microstructures and mechanical properties of welded joint of 2519 aluminum alloy was investigated. The results showed that after aging treatment more precipitates formed in ill-aged weld metal, hardness of which increased as a result. However, microstructure and hardness of soft heat-affected zone (HAZ) that suffered over-aging didn't change obviously. The aging treatment increased strength of the welded joint a little and reduced ductility. After solid solution plus aging treatment the continuous and netlike eutectics in weld metal were decreased. At the same time a great number of needlelike precipitates emerged in both weld metal and soft HAZ, which increased hardness of weld metal farther, eliminated softening of HAZ, enhanced strength and ductility of welded joint.

KEY WORDS metallic materials, 2519 Al alloy, welded joint, post-weld heat treatment

高强铝铜合金又称为硬铝合金, 可热处理强化, 具有很高的室温强度及良好的高温和超低温性能^[1], 而广泛应用于飞机和汽车的结构件^[2]以及轻型战车的防护装甲等^[3]。2519 铝铜合金是在 2219 铝铜合金^[4~6]的基础上添加适量 Mg 元素, 获得了更高的强度和抗弹性能, 成为首选的高强轻质装甲材料^[3,7~9]。

高强铝铜合金的熔化焊, 不仅焊接接头的强度低(接头的强度系数仅为焊前母材的 60% 左右), 热影响

区的软化现象也很严重。优化焊接工艺参数、向焊缝金属中添加孕育剂以及采用新的焊接方法(如, 激光—MIG 复合焊或摩擦搅拌焊)等措施只能部分改善接头的力学性能^[4,6,10~12]。本文研究焊后热处理 2519 铝铜合金对其接头组织和力学性能的影响及其机制。

1 实验方法

实验用的母材为 2519-T87 铝合金板, 尺寸为 300 mm×150 mm×20 mm, 坡口形式为 X 形, 坡口角度为 70°, 对接接头。焊接设备采用德国 CLOOS 公司生产的 Quinto503 焊机, 焊丝为 ER2319, 直径为 1.6 mm, 保护气体为纯度 99.9% 的氩气。母材和焊丝

* 国家八六三计划新材料领域 2002AA305402 资助项目。

2005 年 12 月 12 日收到初稿; 2006 年 1 月 17 日收到修改稿。

本文联系人: 国旭明

表 1 母材和焊丝的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of base metal and filler wire (mass fraction, %)

Material	Cu	Mn	Mg	Zr	Ti	Fe	Si	V	Al
2519 base metal	5.8	0.28	0.22	0.21	0.06	0.15	0.06	0.02	Bal.
ER2319 filler wire	5.96	0.30	0	0.12	0.17	0.14	0.04	0.06	Bal.

表 2 脉冲 MIG 焊接工艺参数

Table 2 Pulsed MIG welding parameters

Parameters	Wire drive /m·min ⁻¹	Pulse frequency /Hz	Peak voltage /V	Pulse time /ms	Background current /A	Welding speed /cm·min ⁻¹	Average current /A	Average voltage /V
Value	6.8	220	30	2.2	80	36.5	236	27

的化学成分和焊接工艺参数分别列于表 1 和表 2。焊前对坡口进行清洁处理, 采用脉冲 MIG 焊接, 正、反面各焊两道, 层间温度不能高于 100 °C。焊接后, 用机械切割法将试板的两端各去除 30 mm, 然后截取焊接接头的拉伸试样和金相试样。

拉伸实验使用光滑的圆棒拉伸试件, 直径 10 mm, 标距长度 50 mm。拉伸试验在 AG-250KNE 电子拉伸试验机上进行, 拉伸速率是 1.2 mm/min。用 FM-700 维氏硬度仪测量焊接接头横截面从焊缝至母材的硬度变化, 压头载荷为 500 g, 持续时间 15 s。用莱卡 MEF-4A 光学显微镜观察金相显微组织变化, 用牛津 TECNAI G² 20 透射电镜观察晶内析出相形貌及分布。

对 2519 铝合金焊接接头的焊后时效热处理条件为: 200 °C × 23 h, 焊后固溶 + 时效热处理条件为: 530 °C × 2 h + 200 °C × 23 h。

