

稀土元素对铝合金组织与性能影响的研究进展

余 聪 陈乐平 周 全
(南昌航空大学航空制造工程学院)

摘 要 稀土元素因其有效、稳定的变质作用,被广泛应用于多种金属材料中。变质处理可以细化合金组织,从而提高合金的力学性能,不同的稀土元素对铝合金的变质效果不同。重点介绍了几种常用稀土元素对铝合金显微组织、力学性能的影响及其变质机理,综述了现阶段国内外稀土铝合金的研究现状,并阐述目前存在的问题,以及对未来研究进行了展望。

关键词 稀土元素;铝合金;显微组织;力学性能

中图分类号 TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.02.024

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress in Effects of Rare Earth Elements on Microstructure and Properties of Aluminum Alloy

Yu Cong, Chen Leping, Zhou Quan
(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

Abstract: Rare earth element is widely used in a variety of metal materials due to the effective and stable modification. The modification can refine alloy structure, thus improving mechanical properties, and the modification effect of different rare earth elements on aluminum alloy is different. The influence of several rare earth elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys as well as the modification mechanism was mainly introduced. Meanwhile, the present research status of rare earth aluminum alloys at home and abroad was reviewed. The existing problems were discussed and the future research was prospected.

Key Words: Rare Earth Elements, Aluminum Alloys, Microstructure, Mechanical Properties

铝合金具有密度低、耐腐蚀性强等特点,被广泛应用于航空、航天和汽车等领域^[1]。虽然铝合金的制备成本低,耐腐蚀性能较好,但采用传统铸造方法制备的铝合金,晶粒多为粗大、分布不均匀的柱状晶,其中共晶Si相多为层片状和针状。这些导致铝合金的室温以及高温力学性能不佳。在铝合金中添加适量稀土元素,不仅可以达到晶粒细化的效果,还可以消除合金中杂质的影响,改善合金的室温和高温性能等,因此添加稀土元素的方法得到广泛应用^[2~4]。本课题介绍了稀土元素在铝合金中的作用,综述了稀土元素对铝合金组织和性能的影响,并展望了稀土在铝合金中应用的发展方向。

1 稀土元素在铝合金中的作用

稀土元素因为其最外层的电子结构特殊,所以其化学性质十分活泼,能与铝形成稳定的金属间化合物,达到细化组织的效果,从而起到变质效果并且还能降低熔

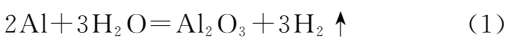
体中的氢含量,起到精炼、净化和合金化的作用^[5~7]。

1.1 变质作用

稀土元素的变质作用主要是细化合金的枝晶组织,抑制合金中富铁相的生成。由于稀土元素与铝原子的尺寸相差较大,因此大部分稀土元素无法进入到基体中,只能富集在晶界处,使得铝原子之间的作用力增大,抑制枝晶的生长,达到改善合金显微结构和提高合金力学性能的目的^[8]。

1.2 净化作用

稀土元素的精炼净化作用是指添加稀土元素可以降低熔体中的氢含量和气孔数量。铸造过程中,熔体中容易卷入大量水蒸气,铝和水蒸气的反应如下:



稀土元素能和氢气发生反应,生成LaH₂、CeH₂等难熔化合物^[9],减少气体的析出,显著降低熔体中的氢

收稿日期:2020-07-30;修改稿收到日期:2020-08-17
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51261026)
第一作者简介:余聪,男,1998年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:921312043@qq.com
通信作者:陈乐平,男,1964年出生,教授,南昌(330063),E-mail:jnnclp@163.com
引用格式:余聪,陈乐平,周全. 稀土元素对铝合金组织与性能影响的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(2): 241-246.
YU C, CHEN L P, ZHOU Q. Research progress in effects of rare earth elements on microstructure and properties of aluminum alloy[J].
Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(2): 241-246.

