

固溶温度对Al-Mg-Si-Cu合金材料性能的影响

刘华东 邵百明 倪雷 李大维

(上海汽车集团股份有限公司乘用车公司, 上海 201805)

摘要:为研究不同固溶温度对Al-Mg-Si-Cu合金力学性能、断口形貌、金相组织和耐晶间腐蚀性能的影响,对6056铝合金热轧盘条在470~600℃范围内进行固溶处理、室温水淬及人工时效,进行室温拉伸性能测试和耐晶间腐蚀试验,并结合光学显微镜、扫描电镜和能谱分析。结果表明:随着固溶温度升高,6056铝合金显微组织中Mg₂Si更充分地溶解到基体,而未溶的富Fe和富Cu相没有明显变化。拉伸强度随着固溶温度升高而提升,在540℃左右到达峰值,固溶温度升高到570℃和600℃时,强度变化很小,但伸长率随着固溶温度升高先提高后降低,耐晶间腐蚀性能随着固溶温度升高而降低。

关键词:铝合金 固溶温度 力学性能 晶间腐蚀

中图分类号: TG157; U465.2

文献标志码: B

DOI: 10.19710/J.cnki.1003-8817.20230249

Effects of Solid Solution Temperature on Material Properties of Al-Mg-Si-Cu Aluminum Alloy

Liu Huadong, Shao Baiming, Ni Lei, Li Dawei

(SAIC Motor Corporation Limited Passenger Vehicle Co., Shanghai 201805)

Abstract: The hot-rolled wire rods of 6056 aluminum alloy were solution treated at 470~600℃, water quenched and artificially aged. The effects of different solution temperatures on the mechanical properties, fracture morphology, metallographic and intergranular corrosion resistance of Al-Mg-Si-Cu aluminum alloy were investigated by tensile property test at ambient temperature, intergranular corrosion resistance test, combined with optical microscopy, scanning electron microscopy and energy spectrum analysis. The results show that Mg₂Si in the microstructure of 6056 aluminum alloy dissolves more fully into the matrix as the solid solution temperature increases, while the undissolved iron-rich and copper-rich phases do not show significant changes. The tensile strength increases with the increase of solid solution temperature, reaching a peak around 540℃. When the solid solution temperature increases to 570℃ and 600℃, the strength changes slightly, but the elongation first increases and then decreases with the increase of solution temperature. The intergranular corrosion resistance decreases with the increase of solid solution temperature.

Key words: Aluminum alloy, Solid solution temperature, Mechanical property, Intergranular corrosion

1 前言

为提高汽车轻量化水平,轻金属和复合材料应用越来越广泛,铝合金、镁合金和工程塑料逐渐替换了碳钢材料,镁合金的大量应用对连接技术提出了新的要求。目前,大多数结构件采用钢制

螺栓连接,而传统碳钢材料的热膨胀系数与镁合金材料差异很大,与镁合金材料还存在较大电位差,容易发生电偶腐蚀。而铝合金材料的热膨胀系数和电位差与镁合金材料接近,因此,铝合金螺栓得到广泛应用。

6056铝合金是在传统Al-Mg-Si合金的基础上

作者简介:刘华东(1990—),男,工程师,学士学位,研究方向为紧固件材料开发和失效分析。

参考文献引用格式:

刘华东,邵百明,倪雷,等.固溶温度对Al-Mg-Si-Cu合金材料性能的影响[J].汽车工艺与材料,2024(4):45-49.

LIU H D, SHAO B M, NI L, et al. Effects of Solid Solution Temperature on Material Properties of Al-Mg-Si-Cu Aluminum Alloy[J]. Automobile Technology & Material, 2024(4): 45-49.

添加Cu以及其他少量合金元素形成Al-Mg-Si-Cu合金,经过T6处理后的强度和塑性均优于Al-Mg-Si合金,但晶间腐蚀倾向会随Cu元素的添加而增加^[1-3]。目前对6056铝合金热处理后相关性能研究不多,本文主要研究不同固溶温度对以6056铝合金为代表的Al-Mg-Si-Cu合金的力学性能、显微组织以及耐晶间腐蚀等性能的影响,并探讨相关机制。

2 试验方案

试验材料为国内某厂生产的6056铝合金热轧盘条,化学成分如表1所示。试样分别在490℃、510℃、540℃、570℃和600℃温度下固溶,保温1h后进行室温水淬,最后在180℃温度下人工时效6h。

表1 6056铝合金线材化学成分(质量分数) %								
项目	Si	Mg	Cu	Zn	Mn	Cr	Fe	Zr+Ti
要求值	0.7~1.3	0.6~1.2	0.5~1.1	0.1~0.7	0.4~1.0	≤0.25	≤0.50	≤0.20
实测值	1.01	0.95	0.68	0.13	0.53	0.02	0.18	0.18