2 结果与讨论

2.1 焊后时效处理对 2519 铝合金焊接接头组织的影响

由图 1 可见, 焊缝的金相组织为柱状枝晶 (图 1a), α Al 为基体, 在晶界和枝晶间分布有连续网状的 α Al-CuAl₂ 共晶。其原因是, 在焊接熔池的凝固过程中, 贫溶质的 α Al 固溶体先行结晶, 大部分溶质原子 (主要是铜) 被排挤到晶界和枝晶间的低熔点液相中, 这些富溶质的液相在凝固的最后阶段沿晶界与枝晶间形成了网状的共晶组织。在焊缝中析出相的形貌呈透镜状, 且数量较少 (图 1b、c); 而热影响区软化区析出相的形貌呈短棒状, 不仅数量更少, 而且粗化明显。透镜状的析出相为 θ' , 粗大的短棒状析出相为 θ ^[4]。对于铝合金, 焊缝金属的冷却速度非常快, 析出相来不及从已凝固的 α Al 基体中充分的时效析出, 因此形成了数量较少的中间过渡相 θ' , 故焊缝金属处于

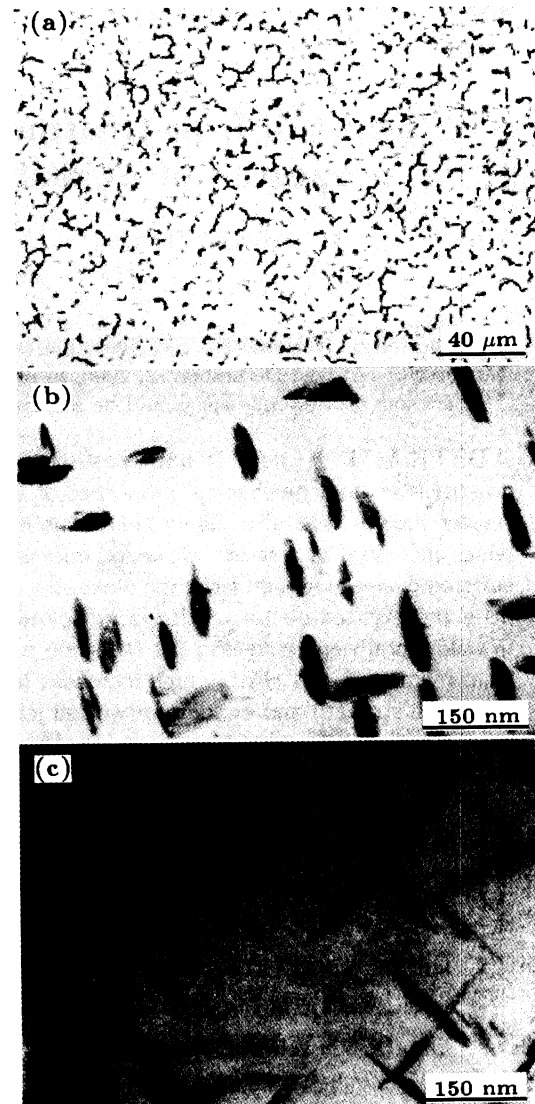


图 1 焊态下焊接接头的金相组织和析出相形貌

Fig.1 Microstructures and precipitates morphology of welded joint (a) microstructures of weld, (b) Precipitates morphology of weld, (c) precipitates morphology of soft HAZ

欠时效状态. 而热影响区软化区在焊接热循环的作用下, 虽然作用时间短, 但由于经历的温度高, 母材中原有的析出相发生了聚集长大, 并从 αAl 基体脱溶、析出, 形成了稳态的 θ 相, 即发生了过时效.

图 2 表明, 时效处理对焊缝金相组织和热影响区软化区析出相形貌没有明显影响 (图 2a 和 c), 但使焊缝析出相数量增加 (图 2b). 其原因是时效处理温度 ($200\text{ }^\circ\text{C}$) 远低于 2519 合金的固溶温度, 焊缝共晶组织中的 CuAl_2 不会溶于 αAl 基体, 仍然保持共晶形态分布于晶界. 同时, 如此低的时效温度也不会使

热影响区软化区内形成的稳态 θ 相的形状发生改变. 但由于焊缝处于欠时效状态, 基体为过饱和的 αAl , 时效处理使焊缝中原来未来得及析出的第二相得以从 αAl 基体中继续析出.

