

微量元素对电容器用铝箔织构形成影响的研究进展

贾桂龙¹ 杨 宏^{1,2} 伍志铭¹ 黄 奎¹ 尹建平¹ 甘 勇¹
(1.广西容创新材料产业研究院有限公司; 2.广西正润新材料科技有限公司)

摘 要 介绍了经典的再结晶织构形成理论,综述了 Fe、Cu、Zn 等微量元素对电容器用高纯铝箔织构形成影响的研究进展,对高纯铝中其他典型微量元素对电容器用铝箔织构演化影响的发展方向进行了展望。

关键词 微量元素;电容器用铝箔;织构

中图分类号 TG146.21 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.09.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress in Effects of Trace Elements on Texture Formation of Aluminum Foil for Capacitors

Jia Guilong¹, Yang Hong^{1,2}, Wu Zhiming¹, Huang Kui¹, Yin Jianping¹, Gan Yong¹
(1.Guangxi Rongchuang Materials Industry Research Institute Co., Ltd.;
2.Guangxi Zhengrun New Material Technology Co., Ltd.)

Abstract: The classical theories of recrystallization texture formation were briefly introduced, and the effects of Fe, Si, Cu and other trace elements on the texture formation of high-purity aluminum foil for capacitors were reviewed. The influence of other typical trace elements in high purity aluminum on the texture evolution of aluminum foil for capacitors was expounded.

Key Words: Trace Elements, Aluminum Foil for Capacitors, Texture

铝电解电容器行业中通常采用高立方织构的高纯铝箔,并选择特殊的浸蚀技术以提高其单位体积的比电容^[1],高立方织构已成为评价电容器用高压阳极铝箔产品质量优劣的关键性能参数。

高纯铝是生产电容器用铝箔的主要原材料。目前国际上通用的、成熟的生产高纯铝的技术,无论是三层液电解法还是偏析法都不能完全去除杂质元素。高纯铝生产技术特点的不同,导致其中杂质元素的种类和含量不同,这也会导致电容器用高纯铝箔生产工艺上的差异。

影响高纯铝箔织构形成的因素有很多^[2],除受铝箔生产工艺参数影响外,还与高纯铝本身所含杂质元素的种类、含量及杂质元素在铝基体中的存在形式和状态有关,某些微量元素对高纯铝箔的再结晶立方织构的形成和发展起到促进作用,因此也可以考虑将有利于提升铝箔立方织构占有率的微量元素加入。

研究微量元素对电容器用铝箔织构演变的影响规律及其作用机理,控制高纯铝箔中微量元素的含量,对

于提升电容器用铝箔立方织构占有率具有积极的意义。本课题介绍了经典的再结晶织构形成理论,然后综述了 Fe、Si、Cu 等微量元素对电容器用铝箔织构形成影响的研究进展,最后对高纯铝中典型微量元素对其织构演化影响的研究方向进行了展望。

1 再结晶织构的形成理论

1.1 取向形核理论

取向形核理论是由 DILLAMORE I L 等^[3]提出的,该理论认为退火时在变形基体的某些特定区域优先形成具有某种择优取向的核心,这些核心长大后形成了最终的再结晶织构。该理论解释了过渡带内有利形核且晶核取向与基体取向相近的现象,其他形核时出现择优取向的现象,但所描述的形核位置已不限于过渡带,如冷轧铝退火过程中观察到立方织构晶粒优先在立方过渡带内形成,高温变形铝在退火过程中形成的立方织构起源于变形组织中的立方取向成分^[4]。

收稿日期:2021-03-08;修改稿收到日期:2021-03-25
基金项目:广西创新驱动发展专项资金资助项目(桂科 AA17202004);贺州市创新驱动发展专项资助项目(贺科创 ZX0710003)
第一作者简介:贾桂龙,男,1989 年出生,工程师,广西贺州(542899),E-mail:jiaguilong@126.com
通信作者:杨宏,男,1967 年出生,高级工程师,广西贺州(542899),E-mail:hoyang18@126.com
引用格式:贾桂龙,杨宏,伍志铭,等. 微量元素对电容器用铝箔织构形成影响的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(9):1 086-1 092.
JIA G L, YANG H, WU Z M, et al. Research progress on the effect of trace elements on texture formation of aluminum foil for capacitors [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(9):1 086-1 092.

