

1235 铝合金冷加工过程中组织演变

余党会, 王生宁, 刘建兴

(酒钢集团甘肃东兴铝业有限公司铝业研究院, 甘肃 嘉峪关 735100)

摘要: 为进一步掌握铝箔坯料在冷加工过程中的组织演变规律, 以 1235 铝合金双零箔坯料为研究对象, 探究其 7.0 mm 厚铸轧坯料冷轧至 3.8, 1.8, 0.9, 0.5 mm 过程中第二相形貌、尺寸的变化情况。结果表明, 铸轧坯料冷轧一道次后均匀化退火未改变第二相的属性, 只是在一定程度上改变了相的尺寸, 组织内的 θ 相 (FeAl_3) 会发生溶解和均匀化扩散, 且在高温下部分 θ 析出相形貌发生了变化, 长大变成针状; 后在一道次冷轧至 1.8 mm 过程中针状相发生了明显的“折断”, 但在随后的冷轧过程中, 针状相被破碎至 5~8 μm 范围内以后再很难被进一步破碎, 验证了针状第二相“硬而脆”的特性, 说明在退火过程中控制尺寸 >5 μm 第二相的数量的重要性。

关键词: 1235 铝合金; 双零箔; 第二相; 均匀化退火

中图分类号: TG146.21; TG339 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2024)04-0331-05

引用格式: 余党会, 王生宁, 刘建兴. 1235 铝合金冷加工过程中组织演变[J]. 中国材料进展, 2024, 43(4): 331-335.

YU D H, WANG S N, LIU J X. Microstructure Evolution of 1235 Aluminum Alloy During Cold Working[J]. Materials China, 2024, 43(4): 331-335.

Microstructure Evolution of 1235 Aluminum Alloy During Cold Working

YU Danghui, WANG Shengning, LIU Jianxing

(Aluminum Research Institute, Gansu Dongxing Aluminum Co., Ltd. of JISCO, Jiayuguan 735100, China)

Abstract: In order to master the rule of microstructure evolution of aluminum double zero foil in the process of cold-rolling, the 1235 aluminum alloy foil billet was studied in this paper, the morphology and size change of the second phase of the 7.0 mm thickness cast-rolling foils during the cold working was investigated. The results showed that the homogenization annealing for the first pass rolled cast-rolling foils does not change the property of the second phase, but only changes the phase size to a certain extent, some precipitates $\theta(\text{FeAl}_3)$ dissolve, the morphology of partial θ precipitates tends to grow up to needle-like shape; and then the needle-like structures are broken during cold rolling to 1.8 mm, the needle-like phases are difficult to be further broken after being broken in the range of 5~8 μm , the “hard and brittle” characteristics of the needle-like second phases is verified, and the importance of controlling the quantity of the second phase with the size larger than 5 μm during annealing is explained.

Key words: 1235 aluminum alloy; double zero foil; second phase; homogenization annealing

1 前言

铝箔具有质轻、密闭、包覆性好、无毒和防潮等一系列优点, 因而在国民经济及人们日常生活中得到广泛的应用^[1], 近些年来我国铝箔加工业在装机水平、生产能力、产品质量等方面都有大幅度提升^[2], 铝箔加工企业规模扩

大, 生产成本降低, 使铝箔的应用领域不断扩展。

在铝箔加工过程中, 第二相粒子的数量、尺寸和分布对产品的组织和性能有重要的影响, 细小弥散的第二相粒子可钉扎位错和晶界, 抑制再结晶的发生, 提高材料的强度和韧性^[3]; 在轧制过程中, 当成品的厚度小于或接近其中第二相粒子尺寸时, 便易在粗大第二相粒子处产生针孔, 甚至导致断带^[4]。目前国内生产双零铝箔坯料主要以 1235 和 8079 铝合金为原料, 普遍采用铸轧工艺生产, 1235 合金中 Fe 和 Si 是其主要的杂质元素, 也是形成第二相化合物的主要元素, 对后续铝箔质量也有很大的影响。因此研究 Fe, Si 等杂质元素形成的第二