2.2 焊后固溶 + 时效处理对 2519 铝合金焊接接头组织的影响

图 3 为 $530\text{ }^\circ\text{C} \times 2\text{ h}$ 固溶 + $200\text{ }^\circ\text{C} \times 23\text{ h}$ 时效处理后焊缝的金相组织以及焊缝和热影响区软化区析出相形貌. 可以看出, 无论是焊缝的金相组织还是焊缝和热影响区软化区析出相的形貌都发生了明显的

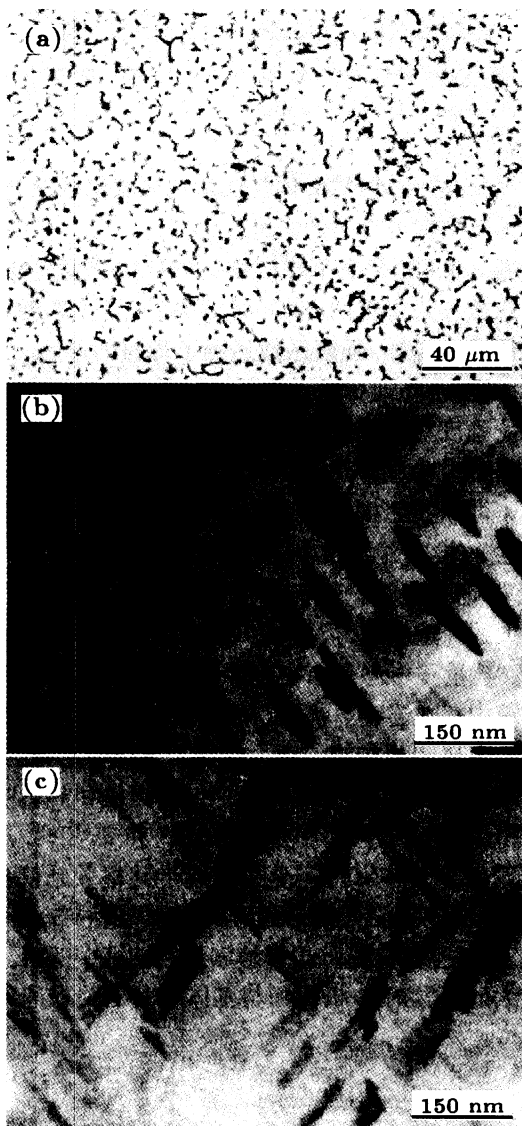


图 2 $200\text{ }^\circ\text{C} \times 23\text{ h}$ 直接时效处理后焊接接头的金相组织和析出相形貌

Fig.2 Microstructures and precipitates morphology of welded joint after aging treatment at $200\text{ }^\circ\text{C}$ for 23 h (a) microstructures of weld, (b) precipitates morphology of weld, (c) precipitates morphology of soft HAZ