含量,并在熔炼过程中以残留物的形式析出。此外,稀土元素还可以和熔体中的氧、硫等元素发生反应,生成 RES 、 RE_2S_3 、 RE_2O_2S 等硫化物,与 Dy 、 As 等元素生成 $REDy$ 、 $REAs$ 等化合物。这些稀土化合物都具有熔点高、密度低的特点,在熔炼过程中能上浮成渣,采取扒渣去除,以消除杂质元素对合金组织和性能的危害。

1.3 合金化作用

稀土元素在铝合金中表现的强化作用为:细晶强化、固溶强化、第二相强化等^[10]。哪种强化机制占主导地位是由稀土元素的添加量决定的。当稀土元素的添加量小于0.1%(质量分数,下同)时,稀土元素固溶于基体中或者偏聚在晶界处,此时,固溶强化占主导地位;当稀土元素的添加量大于0.3%时,稀土元素以金属间化合物的形式存在,此时,第二相强化占主导地位。无论是何种强化机制,都在一定程度上强化了铝合金^[11]。

2 稀土元素对铝合金组织和性能的影响

通过添加单一稀土元素对铝合金的显微组织进行细化可以提高合金的力学性能,常用的稀土元素有 Y 、 Ce 、 Yb 、 La 、 Er 等。

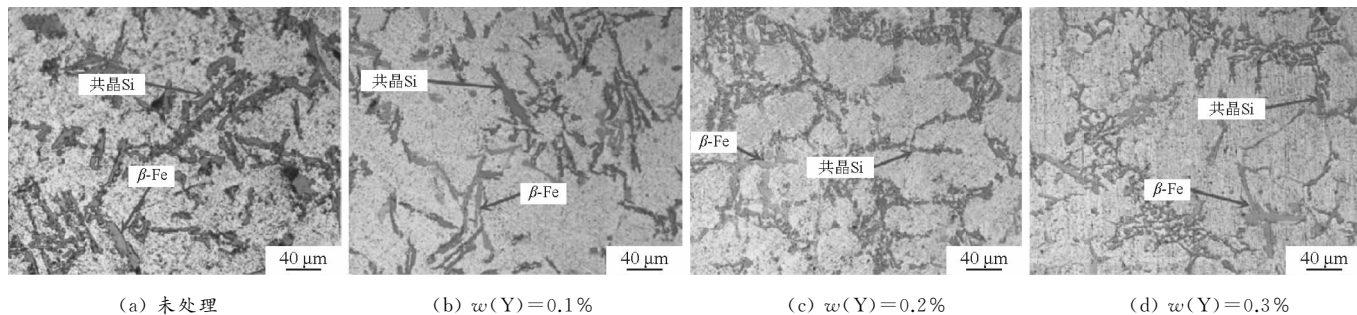


图1 A356合金经不同含量 Y 变质后的显微组织

Fig.1 Microstructure of A356 alloy modified with different Y content

到6201铝合金中,发现随着 Y 添加量的不断增大,晶粒尺寸不断减小,但细化效果逐渐减弱;当 Y 的添加量为0.5%时,晶粒平均直径从起始的197 μm 降低到66 μm ,细化效果明显。

Y 的变质机理主要有两个方面^[16]:一方面因为 Y 与 Al 的原子尺寸相差较大, Y 进入 Al 晶格中,导致晶格畸变,使得体系的自由能升高,所以为了降低体系的吉布斯自由能,大部分含 Y 的化合物只能分布在晶界处,形成微小的稀土化合物;另一方面,由于 Y 的加入,使得铝合金中分布在晶界处的第二相增多,晶界迁移的阻力增大,从而阻碍晶粒的生长,使得晶粒细化。此外,生成的 Al_3Y 可以作为非均质形核的核心,提高形核率,从而达到细化晶粒的效果;但当 Y 含量过高时,会析出粗大的铝稀土相,导致第二相富集,不利于组织的

2.1 Y 对铝合金组织和性能的影响

向铝合金中添加一定量的 Y ,对合金显微组织有明显的细化效果。DING W W等^[12]的研究表明,将Al-10 Y 中间合金加入到6063铝合金中,晶粒细化明显。未添加 Y 的合金组织主要为粗大的、分布不均匀的柱状晶。添加 Y 后,组织得到了细化,分布也变得均匀。刘生发等^[13]向6063铝合金中添加 Y ,发现 Y 十分活泼,能与合金中的 Si 相结合,从而降低了 $AlFeSi$ 相中的 Si 含量,改善了 $AlFeSi$ 相的形貌。当 Y 的添加量为0.1%~0.3%时,随着 Y 的添加量增加,6063铝合金的力学性能逐渐改善。当 Y 的添加量为0.3%时,合金的抗拉强度和伸长率分别达到154 MPa和22.5%。

