

自然时效对 6005A-T4 搅拌摩擦焊接接头组织性能的影响

魏翠琴^{1,2,3} 曾 望⁴ 于连生⁵ 盛晓菲²

(1.湖州职业技术学院机电与汽车工程学院; 2.湖北汽车工业学院材料科学与工程学院; 3.浙江久立特种科技股份有限公司; 4.河北申科磁性材料有限公司; 5.菏泽市科学技术信息研究所)

摘 要 通过硬度测试、拉伸测试、断口扫描电镜观察(SEM)、焊缝分区透射电镜(TEM)观察,研究了自然时效对 6005A-T4 搅拌摩擦焊接接头组织性能的影响。结果发现,自然时效后的搅拌摩擦焊试样最高抗拉强度为 194 MPa,伸长率为 10.9%;最低抗拉强度为 180 MPa,伸长率为 10.3%。平均抗拉强度为 186 MPa,伸长率为 10.2%,分别为母材的 89.0%和 93.5%,较未时效试样分别提升了 5.2%和 9.7%。自然时效后,焊缝硬度呈“W”型分布。焊缝的热影响区、热机械影响区,焊核区硬度均有所上升,最薄弱区域从焊后的热机械影响区变成自然时效后的热影响区。自然时效后断口与母材断口基本一致,韧窝尺寸较大、较深,与伸长率结果一致,较为接近母材。自然时效后,焊缝各个区域 TEM 照片中均发现 β 相,热影响区受焊接热量影响较小,导致相析出动力不足,为自然时效后最薄弱区域。

关键词 6005A 铝合金; T4 处理; 搅拌摩擦焊; 自然时效**中图分类号** TG146.21; TG113.25**文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.04.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Natural Aging on the Microstructure and Properties of 6005A-T4 Friction Stir Welded Joints

Wei Cuiqin^{1,2,3}, Zeng Wang⁴, Yu Liansheng⁵, Sheng Xiaofei²(1.School of Mechatronics and Automotive Engineering, Huzhou Vocational and Technical College;
2.School of Materials Science and Engineering, Hubei University of Automotive Technology;
3.Zhejiang Jiuli Special Material Technology Co., Ltd.; 4.Hebei Shenke Magnetic Materials Co., Ltd.;
5.Heze Institute of Science and Technology Information)

Abstract: Through hardness test, tensile test, fracture scanning electron microscopy (SEM) and welding zone transmission electron microscopy (TEM) observation, the effects of natural aging on the microstructure and properties of 6005A-T4 friction stir welded joints were investigated. The results indicate that the maximum tensile strength of the friction stir welded specimens after natural aging is 194 MPa, and the elongation is 10.9%, while the minimum tensile strength is 180 MPa, and the elongation is 10.3%. The average tensile strength is 186 MPa, and the elongation is 10.2%, which are 89.0% and 93.5% of the base metal, and increased by 5.2% and 9.7%, respectively, compared with the unaged specimens. After natural aging, the hardness of the weld joints presents a “W”-shaped distribution, of which the heat-affected zone, thermo-mechanical influence zone, and weld nugget zone are all increased, and the weakest area is changed from the thermo-mechanical influence zone after welding to the heat-affected zone after natural aging. The fracture after aging is basically consistent with that of the base material with larger and deeper dimple, which coincides with the elongation result, and closer to the base material. After natural aging, β phases are observed in each area of the weld by TEM, and the heat-affected zone is less affected by the welding heat, resulting in insufficient precipitation power, which is the weakest area after natural aging.

Key Words: 6005A Aluminum Alloy, T4 Treatment, FSW, Natural Aging**收稿日期:** 2021-10-29; **修改稿收到日期:** 2021-11-03**基金项目:** 湖北省自然科学基金资助项目(2020CFB366); 湖北省青年英才开发计划资助项目**第一作者简介:** 魏翠琴, 女, 1979 年出生, 讲师, 浙江湖州(313000), E-mail: 790994575@qq.com**通信作者:** 盛晓菲, 男, 1987 年出生, 副教授, 湖北十堰(442002), E-mail: auden1@126.com**引用格式:** 魏翠琴, 曾望, 于连生, 等. 自然时效对 6005A-T4 搅拌摩擦焊接接头组织性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(4): 477-481.