1.2 取向生长理论

取向生长理论是由 LÜCKE K 等^[5]提出的,该理论认为再结晶时在变形基体中形成多种不同取向的晶核,但只有与基体构成特定取向关系的晶核能快速长大,从而决定最终的再结晶织构。晶体结构不同,高迁移率晶界两侧的晶粒间取向关系不同^[6,7],面心立方金属为 $40^\circ \langle 111 \rangle$ 。特别要注意的是,高纯铝箔中与基体呈 $40^\circ \langle 111 \rangle$ 取向关系的晶核,具有择优长大的优势。

1.3 取向钉扎理论

取向钉扎理论由 JENSEN D J^[8]提出的,该理论认为再结晶晶粒在长大过程中会遇到多种取向的变形基体,晶粒长大是多种取向关系共同作用的结果。立方取向晶粒在长大过程中与其取向接近的晶粒相遇的概率几乎为 0,从而具有较快的长大速度;其他取向晶粒在长大过程中则会频繁与其取向相近的晶粒相遇,导致长大速度迟缓。取向钉扎现象在再结晶过程中的出现已经被多次证明。

1.4 应变储能最大弛豫理论

应变储能最大弛豫理论是由 LEED N^[9]提出,认为再结晶织构的形成与体系内因各向异性的位错密度造成的应力定向分布有关。当再结晶晶粒最小弹性模量

方向与形变基体内绝对值最大的应力方向重合时,释放出的应变储能最大,提供给再结晶的驱动力也最大,这类再结晶晶粒迅速长大,最终形成与形变基体构成特定取向关系的再结晶织构。

2 杂质对电容器用铝箔织构形成的影响

2.1 Fe 对电容器用铝箔织构形成的影响

杂质 Fe 强烈影响工业纯铝的再结晶行为,对电容器用铝箔立方织构的形成和发展十分重要。张新明等^[10]使用 4 种 Fe 含量不同的高纯铝,按照相同的工艺生产出电容器用高压阳极铝箔,采用 X 射线衍射法、蚀坑法、极图等方法研究了铝箔再结晶织构随 Fe 含量变化的演变规律。发现电容器用高压阳极铝箔的再结晶织构主要由立方织构 $\{100\} \langle 001 \rangle$ 及 R 织构 $\{124\} \langle 211 \rangle$ 构成。根据铝箔中晶粒位向的各向异性及 $\{100\}$ 晶面腐蚀形貌的晶体学特征,即 $\{100\}$ 面与箔面平行时,蚀坑呈正方形,其他 $\{hkl\}$ 面一般呈三角形,使用蚀坑法观测铝箔中晶粒取向形貌时发现,随 Fe 含量增加,正方形蚀坑取向晶粒明显减少,而三角形蚀坑取向晶粒随之占据主导地位。4 种 Fe 含量不同的铝箔 $\{111\}$ 极图(见图1)同样证明,铝箔立方织构占有率随

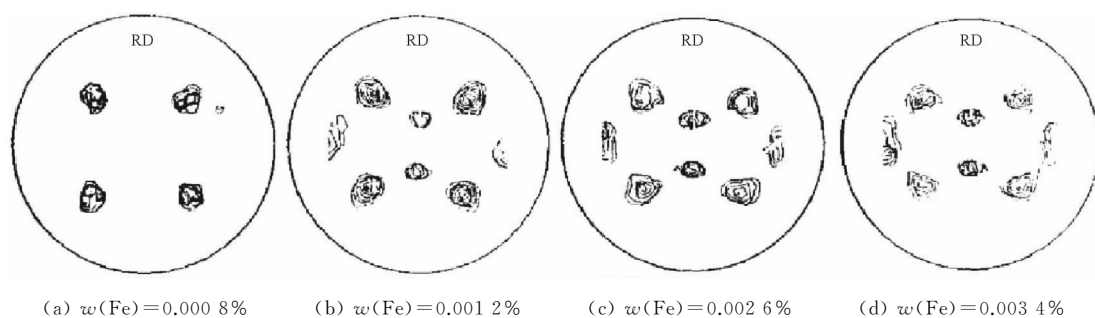


图1 Fe 含量对电容器用铝箔再结晶织构的影响^[10]

Fig.1 Effects of Fe content on recrystallization texture of aluminum foil for capacitors

Fe 含量的增加而减弱,R 织构逐渐增强。

Fe 含量不同,铝箔中立方织构的占有率不同,显然 Fe 是电容器用铝箔中最致命的杂质。Fe 在 Al 中的溶解度极小,且随温度的降低溶解度急剧下降;共晶温度为 655°C 时,Fe 的极限溶解度仅为 0.04% (质量分数),至 200°C 时 Fe 几乎不溶于铝。根据温度不同,Fe 可溶解,可偏聚,可形成 FeAl_6 、 FeAl_3 等颗粒析出;根据 Fe 含量的不同,铝箔退火温度的选择也有差别,具体可分为低温退火、中温退火、高温退火。退火温度的不同,又决定了 Fe 在铝箔中的存在状态,进而直接决定着铝箔中的织构类型和强度。低温退火时一般析出先于再结晶,高温退火时再结晶先于析出,中温退火时 Fe 往往以饱和均质固溶态存在。Fe 以饱和固溶态或颗粒析出

物状态存在,则铝箔中基本上只会形成强烈的 R 织构;Fe 以不饱和固溶态状态存在,则立方织构组分增强,并占据主导地位。因此,在工业化生产中,为提高电容器用铝箔立方织构比例,应最大限度地降低铝箔中的 Fe 含量,同时改变 Fe 的存在形式及状态。

