

铈对 2195 铝锂合金显微组织和拉伸性能的影响

尹登峰, 余志明, 王 华, 孟力平, 伍汰莎

(中南大学材料科学与工程学院, 有色金属材料科学与工程教育部重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 通过拉伸试验机、透射电镜、扫描电镜等研究了添加微量铈对 T8 和 T6 时效态 2195 铝锂合金显微组织和拉伸性能的影响。结果表明: 添加微量铈能使热处理态 2195 铝锂合金的组织及性能得到明显改善; 微量铈一方面能使合金的主要强化相 T_1 相和 θ' 相增多, 且更均匀细小地弥散分布; 另一方面能有效细化晶粒、净化晶界和抑制再结晶, 使合金的组织分层更加薄化, 在一定程度上改善合金的断裂行为, 减少沿晶断裂倾向。

关键词: 铈; 2195 铝锂合金; 显微组织; 拉伸性能

中图分类号: TG146.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3738(2012)02-0011-04

Effect of Ce on Microstructure and Tensile Properties of 2195 Aluminum-Lithium Alloy

YIN Deng-feng, YU Zhi-ming, WANG Hua, MENG Li-ping, WU Tai-sha

(School of Materials Science and Engineering, Key Laboratory of Nonferrous Metal Materials Science and Engineering Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The effect of and trace Ce on the microstructure and tensile properties of T8 aged and T6 aged 2195 aluminum-lithium alloy had been studied by tensile tester, transmission electron microscopy and scanning electron microscopy, etc. The results show that the addition of Ce could significantly improve the microstructure and mechanical properties of heat-treated 2195 aluminum alloy. The trace Ce could increase the amount of the major strengthening phase of T_1 and θ' phase and make them distribute more dispersively and homogenously. On the other hand, Ce could refine the grain size, purify the grain boundaries, restrain the recrystallization and make the microstructure delamination of the alloy thinner, which could improve the fracture behavior of alloy and decrease the tendency of intergranular fracture in a certain degree.

Key words: cerium; 2195 aluminum-lithium alloy; microstructure; tensile property

0 引 言

利用稀土微合金化方法改善铝锂合金力学性能方面的研究工作在近几十年取得了重要进展。俄罗斯学者系统研究了 16 种稀土元素在铝锂合金中的作用, 证明钪和铈是提高铝锂合金性能最有效果的稀土元素, 但由于钪过于昂贵, 而铈相对便宜, 因此有关铈在铝锂合金中作用的研究受到了研究者的青睐。一般认为微量铈在低铜、锂含量比(两者的质量分数之比小于 1.5)铝锂合金中的作用有如下几方面^[1-5]: 微量铈能使 T_1 相细化并弥散化, 既能在晶

内析出, 又能在晶界或亚晶界析出, 从而既增强了 T_1 相抑制共面滑移的能力, 又减轻了其本身造成微观应力集中的程度; 微量铈能使 δ' 相的晶界无沉淀带(PFZ)变窄; 可使钠、钾等杂质元素向晶界迁移的过程变慢, 相对降低了晶界上碱金属杂质的含量, 从而减少了晶界上液相质点的数量, 同时, 铈能细化晶粒作用, 从而相对增加了金属中晶界的面积, 相应地降低了单位面积晶界上的钠、钾的含量或液相质点的数量。因此微量铈的加入减少了铝锂合金晶界或亚晶界的应力集中和弱化, 可使变形更加均匀, 更有利于合金强韧性的提高。

由于 2195 铝锂合金具有高的铜、锂含量比而几乎不出现 δ' 相, 因此, 共面滑移和晶界 δ' 相的 PFZ 不再是导致合金塑性和韧性降低的主要原因^[6-7]。

收稿日期: 2011-01-05; 修订日期: 2011-11-22

基金项目: 总装备部重点基金资助项目(6140506)

作者简介: 尹登峰(1966—), 男, 湖南株洲人, 副教授, 博士。

但钽仍可强化晶界、细化并弥散化 T_1 相和抑制再结晶等,从而在 2195 铝锂合金中起到显著的增塑作用,但目前有关添加微量钽对提高该合金强韧性研究的报道还不多见。为此,作者研究了添加微量钽对 2195 铝锂合金显微组织和拉伸性能的影响。