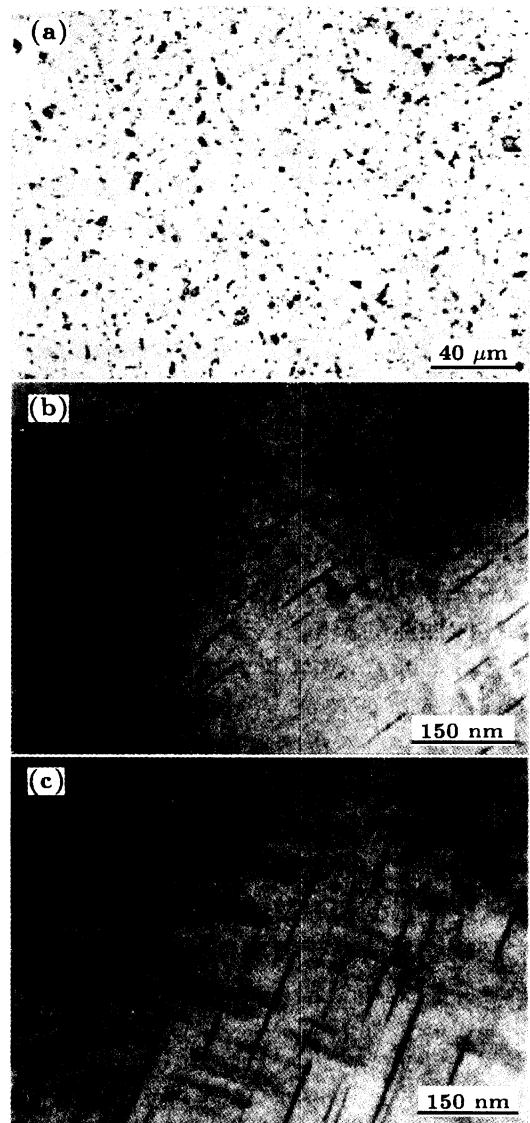


图 3 固溶 + 时效处理后焊接接头的金相组织和析出相形貌

Fig.3 Microstructures and precipitates morphology of welded joint after solid solution plus aging treatment (a) microstructures of weld, (b) precipitates morphology of weld, (c) precipitates morphology of soft HAZ

改变,焊缝共晶组织的连续网状分布特征消失,数量减少(图 3a),而焊缝和热影响区软化区析出相形貌由透镜状和短棒状变成了细小的针状,数量明显增加(图 3b 和 c).这是由于 530 °C 的固溶处理使焊缝共晶组织中的 CuAl_2 大部分溶解进入 αAl 基体,而且使焊缝和热影响区软化区中的析出相也全部溶于 αAl 基体中,淬火冷却后 αAl 固溶体处于过饱和状态,在随后的 200 °C 低温时效过程中,第二相从过饱和 αAl 固溶体中重新析出的结果.研究表明^[13],铝铜合金的时效过程为: $\alpha\text{Al}_3 \rightarrow \text{GP 区} \rightarrow \theta'' \rightarrow \theta' \rightarrow \theta$. 其中 αAl_3 是淬火状态的过饱和 αAl 固溶体,铜原子均匀随机地分布在铝基体点阵中,基体中有高浓度空位;在时效初期铜原子在基体点阵的某些区域开始聚集,形成一种富铜区,呈圆盘状,尺寸极小,数量极大,称为 GP 区,它的形成受空位影响较大,GP 区是时效过程中出现的预沉淀产物;随着时效的进行,铜原子继续富集,出现中间过渡相 θ'' 和 θ' . 其中先析出的 θ'' 相呈细针状,尺寸比 GP 区大,而第二种过渡相 θ' 呈针状或者透镜状,这与时效温度和时效时间有关,尺寸比 θ'' 相的更大.从析出相的形貌可以看出,2519 铝合金焊缝和热影响区软化区经过 530 °C \times 2 h 固溶 + 200 °C \times 23 h 时效处理后析出的是 θ'' 和 θ' 两种中间过渡相的混合物(图 3b、c).如果此时继续时效处理, θ' 相将完全脱溶变成稳态相 θ ,合金的强度硬度迅速下降.

2.3 焊后热处理对 2519 铝合金焊接接头硬度分布及拉伸性能的影响

从图 4 可见,焊态下 2519 铝合金焊接接头出现了两个硬度低值区,一个是焊缝金属,硬度在 HV68 左右;另一个位于焊接热影响区内距离熔合线约 3 mm 处,硬度在 HV90 左右,此即为热影响区的软化区;此后硬度逐渐上升直至母材的硬度.焊接接头经过 200 °C \times 23 h 的时效热处理后,焊缝金属的硬度得到明显提高,达到 HV95 左右,而热影响区软化区的硬度没有明显变化.焊接接头经过固溶 + 时效热处理后,不仅焊缝金属的硬度进