2.2 Cu 对电容器用铝箔织构形成的影响

Cu 是高纯铝中典型的杂质元素,Cu 能够影响高纯铝箔再结晶行为,进而影响铝箔中立方织构占有率。徐进等^[11]在高纯铝中设计添加了 3 种 Cu 含量,并按照相同工艺制备出了电容器用高压阳极铝箔,利用晶体取向分布函数(ODF)等方法研究了 Cu 含量对铝箔立方织构的影响,并讨论了作用原理。发现含 Cu 的高纯铝箔经冷轧后获得了强度较高的 C 织构 $\{112\} \langle 111 \rangle$,随

着 Cu 含量增加, C 织构附近有较大的散漫分布, 冷轧箔 ODF 的 $\varphi_2=45^\circ$ 截面图见图 2。铝箔再结晶退火后发现, Cu 含量为 0.001 19% 时, 铝箔立方织构占有率达

到最高; 随着 Cu 含量增加, 铝箔中立方织构占有率均逐渐下降, 其 $\{111\}$ 极图见图 3。

HIRSCH J 等^[12] 研究发现, 合金元素可显著降低

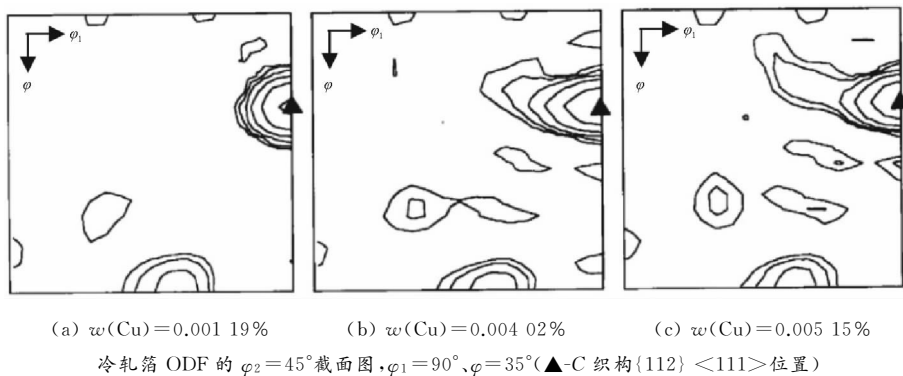


图 2 Cu 含量对电容器用铝箔变形织构的影响^[11]

Fig.2 Effects of Cu content on deformation texture of aluminum foil for capacitors

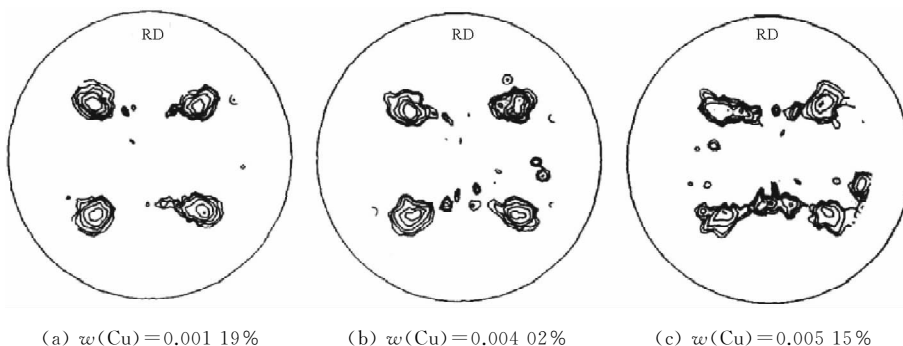


图 3 Cu 含量对电容器用铝箔再结晶织构的影响^[11]

Fig.3 Effects of Cu content on recrystallization texture of aluminum foil for capacitors

面心立方金属层错能, 阻滞晶粒朝着稳定的冷轧取向转变, 导致不同织构类型的形成。C 织构是高层错能面心立方金属轧制过程的稳定取向, Cu 含量由 0.001 19% 增加至 0.005 15% 时, C 织构附近的聚集状态由锋锐聚集转变成漫散聚集, 证明 Cu 含量的变化的确对晶粒向 C 织构的转变过程起到了阻滞效应, 进而引起晶界特征为小角度晶界的亚结构过渡带的形成。Cu 含量的增加, 尽管不会改变冷轧织构的类型, 但是会改变冷轧织构的组态。

经典理论认为, 再结晶晶粒的形核和长大要依靠大角度晶界的迁移完成。再结晶立方取向晶粒, 与冷轧变形织构中 C 织构晶粒间形成的是大角度晶界, 有利于立方取向晶粒的形核和长大; 如其与冷轧织构中的一系列小角度晶界的亚结构过渡带连接而成, 其他取向的再结晶晶粒的长大优势会逐渐凸显, 导致立方织构占有率降低。Cu 含量增加, 其在位错附近的偏聚还会对位错和晶界迁移起到阻滞作用, 阻止再结晶晶粒的长大, 影响立方织构的形成。