1 试样制备与试验方法

试验合金在电阻炉中用石墨坩埚熔炼,其化学成分如表 1 所示。合金在熔剂覆盖和氩气保护下熔炼浇铸,铸锭在盐浴炉中进行 $450\text{ }^\circ\text{C}\times 16\text{ h}+500\text{ }^\circ\text{C}\times 8\text{ h}$ 均匀化处理,然后在 $450\text{ }^\circ\text{C}$ 进行热轧,保温 2 h,变形量为 80%;然后再经 $450\text{ }^\circ\text{C}\times 2\text{ h}$ 中间退火后冷轧至 2 mm。加工出拉伸试样再进行 $504\text{ }^\circ\text{C}\times 0.5\text{ h}$ 水淬+ $180\text{ }^\circ\text{C}$ (T6 处理)或 $160\text{ }^\circ\text{C}$ (T8 处理)时效 4~20 h 的热处理,试样时效前预变形量为 6%,然后按照 GB/T 228-2002 进行室温拉伸试验。在 H800 型透射电镜(TEM)上观察显微组织;在 KYKY-1000 型扫描电镜(SEM)上观察断口形貌。

表 1 试验合金的化学成分(质量分数)

Tab. 1 Chemical composition of the tested alloys (mass) %								
合金	Cu	Li	Mg	Ag	Zr	Ti	Ce	Al
1#	3.97	1.07	0.42	0.43	0.15	0.11	—	余
2#	4.08	0.98	0.53	0.48	0.15	0.10	0.11	余

2 试验结果与讨论

2.1 拉伸性能

由图 1,2 可知,在两种热处理工艺下,随时效时间的延长,两种合金拉伸强度的变化规律大致相同,即都经历了欠时效、峰时效和过时效三个阶段。其中,2# 合金时效强化效应更为显著。与 1# 合金相比,无论是 T8 时效态还是 T6 时效态,2# 合金的峰值强度都比 1# 合金的高,而且其伸长率也比 1# 合金的高,但 2# 合金达到峰值时效的时间较长。从表 2 可知,2# 合金在 T8 和 T6 时效态的峰值强度比 1# 合金的分别提高了 38 MPa 和 11 MPa,而且伸长率也都略有提高,但达到峰值强度的时效时间则分别推迟了 4 h 和 2 h。这说明微量钽的加入使 2195 铝锂合金的强度和塑性均有所提高。

表 2 T6、T8 时效态合金的峰值强度、峰值时间及相应的伸长率

Tab. 2 Peak strength, peak time and elongation of the T6 aged and T8 aged alloys

合金	热处理工艺	峰值强度/MPa		峰值时间/h	伸长率/%
		σ_b	$\sigma_{0.2}$		
1#	T6	501	453	10	9.2
	T8	570	530	16	9.8
2#	T6	512	471	12	9.7
	T8	608	544	20	10.2

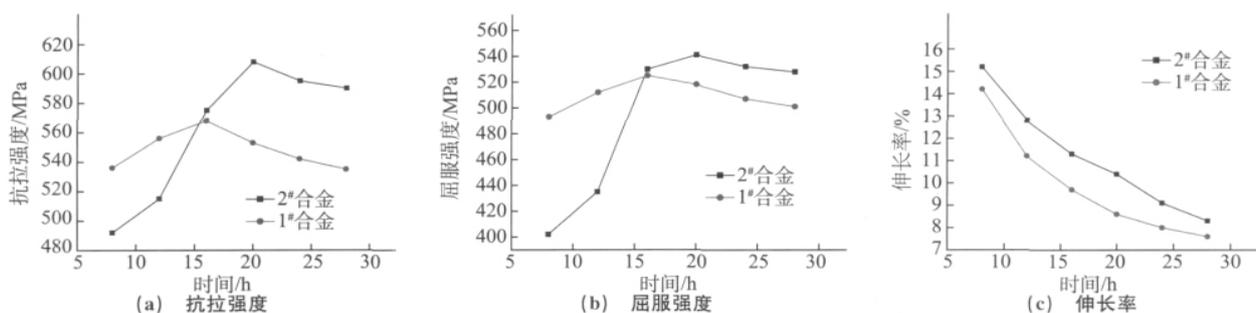


图 1 T8 时效态试验合金室温拉伸性能与时效时间的关系

Fig. 1 Tensile properties of T8 aged alloys at room temperature vs aging time: (a) tensile strength; (b) yield strength and (c) elongation