WEI I F等^[14]的研究表明,向A356合金中加入一定量的 Y ,对A356合金的显微组织的细化效果明显,见图1。可以看出,当未添加 Y 时,显微组织分布不均匀,共晶 Si 相为针状,晶界并不明显;当 Y 的添加量为0.1%时,共晶 Si 相变细,分布也变得较为均匀;当 Y 添加量为0.2%时,晶界变得清晰,合金的组织分布更加均匀,长针状的共晶 Si 相转变为块状, $\alpha-Al$ 相平均晶粒尺寸减小至40.3 μm ;当 Y 的添加量为0.3%时,共晶 Si 相又变为针状。雷文魁等^[15]将Al-30 Y 中间合金加入

细化,从而使合金的性能下降。

2.2 Ce 对铝合金组织和性能的影响

近年来,研究者发现向铝合金中添加 Ce 可以改善铝合金的力学性能。钟韬等^[17]向3003铝合金中加入了微量的 Ce ,发现合金的力学性能有所提升,当 Ce 的添加量为0.35%时,合金的显微硬度(HV)比未添加 Ce 的3003合金的高56.3。VIPIN K S等^[18]研究表明,向6061铝基复合材料中添加 CeO_2 ,可以有效地提高材料的力学性能,在0.5%~2.5%范围内,随着 Ce 添加量增加,复合材料的力学性能逐渐提高。当 Ce 添加量为2.5%时,合金的抗拉强度和抗弯强度达到123 MPa和615.6 MPa。刘慧等^[19]向7B04铝合金中添加微量的 Ce ,发现合金的显微组织细化明显,合金的抗拉强度和屈服强度变化不大,但当 Ce 的添加量为0.1%时,合金

的伸长率达到 10.81%，比未添加 Ce 的合金提高了 26.5%。祝贞凤等^[20]以 Al-10Ce 中间合金的方式向 7150 铝合金中添加 Ce，发现加入 0.1% 的 Ce 后，合金的枝晶间组织由粗糙的鱼骨状变为窄而不连续的形态，平均晶粒尺寸也减小至未加入 Ce 时的 10%。

Ce 能细化晶粒尺寸主要有两方面原因：一方面是因为 Ce 吸附在共晶 Si 相表面，形成大量的孪晶，共晶 Si 的生长机制变为孪晶凹谷机制 (TPRE)，使得层片状的共晶 Si 相变为纤维状或短棒状。另一方面，Ce 和合金中的 Si、Cu、Mn 等元素形成富稀土合金相，这些相在固-液界面前沿富集，不仅导致成分过冷，还阻碍初生 α -

Al 相的生长；在一定条件下，Ce 还会与合金中的 Fe 发生反应，使得合金中的 β -Fe 相形貌发生改变，从而达到细化组织的效果^[21]。

2.3 Yb 对铝合金组织和性能的影响

研究者发现将 Yb 添加到铝合金中也具有优良的变质效果。LI B 等^[22]将纯 Yb 加入到 Al-7.5Si-0.45Mg 中，发现未变质时，初生 α -Al 相呈粗大的枝晶状，共晶 Si 相也为层片状，随着 Yb 的加入，共晶 Si 相的尺寸和片状间距明显减小，但共晶 Si 相的形貌并未发生变化，仍为片状和枝晶状，见图 2。当 Yb 含量为 0.15% 时，共晶 Si 的分布较为均匀，当 Yb 含量为 0.3% 时，共晶 Si