2.3 Zn 对电容器用铝箔织构形成的影响

Zn 是高纯铝中另一典型的杂质元素, 对电容器用

铝箔立方织构的形成起到强烈的阻碍作用。谢雨哲等^[13] 利用电子背散射衍射 (EBSD) 技术分析了不同 Zn 含量高纯铝箔成品退火时再结晶织构的演变规律。研究表明, 随 Zn 含量增加, 铝箔中立方织构的强度逐渐变弱, R 织构的强度逐渐占据主导位置; 当 Zn 含量小于 0.000 5% 时, 铝箔中立方取向的亚结构形核和快速长大的优势不受影响; 当 Zn 含量增加至 0.004 85% 时, 非立方取向再结晶核心获得更多的生长机会, 立方织构比例显著下降, 其 $\{111\}$ 极图见图 4。

在冷轧变形过程中, 大量的位错堆积在晶界处, 加工应变储能得到极大的提升, 而 Zn 原子往往扩散到位错附近偏聚; 再结晶退火时, 冷轧变形过程产生的位错周围形成气团, 气团钉扎位错、阻滞晶界的迁移, 位错储能也得到极大的增强。上述两种储能的同时增加促进了立方取向晶粒优先形核并长大, 导致立方织构强度的提升。Zn 含量低至 0.000 5% 以内时, 变形晶粒具有较高的热激活能, 晶界可以摆脱 Zn 原子的束缚而任意迁移, 再结晶过程加快, 立方织构组分增加。当 Zn 含量高达至 0.004 85% 时, 上述过程变得缓慢甚至是相反的结果, 再结晶过程减缓, 立方织构组分降低。在工业化

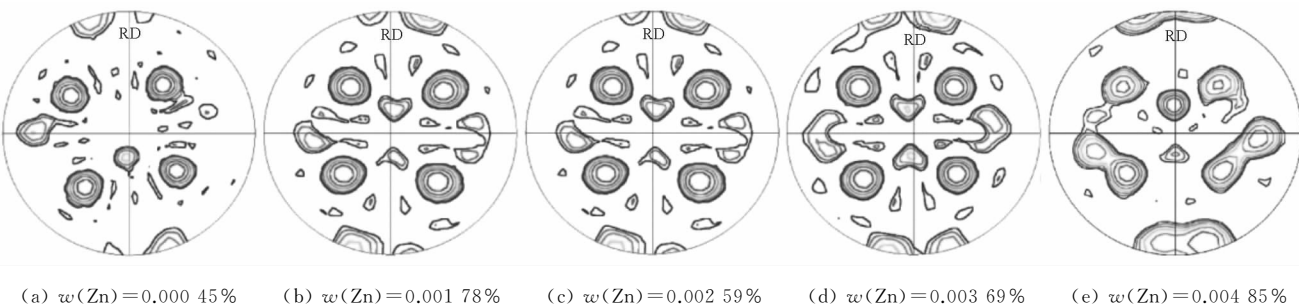


图4 Zn含量对电容器用铝箔再结晶织构的影响^[13]

Fig.4 Effects of Zn content on recrystallization texture of aluminum foil for capacitors

生产中,应尽量控制高纯铝中 Zn 含量,最好能维持在 0.000 5%左右。

2.4 其他杂质元素对电容器用铝箔织构形成的影响

ZHAI X S 等^[14]研究发现,杂质 Si 对高纯铝箔立方织构的形成产生不利影响。Si 与 Fe 几乎共存于高纯铝中,且相互影响彼此的存在形式。当 $w(\text{Fe}) < 0.001\%$ 、 $w(\text{Si}) > 0.003\%$ 时, Si 会形成单质析出物,不利于立方织构的形成;当 $w(\text{Fe}) > 0.003\%$ 时, Si 能促使 Al-Si-Fe 化合物析出,有利于立方织构的形成。在工业化生产中最好控制 Si 含量在 0.001% 以下。

毛卫民等^[15]研究了不同 Mg 含量高纯铝箔退火后立方织构的差别,发现增加 0.001% 的 Mg 就能使铝箔立方织构有所下降。Mg 含量的增加,会降低 Al 的形核率和晶核长大的速度,抑制立方织构的形成和发展^[16]。工业化生产中同样要严格控制 Mg 的含量,最好不要超过 0.001%。

3 稀有金属对电容器用铝箔织构的影响

3.1 Be 对电容器用铝箔织构形成的影响

Be 对电容器用铝箔形变织构和再结晶织构的形成

具有重要影响。刘楚明等^[17]在高纯铝中添加不同含量的 Be,按照相同的工艺生产出电容器用高压阳极铝箔,研究了 Be 含量对铝箔织构形成的影响。发现电容器用高压阳极铝箔的变形织构主要由 S 织构 $\{123\} \langle 634 \rangle$ 、C 织构 $\{112\} \langle 111 \rangle$ 、B 织构 $\{110\} \langle 112 \rangle$ 组成,添加微量 Be 元素能够对高纯铝箔变形织构类型和含量产生影响。无 Be 时,铝箔中 S 织构和 C 织构含量较高;随 Be 含量的增加, S 织构和 C 织构取向密度减少, B 织构取向密度增加;继续增加 Be 含量至最高的 0.002 8% 时, B 织构取向密度减弱,铝箔中出现了较强的旋转 G 织构 $\{011\} \langle 100 \rangle$,其 ODF 图见图 5。成品退火后, Be 元素对铝箔再结晶织构的 R 织构和立方织构强度均产生一定影响。未添加 Be 时,铝箔中 R 织构最强、立方织构最弱; Be 含量为 0.002% 时,铝箔中 R 织构最弱、立方织构最强;其他 Be 含量下,铝箔中 R 织构强度均显著增强、立方织构强度则相应减小,其 ODF 图见图 6。