WEI C Q, ZENG W, YU L S, et al. Effects of natural aging on the microstructure and properties of 6005A-T4 friction stir welded joints[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(4): 477-481.

汽车轻量化是节能减排、提高车辆运行效率、降低碳排放的重要手段^[1],而铝合金的密度约为 2.7 g/cm^3 ,只有钢材的 $1/3$,替换钢材后能起到非常好的减重效果。铝合金具有易加工、可回收^[2]、耐腐蚀等特点,同时力学性能较好,因此,在汽车轻量化应用中受到重视^[3]。

当前,铝合金在汽车轻量化的应用中^[4],主要有发动机^[5]、变速箱^[6]、轮毂^[7]、摇臂^[8]、车门^[9]等。其中车身在汽车自重中的占比达到了 30% 左右,实现车身的轻量化有利于实现汽车整体轻量化,同时降低汽车能耗。当前,铝制车身主要出现在高端车型和特斯拉等新能源车上,其制造成本和维修成本较高。铝制车身钣金难度大,一旦变形超过一定程度,只能整体更换。因此,开发铝合金车身的维修技术能够降低维修成本,推广铝制车身的使用,实现节能减排。

车身使用的铝合金要求强度中等,延展性和耐蚀性较好。Al-Mg-Si 系铝合金是可热处理强化型铝合金中唯一没有发现应力腐蚀开裂(SCC)现象的合金^[10],其中,6005A 铝合金具有优良的挤压性、焊接性、耐腐蚀性及中等的强度,可挤压出断面形状复杂的薄壁空心型材,并能在挤压机上实现在线风冷或水雾冷淬火,广泛应用于车身的制造。因此,研究 6005A 铝合金的焊接性能以实现铝制车身的焊接维修,对降低制造、维修成本具有积极意义。

搅拌摩擦焊接(Friction Stir Welding, FSW)属于固相焊接^[11],是具有低成本、无污染、高品质的新型连接方法^[12]。因此,采用 6005A 铝合金作为轻量化车身可通过搅拌摩擦焊接实现焊接维修。

当前对 6000 系铝合金的搅拌摩擦焊研究主要集中在 T6 态上^[13~15],另外对焊缝的自然时效性能也进行了研究。鄢新哲^[16]研究了焊前人工时效和自然时效对 6082 铝合金搅拌摩擦焊焊缝的组织性能影响,发现焊前人工时效和自然时效不会影响焊缝品质。王希靖等^[17]研究了自然时效和人工时效对 6082-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头的影响,发现经过焊后自然时效、人工时效的焊接接头力学性能得到一定程度的提升,人工时效相比自然时效抗拉强度提高了 13%,伸长率降低了 9%,人工时效提高抗拉强度效果更明显。何理谦等^[18]研究了 6005A-T6 铝合金搅拌摩擦焊缝的自然时效效应,发现焊缝随自然时效时间延长,其抗拉强度和焊缝焊核区的硬度均先提高并趋于稳定,而焊缝热影响区的硬度则保持不变,伸长率也变化不大。佟建华等^[19]对不同自然时效及人工时效条件下 6061-T6 搅拌摩擦焊接头进行了研究,发现随着自然时效时间延长,焊缝硬度有所回升,时效 30 天时趋于稳定,接头强度达到母材的 72%。但这些研究主要集中在 T6 状态的焊缝,而实

际应用中,固溶态的 6000 系铝合金因其延展性好,更易加工,且其能够通过自然时效,在使用过程中逐渐强化。T6 状态下焊接因强度较 T4 状态高,焊接过程产热多于 T4 状态,对焊缝的热影响不同,对后续时效的影响也不同,而 6000 系铝合金自然时效态的搅拌摩擦焊接研究报道很少,焊接后再进行自然时效的研究报道也不多。因此,本课题采用力学性能测试、扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)观察等方法,研究了自然时效对 3 mm 厚 6005A-T4 搅拌摩擦焊焊接头的组织性能的影响,为 6000 系铝合金搅拌摩擦焊研究提供参考。