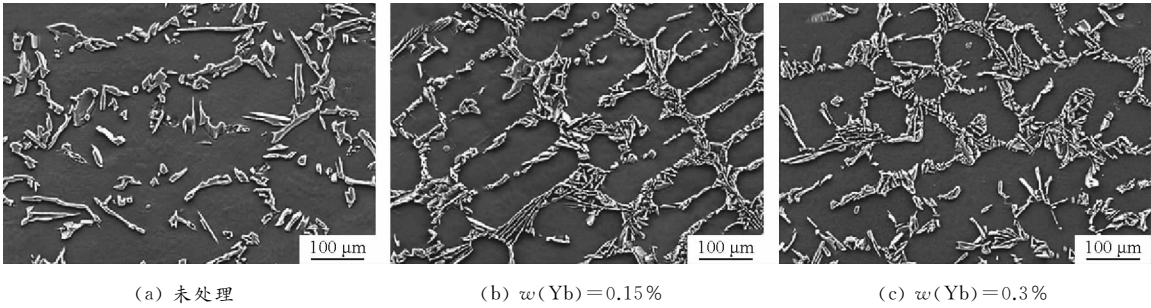


图 2 不同 Yb 含量下 Al-7.5Si-0.45Mg 的显微组织

Fig.2 Microstructure of Al-7.5Si-0.45Mg alloy with different Yb content

相得到明显细化，分布更加均匀。

徐衡^[23]向 A356 合金中添加 Yb，发现 Yb 可以细化显微组织，当 Yb 含量为 0.1% 时， α -Al 相明显被细化；当 Yb 含量为 0.2% 时， α -Al 相得到进一步细化。随着 Yb 的加入， α -Al 相的二次枝晶间距不断减小，Yb 含量为 0.2% 时二次枝晶间距达到最小值 30 μm ^[23]；当 Yb 含量继续增加到 0.3% 时，合金发生过变质，间距反而增大，见图 3。ZOU Y 等^[24]通过在 ADC12 铝合金中以 Al-10Yb 中间合金的形式添加 Yb，发现合金中的 α -Al、共晶 Si 和 β -Al₃FeSi 相得到明显的细化。当 Yb 加入量为 0.9% 时，还观察到 Al₃Yb 金属间化合物。诸建彬等^[25]将 Al-10Yb 中间合金加入到 Al-Zn-Mg-Cu 合金中，发现加入 Yb 后，合金显微组织得到明显细化，但当添加量超过 0.2% 时，晶粒反而变得粗大，因此 Yb 的添加量为 0.2% 时，细化效果最好。

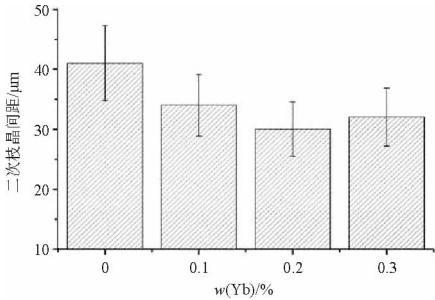


图 3 添加 Yb 对二次枝晶臂间距的影响

Fig.3 Effect of Yb addition on SDAS

Yb 和 Si 的原子直径比为 1.685，与 1.65 相接近，可使共晶 Si 的生长机制变为孪晶凹谷机制 (TPRE)^[26]。因此，Yb 的加入可以吸附在 Si 相表面，和 Si 晶体 {111} 面上产生台阶相互作用，形成大量孪晶，从而阻碍层片状共晶 Si 相的生长，达到细化组织的效果。Yb 虽然能细化共晶 Si 组织，但是并不能改善共晶 Si 相的形貌，与作为亚共晶 Al-Si 合金的常规变质剂的 Sr 变质效果不同。就亚共晶 Al-Si 合金而言，选择 Y、Er 等稀土较好，既能达到细化晶粒的效果，又能改善共晶 Si 相和其他相的形貌，从而能更大程度地提升合金的力学性能。

2.4 La 对铝合金组织和性能的影响

向 Al-Si 合金中添加一定量的 La，能够有效地细化合金组织和提高力学性能。TSAI Y C 等^[27]的研究表明，向 A356 合金中加入一定量的 La (0.2%~1.0%) 进行变质，当 La 添加量为 0.2%~0.8% 时，合金中共晶 Si 相的形貌与未添加 La 的 A356 合金中的共晶 Si 相形貌相似，细化效果不明显；但当 La 添加量为 1.0% 时，共晶 Si 相由原来粗大的板状变为短纤维状，见图 4。在此范围内，当 La 添加量大于 0.6% 时，合金的伸长率得到显著提升。吴迪^[28]的研究表明，向 Al-Cu-Mn-Ti-Cd-Zr 合金中添加 La，当 La 添加量为 0.2% 时，T6 时效后合金的抗拉强度和伸长率能达到 504 MPa 和 10.2%；当 La 添加量为 0.3% 时，共晶 Al₂Cu 相分布更加均匀，

晶粒也得到了细化。要东明^[29]的研究表明,向铸造 Al-Cu 合金中添加一定量的 La(0~1.0%)进行变质后,当测试温度为 180 ℃和 220 ℃,La 的添加量为 0.3%时,合金的抗拉强度分别达到 320 MPa 和 270 MPa,比未变质处理的合金提升了 13.07%和 22.72%。