收稿日期: 2022-05-26 修回日期: 2022-08-08

基金项目: 嘉峪关市科技计划资助项目(QKJ22-02)

第一作者: 余党会, 男, 1973 年生, 高级工程师,

Email: yudanghui@jiugang.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202205020

相粒子在 1235 铸轧板及后续加工过程中的第二相分布及成分组成对改善和提高铝箔的组织性能具有十分重要的意义。

2 实验材料与方法

实验选取某企业利用电解原铝液直接铸轧生产的 7.0 mm×1400 mm 规格的 1235 铝合金双零箔坯料，成分

如表 1 所示。试样分别取自铸轧样板、经冷轧一道次加工至 3.8 mm 的铝箔、3.8 mm 铝箔均匀化退火后及分别加工至 1.8, 0.9, 0.5 mm 的铝箔，试样尺寸 15 mm×15 mm。采用 LEICA DMI3000 倒置金相显微镜对组织中的析出相进行观察，利用 ImageJ 金相处理软件对组织中的析出相尺寸进行统计分析。并结合 XRD 图谱对第二相化合物的组分进行分析观察。

表 1 实验用 1235 铝合金坯料化学成分
Table 1 Chemical composition of 1235 aluminum alloy billet for test(ω / %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
0.10~0.15	0.36~0.50	0.02~0.04	≤0.01	≤0.01	≤0.01	0.01~0.03	≥99.35

3 结果分析与讨论

3.1 铸轧坯料在加工过程中第二相变化情况

图 1 为铸轧坯料经过一道次轧制(加工率 45.7%)后 3.8 mm 厚、未退火的铝箔坯料纵截面的金相显微组织照片。研究表明^[5]，铸轧坯料组织中主要存在的是 Al-Fe-Si 三元化合物，在 6~7 mm 厚的铸轧板中的第二相粒子是形貌较为规则的块状结构，随着轧制过程的进行，板坯的厚度减小，第二相会向条状结构转变，并在其周围聚集很多尺寸相当细小(20~30 μm)的颗粒。由图 1 可看出，3.8 mm 厚铝箔组织的第二相粒子密度显然高于 7.0 mm 厚铸轧态样品的，中层絮状或者骨骼状的第二相受到冷加工过程挤压破碎后呈连续或断开的流线形。冷轧过程中，第二相受到剪切应力的作用而被逐渐拉长，形成长条状的粒子。

利用 ImageJ 处理软件对铸轧坯料及经 45.7%加工率

冷加工后的试样的第二相尺寸进行了统计，结果如图 2 所示。结合图 2 看出，7.0 mm 厚铸轧坯料表层组织中析出相尺寸主要集中在 0~1 μm 和 1~2 μm 这 2 个区间，中心层组织中析出相尺寸主要集中在 1~2 μm 和>5 μm 这 2 个区间，这与铸轧生产过程中非平衡凝固特点相吻合。经 45.7%加工率冷加工至 3.8 mm 后，坯料表层组织中析出相尺寸主要集中在 1~2 μm 和 2~3 μm 这 2 个区间，中心层组织中析出相尺寸主要集中在>5 μm 区间。铸轧坯料经直接冷轧处理后第二相有一定程度的长大和聚集，说明冷轧过程对非平衡析出相破碎效果不明显，而析出相聚集效果相对明显。

3.2 均匀化退火后第二相变化情况

图 3 为 3.8 mm 厚铝箔坯料均匀化退火后纵截面金相显微组织照片，铝箔组织经高温快速升温均匀化退火后连续或断开的流线形第二相消失，并出现了针状的第二相，其尺寸分布变化情况如图 4 所示。结合图 3 和图 4