1 试验方法

采用厚度为 3 mm 的 6005A-T4 合金板材,其主要成分(质量分数):0.65% 的 Mg,0.73% 的 Si,0.13% 的 Cu,0.31% 的 Mn,0.16% 的 Cr, $\leq 0.10\%$ 的 Ti, $\leq 0.10\%$ 的 Zn,余量为 Al。

焊接形式为单道对接拼焊。搅拌头转速为 $2\ 100 \text{ r/min}$,焊接速度为 100 mm/min 。焊接后铝合金板见图 1。在焊接件上垂直焊缝方向取样,分别制取拉伸试样、硬度测试试样。剩余焊板在室温自然时效 10 年后进行性能和组织测试,并与焊后未时效试样进行性能和组织对比。



图 1 焊接完的 6005A-T4 铝合金板

Fig.1 The appearance of 6005A-T4 aluminum alloy plate after welding

拉伸试验在 Instron 8032 万能材料拉伸机上进行,拉伸速度为 2 mm/min ,取 5 个拉伸试样,去掉最大值和最小值后取平均值,其中拉伸试样见图 2。

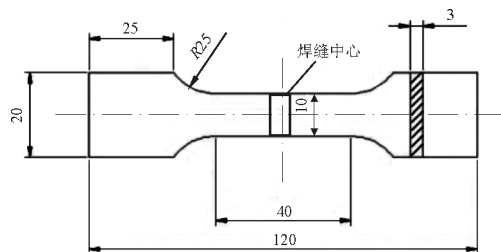


图 2 拉伸试样

Fig.2 Tensile specimen

硬度测试使用 HV-5 型小负荷维氏硬度计,载荷为 1.96 N ,加载时间为 10 s ,每隔 0.25 mm 打一个点,误差

范围为 ± 0.5 。

断口形貌观察在 FEI Sirion200 场发射扫描电镜上进行,工作电压为 20 kV。

TEM 试样在 MTP-1 型双喷电解减薄仪上双喷减薄、穿孔。电解液采用体积分数为 30% 的硝酸甲醇溶液,温度为 $-30\sim-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,电压为 12~15 V,电流为 80~100 mA。在 JEOL F-2100 型 TEM 上观察,加速电压为 200 kV。

2 试验结果与分析

2.1 力学性能及硬度测试

母材平均抗拉强度为 208 MPa,平均伸长率为 12.5%。搅拌摩擦焊后试样平均抗拉强度为 174 MPa,伸长率为 9.0%,分别为母材的 83.8% 和 79.2%^[20,21]。

焊板经 10 年自然时效后,母材平均抗拉强度为 209 MPa,平均伸长率为 12.7%,与 10 年前的母材非常接近。自然时效后的搅拌摩擦焊试样平均抗拉强度为 186 MPa,伸长率为 10.2%,分别为母材的 89.0%,93.5%,较未时效试样分别提升 5.2% 和 9.7%。

为了分析长时间自然时效对焊接头不同区域硬度的影响,对其进行了硬度测量,并与焊接后的硬度数据进行了对比,见图 3。焊缝可分为母材区、热影响区、热机械影响区和焊核区。方点曲线为焊接后立刻测量的

焊缝硬度曲线,圆点为经 10 年长时间自然时效后的焊缝硬度曲线。可以看到,经过 10 年自然时效后,热机影响区和焊核区的硬度明显上升,特别是硬度最低的热机械影响区的硬度(HV)从整个焊缝最低的 58 升至 67。而自然时效后焊缝硬度(HV)曲线中,最低在热影响区,约为 62;焊核区域的硬度(HV)由 64 升高至 68。