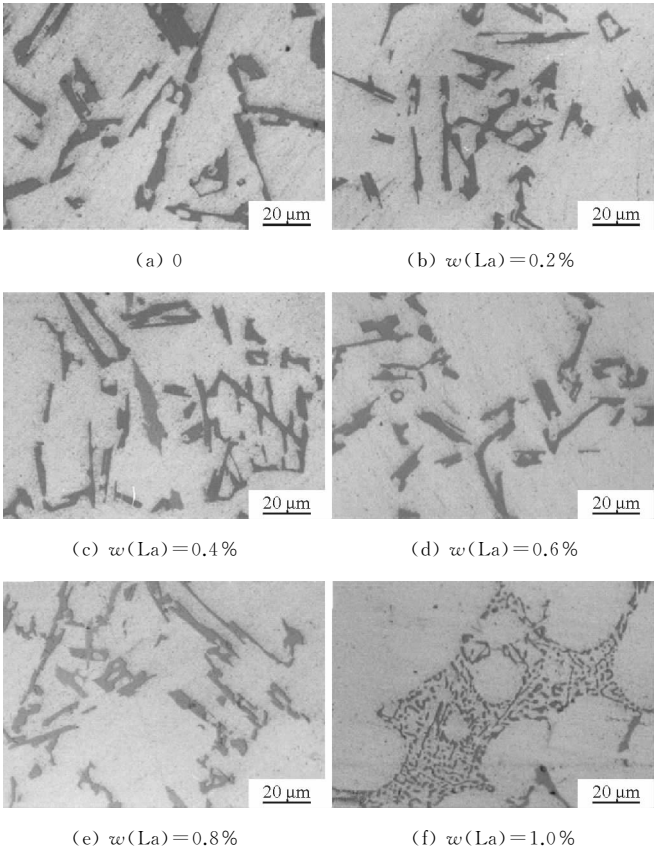


图 4 不同 La 含量下 A356 合金的铸态显微组织
Fig.4 The as-cast microstructures of A356 alloys with different La content

La 能细化晶粒主要有两个原因。首先,La 能与熔体中其他元素发生热力学反应,形成金属间化合物,为 α -Al 提供非均质形核核心;其次,La 在 Al 中的溶解度极小,大部分 La 原子无法进入 Al 的晶格,这意味着在凝固过程中,La 富集在固-液界面前沿,从而阻碍初生 α -Al 的生长,达到细晶强化的效果^[30]。

2.5 Er 对铝合金组织和性能的影响

近年来,有研究表明,稀土 Er 对共晶 Al-Si 合金或过共晶 Al-Si 合金中 Si 相的形貌和尺寸有良好的变质效果。SHI Z M 等^[31]的研究表明,向 A356 合金中添加 Er,当 Er 含量为 0.3%时, α -Al 晶粒的细化效果最好,对 Si 相的改性效果最好,将层片状的 Si 相变为颗粒状和短棒状。当 Er 含量为 0.4%时,合金发生了过变质, α -Al 晶粒又变得粗大。LI Q 等^[32]的研究表明,当 Er 的添加量为 0.5%时,Al-20Si 合金中的初生 Si 相从粗多角形、血小板状和星形明显变为细小的块状;共晶

Si 相形貌发生了变化,从粗血小板状、针状结构变为细珊瑚状纤维结构。

Er 对铝合金的细化机理与 La 相似,因为在 α -Al 晶粒形核和长大的过程中,Si 和稀土原子大部分无法进入晶粒,主要富集在固-液界面前沿,所以导致成分过冷,阻碍初生 α -Al 的生长;Er 与熔体中某些元素,生成一些特殊的化合物,提供非均质形核的核心。对比 Er 和 La 对 A356 合金的变质后的性能,发现 Er 对于亚共晶铝合金的性能提升高于 La,但 La 在提升铝合金的导电性和耐腐蚀性方面强于 Er。

2.6 Sm 对铝合金组织和性能的影响

稀土元素 Sm 与 Si 的原子半径比为 1.54,与 1.65 相接近,所以 Sm 对 Si 相有良好的变质效果。饶远生等^[33]将 Sm 添加到 ADC12 铝合金中,发现合金组织由原来粗大的、无规则的 α -Al 相变为轮廓清晰、分布较为均匀的显微组织,二次枝晶间距和平均晶粒尺寸由原来的 51 μm 和 90 μm 减少到 15 μm 和 40 μm ,细化效果明显。李纛缤等^[34]将 Al-20Sm 中间合金加入到 7050 铝合金中,发现 Sm 的加入使晶粒尺寸减小,晶粒数量增多。当添加量为 2.0%时,晶粒尺寸达到最小值 25.93 μm 。当 Sm 添加量超过 2.0%时,合金发生过变质,晶粒尺寸反而增大。QIU H 等^[35]向 Al-7Si-0.7Mg 合金中添加 Sm,发现晶粒由柱状晶变为等轴晶,二次枝晶间距也减小,合金的强度和伸长率随着 Sm 添加量的增大,先升高后降低,在添加量为 0.6%时,抗拉强度和伸长率都达到最大值,见图 5。