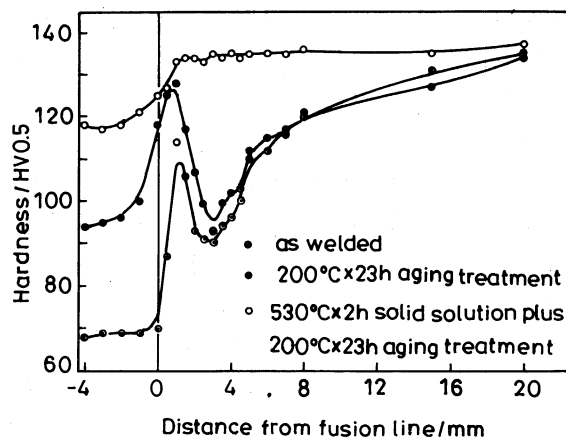


图 4 焊接接头从焊缝到母材的硬度分布曲线

Fig.4 Hardness curves of welded joint from weld metal to base metal

一步提高,达到 HV116,而且热影响区软化区消失,硬度值恢复到接近母材的水平.

表 3 表明,焊态下焊接接头的抗拉强度最低,其强度系数仅为母材的 62%;时效热处理后,焊接接头的强度有所提高,强度系数达到了母材的 65%,但塑性由 4.5% 下降到 3.2%;固溶 + 时效热处理不仅焊接接头的强度显著提高,强度系数达到了母材的 88%,尤其是塑性明显升高,由 4.5% 升高到 6.4%.

不同状态下焊接接头的硬度分布和力学性能与其对应的接头组织和析出相形貌密切相关^[14,15].2519 铝铜合金是一种析出强化型合金,其焊缝具有共晶型的铸造组织,焊接接头的组织形貌与析出相的性质、数量和形态分布决定了焊接接头的力学性能.当焊缝中存在连续网状分布的共晶组织时,由于这些脆性的金属间相在拉伸应力的作用下很容易开裂,焊缝金属的强度和塑性都降低^[16];当焊缝和热影响区中的析出相为细小和均匀分布的 θ'' 和 θ' 相时,这两种过渡相与基体保持完全共格或半共格关系使基体产生共格畸变,阻碍位错的运动,使焊缝和热影响区的强度和硬度都提高;当焊缝和热影响区中的析出相为粗大的 θ 相时,析出相与基体的共格关系遭到破

表 3 焊态、时效处理以及固溶 + 时效处理后焊接接头和母材金属的拉伸性能

Table 3 Tensile properties of welded joint and base metal

Condition	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	Joint strength coefficient/%
As welded	296	198	4.5	62
200 °C \times 23 h aging treatment	310	230	3.2	65
530 °C \times 2 h solid solution plus 200 °C \times 23 h aging treatment	420	315	6.4	88
Base metal	477	440	10.1	—

坏, 成为非共格界面, 点阵的畸变程度下降, 对塑性变形的抗力降低, 析出相的强化作用消失, 出现软化现象 [17].

以上结果表明, 2519 铝合金焊接接头在焊态下, 不仅焊缝金属有连续网状分布的 $\alpha\text{Al}-\text{CuAl}_2$ 共晶组织, 而且由于焊缝金属处于欠时效状态, 析出的 θ' 相数量较少以及热影响区软化区发生了过时效, 形成了稳态的 θ 相, 因此焊接接头的硬度和强度最低. 经过 $200\text{ }^\circ\text{C} \times 23\text{ h}$ 的时效热处理后, 虽然焊缝中析出的 θ' 相数量有所增加, 但由于焊缝的金相组织和热影响区软化区的析出相没有明显改变, 对焊接接头硬度和强度的提高不显著. 当焊接接头经过 $530\text{ }^\circ\text{C} \times 2\text{ h}$ 固溶 + $200\text{ }^\circ\text{C} \times 23\text{ h}$ 时效热处理后, 无论是焊缝的金相组织还是焊缝和热影响区软化区析出相形貌都发生了明显的改变, 焊缝共晶组织的连续网状分布特征消失, 数量减少, 焊缝和热影响区软化区析出相变成了细小针状的 θ'' 和 θ' 相, 并且数量明显增加. 因此, 焊接接头的硬度和强度都显著提高.