Fe 能够显著提高高纯铝的再结晶温度,对电容器用铝箔中立方织构的形成具有强烈的阻碍作用。当 Fe 含量一定时,改变 Fe 在铝基体中的存在形式和状态,对提高铝箔立方织构强度具有重要意义。Fe 与其他微

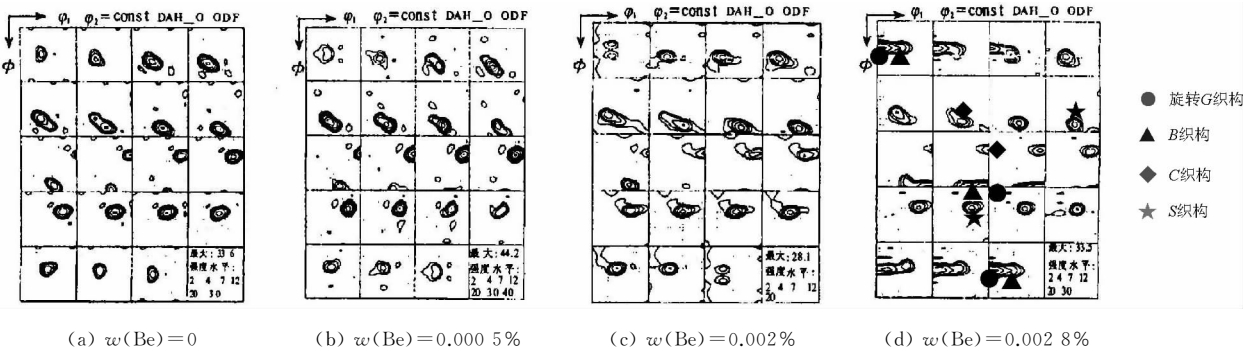


图5 Be含量对电容器用铝箔变形织构的影响^[17]

Fig.5 Effects of Be content on deformation texture of aluminum foil for capacitors

量元素的相互作用对 Fe 的存在状态有直接联系。Be 在铝中的溶解度极小,且随温度的降低溶解度急剧下降;共晶温度为 645 ℃ 时, Be 的极限溶解度仅为 0.08%

(质量分数),至 127 ℃ 时 Be 几乎不溶于铝,可见 Be 在高纯铝中只能以化合物的形式存在。有研究显示, Be 在高纯铝中可与 Fe 形成多元化合物,析出后可净化铝

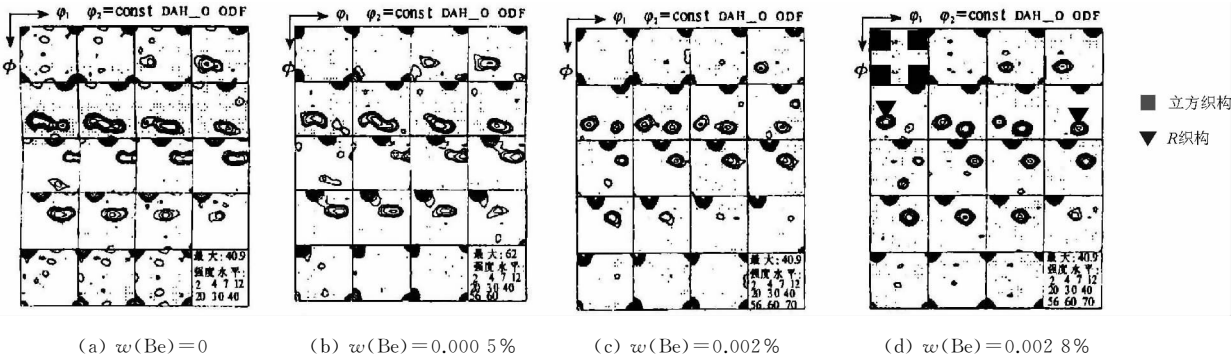


图6 Be含量对电容器用铝箔再结晶组织的影响^[17]
Fig.6 Effects of Be content on recrystallization texture of aluminum foil for capacitors

基体,降低铝基体中杂质Fe的浓度。在高纯铝中添加适量的微量Be元素,对提升电容器用铝箔立方织构比例很有帮助。

3.2 Y对电容器用铝箔织构形成的影响

稀土Y与Fe、Si等可生成化合物,能够改变杂质元素在高纯铝中的存在形式和状态,对电容器用铝箔织构的形成产生积极作用。邓运来等^[18]、刘楚明等^[19]在高纯铝中添加不同含量的稀土Y,按照相同的工艺生产出电容器用高压阳极铝箔,利用晶体取向分布函数(ODF)分析了Y作用下铝箔织构形成的规律,分析了