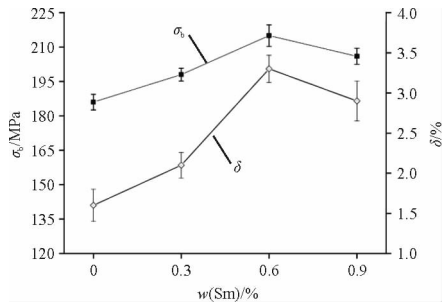


图 5 不同 Sm 含量下 Al-7Si-0.7Mg 合金的力学性能
Fig.5 The mechanical properties of Al-7Si-0.7Mg alloys with different Sm content

2.7 其他元素

除了上述几种稀土元素外,还发现 Sc、Gd、Eu 等元素对铝合金具有良好的变质效果。向铝合金中加入稀土元素,其与熔体中某些元素发生化学反应,生成富稀土相,这些相富集在凝固界面前沿,阻碍组织长大,从而达到细化组织的效果,但添加的含量过多,将会生成粗大的第二相,在界面处富集,降低界面的结合力,从而降低合金的室温力学性能^[36~39],其中 Gd 还对合金的高

温性能具有一定影响。隋育栋^[40]将 Gd 加入到 M174 合金中,结果发现,合金的高温瞬时拉伸性能呈先增加后降低的趋势。当温度低于 200 ℃时,同一热处理条件下的 M174-0.1Gd 拉伸性能最优,抗拉强度达到 260.3 MPa;当温度高于 300 ℃时,同一热处理条件下的 M174-0.2Gd 抗拉强度最优,达到 123.4 MPa。

3 稀土铝合金存在的问题及展望

我国已成为全球最大的铝合金制造国,铝合金的使用量也在逐年攀升,对力学性能等方面的要求也在不断提高。向铝合金中添加稀土元素可使晶粒细化,从而达到提升铝合金力学性能的目的。但是由于稀土元素种类繁多,且关于稀土元素对合金的作用机理的了解还不够透彻,限制了稀土元素在铝合金中的应用。为了进一步研究稀土元素在铝合金中的应用,可以从以下 3 个方面开展深入研究。

(1)合理地使用已知的变质稀土元素,并深入考虑采用两种或两种以上稀土元素对铝合金进行复合变质处理。

(2)针对部分稀土元素的变质效果不理想的状况,可以采用稀土元素与物理场复合处理的方法进一步改善合金组织和力学性能进一步改善。

(3)提高合金的力学性能不能局限于常温力学性能,对材料在高温条件下的性能有待进一步开展研究。

参 考 文 献

- [1] 冯艳飞,孙巍,杨路,等.稀土在车用铝合金中的作用最新研究进展[J].热处理技术与装备,2020(2): 68-71.
- [2] MIZUTANI U, INUKAI M, SATO H, et al. Physical Metallurgy 2-Electron Theory of Complex Metallic Alloys[M]. Amsterdam, Holland: Elsevier, 2014.
- [3] 辛明德,李忠允.单一稀土元素在铸造铝合金中应用现状[J].机械工程师,2015(11): 69-74.
- [4] 潘利文,罗涛.稀土铝合金最新研究进展[J].轻合金加工技术,2016(9): 12-16.
- [5] BOHLEN J, YI S, LETZIG D, et al. Effect of rare earth elements on the microstructure and texture development in magnesium-manganese alloys during extrusion[J]. Materials Science and Engineering, 2010, A527(26): 7 092-7 098.
- [6] RØYSET J, RYUM N. Scandium in aluminium alloys[J]. Metallurgical Reviews, 2005, 50(1): 19-44.
- [7] BOOTH-MORRISON C, DUNAND D C, SEIDMAN D N. Coarsening resistance at 400 ℃ of precipitation-strengthened Al-Zr-Sc-Er alloys[J]. Acta Materialia, 2011, 59(18): 7 029-7 042.
- [8] 孙玥,田伟,胡梦楠.稀土对铝合金力学性能影响的研究进展[J].有色金属材料与工程,2019,40(3):55-60.
- [9] LIU W C, LI J, YUAN H, et al. Effect of recovery on the recrystallization texture of an Al-Mg alloy[J]. Scripta Materialia, 2007, 57(9): 833-836.