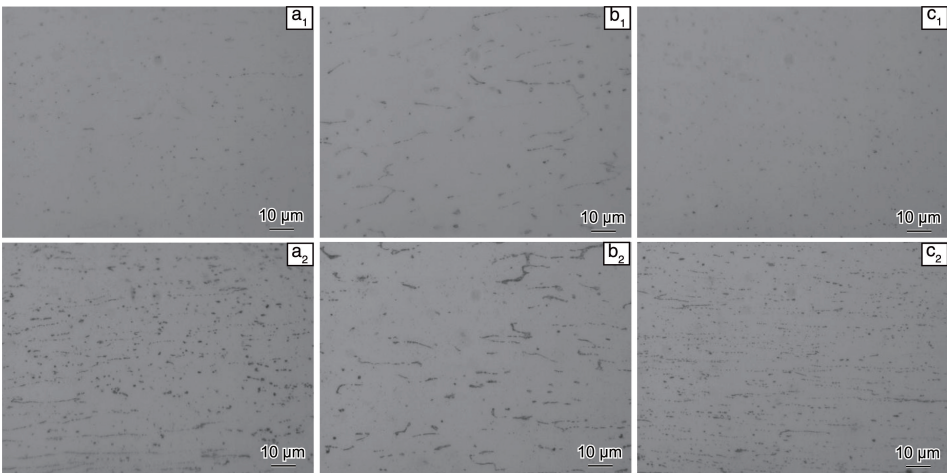


图 1 铸轧坯料(上)及经冷轧加工率 45.7%冷轧后铝箔(下)的纵截面金相组织照片：(a₁, a₂) 上层，(b₁, b₂) 中心层，(c₁, c₂) 下表层
Fig. 1 Metallographs of longitudinal section of as-casted 1235 aluminum alloy billet (upper) and after cold rolling with 45.7% deformation amount (lower): (a₁, a₂) surface layer, (b₁, b₂) centre layer, (c₁, c₂) bottom layer

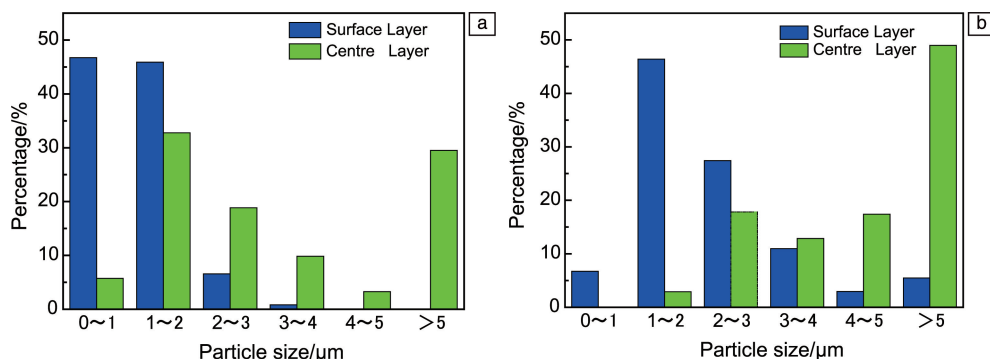


图2 铸轧坯料(a)及经冷轧加工率45.7%冷轧后铝箔(b)的第二相尺寸分布

Fig. 2 Size distribution of the second phase of as-casted 1235 aluminum alloy billet (a) and after cold rolling with 45.7% deformation amount (b)

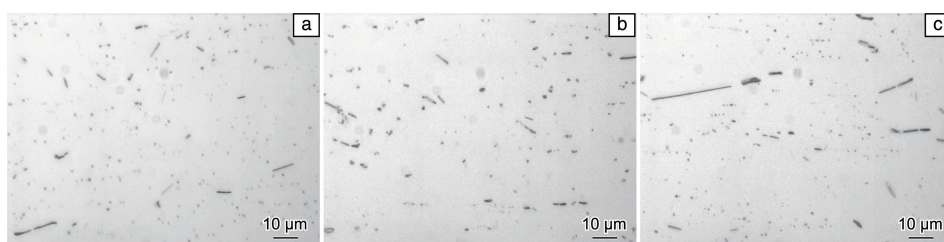


图3 以冷轧加工率45.7%冷轧后铝箔均匀化退火后纵截面金相组织照片:(a)上表层,(b)中心层,(c)下表层

Fig. 3 Metallographs of longitudinal section of 1235 aluminum alloy cold rolled foil with 45.7% cold working amount after homogenization annealing: (a) surface layer, (b) centre layer, (c) bottom layer