稀土Y对铝箔再结晶组织的作用机理。发现稀土Y的加入不会改变电容器用高压阳极铝箔变形织构的类型,但能改变各织构类型组分的相对强度,铝箔冷轧织构仍然由S织构、C织构、B织构组成。稀土Y的添加,铝箔变形织构中各织构类型的组分强度都很强,特别是S织构;Y含量为0.005%时,B织构组分强度最高,而当Y含量为0.007%时,C织构组分强度达到最强,其ODF图见图7。成品退火后,随着Y含量的增加,立方织构强度有所降低,相应的R织构强度略有增加,其ODF图见图8。

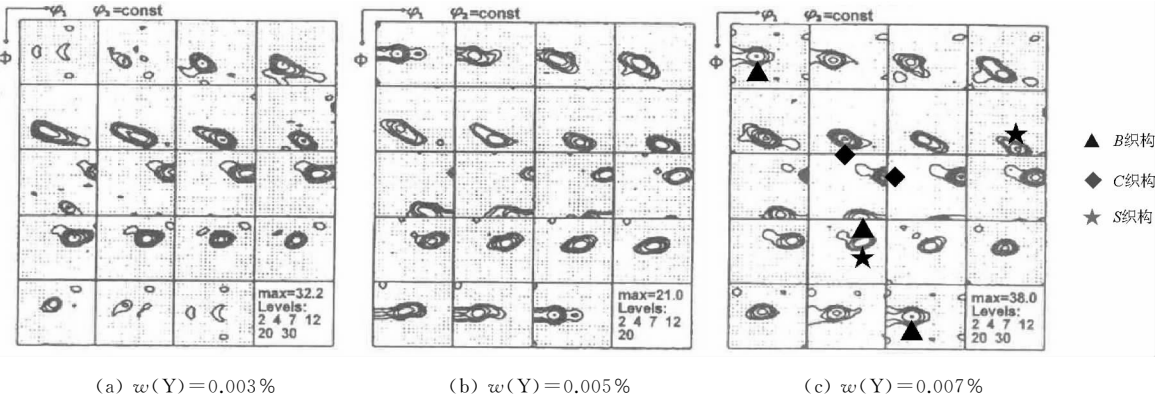


图7 Y含量对电容器用铝箔变形组织的影响^[18]
Fig.7 Effects of Y content on deformation texture of aluminum foil for capacitors

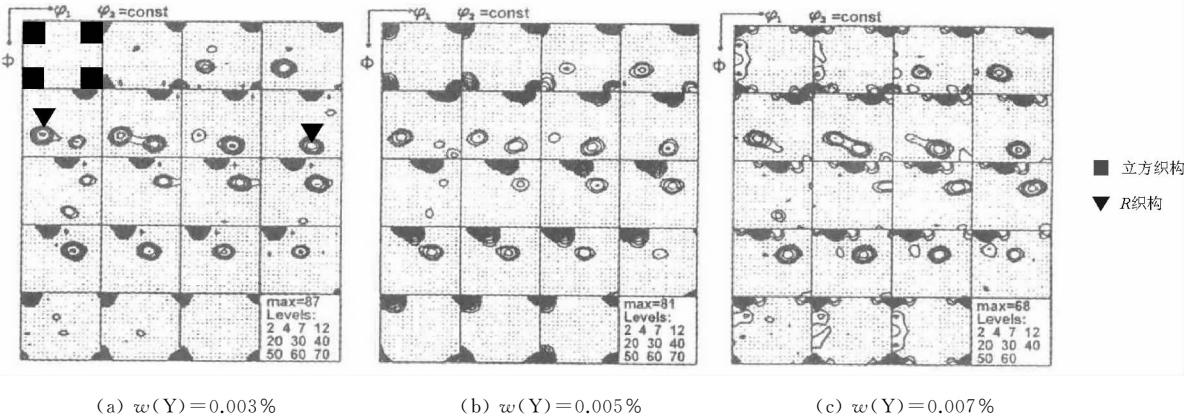


图8 Y含量对电容器用铝箔再结晶组织的影响^[18]
Fig.8 Effects of Y content on recrystallization texture of aluminum foil for capacitors

稀土 Y 在 Al 中的作用属性决定了其对铝箔织构形成的影响规律。Y 在 Al 中的溶解度极小,且随温度的降低溶解度逐渐降低;共晶温度为 637 °C 时,Y 的极限溶解度仅为 0.17% (质量分数),从 627 °C 降温至 527 °C 时,其溶解度由 0.15% 骤降为 0.08%,在室温下 Y 几乎不溶于 Al,可见 Y 在高纯铝中只能以化合物的形式存在。Y 和 Al 及杂质 Fe、Si 等能够形成多种多元化合物,可达到净化基体的作用,退火时也能显著消除杂质对立方取向晶核的形成和长大的阻碍作用,对立方织构组分强度的增加起到积极的作用。稀土 Y 虽然对铝箔立方织构的提升有帮助,但是过量加入 Y,铝箔立方织构的强度反而与其加入量成反比,这是由于过量的 Y 会加大对晶界迁移的阻碍作用,退火时会降低大角度晶界的迁移速度,迟滞再结晶过程的发展。