采用Ziwick-50 kN型电子拉伸机进行拉伸试验,测量6056铝合金在不同固溶温度下的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率。在Zwick EVO MA25型扫描电子显微镜下观察试样拉伸断口形貌并对显微组织进行能谱分析。将在不同温度下固溶处理后的合金放置在腐蚀液(H₂O(1 000 mL)+NaCl(20 g)+浓度为25%的HCl溶液)中2 h,溶液温度控制在25℃左右。利用Zwick AxioCam MRc5型光学

显微镜观察腐蚀后试样的晶间腐蚀形貌、腐蚀深度和合金热处理后的显微组织。

3 试验结果

3.1 力学性能

图1为6056铝合金经过不同温度固溶处理并时效后的力学性能变化趋势,当固溶温度由470℃升高至540℃时,合金的拉伸强度和屈服强度分别由307 MPa和254 MPa升高至422 MPa和368 MPa,断后延伸率由9%升高至15%。随着固溶温度进一步升高,强度存在轻微下降,而延伸率明显下降。

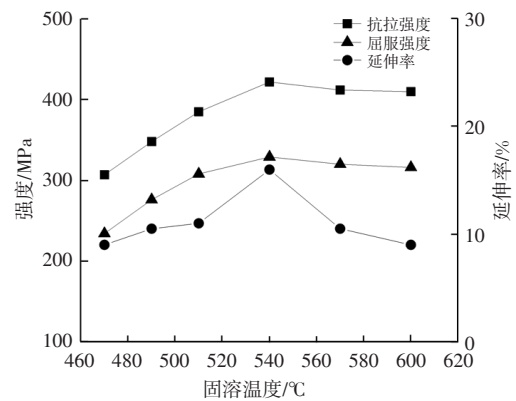


图1 固溶温度对合金力学性能的影响

图2为拉伸断口形貌:图2a~图2d为固溶温度为470~540℃时合金拉伸试样断口形貌,断口分布着大量椭圆形或圆形韧窝,且韧窝分布均匀;图2e和图2f分别为固溶温度为570℃和600℃合金试样拉伸断口形貌,断口韧窝数量明显变少,同时还伴有较多的二次裂纹,局部呈现出类似冰糖状的沿晶特征。

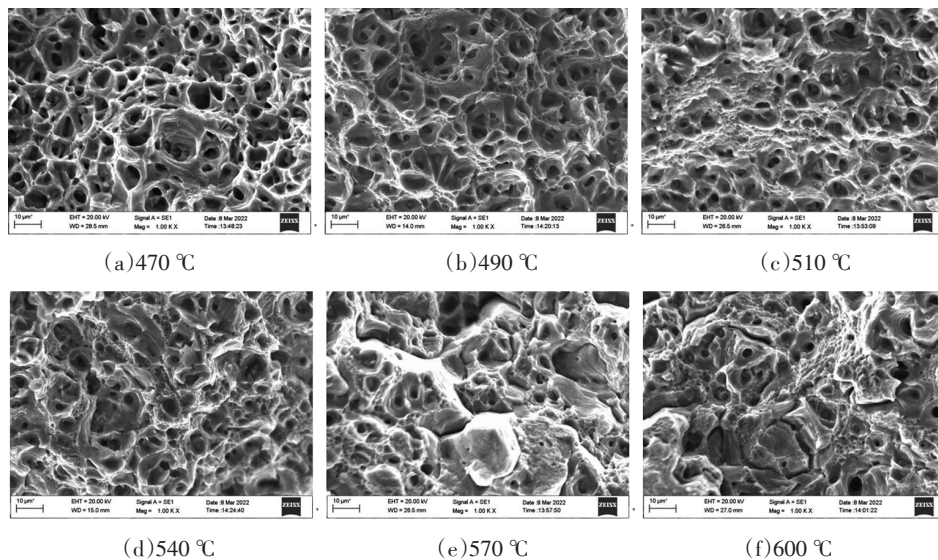


图2 不同固溶温度下的拉伸断口SEM形貌

3.2 显微组织

6056铝合金经不同温度固溶处理后的显微组织如图3所示,组织主要为 α -Al基体和第二相,其中,第二相主要有块状黑色粒子A和尺寸稍小一点的褐色粒子B,如图3a所示。随着固溶温度升高,块状黑色粒子A逐渐减少,当温度升高至570℃和600℃时,合金显微组织中已经没有明显的黑色粒子,而褐色粒子B的数量没有随温度升高而发生明显变化。

