

退火温度对 5154 铝合金铆钉线力学性能的影响

张 恒 贾 伟 赵立洋 章安楠 段妍彤 乔 恒 韦振翔
(江苏亨通电力特种导线有限公司)

摘 要 通过连铸连轧-拉拔-中间退火-拉拔法制备了 5154 铝合金铆钉线。采用力学性能测试、显微组织观察等方法分析了退火后铆钉线的力学性能和显微组织。结果表明,当退火温度为 460 ℃时,5154 铝合金铆钉线的力学性能理想,这与材料中的第二相变化以及晶粒的大小有关。

关键词 5154 铝合金;力学性能;第二相;显微组织

中图分类号 TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.08.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Annealing Temperature on Mechanical Properties of 5154 Alloy for Rivet Wire

Zhang Huan, Jia Wei, Zhao Liyang, Zhang Annan, Duan Yantong, Qiao Heng, Wei Zhenxiang
(Jiangsu Hengtong Electric Power Special Wire Co., Ltd.)

Abstract: 5154 aluminum alloy for rivet wire was fabricated by continuous casting and rolling-drawing-intermediate annealing-drawing. The mechanical properties and microstructure of the annealed rivet wire were analyzed by means of tensile testing and SEM observation. The results reveal that the mechanical properties of 5154 alloy for rivet wire are desirable with the annealing temperature of 460 ℃, which is related with the transformation of the second phase and the grain size.

Key Words: 5154 Aluminum Alloy, Mechanical Properties, Second Phase, Microstructure

收稿日期:2021-01-28;修改稿收到日期:2021-05-13
第一作者简介:张恒,男,1993 年出生,助理工程师,江苏苏州(215234),E-mail:zhanghuan@htgd.com.cn
引用格式:张恒,贾伟,赵立洋,等. 退火温度对 5154 铝合金铆钉线力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(8): 979-981.
ZHANG H, JIA W, ZHAO L Y, et al. Effects of annealing temperature on mechanical properties of 5154 alloy for rivet wire[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(8): 979-981.

(2)根据 3 种合金的 T4 态显微组织及力学性能确定了最优 T4 工艺参数,其中 1 号合金为 510 ℃×24 h, 2 号合金为 530 ℃×24 h,3 号合金为 510 ℃×24 h。

(3)在优化的固溶工艺前提下,对 3 种合金分别进行 200 ℃、220 ℃的时效硬化处理,根据测试结果确定 1 号、2 号合金优化的时效工艺为 200 ℃×100 h,3 号合金优化的时效工艺为 200 ℃×70 h。

(4)Mg-4.5Y-2.5Gd-1.5Sm 合金经 530 ℃×24 h 固溶+200 ℃×100 h 时效后,其力学性能最优,抗拉强度可达 267 MPa,屈服强度可达 200 MPa,伸长率为 2.0%。

参 考 文 献

[1] HAJO D, KARL U K. Magnesium and Magnesium Alloys[M]. Introductory Chapter: Springer International Publishing, 2018.

[2] 丁文江. 镁合金科学与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[3] 杨力祥, 肖旅, 周海涛, 等. 高强耐热稀土镁合金研究进展[J]. 上海航天, 2019, 36(2): 38-44.

[4] 丁文江, 吴国华, 李中权, 等. 轻质高性能镁合金开发及其在航空航天领域的应用[J]. 上海航天, 2019, 36(2): 1-8.

[5] LUO A A. Magensium casting technology for structural applications[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2013, 1(1): 2-22.

[6] 董天顺, 王拓, 郑晓东, 等. 细晶 Mg-Ce 中间合金的制备及其对 AZ91D 组织和性能的影响[J]. 材料导报, 2017, 31(6): 73-78.

[7] 吴国华, 陈玉狮, 丁文江. 镁合金在航空航天领域研究应用现状与展望[J]. 载人航天, 2016, 22(3): 281-292.

[8] 肖阳, 张新明, 王飞超, 等. 高强耐热镁合金的合金化设计[J]. 轻合金加工技术, 2012, 40(11): 32-40.

[9] 张清, 陈君, 李全安. Mg-Y-Sm 系耐热镁合金的研究进展[J]. 热加工工艺, 2017, 46(12): 19-25.

[10] 章桢彦. Mg(-Gd)-Sm-Zr 合金的显微组织、力学性能和析出相变研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.

[11] 陈舸, 肖旅, 董喜旺. 低溶质总量高强镁合金复杂铸件本体性能优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(8): 813-818.

[12] ROKHLIN L L, LUK'YANOVA E A, DOBATKINA T V, et al. Phase equilibria in Mg-Y-Gd-Sm alloys[J]. Russian Metallurgy (Metally), 2012(9): 802-807.