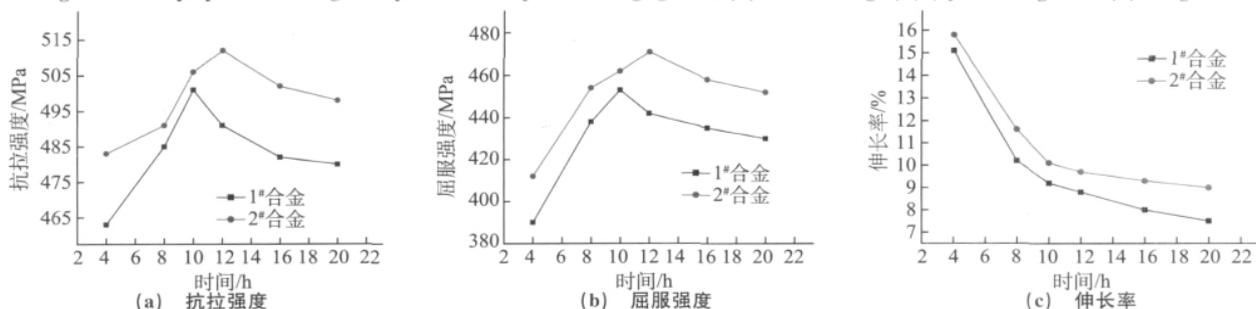


图 2 T6 时效态试验合金室温拉伸性能与时效时间的关系

Fig. 2 Tensile properties of T6 aged alloys at room temperature vs aging time: (a) tensile strength; (b) yield strength and (c) elongation

2.2 显微组织

由图 3,4 可见,两种合金在 T8、T6 峰时效态的显微组织存在着明显差别。1# 合金的 T6 峰时效态主要强化相是大量 T_1 相和极少量 θ' 相,而其 T8 峰时效态几乎只有 T_1 相,而且较之 T6 峰时效态其 T_1 相更加均匀细小、弥散,析出相密度更大。2# 合金的 T6 峰时效态主要强化相也是大量的 T_1 相和少量的 θ' 相,而且与 1# 合金 T6 峰时效态相比, T_1 相和 θ' 相都较多,而且尺寸更细小;2# 合金的 T8 峰时效态也几乎只有 T_1 强化相,相对 2# 合金 T6 峰

时效态而言,其 T_1 相更加均匀、细小、弥散并且密度大;与 1# 合金相比,T8 峰时效态 2# 合金的 T_1 相数量更多,尺寸更小,分布更均匀,而且其晶界无析出带,PFZ 也比 1# 合金更窄,晶界平衡相的尺寸也相对较小。1#、2# 合金的大角度晶界上出现的板状粗大的沉淀相为 T_2 相,其电子衍射花样呈五次对称性(图略),这与 Langan 等^[8]的研究结果一致。