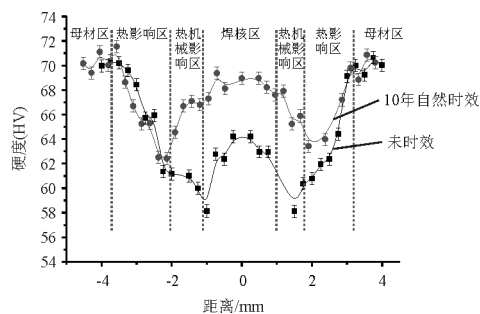
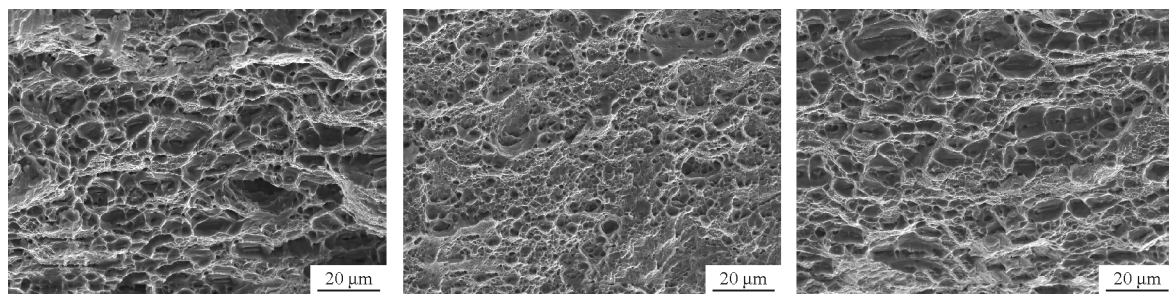


图 3 6005A-T4 铝合金搅拌摩擦焊焊接接头的硬度分布^[20,21]

Fig.3 Hardness distribution of 6005A-T4 aluminum alloy friction stir welding joints

2.2 断口组织观察

图 4 为母材和搅拌摩擦焊及自然时效后拉伸断口的 SEM 形貌。可见发现母材拉伸断口上平坦区域均匀分布着延性韧窝,焊接接头断口主要为穿晶断口,韧窝为等轴韧窝,尺寸较大,韧窝较深。而焊后的断口形貌仍为韧性断裂,韧窝尺寸较小。自然时效后断口与母材断口基本一致,韧窝尺寸较大、较深,与伸长率结果一



(a) 母材

(b) 搅拌摩擦焊

(c) 自然时效

图 4 母材、搅拌摩擦焊及自然时效后试样拉伸断口 SEM 形貌

Fig.4 SEM morphologies of tensile fracture of BM and specimens after friction stir welding and natural aging

致,接近母材。

2.3 TEM 组织观察

图 5 为 6005A-T4 铝合金搅拌摩擦焊和自然时效试样焊缝 TEM 组织。选取了焊缝的母材区(BZ)、热影响区(HAZ)、热机械影响区(TMAZ)和焊核区(WNZ)等 4 个区域进行 TEM 观察,与自然时效前后的试样进行对比。

可以看出,焊接刚完成时,T4 态板材中,主要析出相为平衡 β 相(见图 5a),尺寸为 300~600 nm。长时间自然时效后,母材区变化不明显,主要析出相依旧为平衡 β 相(见图 5b),尺寸为 300~600 nm。

受焊接过程产生热量的影响,焊后热影响区平衡 β 相发生了部分回溶,尺寸为 200~400 nm。经过长时间自然时效后的焊缝热影响区(见图 5d),平衡 β 相尺寸较焊接后有所长大,为 300~500 nm。

热机械影响区受焊接过程中热量和焊接头搅拌的机械影响,平衡 β 相回溶情况较热影响区严重,尺寸为 200~250 nm。经过自然时效后(见图 5f),平衡 β 相长大,尺寸为 300~400 nm。