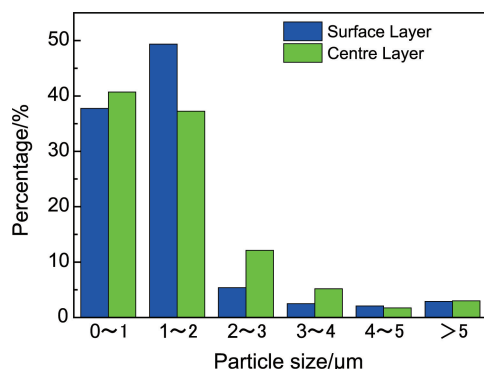


图4 以冷轧加工率45.7%冷轧后的铝箔均匀化退火后的第二相尺寸分布

Fig. 4 Size distribution of the second phase of 1235 aluminum alloy cold rolled foil with 45.7% cold working amount after homogenization annealing

可以看出, 3.8 mm 厚铝箔经高温均匀化退火后的表层和中心部位组织中析出相尺寸进一步减小, 主要集中在 0~1 μm 和 1~2 μm 这 2 个区间, 尺寸>5 μm 的析出相大幅减小, 且部分第二相长大变为针状。说明 3.8 mm 厚铝箔经高温均匀化退火后, 铸轧坯料“遗传”的非平衡析出相发生了溶解和均匀化扩散, 而受高温环境的影响部分析出相形貌发生了变化, 长大为针状相。相关研究也表明^[6], 大变形量冷轧加工后, 冷轧板中的位错密度更高,

均匀化退火时位错可以为 Fe, Si 等原子的扩散提供通道, 促使原子扩散, 有利于形成更细小的第二相。

为进一步研究 3.8 mm 厚铝箔坯料组织经高温均匀化退火后第二相化合物组分的变化, 对退火前后试样进行 XRD 分析, 结果如图 5 所示。结果显示, 1235 合金坯料冷轧后所获铝箔在均匀化退火前后基本为 Al 基体和微量的 $\text{Fe}_{4.23}\text{Al}_{12.02}\text{Si}_{0.75}$ 第二相, 即 θ 相(FeAl_3), 占比为 0.68%。已有相关研究认为^[7], 随着轧制的进行, 颗粒状第二相受挤压聚集后的宏观形貌更趋向于纤维状和丝状, 颗粒状的 θ 相和 $\alpha\text{-AlFeSi}$ 相居多, 而棒状或针状的 θ 相则较少; 经过均匀化退火处理之后, 颗粒状的 θ 相发生均匀化扩散, 而少部分会发生长大变成针状。图 5 所示的 XRD 图谱也说明退火未改变第二相的属性, 只是在一定程度上改变了相的尺寸。

3.3 均匀化退火后冷加工过程各道次第二相变化情况

将 3.8 mm 厚铝箔均匀化退火后经一道次冷轧至 1.8 mm 厚, 其微观组织和第二相尺寸、分布如图 6 所示, 可以看出, 针状相发生了明显的“折断”, 说明较大的针状相有较大“脆性”。并对比图 4 和图 7 的第二相尺寸分布柱状图可知, 均匀化退火后的坯料经冷加工过程表层组织析出相破碎效果明显, 尺寸在 0~1 μm 区间的第二相增多, 而尺寸在 1~2 μm 区间的第二相减少; 但是尺寸>5 μm 的析出相并未减少, 而是稍微有增长趋势, 说明