(编辑:张正贺)

5154 铝合金是中等强度的变形铝合金,属于不可热处理强化铝合金^[1]。由于优异的防腐性能、抗疲劳性能和焊接性能,5154 铝合金被广泛应用于焊接结构、铆固件、屏蔽线和压力容器等^[2]。随着汽车轻量化技术的发展,铝合金材料在车身上大量使用,从而促使铝合金铆钉在汽车上也大量使用。5154 铝合金铆钉被用于力学性能中等要求的部件铆接,其力学性能和铆钉线材的退火有关^[3~5]。本课题旨在研究不同退火温度对铆钉线的力学性能的影响,从而为其工业化应用提供参考。

1 试验过程

采用 SH2300/9.5-3U+10Y 连铸连轧机生产 5154 铝合金圆杆,圆杆直径为 7.5 mm,其化学成分见表 1。采用 LZ1.900+2.700 直进式拉丝机将 $\phi 7.5$ mm 的圆杆拉拔至 $\phi 4.6$ mm 的 5154 铝合金铆钉线(总变形量为 62.38%,变形量每达到 45% 需要进行 1 次软化退火),再将铆钉线放入 WH-C-4 电热鼓风干燥中分别在 100、200、300、350、390、420、440、460、470、480、500 $^{\circ}\text{C}$ 温度下退火 2 h^[6];然后用 WDW-20C 万能试验机测试其抗拉强度,其中试样标距为 250 mm;采用 WDW-40C 万能试验机测试其抗剪强度,其中试样标距为 50 mm;试样经环氧树脂镶嵌后经 200~2000 号砂纸打磨并抛光,用 5% 的硝酸酒精腐蚀 10 s 后电镜观察试样组织,采用 AX10 金相显微镜和扫描电镜观察试样组织;采用 SPECTRO 直读光谱仪测试合金的化学成分。

表 1 5154 铝合金的化学成分

元素	w _B						
	Si	Fe	Mg	Mn	Cr	Ti	Al
标准	≤0.4	≤0.4	3.1~3.9	≤0.09	0.15~0.35	≤0.4	余量
实测	0.07	0.06	3.54	0.85	0.17	0.02	余量

2 试验结果与分析

2.1 力学性能

在不同温度退火 2 h 的 5154 铝合金铆钉线的抗拉

强度和抗剪强度见图 1。可以看出,当退火 2 h 时,在 100~500 $^{\circ}\text{C}$ 范围内抗拉强度随退火温度的上升而先降低后趋于稳定。在 100~350 $^{\circ}\text{C}$ 试样的抗拉强度从 280.7 MPa 降低至 252.0 MPa,总降幅为 8.2%,而当温度在 390 $^{\circ}\text{C}$ 时抗拉强度出现大幅下降(9.2%)。之后随着温度继续增加,抗拉强度的变化趋于平稳。这是因为合金冷变形时组织中会出现位错缺陷,当温度在 100~350 $^{\circ}\text{C}$ 时,材料处于回复阶段,晶粒仍保持纤维状,因此强度逐渐降低。而当退火温度达到 390 $^{\circ}\text{C}$ 时,合金发生了再结晶,显微组织出现小晶粒并不断长大,合金发生较明显的软化,因此,其抗拉强度急剧降低。

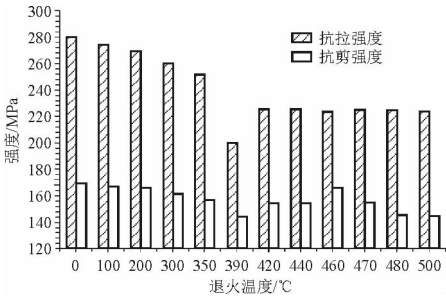


图 1 试样抗拉强度和抗剪强度随温度变化曲线
Fig.1 Variation curves of tensile strength and shear strength of specimens with temperature

当温度 ≤ 390 $^{\circ}\text{C}$ 时,抗剪强度变化趋势和抗拉强度相似,即当温度在 100~350 $^{\circ}\text{C}$ 时试样的抗剪强度逐渐减小,一旦温度达到 390 $^{\circ}\text{C}$ 抗剪强度大幅降低。然而当温度超过 390 $^{\circ}\text{C}$ 时,抗剪强度却出现了先升高后降低的趋势,且在 460 $^{\circ}\text{C}$ 左右出现了极大值为 166.1 MPa,比未退火试样仅下降 2.2%。为了解抗剪强度的变化机制,选取不同退火温度的试样进行微观组织及微区成分分析。