- [10] NOGITA K, MCDONALD S D, DAHLE A K. Eutectic modification of Al-Si alloys with rare earth metals[J]. Materials Transactions, 2004, 45(2): 323-326.
- [11] LIANG Z, PAN Q, HE Y, et al. Effect of minor Sc and Zr addition on microstructures and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(2): 340-345.
- [12] DING W W, ZHAO X Y, CHEN T L. Effect of rare earth Y and Al-Ti-B master alloy on the microstructure and mechanical properties of 6063 aluminum alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 830: 154 685.
- [13] 刘生发,罗利民,周锦平,等.钇对 6063 铝合金导体材料铸态组织与性能的影响[J].中国稀土学报,2018(2): 202-207.
- [14] WEI Z F, LEI Y S, YAN H. Microstructure and mechanical properties of A356 alloy with yttrium addition processed by hot extrusion[J]. Journal of Rare Earths, 2019(37): 659-667.
- [15] 雷文魁,王顺成,郑开宏,等. Y 对 6201 电工用铝合金组织与性能的影响[J].轻合金加工技术,2015,43(9): 22-26.
- [16] 杨玉玲,刘超,马运柱.稀土元素 Y 对粉末冶金 2A12 铝合金组织和力学性能的影响[J].粉末冶金技术,2020(1): 3-9.
- [17] 钟韬,曾归余,肖明清,等.稀土 Ce 对 3003 铝合金组织性能的影响[J].稀有金属与硬质合金,2019(6): 33-36, 41.
- [18] VIPINK S, VINOD K, RAVINDER S J. Investigation of rare earth particulate on tribological and mechanical properties of Al-6061 alloy composites for aerospace application[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(4): 3 504-3 516.
- [19] 刘慧,孙杰,房洪杰,等.微量 Ce 对 7B04 铝合金组织性能的影响[J].金属热处理,2018,43(10): 31-35.
- [20] 祝贞凤,李辉,史春丽,等.微量 Ce 对 7150 铝合金显微组织和性能的影响[J].材料热处理学报,2018,39(7): 21-28.
- [21] 朱锐祥,秦新宇,胡南,等.稀土元素对 Al-Si-Cu-Mg 系压铸铝合金组织和性能的影响[J].材料研究与应用,2019(1): 27-32.
- [22] LI B, WANG H W, JIE J C, et al. Microstructure evolution and modification mechanism of the ytterbium modified Al-7.5% Si-0.45% Mg alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(7): 3 387-3 392.
- [23] 徐衡. Yb 对 A356 铝合金显微组织与力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2017,37(8): 827-830.
- [24] ZOU Y, YAN H, YU B B, et al. Effect of rare earth Yb on microstructure and corrosion resistance of ADC12 aluminum alloy[J]. Intermetallics, 2019, 110: 106 487.
- [25] 诸建彬,胡志,闫洪.稀土 Yb 对 Al-Zn-Mg-Cu 合金显微组织、力学性能及热物性的影响[J].热加工工艺,2014(14): 39-43.
- [26] SHU Z L, HELLAWELL A. The mechanism of silicon modification in aluminum-silicon alloys: Impurity induced twinning[J]. Metallurgical Transactions, 1987, A(11): 1 721-1 733.
- [27] TSAI Y C, CHOU C Y, LEE S L, et al. Effect of trace La addition on the microstructures and mechanical properties of A356 (Al-7Si-0.35Mg) aluminum alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 487(1-2): 157-162.
- [28] 吴迪.La 对铸造 Al-Cu-Mn-Ti-Cd-Zr 合金组织与性能的影响[J].热加工工艺,2013,42(23): 90-92.
- [29] 要东明.La,Pr 对铸造 Al-Cu 合金组织和高温性能影响规律及机制[D].长春:吉林大学,2012.