针状第二相虽发生了破碎,但破碎后的尺寸仍在 $>5\ \mu\text{m}$ 范围内(主要集中在 $5\sim 9\ \mu\text{m}$ 范围内)。中心部位尺寸在 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 区间的第二相增多,而尺寸在 $0\sim 1\ \mu\text{m}$ 区间的第二

相减少,应是轧制过程中铝箔在厚度方向受到挤压使第二相发生聚集的缘故;尺寸 $>5\ \mu\text{m}$ 的析出相(主要集中在 $5\sim 9\ \mu\text{m}$ 范围内)数量变化不是很明显。

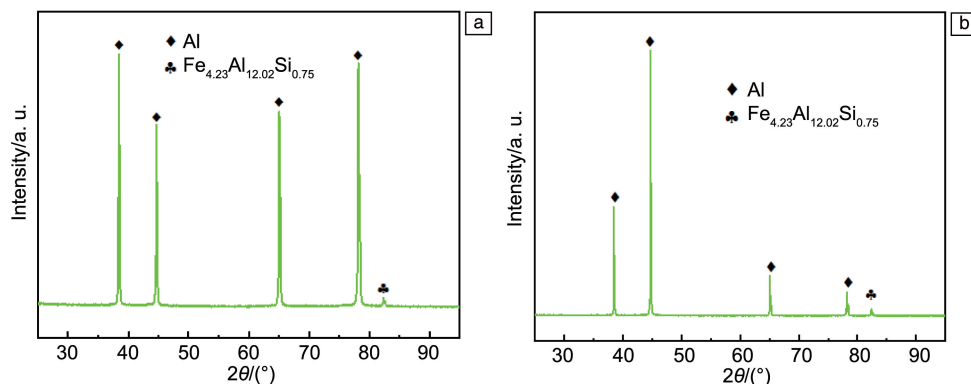


图 5 以冷轧加工率 45.7%冷轧后的铝箔均匀化退火前(a)、后(b)的 XRD 图谱

Fig. 5 XRD patterns of 1235 aluminum alloy cold rolled foil with 45.7% cold working amount before (a) and after (b) homogenization annealing

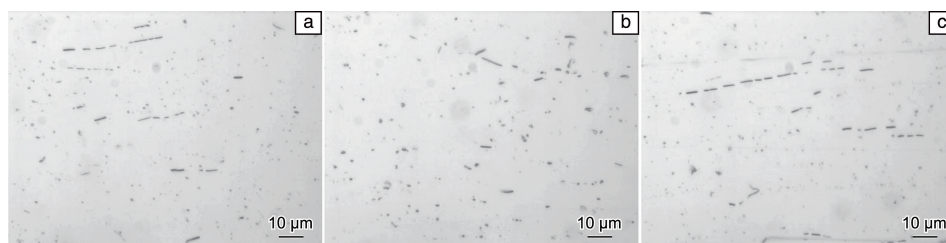


图 6 均匀化退火后的 3.8 mm 厚铝箔冷轧至 1.8 mm 的箔材纵截面金相组织照片: (a) 上层, (b) 中心层, (c) 下层

Fig. 6 Metallographs of longitudinal section of cold rolled foil with 1.8 mm thickness from homogenization annealed foil with 3.8 mm thickness: (a) surface layer, (b) centre layer, (c) bottom layer

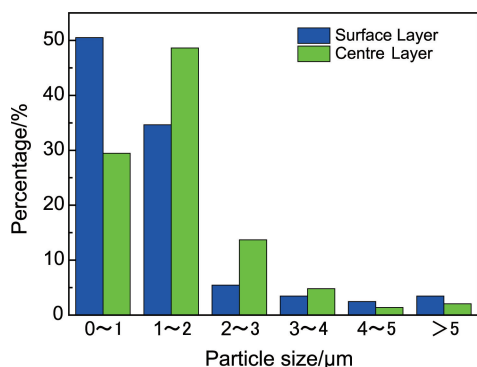


图 7 均匀化退火后的 3.8 mm 厚铝箔冷轧至 1.8 mm 的箔材第二相尺寸分布

Fig. 7 Size distribution of the second phase of cold rolled foil with 1.8 mm thickness from homogenization annealed foil with 3.8 mm thickness