3 结 论

在焊态 2519 铝合金焊接接头中焊缝内共晶组织呈连续网状分布, 析出相为透镜状 θ' 相且数量较少, 而热影响区软化区内析出相为粗大的平衡态 θ 相, 因此出现软化现象, 焊接接头的强度和硬度最低. 时效处理使焊缝金属的析出相增加, 但焊缝共晶组织和热影响区软化区的析出相没有明显改变, 接头强度略微升高, 塑性下降, 热影响区软化现象仍然存在. 固溶 + 时效处理后, 焊缝连续网状共晶组织减少, 焊缝金属和热影响区软化区的析出相变成大量细小弥散的针状相, 极大地提高了接头的强度和塑性, 彻底消除了热影响区的软化.

参 考 文 献

- 1 S.Abis, M.Massazza, P.Mengucci, G.Riontino, Scripta Materialia, **45**, 685(2001)
- 2 D.H.Xiao, J.N.Wang, D.Y.Ding, S.P.Chen, Journal of Alloys and Compounds, **343**, 77(2002)
- 3 S.Dymek, M.Dollar, Materials Chemistry and Physics, **81**, 286(2003)
- 4 YANG Chengang, GUO Xuming, HONG Zhangfei, QIAN Bainian, Acta Metallurgica Sinica, **41**(10), 1077(2005) (杨成刚, 国旭明, 洪张飞, 钱百年, 金属学报, **41**(10), 1077(2005))
- 5 G.V.Narayana, V.M.J.Sharma, V.Diwakar, K.S.Kumar, R.C.Prasad, Science and Technology of Welding and Joining, **9**(2), 121(2004)
- 6 GUO Xuming, YANG Chenggang, QIAN Bainian, XU Qiang, ZHANG Hongyan, Acta Metallurgica Sinica, **41**(4), 379(2005) (国旭明, 杨成刚, 钱百年, 徐强, 张洪延, 金属学报, **41**(4), 379(2005))
- 7 S.M.Devinent, J.H.Devletian, S.A.Gedeon, Welding Journal, **7**, 33(1988)
- 8 J.J.Fisher, Jr., L.S.Kramer, J.R.Pickens, Advanced Materials and Processes, **9**, 43(2002)
- 9 L.S.Kramer, T.P.Blair, S.D.Blough, J.J.Fisher, Jr., J.R.Pickens, Journal of Materials Engineering and Performance, **11**(6), 645(2002)
- 10 XU Wenli, LIU Xuesong, FANG Hongyuan, TIAN Xitang, GUO Shaoqing, Transactions of the China Welding Institution, **25**(2), 39(2004) (徐文立, 刘雪松, 方洪渊, 田锡唐, 郭绍庆, 焊接学报, **25**(2), 39(2004))
- 11 XU Lianghong, TIAN Zhiling, PENG Yun, ZHANG Xiaomu, Chinese Journal of Rare Metals, **29**(5), 773(2005) (许良红, 田志凌, 彭云, 张小牧, 稀有金属, **29**(5), 773(2005))
- 12 M.J.Jones, P.Heurtier, C.Desrayaud, F.Montheillet, D.Allehaux, J.H.Driver, Scripta Materialia, **52**, 693(2005)
- 13 M.J.Starink, P.Van Mourik, Materials Science and Engineering A, **156**, 183(1992)
- 14 CHEN Xianfeng, PENG Dashu, ZHANG Hui, LIN Qiquan, LIN Gaoyong, The Chinese Journal of Nonferrous Metals, **13**(4), 934(2003) (陈险峰, 彭大暑, 张辉, 林启权, 林高用, 中国有色金属学报, **13**(4), 934(2003))
- 15 CHEN Zhiguo, ZHENG Ziqiao, WANG Zhixiu, LI Shichen, Chinese Journal of Materials Research, **18**(5), 517(2004) (陈志国, 郑子樵, 王芝秀, 李世晨, 材料研究学报, **18**(5), 517(2004))
- 16 C.Huang, S.Kou, Welding Journal, **1**, 9s(2001)
- 17 A.W.Zhu, E.A.Starke Jr., Journal of Materials Processing Technology, **117**, 354(2001)