铝箔冷轧变形织构可直接影响再结晶立方织构的形成和发展。S 织构,与立方织构具有良好的 $40^\circ <111>$ 关系,退火时可向立方织构转化;C 织构,退火时有助于立方织构在其变形基体的过渡带内优先形核,为立方织构的发展创造有利条件;B 织构,抑制立方织构的形成,这是因为 B 织构在退火时易发生回复,阻碍立方织构的形成和发展。在高纯铝中添加适量的稀土 Y,对提升电容器用铝箔立方织构比例是有益的。

3.3 其他稀有元素对电容器用铝箔织构形成的影响

左宏等^[20]研究了不同 Ga 含量对高纯铝箔再结晶织构的影响,发现 Ga 可导致铝箔立方织构体积分数的降低,这是因为 Ga 的加入及其含量的增加,引起了铝箔再结晶温度的提高,导致立方取向形核变得困难,其他取向形核优先生长。因此,Ga 作为抑制立方织构形成的杂质元素,在工业化生产中最好控制在 0.001% 以内。

刘建才^[21]在高纯铝中添加了 In 元素。发现当 In 含量小于 0.004% 时,其对铝箔立方织构的增强有利,立方织构占有率总保持在 95% 左右;当 In 含量继续增加超过 0.004% 时,非立方取向晶粒得到发展,R 织构逐渐增加。

宋婧波等^[22]在高纯铝中掺杂了微量的 Sn 元素。发现 Sn 含量较低时,铝箔立方取向亚结构形核及快速长大的优势不受影响,立方织构可达 95%。

路璐等^[23]在高纯铝中加入了不同量的稀土 Ce 元素,研究了成品退火后 Ce 对铝箔立方织构的影响。发现适量的 Ce 可以增加铝箔立方织构的取向密度,但不是越多越好。

4 总结与展望

微量元素在电容器用铝箔织构的形成和演化过程

中十分重要,杂质元素如 Fe、Cu 等抑制再结晶立方织构的形成和发展,而极少量的稀有金属元素如 Be、Y 等对提升再结晶立方织构强度有一定的促进作用,但无论是对立方织构有利的还是有害的,微量元素的含量都应该适量。

虽然国内外已经有很多关于微量元素对铝箔织构影响的研究,但是仍然没有完全覆盖,高纯铝中其他杂质如 Mn、Ni、Cr、Ti、Zr 等元素对铝箔织构形成和演变又是如何影响和作用的,仍然需要进一步研究,这对于建立微量元素与电容器用铝箔织构联系的完整谱系具有积极意义。

参 考 文 献

- [1] 杨宏,毛卫民. 铝电解电容器铝箔的研究现状和技术发展[J]. 材料导报, 2005, 19(9): 1-4.
- [2] 申蓉,卢云,杨邦朝,等. 高压铝阳极箔制备技术研究进展[J]. 材料导报, 2008, 22(11): 69-73.
- [3] DILLAMORE I L, KATOH H. A comparison of the observed and predicted deformation textures in cubic metals[J]. Metal Science, 1974, 8(1): 73-83.
- [4] 魏承扬. 再结晶织构形成机理的研究进展[A]. 2014 年建筑科技与管理学术交流会[C]. 北京, 2014.
- [5] LÜCKE K, RIXEN R, SENNA M. Formation of recrystallization textures in rolled aluminum single crystals[J]. Acta Metallurgica, 1976, 24(2): 103-110.
- [6] HIRSCH J, LÜCKE K. The application of quantitative texture analysis for investigating continuous and discontinuous recrystallization processes of Al-0.01Fe[J]. Acta Metallurgica, 1985, 33(10): 1 927-1 938.
- [7] MOLODOVD A, CZUBAYKO U, GOTTSTEIN G, et al. Mobility of $<111>$ tilt grain boundaries in the vicinity of the special misorientation $\Sigma=7$ in bicrystals of pure aluminium[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1995, 32(4): 529-534.
- [8] JENSEN J. Growth rates and misorientation relationships between growing nuclei grains and the surrounding deformed matrix during recrystallization[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1995, 43(11): 4 117-4 129.
- [9] LEED N. The evolution of recrystallization textures from deformation textures[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1995, 32(10): 1 689-1 694.
- [10] 张新明,孟亚,周卓平,等. Fe 杂质对高纯铝箔再结晶织构及比电容的影响[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(1): 19-24.
- [11] 徐进,毛卫民,冯惠平,等. Cu 对高压电解电容器阳极铝箔再结晶织构的影响[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(2): 133-136.
- [12] HIRSCH J, LÜCKE K. Mechanism of deformation and development of rolling texture in polycrystalline FCC metals[J]. Acta Metallurgica, 1988, 36(11): 2 905-2 927.
- [13] 谢雨哲,何陈强,杨宏,等. 微量锌元素对高压电解电容器高纯铝箔再结晶织构的影响[J]. 中国体视学与图像分析, 2020, 25(2): 144-149.
- [14] ZHAI X S, WANG L, LIU Y, et al. Effects of content and distribution of trace element on texture and property of high-voltage electronic aluminum foil[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(8): 1 552-1 557.