将 3.8 mm 厚铝箔均匀化退火后经两道次冷轧至 0.9 mm 及三道次冷轧至 0.5 mm, 分别截取样品对其纵截面进行组织观察(图 8), 并统计其第二相尺寸分布(结果如图 9)。

由图 8 可看出, 1.8 mm 厚铝箔坯料经进一步冷加工后, 针状相有一定的破碎减小, 但不太明显, 说明针状

第二相虽有“脆性”,但在一定的尺寸范围内很难再被破碎,其尺寸分布情况如图 9 所示。图 9 显示,坯料组织中尺寸处于 $0\sim 1\ \mu\text{m}$ 和 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 区间的第二相增多,且随着坯料的逐渐减薄,上层与中心层的第二相尺寸趋于一致;尺寸 $>5\ \mu\text{m}$ 的第二相(主要集中在 $5\sim 8\ \mu\text{m}$ 范围内)数量几乎再无明显变化。说明随着累积冷加工率的增加,颗粒状的第二相进一步被破碎,但针状相被破碎至 $5\sim 8\ \mu\text{m}$ 范围内以后再很难被进一步破碎,验证了针状第二相“硬而脆”的特性。

4 结 论

(1)对铸轧坯料直接进行冷加工,对非平衡析出相破碎效果不明显,而在冷加工过程中挤压作用对第二相的聚集效果相对明显。

(2)铸轧坯料经冷加工所获 3.8 mm 厚铝箔坯料经高温均匀化退火后,铸轧坯料“遗传”的非平衡析出相发生了溶解和均匀化扩散,而在高温下部分 θ 析出相(FeAl_3)形貌发生了变化,长大为针状相,即均匀化退火未改变第二相的属性,只是在一定程度上改变了相的尺寸。

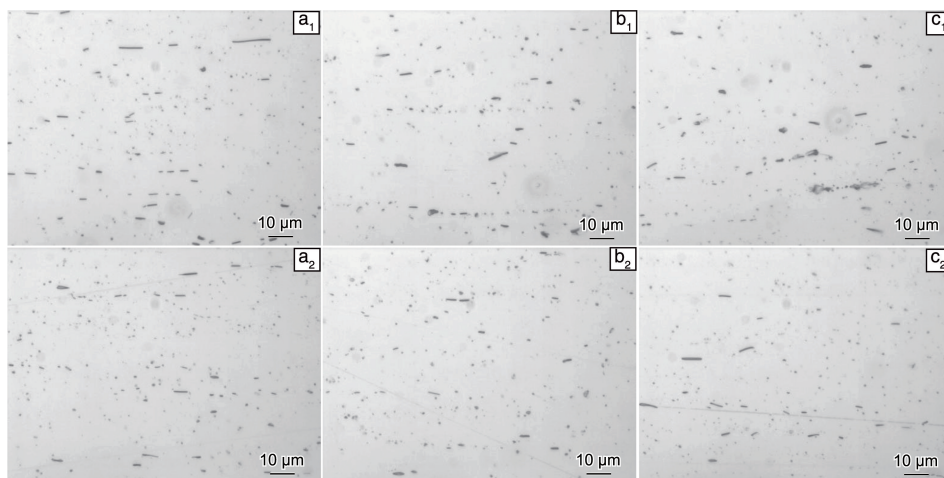


图8 均匀化退火后的3.8 mm厚铝箔冷轧至0.9 mm的箔材(上)和冷轧至0.5 mm的箔材(下)的纵截面金相组织照片: (a₁, a₂) 上层, (b₁, b₂) 中心层, (c₁, c₂) 下层