受焊接头和板材摩擦产热的影响,焊核区的平衡 β 相基本完全回溶,只剩下较难溶解的过剩 Si 相。焊核区经过自然时效后(见图 5h),平衡 β 相重新析出,尺寸

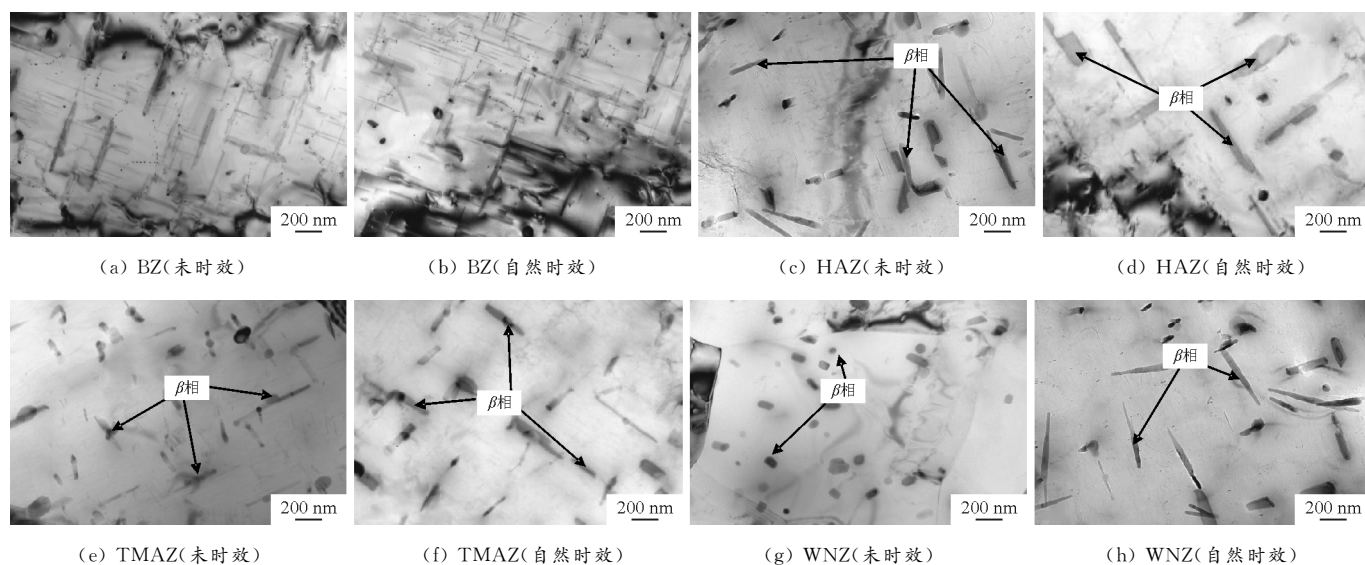


图 5 6005A-T4 铝合金搅拌摩擦焊和自然时效(10 年)试样焊缝 TEM 组织

Fig.5 TEM images of welding joints of 6005A-T4 aluminum alloy FSW and aged specimens

为 300~500 nm。

3 讨论

6005A 铝合金主要增强相是 $Mg_2Si^{[22]}$ 。T4 状态^[23]为在线挤压淬火后自然时效至稳定状态,其主要强化相为 $\beta-Mg_2Si$ 相。所以基体中平衡态的 β 相的尺寸、密度是影响合金强度的重要因素。

搅拌摩擦焊依靠焊接头和基体摩擦生热,并结合机械作用软化并焊接板材,其焊接过程中,焊核区的最高温度仅为熔化温度的 70%~90%,能够有效避免产生较大的温度梯度,减少焊接缺陷^[24]。而且搅拌摩擦焊接前及焊接过程中对设备和环境要求低,同时对环境的影响也很小。再加上焊接过程中的摩擦和搅拌可以去除焊件表面的氧化膜,焊接过程中无烟尘和飞溅,适合在汽车维修店进行搅拌摩擦焊焊接。

搅拌摩擦焊焊接过程中,焊核区域因为焊接头和金属的摩擦,热量最高,因此,焊缝区域平衡相回溶最严重(见图 5g)。理论上,焊核区应该是性能最低的区域,但其处于焊缝中,受机械和热作用,晶粒细化^[20,21],产生了细晶强化,故焊核区的硬度并非最低。同时因为焊接过程中焊核区温度高,回溶的溶质原子有比较充足的析出动力,在后续自然时效中,能够析出并长大成平衡态的 $\beta-Mg_2Si$ 相(见图 5h)。通过 β 相的强化和细晶强化,焊核区经过自然时效后,硬度(HV)从 64 升高至 68,说明自然时效能够提升焊核区的强度。

最靠近焊核区的热机械影响区是焊缝中受热量影响仅次于焊核区,在搅拌头部分机械搅拌的作用下,搅碎部分晶粒,但没有产生细晶强化^[20,21]。因为热量的影响,回溶较为严重,是焊后最薄弱的区域(见图 3 和图

5e)。但在自然时效后,因热机械影响区的热量输入是仅次于焊核区的,焊接过程部分溶质原子回溶后,依旧有动力析出,自然时效过程中, β 相析出并长大(见图 5),热机械影响区的硬度有所升高(见图 3),不再是焊缝最薄弱的区域。