大间隙钎焊在燃气轮机热端部件修复领域的应用和发展

李金祺^{1,2} 高振桓^{1,2} 王天剑^{1,2} 聂丽萍^{1,2}
(1.长寿命高温材料国家重点实验室; 2.东方汽轮机有限公司)

摘要 综述了钎焊修复技术在燃气轮机高温部件修复领域的研究进展,介绍了国内外一些先进的大间隙钎焊技术(WGB)修复方法,深入分析了不同修复方法的特点。探讨了 WGB 修复技术存在的一些问题并对未来的发展进行展望。

关键词 高温合金;大间隙;钎焊修复

中图分类号 TG454; TG457.19 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.02.025 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application and Progress in Wide Gap Braze Repair of Gas Turbine Vanes
Li Jinqi^{1,2}, Gao Zhenhuan^{1,2}, Wang Tianjian^{1,2}, Nie Liping^{1,2}
(1.State Key Laboratory of Long-Life High Temperature Materials;
2.Dongfang Steam Turbine Co., Ltd.)

Abstract: The progress in WGB repair of superalloy vanes was reviewed, and advanced WGB repair methods at home and abroad were introduced, of which the characteristics was analyzed in depth. In conclusion, the existing problems of WGB technology were discussed and the future development was prospected.

Key Words: Superalloy, Wide Gap, Repair Brazing

燃气轮机被广泛应用于电力、运输、石油等领域,其涡轮叶片通常由高强度、耐高温的镍基或钴基铸造高温合金制成。为了提高其使用性能,叶片内部设计有复杂的冷却通道,表面采用涂层技术,制造涡轮叶片材料中加入大量的稀有金属,制造成本很高。在发动机运行过程中,涡轮叶片长期受高温燃气的腐蚀、冲刷以及冷热疲劳等作用,很容易导致叶片表面产生热疲劳裂纹、热腐蚀以及凹坑等缺陷。这些损坏叶片若不及时处理,

收稿日期:2020-07-24;修改稿收到日期:2020-08-26
第一作者简介:李金祺,男,1993 年出生,助理工程师,四川德阳(618000),E-mail:672831084@qq.com
通信作者:高振桓,男,1986 年出生,高级工程师,四川德阳(618000),E-mail:gaozhenhuan@dongfang.com
引用格式:李金祺,高振桓,王天剑,等. 大间隙钎焊在燃气轮机热端部件修复领域的应用和发展[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(2):246-250.
LI J Q, GAO Z H, WANG T J, et al. Application and progress in wide gap braze repair of gas turbine vanes[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(2):246-250.

[30] CHEN Y, PAN Y, LU T, et al. Effects of combinative addition of lanthanum and boron on grain refinement of Al-Si casting alloys[J]. Materials and Design, 2014(64): 423-426.

[31] SHI Z M, WANG Q, ZHAO G, et al. Effects of erbium modification on the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2015, A626 (25): 102-107.

[32] LI Q, XIA T, LAN Y, et al. Effects of rare earth Er addition on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-20 Si alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2013, A588: 97-102.

[33] 饶远生, 闫洪, 胡志, 等. Sm 对 ADC12 铝合金变质效果影响的研究[J]. 材料导报, 2013, 27(4): 45-48.

[34] 李纓缤, 郭二军, 王丽萍, 等. Sm 对 7050 铝合金铸态组织及硬度的影响[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2016, 21(5):20-23,28.

[35] QIU H, YAN H, HU Z. Effect of samarium (Sm) addition on the microstructures and mechanical properties of Al-7Si-0.7Mg alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 567: 77-81.

[36] PATAKHAM U, KAJORNCHAIYAKUL J, LIMMANEEVI-CHITR C. Modification mechanism of eutectic silicon in Al-6Si-0.3Mg alloy with scandium[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 575: 273-284.

[37] WU X F, WANG K Y, WU F F, et al. Simultaneous grain refinement and eutectic Mg₂Si modification in hypoeutectic Al-11Mg₂Si alloys by Sc addition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 791: 402-410.

[38] WANG K Y, ZHAO R D, WU F F, et al. Improving microstructure and mechanical properties of hypoeutectic Al-Mg₂Si alloy by Gd addition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 813: 152-178.

[39] MAO F, YAN G Y, XUAN Z J, et al. Effect of Eu addition on the microstructures and mechanical properties of A356 aluminum alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 650: 896-906.

[40] 隋育栋. Al-Si-Cu-Ni-Mg 系铸造耐热铝合金组织及其高温性能研究[D].上海:上海交通大学, 2016.

(编辑:栗万仲)