Fig. 8 Metallographs of longitudinal section of cold rolled foils with 0.9 mm thickness (upper) and 0.5 mm thickness (lower) from homogenization annealed foil with 3.8 mm thickness: (a₁, a₂) surface layer, (b₁, b₂) centre layer, (c₁, c₂) bottom layer

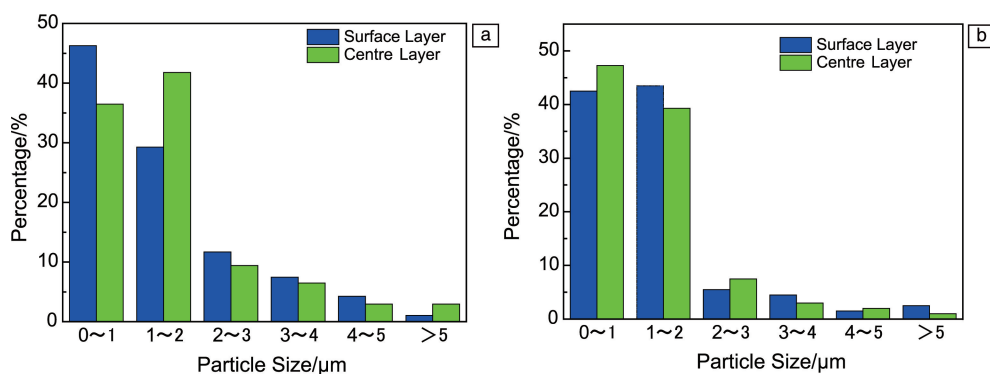


图9 均匀化退火后的3.8 mm厚铝箔冷轧至0.9 mm的箔材(a)和0.5 mm的箔材(b)第二相尺寸分布

Fig. 9 Size distributions of the second phase of cold rolled foils with 0.9 mm thickness (a) and 0.5 mm thickness (b) from homogenization annealed foil with 3.8 mm thickness

(3) 将高温均匀化退火后铝箔经一道次冷轧轧至1.8 mm厚, 其针状相发生了明显的“折断”, 但在随后的冷加工过程中, 针状相被破碎至5~8 μm范围内后再很难被进一步破碎, 验证了针状第二相“硬而脆”的特性。进而说明在退火过程中控制尺寸>5 μm的第二相的数量的重要性。

参考文献 References

- [1] 蔡邦霞. 甘肃冶金[J], 2015, 37(3): 33-35.
CAI B X. Gansu Metallurgy[J], 2015, 37(3): 33-35.
- [2] 李万印, 陈亮维, 岳有成, 等. 轻金属[J], 2016(12): 47-51.
LI W Y, CHEN L W, YUE Y C, *et al.* Light Metals[J], 2016(12): 47-51.
- [3] 周年润, 胡振青, 陈康华, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2009, 38(9): 1613-1617.
ZHOU N R, HU Z Q, CHEN K H, *et al.* Rare Metal Materials and

Engineering[J], 2009, 38(9): 1613-1617.

- [4] DAI Q W, ZHANG D F, CHEN X, *et al.* Advanced Materials Research[J], 2014, 884-885: 308-311.
- [5] 谭国寅, 岳有成, 杨钢, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2016, 45(4): 979-981.
TAN G Y, YUE Y C, YANG G, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2016, 45(4): 979-981.
- [6] 任书卿, 李怀武, 朱帅, 等. 轻合金加工技术[J], 2013, 41(5): 41-44.
REN S Q, LI H W, ZHU S, *et al.* Light Alloy Fabrication Technology[J], 2013, 41(5): 41-44.
- [7] 姚素娟, 王西科, 关绍康, 等. 有色金属加工[J], 2014, 43(5): 18-22.
YAO S J, WANG X K, GUAN S K, *et al.* Nonferrous Metals Processing[J], 2014, 43(5): 18-22.

(编辑 惠琼)