热影响区在焊接过程中是受焊接影响最远的区域,焊接过程中因摩擦产热,部分热量传输至热影响区,导致热影响区平衡相的回溶(见图 5c),影响了热影响区的性能(见图 3)。在自然时效过程中,因其受热量影响小于热机械影响区、焊核区,回溶的溶质原子数量和后续析出动力都小于热机械影响区,自然时效时析出动力不足,导致自然时效后,焊缝性能最薄弱的区域从热机械影响区变成热影响区(见图 3),热影响区经长时间自然时效,硬度只有较小的提升。

母材区域经过长时间自然时效,其组织和性能都没有发生太大变化(见图 3、图 5a 和图 5b)。

4 结论

(1)10 年自然时效后,6005A 铝合金搅拌摩擦焊试样的平均抗拉强度为 186 MPa,伸长率为 10.2%,分别为母材的 89.0% 和 93.5%,较未时效试样分别提升了 5.2% 和 9.7%。

(2)10 年自然时效后,6005A 铝合金搅拌摩擦焊焊缝硬度呈“W”型分布。焊缝的热影响区、热机械影响区、焊核区硬度均有所上升,最薄弱区域从焊后的热机械影响区变成自然时效后的热影响区。

(3)10 年自然时效后,6005A 铝合金搅拌摩擦焊断口与母材断口基本一致,韧窝尺寸较大、较深,与伸长率结果一致,接近母材。

(4)10 年自然时效后,6005A 铝合金搅拌摩擦焊缝各个区域均发现 β 相,热影响区受焊接热量影响较小,导致析出动力不足,为自然时效后最薄弱区域。

参 考 文 献

- [1] 周宏湖. 节能减排的重要课题——汽车轻量化[J]. 轿车情报, 2010(1): 152-155.
- [2] 孙德勤, 费有静. 废铝再生与汽车轻量化进展[J]. 新材料产业, 2016(6): 1-5.
- [3] 高永迪. 试论铝合金材料在未来汽车轻量化中的应用与发展[J]. 世界有色金属, 2019(21): 185-187.
- [4] 王正科. 铝合金在汽车轻量化中的应用[J]. 时代汽车, 2021(1): 113-114.
- [5] 杨兵, 张大为, 周峰. 汽车发动机铝合金缸体压铸工艺改进及品质提升[J]. 铸造技术, 2017, 38(1): 237-239.
- [6] 樊振中, 袁文全, 王端志, 等. 压铸铝合金研究现状与未来发展趋势[J]. 铸造, 2020, 69(2): 159-167.
- [7] 张宏亮. 关于铝合金轮毂成形工艺的应用与研究进展[J]. 技术与市场, 2017, 24(10): 141.
- [8] 黄海. 预变形对铝合金机械摇臂锻压成形的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(1): 152-154.
- [9] 廖仲伍. 铝合金汽车车门冲压成形工艺研究[D]. 湖北十堰: 湖北汽车工业学院, 2017.
- [10] HIRSCH J. Aluminium alloys for automotive application[J]. Materials Science Forum, 1997, 242: 33-50.
- [11] 蔺宏涛, 江海涛, 王怡嵩, 等. 6016-T4 铝合金与镀锌 IF 钢搅拌摩擦焊接头的组织与性能[J]. 材料导报, 2019, 33(9): 19-24.
- [12] 栾国红, 关桥. 搅拌摩擦焊——革命性的宇航制造新技术[J]. 航天制造技术, 2003(4): 16-23.
- [13] DONG P, SUN D Q, WANG B, et al. Microstructure, micro-