2.3 断口形貌

由图 5 可知,2195 铝锂合金和其它铝锂合金的断口形貌相似,主要为被分层裂纹隔开的平行

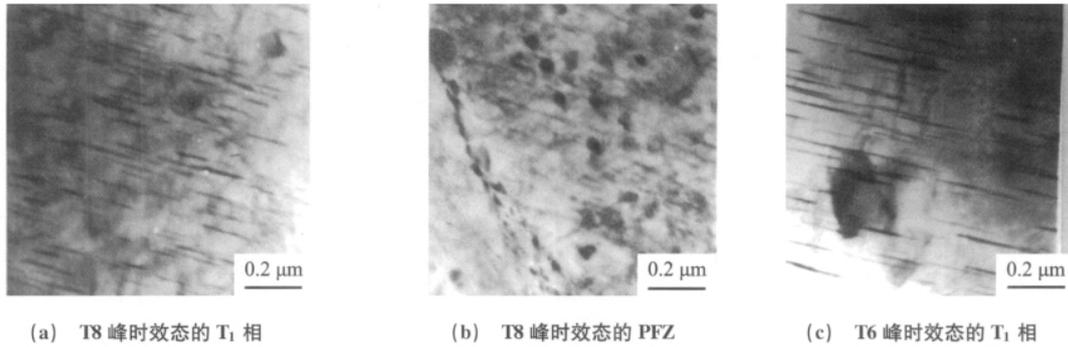


图 3 T8、T6 峰时效态 1# 合金的 TEM 形貌

Fig. 3 TEM morphology of T8 and T6 peak-aged alloy 1#: (a) T8 peak-aged T_1 phase; (b) T8 peak-aged PFZ and (c) T6 peak-aged T_1 phase

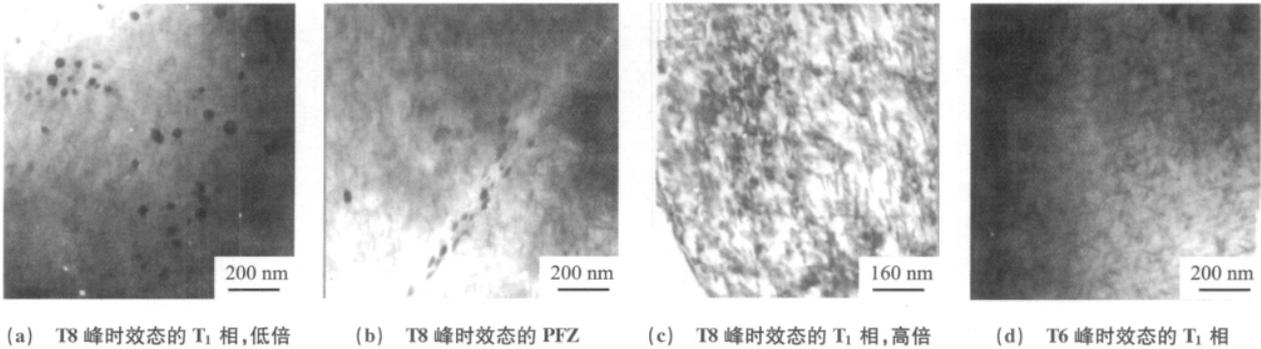


图 4 T8、T6 峰时效态 2# 合金的 TEM 形貌

Fig. 4 TEM morphology of T8 and T6 peak-aged alloy 2#: (a) T8 peak-aged T_1 phase, low magnification; (b) T8 peak-aged PFZ; (c) T8 peak-aged T_1 phase, high magnification and (d) T6 peak-aged T_1 phase

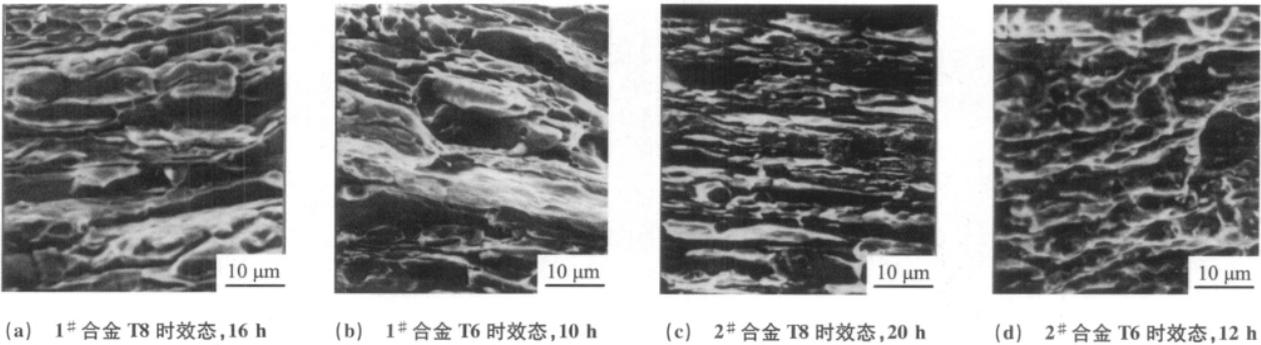


图 5 试验合金峰时效态拉伸断口的 SEM 形貌

Fig. 5 SEM morphology of fracture surface of the the peak-aged tested steels:

(a) T8 aged alloy 1#, 16 h; (b) T6 aged alloy 1#, 10 h; (c) T8 aged alloy 2#, 20 h and (d) T6 aged alloy 2#, 12 h

薄带,1[#]合金主要呈沿晶断裂特征,并可看到沿晶界扩展的裂纹,2[#]合金的沿晶断裂比例减少,可看到一些较为平坦的穿晶断裂区,且其平行薄带比1[#]合金要更薄一些,强塑性明显提高。

2.4 讨论

由试验结果可知,添加微量铈可以提高 2195 铝锂合金的强度与塑性,而合金性能的改善与合金中主要沉淀析出相的数量、大小和分布以及晶粒细化、晶界净化、合金的层状组织薄化有关。

铈改善 2195 铝锂合金析出相分布、大小和数量的作用主要有以下两个方面:一是铈可提高铜原子与铝的结合能,使铜原子在基体中的分布更均匀,扩散能力降低,从而使 T_1 相均匀析出、长大速度下降。 T_8 时效态的 2[#]合金达到峰值时效的时间较长(20 h),而 1[#]合金仅为 16 h,并且在 16 h 前 2[#]合金的强度比 1[#]合金的低,说明 2[#]合金中 T_1 相长大速度相对较慢。 T_6 态由于时效温度较高(180 °C),高温时效使 T_1 相长大速度增大,所以,在 4 h 时 2[#]合金的强度就已经比 1[#]合金的高了。另一方面,添加微量铈可促进 T_1 相形核。当铈原子以置换的形式存在于铝基体中时,由于其原子半径比铝原子半径大很多,必然造成较大的晶格畸变。固溶处理后基体中过饱和的空位在铈原子周围凝聚可减小晶格畸变能和空位形成能,因此在铈原子周围会形成空位对和空位簇;而铜原子的原子半径小于铝原子的,因此,铜原子易于存在铈原子周围而降低晶格畸变能。由此可推知,由于铈原子周围空位和铜原子的偏聚,增加了 T_1 相形核的 GP 区,因此,增加了 T_1 相形核的数量。时效时晶内析出相的数量、大小、分布,亚晶界及晶界上析出相的种类和大小,以及 PFZ 的宽度等对合金性能有较大影响,而添加微量铈能使合金晶内析出的 T_1 相分布更均匀,平均尺寸减小,而且数量增加,同时也能使 PFZ 变窄,并使晶界析出相变得细小。这些有益的作用无疑对改善合金性能起了很大的作用。

此外,添加微量铈使 2195 铝锂合金晶粒细化、晶界净化及合金的层状组织薄化,这也是提高强塑性的又一重要作用。铈能细化铝锂合金铸态晶粒,又有细化其时效态晶粒或抑制再结晶的作用^[9]。一般认为,铈细化晶粒的原因可能与铈降低表面张力有关^[9],可大幅度增加晶核的形核率。另一方面,铈有可能在晶界富集形成化合物阻碍晶粒长大。在大