2.2 微观组织观察

不同退火温度下 5154 铝合金试样纵截面的金相组织与 SEM 组织分别见图 2 和图 3,各点成分分析见表 2。可以看出,低温退火时试样的晶粒整体呈纤维状,晶粒沿加工方向分布,具有明显的取向性。随着温度提高,当温度 ≥ 390 $^{\circ}\text{C}$ 时,试样发生再结晶,晶粒尺寸逐渐

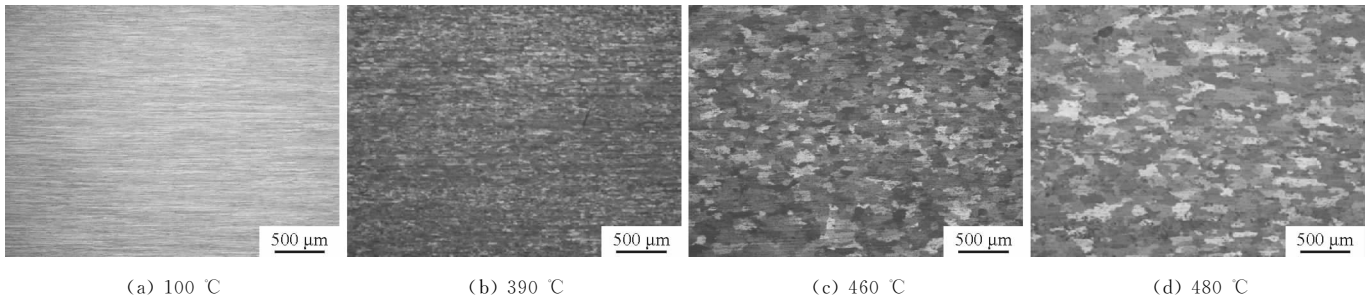


图 2 不同状态下 5154 铝合金试样的金相组织
Fig.2 The metallographic structure of specimens at different states