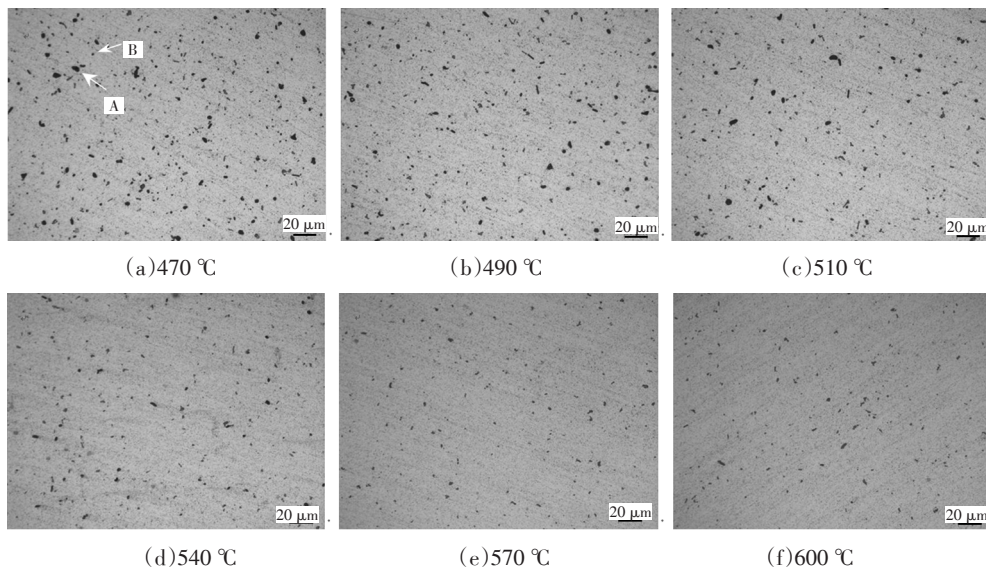
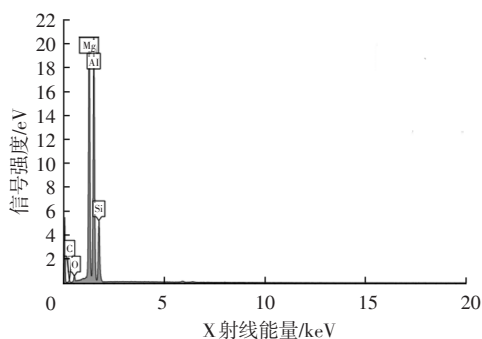


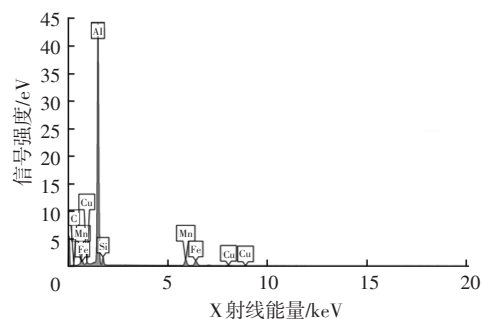
图3 不同固溶温度下的6056铝合金显微组织

对显微组织中A和B两种第二相粒子进行能谱仪(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)扫描,能谱扫描峰图如图4所示,黑色粒子A主要含有Al、Mg和Si,其各元素质量分数分别约为48.6%、28.5%



(a) 黑色粒子A

和19.0%,可以判断其主要为初生的 Mg_2Si 相。而褐色粒子B主要含有Al、Si、Mn、Fe和Cu,其质量分数分别为72%、5%、10.5%、9.1%和1.2%,可以判断这些残留相主要为富Fe相和富Cu相。



(b) 褐色粒子B

图4 能谱扫描峰图

因此,随着固溶温度的升高,初生的 Mg_2Si 相逐渐溶解到基体中,数量减少,固溶温度越高, Mg_2Si 相的溶解越充分。残留的富Fe相和富Cu相相对稳定,数量没有随着温度升高而发生明显变化。

3.3 晶间腐蚀

图5和图6分别为固溶温度为540℃时的合金晶间腐蚀后的表面形貌和腐蚀裂纹纵向形貌。可以看出,合金晶界发生了明显腐蚀,腐蚀沿着晶界呈网状分布,部分晶粒已相互脱离。同时,腐蚀在晶界附近向晶粒内部扩展,形成黑色的腐蚀坑洞^[3-4]。

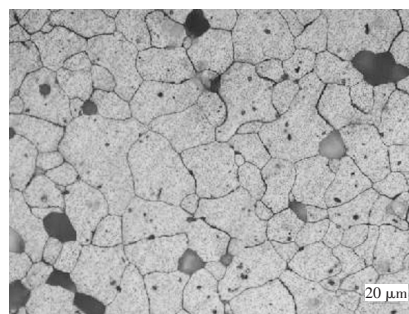


图5 晶间腐蚀表面形貌

不同温度固溶处理的合金腐蚀深度不同,图7为在合金晶间腐蚀深度随固溶温度升高的变化趋

势。其中,在固溶温度为 470 ℃时合金晶间的腐蚀深度最浅,最大晶间腐蚀深度为 210.0 μm。随着固溶温度的升高,在 490~600 ℃时的合金晶间腐蚀最大深度分别为 254.7 μm、302.6 μm、335.9 μm、341.8 μm 和 357.6 μm,逐渐加深。