变形条件下,再结晶一般采用亚晶粗化的形核机制,而对于高层错能的铝合金,则主要是通过相邻亚晶粒的合并来实现的。亚晶合并既需要位错沿亚晶界面的攀移,也需要亚晶粒的旋转(亚晶界的迁移)。2195 铝锂合金中由于加入铈,可能在晶界富集形成化合物,可钉扎位错,阻碍位错攀移;而且铈还能降低亚晶界及晶界的表面张力,也将减小亚晶界和晶界的迁移驱动力。铝锂合金的弱结合晶界、微观塑性变形集中和扁平晶粒结构,使之呈现很强的短横向沿晶分层倾向,分层限制塑性变形而提高强度的作用称为分层强化^[10]。分层强化在铝锂合金的强化机制中占有很重要的地位,分层不仅对合金的横向、纵向强度有很大的贡献,并可提高横向、纵向断裂韧性,此时称为分层韧化^[10]。断口形貌表明,添加微量铈使 2195 铝锂合金分离层平行薄带厚度明显减小,这充分证明微量铈将有助于 2195 铝锂合金强韧性的提高,至于加铈为何使分离层薄带变薄,推测与铈细化晶粒和抑制再结晶的作用有关。加铈的 2195 铝锂合金断口中沿晶断裂比例减少,有更大的穿晶断裂比例,说明铈的添加可在一定程度上改变 2195 铝锂合金的断裂行为,减少低能沿晶断裂倾向,提高合金的强塑性。

3 结论

(1) 添加微量铈可使 T_6 、 T_8 态 2195 铝锂合金的强度和塑性同时提高。

(2) 添加微量铈能使 2195 铝锂合金的主要强化相(T_1 相和 θ' 相)增多且更均匀细小地弥散分布。

(3) 2195 铝锂合金中添加微量铈能细化晶粒、净化晶界和抑制再结晶,使合金的组织分层更加薄化,可在一定程度上改变合金的断裂行为,减少沿晶断裂倾向,提高合金强塑性。

参考文献:

- [1] XIAO D H, WANG J N, DING D Y, *et al.* Effect of rare earth Ce addition on the microstructure and mechanical properties of an Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2003, 352: 84-88.
- [2] LIU Bing, CHEN Zheng, WANG Yong-xin, *et al.* The effect of an electric field on the mechanical properties and microstructure of Al-Li alloy containing Ce[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 313: 69-74.
- [3] 尹登峰,余志明,陶颖,等. Al-Li 合金的合金化及组织研究进展[J]. *材料导报*, 2005, 19(2): 84-87.

(下转第 67 页)

27.3, 12.1 MPa 时,特征挠度分别为 2.2, 1.8, 2.9 mm。即随着玻璃纤维含量的增加,抗弯强度先增加后下降,玻璃纤维添加量存在最佳值,其主要原因是当添加量较小时,抗弯强度随玻璃纤维的增加而增大,当添加量大于最佳值时,由于玻璃纤维较多在基料中容易成团,玻璃纤维与基料混合不均,这使得夹芯在受力状态下易分层,导致抗弯强度下降。在玻璃纤维添加量均为 8% (质量分数,下同)的条件下,添加石膏的量为 0 和 5% 时,抗弯强度分别达到了 27.3, 30.3 MPa,特征挠度为 1.8, 1.4 mm。这表明,添加石膏可以提高夹层板的抗弯强度。其主要原因是作为气硬性胶凝材料石膏的加入,可以提高夹芯的韧性和稳定性,使夹层板的抗弯强度得到增强。

由表 3 还可以看出,试样 6, 5, 4 的抗弯强度分别为 17.8, 17.5, 19.5 MPa,特征挠度分别为 1.8, 2.1, 4.4 mm。由此可见当石膏添加量大于 5% 后,抗弯强度随石膏加入量的增大变化不大,特征挠度值随石膏加入量的增大而变小。其原因主要是石膏是气硬性胶凝材料,添加后可使夹芯韧性和尺寸的稳定性提高,可提高夹层板的抗弯强度;当添加量超过最佳值后,夹芯的脆性逐渐增大,夹层板的稳定性下降,抗弯强度减小。

参考文献[10]制备的镁合金蜂窝板中蜂窝芯芯材较厚(0.13 mm),采用手工制作;粘结剂为工业有机胶,具有一定的污染,镁合金蜂窝板的抗弯强度为 15.3~19.4 MPa。本试验中夹芯所用粘结剂为工业水玻璃,原料主要为农业剩余物,绿色环保,成本低,而且制作工艺为工业化高的热压工艺,操作简便。通过配比的优化,镁合金夹层板的抗弯强度可控制在 25.5~30.3 MPa。两种不同夹芯的夹层板在结构尺寸相近、夹层板的制作工艺相同时,镁合金夹层板的抗弯强度高于镁合金蜂窝板的。综合考虑,夹层板的制作成本与工艺具有明显的优势。