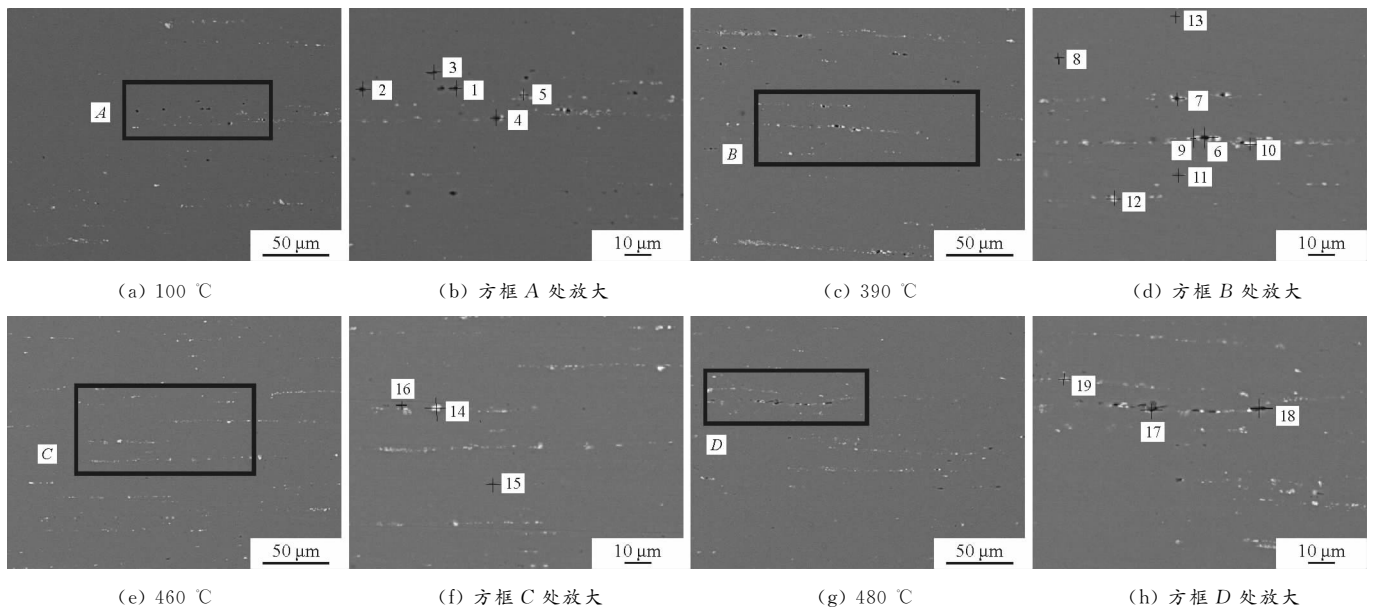


图 3 不同状态下 5154 铝合金试样的 SEM 图
Fig.3 SEM images of specimens at different states

表 2 图 3 中不同位置的能谱分析									
Tab.2 EDS analysis of different points in the Fig.3 %									
谱图	w_B								
	O	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Ca	Ti	Cr
1	2.70	10.48	79.04	7.78	—	—	—	—	—
2	—	4.80	95.20	—	—	—	—	—	—
3	3.77	5.77	85.71	1.02	—	—	1.05	2.69	—
4	—	4.78	87.83	—	0.72	6.67	—	—	—
5	—	3.49	87.18	—	0.87	8.46	—	—	—
6	—	4.14	93.47	—	—	2.39	—	—	—
7	—	3.65	87.63	—	0.76	7.96	—	—	—
8	—	5.19	93.78	1.03	—	—	—	—	—
9	—	3.06	80.11	—	1.04	15.16	—	—	0.62
10	—	3.01	81.65	—	1.06	14.28	—	—	—
11	—	8.30	89.86	1.85	—	—	—	—	—
12	—	3.66	86.56	—	0.66	8.70	—	—	0.42
13	—	6.26	90.30	3.44	—	—	—	—	—
14	—	3.04	80.58	—	0.86	15.51	—	—	—
15	1.97	3.95	91.11	2.97	—	—	—	—	—
16	1.21	4.24	93.14	1.41	—	—	—	—	—
17	10.71	7.60	65.75	15.95	—	—	—	—	—
18	2.32	9.30	82.12	6.26	—	—	—	—	—
19	—	3.55	89.12	—	0.57	6.76	—	—	—

变大。根据合金的强化理论，晶粒尺寸变大，单位体积内晶界面积减小，因此位错阻力变小，强度降低^[7]。

从图 3 可见，在 100 °C 时(未发生再结晶之前)，基体中主要有黑色的 β - Mg_2Al_3 相和少量的白色 $(FeMn)Al_6$ 相；当退火温度 ≥ 390 °C 时，基体中除了析出 β 相和 $(FeMn)Al_6$ 相，还沿着冷加工方向析出灰色的 Mg_2Si 相，这对材料的力学性能起到析出强化的作用，并可观察到在 460 °C 退火后析出的 Mg_2Si 相分布最均匀和细小，导致抗剪强度在 460 °C 时出现峰值。

整体来看，退火后试样的强度主要和晶粒尺寸及析出的第二相的性能有关。退火后抗剪强度出现峰值，主

要因为材料内部形成的强化相 Mg_2Si 相在沿直径方向分布，当进行剪切时，位错在纵向移动时出现较大阻碍；而抗拉强度未出现峰值的原因可能是析出的强化相不足以抵消晶粒粗大带来的软化效果^[8]。

3 结 论

- (1)5154 铝合金铆钉线的抗拉强度随着退火温度的上升而逐渐降低，并在 390 °C 时下降幅度增加，表现在该温度时，试样的组织发生了再结晶。
- (2)5154 铝合金铆钉线的抗剪强度随着温度的上升先降低后增大，并在 460 °C 时出现一个峰值，这是因为在该温度下沿直径方向析出细小而均匀的 Mg_2Si 相，相对于晶粒粗大，析出强化占据主导地位。

参 考 文 献

[1] 郭成,李宝绵,张海涛,等.高强度耐蚀 5xxx 系铝合金的研究现状及发展趋势[J].稀有金属, 2018, 42(8): 878-884.

[2] 李念奎,凌昊,刘安静.铝合金材料及其热处理技术[M].北京:冶金工业出版社, 2012.

[3] 柏振海,罗兵辉,谭敦强.Al-Mg 合金退火组织和性能[J].中南工业大学学报(自然科学版), 2002, 33(6): 600-603.

[4] 王莉.Al-Mg 合金的组织及力学性能[J].轻合金加工技术, 2005, 33(11): 46-47.

[5] 马鹏程,张迪,庄林忠,等.冷轧工艺及退火温度对 Al-Mg 合金组织和性能的影响[J].材料科学与工程学报, 2014, 32(6): 792-797.

[6] 谢屹,尹登峰,余鑫祥,等.退火工艺对 5154 铝合金导线性能的影响[J].轻合金加工技术, 2013, 41(5): 45-48.

[7] 陈俊丹,侯经韬,殷智,等.退火温度对 5356 铝合金力学性能和显微组织的影响[J].新疆有色金属, 2020, 43(3): 105-106.

[8] 赵海,吉猛,王光东,等.Mg 含量对 Al-xMg 合金板材显微组织的影响[J].轻合金加工技术, 2018, 46(5): 18-23.