选区激光熔化 316L 粉末过程数值模拟研究

邱云基¹ 申梦清¹ 牛晓峰¹ 焦晋峰²

(1.太原理工大学材料科学与工程学院; 2.太原理工大学土木工程学院)

摘 要 采用光滑粒子流体动力学方法建立了单次选区激光熔化(SLM)的三维数学模型,耦合了流动场、温度场、表面张力以及润湿作用对选区激光熔化 316L 不锈钢粉末过程进行数值模拟研究。分析了不同激光功率对熔池长度和宽度的影响以及表面张力对 SLM 过程的影响,并与有限元模拟软件的模拟结果以及试验结果进行对比。结果表明,熔池的长度与宽度随着激光功率的增大而增大,同时也验证了马兰戈尼力是 SLM 过程的主要驱动力。

关键词 选区激光熔化;光滑粒子流体动力学;表面张力;数值模拟

中图分类号 TG402;TP311

文献标志码 A

DOI10.15980/j.tzzz.2021.09.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation of the Melting Process of Selective Laser
Melting 316L Powders

Qiu Yunji¹, Shen Mengqing¹, Niu Xiaofeng¹, Jiao Jinfeng²

(1.College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology;
2.College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology)

Abstract: A single SLM three-dimensional mathematical model was established using the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method. The flow field, temperature field, surface tension and wetting action were coupled to simulate the SLM 316L stainless steel powder. The influence of different laser power on the length and width of molten pool and the influence of surface tension on SLM process were analysed, and compared with the simulation and the experimental results of finite element simulation software. The results indicate that the length and width of the molten pool are increased with the increase of laser power, verifying that Marangoni is the driving force of SLM process.

Key Words: Selective Laser Melting, Smoothed Particle Hydrodynamics, Surface Tension, Numerical Simulation

选区激光熔化成形金属粉末(SLM)是由选择性激光烧结演变而来的一种快速成形技术。其是将平铺在底板上的金属粉末通过计算机控制激光器有选择性地

进行扫描,金属粉末熔化形成熔池,经过冷却后与底板相连接。这种加工方法相比于传统的成形工艺具有:①节约资源,成本可控;②力学性能与锻造工艺相当;③可

收稿日期:2021-01-27;修改稿收到日期:2021-02-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874209);山西省科技重大专项资助项目(20191102007)

第一作者简介:邱云基,男,1994 年出生,硕士研究生,太原(030024),E-mail:1796025459@qq.com

通信作者:牛晓峰,男,1982 年出生,教授,太原(030024),E-mail:niuxiaofeng@tyut.edu.cn

引用格式:邱云基,申梦清,牛晓峰,等. 选区激光熔化 316L 粉末过程数值模拟研究[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(9):1 092-1 096.

QIU Y J, SHEN M Q, NIU X F, et al. Numerical simulation of the melting process of selective laser melting 316L powders[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(9):1 092-1 096.

[15] 毛卫民,杨宏,余永宁,等. 微量 Mg 对高压电子铝箔腐蚀结构的影响[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(5): 1 057-1 060.

[16] JINH O, SAIMOTO S. The role of specific impurities in the evolution of deformation textures[J]. Scripta Metallurgica, 2001, 46(4): 275-279.

[17] 刘楚明,张新明,周鸿章. 微量铍对高压阳极电容铝箔再结晶组织形成的影响[J]. 轻合金加工技术, 2001, 29(6): 15-18.

[18] 邓运来,张新明,刘楚明,等. 微量稀土对高压阳极电容铝箔组织演变的影响[J]. 功能材料, 2002, 33(1): 60-62.

[19] 刘楚明,张新明,陈志永,等. 微量元素对高纯铝箔立方织构的影响[J]. 中南工业大学学报, 2001, 32(2): 176-179.

[20] 左宏,李新芳,刘春明. 微量 Ga 对电容器阳极用铝箔组织及比电容的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(10): 1 400-1 403.

[21] 刘建才. 痕量元素和预处理对高压铝箔立方织构和发孔性能的影响[D]. 长沙:中南大学, 2011.

[22] 宋婧波,毛卫民,孟利,等. 高压阳极含锡铝箔再结晶织构的EBSD 分析[J]. 中国体视学与图像分析, 2007, 12(4): 258-262.

[23] 路璐,李文学. Ce 对铝箔再结晶织构演变规律的影响[J]. 热加工工艺, 2010, 39(22): 69-71.

(编辑:栗万仲)