3 结论

(1) 以植物纤维、水玻璃、玻璃纤维、石膏等为

原料,采用热压固化法,在 160 °C, 1.2 MPa 条件下成功制备出轻质、高强度的植物纤维夹芯及镁合金夹层板(120 °C, 1.2 MPa)。

(2) 植物纤维镁合金夹层板的压缩性能主要取决于夹芯基料和固化工艺,添加剂的影响较小。

(3) 适量添加玻璃纤维和石膏可有效提高植物纤维镁合金夹层板的抗弯强度,玻璃纤维添加量为 8%,石膏添加量为 5% 时得到的植物纤维镁合金夹层板的弯曲性能最优。

参考文献:

- [1] 刘琼琼,丛后罗,柳峰,等. 稻壳灰在橡胶工业中的应用[J]. 橡胶工业, 2008, 55(7): 444-447.
- [2] 张枫. 麦秸人造板[J]. 建筑人造板, 1999(4): 20-22.
- [3] 周定国. 关于稻秸秆人造板的几个问题[J]. 林产工业, 2008, 35(1): 3-6.
- [4] 权高峰,严峰,刘赵铭. 镁合金与我国的轨道交通[J]. 科学中国人, 2007(2): 81-84.
- [5] 张青来,王粒粒,张士宏,等. AZ31 镁合金薄板的制备和其组织与性能研究[J]. 金属热处理, 2006, 31(9): 5-10.
- [6] 任志远,范永革. 镁合金的阻尼性能研究进展[J]. 热加工工艺, 2006, 35(18): 64-67.
- [7] 游志勇,林万明,赵浩峰. 材料阻尼及 ZA 合金阻尼性能的研究现状[J]. 铸造设备研究, 2003(3): 23-26.
- [8] 李海涛,张巍. 水玻璃模数快速测定方法[J]. 应用能源技术, 2006(8): 24-25.
- [9] PAIK J K, THAYAMBALLI A K. The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels[J]. Thin-Walled Structures, 1999, 35(3): 205-231.
- [10] 迎春,谷秀娥,权高峰,等. 镁合金蜂窝板的制备及力学性能研究[J]. 科技创新导报, 2009(15): 4-5.
- [11] RENN D J, TULLEAU T, SEEFRISS J C. Composite honeycomb core crush in relation to internal pressure measurement [J]. Journal of Advanced Materials, 1995, 27(1): 31-40.
- [12] LEE H S. Mechanical behavior and failure process during compressive and shear deformation of honeycomb composite at elevated temperature [J]. Journal of Materials Science, 2002, 27: 1265-1272.
- [13] 于文吉,周月,任丁华,等. 竹材、稻草(稻壳)复合板工艺技术[J]. 建材工业信息, 2003(3): 31-32.

(上接第 14 页)

- [4] 陈铮. 铝锂合金的发展趋势、关键技术及应用[J]. 材料导报, 1999, 13(2): 1-4.
- [5] 孟亮. 杂质及铈作用下铝锂合金的应力集中敏感性[J]. 中国稀土学报, 2001, 29(10): 439-442.
- [6] LI J C M. Microstructure and properties of materials[M]. [S. l.]: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1995.
- [7] 尹登峰,余志明,陶颖,等. Zn 对 2195 铝锂合金显微组织和拉伸性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(7): 1036-

1040.

- [8] LANGAN T J, PICKENS J R. Al-Li V[M]. Birmingham: MCEP, 1989.
- [9] BENNETT L H. Theory of alloy phase formation[M]. [S. l.]: the Metallurgical Society of AIME, 1980.
- [10] 陈铮,王永欣,丁占来,等. 稀土铝锂合金的外强化和内韧化机制[J]. 稀土, 1998, 19(2): 23-27.