- hardness and corrosion susceptibility of friction stir welded AlMg-SiCu alloy[J]. Materials & Design, 2014, 54: 760-765.
- [14] REIMANN M, GARTNER T, SUHUDDIN U, et al. Keyhole closure using friction spot welding in aluminum alloy 6061-T6[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 237: 12-18.
- [15] GHARAVI F, MATORI K A, YUNUS R, et al. Corrosion evaluation of friction stir welded lap joints of AA6061-T6 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(3): 684-696.
- [16] 郗新哲. 6082 超厚板铝合金搅拌摩擦焊接头组织演变与力学性能研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2018.
- [17] 王希靖, 魏学玲, 张亮亮. 焊后时效处理对 6082-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头的影响[J]. 材料导报, 2017, 31(8): 62-65.
- [18] 何理谦, 袁鸽成, 骆志捷, 等. 6005A-T6 铝合金搅拌摩擦焊缝的自然时效效应[J]. 广东工业大学学报, 2017, 34(2): 54-57.
- [19] 佟建华, 李光, 董春林, 等. 自然时效及人工时效对 6061-T6 FSW 接头性能的影响[J]. 焊接, 2008(11): 53-55.
- [20] 盛晓菲. 6005A 铝合金组织性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [21] SHENG X F, LI K, WU W, et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded joint of an aluminum alloy sheet 6005A-T4[J]. Metals, 2019, 9(11): 1 152-1 157.
- [22] 王静, 徐国富, 李耀, 等. 6005A 铝合金的淬火敏感性及其微观组织特征[J]. 材料研究与应用, 2019(4): 263-270.
- [23] 李奋律. 汽车用 6082 合金牌号 T4 供应状态铝合金型材的生产工艺[A]. 2010 第四届铝型材技术(国际)论坛论文集[C]. 广州, 2010.
- [24] 朱蕾. 材料摩擦性能对搅拌摩擦焊接头温度及焊缝成形的影响[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.

(编辑: 栗万仲)

新型材料在多领域中的应用

镁-镍钛仿生复合材料——可提高阻尼减震性能

近期, 中外有关科研院所合作研发出一种新型镁-镍钛仿生复合材料, 其不仅实现了镍钛合金同镁基体在性能优势上的互补与结合, 且使材料拥有了自修复功能。据介绍, 新型镁-镍钛仿生复合材料通过多重机制, 分别提高了强度和阻尼性能, 突破了两者之间的相互制约关系, 实现了镁合金的强度、阻尼和能量吸收效率等多种性能的良好结合, 甚至可比肩一些常用的高分子材料。其在减震、吸能、降噪等方面优势明显, 有望成为精密仪器、航空航天等领域需求的新型阻尼减震材料。

稀土贮氢合金材料——用于制造坦克蓄电池

目前, 坦克车辆大量使用的铅酸蓄电池因容量低、自放电率高而需要经常充电, 且维护和搬运十分不便, 制约了坦克作战性能。为此, 美国、日本等国家利用稀土贮氢合金材料制成了一种新的蓄电池。该电池具有能量密度高、耐过充、抗震、低温性能好、寿命长等特点, 将对未来主战坦克的发展产生非常重要的作用。据悉, 稀土贮氢合金材料是生产高容量、宽温区、高工艺、低耗电镍氢动力电池的关键用料。贮氢合金蓄电池比镍镉电池更环保, 比锂电池更安全。此外, 由于贮氢合金材料的贮氢密度都很大, 比标准状态下的氢密度高出多个数量级, 甚至比液态氢的密度还高。因此, 用它制成容器储运氢气既轻便又安全。

新型光控铁电材料——用光敏技术存储信息

近年来, 西班牙巴塞罗那材料研究所研究人员研制出的新型光控铁电材料存储器, 具有低功耗、高性能和多功能等特性, 可实现用光存储信息。进入智能工业 4.0 时代, 低功耗、高性能的存储器显得更加重要, 而传统存储设备具有功耗高、速度慢等问题, 已不能满足现阶段对存储器的要求。该存储器是基于光敏铁电材料, 并利用纳米技术和量子效应设计的新型存储器。这种铁电材料具有光控可切换极化的特性, 通过输入脉冲光, 能对铁电材料薄膜内部的极化方向进行调制, 以控制通过铁电材料电流的电荷数量, 从而实现对铁电材料电阻状态的调制, 最终完成信息存储。此外, 该存储器具有较高稳定性, 其存储的信息具有非易失性, 即使在电源关闭的情况下, 其存储的信息也可保留在设备中。该设备不仅可用于普通存储器中, 还可应用于神经形态视觉等高端系统中, 在军事领域中具有广阔的应用前景。

(摘自中国有色金属报)