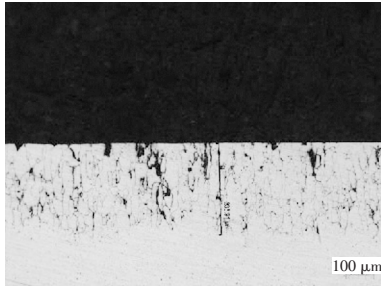


图6 晶间腐蚀纵截面深度

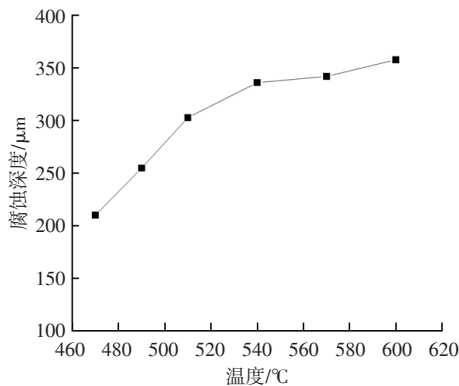


图7 不同固溶温度下合金腐蚀深度曲线

4 分析讨论

6056 铝合金属于 Al-Mg-Si-Cu 时效强化合金,其脱溶分解是一个较为复杂的过程,大致可以简化为:过饱和固溶体、Mg 和 Si 的原子团簇、GP 区、β'相、β'相与 Q'相、β相与 Q 相。其中 β'相与基体保持共格关系,可以最大限度地阻碍位错运动,提高合金强化效果^[5-7]。因此,6056 铝合金强度高主要取决于合金内 β'相的析出数量。随着固溶温度的升高,合金中越来越多的 Mg₂Si 相溶解到基体中,合金基体中溶质原子的浓度越高,在后续的淬火以及时效处理时得到的弥散析出强化相(β'相)也越多,析出强化效果越明显,这也是在固溶温度为 470~540 ℃时,随着固溶温度的升高,合金拉伸强度得到显著提高的重要原因。

图 8 为固溶温度为 570 ℃时的合金晶界形貌,可以发现,固溶温度为 570 ℃时合金局部区域已经出现三角晶区,晶界变宽,此时合金已经出现过

热,抗拉强度下降到 570 ℃时的 412 MPa 和 600 ℃时的 409 MPa。强度下降幅度较小的原因可能为 Mg₂Si 相固溶更充分,使强度没有出现急剧下降,但此时合金的延伸率明显下降,同时拉伸断口形貌韧窝变少,开始出现了二次裂纹和沿晶特征,说明晶界结合力已经出现弱化,这些均与固溶温度过高有关。由于合金在固溶温度为 570 ℃时已发生过热,在 570~600 ℃温度变化下其强度未发生明显变化,但延伸率有所下降,耐晶间腐蚀能力也有所降低。

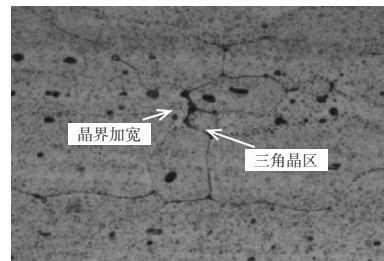


图8 晶界显微组织

铝合金材料晶间腐蚀的敏感性与晶界上的组织强度相关^[8-10]。晶界具有较高的界面能,在时效过程中,晶界附近的溶质原子容易向晶界上偏聚形成连续析出相,从而使得晶界周围形成了无沉淀析出带(Precipitation Free Zone, PFZ)。由于 PFZ 区域溶质原子较少,其电位比晶内和晶界析出相低,成为阳极,在腐蚀介质作用下形成腐蚀原电池,从而发生晶间腐蚀。当固溶温度不足时,合金内的初生 Mg₂Si 没有完全溶解到基体中,后续时效强化过程中析出的强化相也会随之变少。而晶界上析出相会直接影响晶间腐蚀敏感性,导致完全固溶处理的合金比未完全固溶处理的合金更容易发生晶间腐蚀,因此,随着固溶温度的升高,晶间腐蚀深度也随之增大。当固溶温度过高时,合金过热,晶界加宽,晶间结合力变弱,这会使得晶界上组织发生不均匀变化,增大与晶界周围 PFZ 之间的电位差,提高晶间腐蚀敏感性,更容易发生晶间腐蚀。

5 结论

a. 拉伸力学试验结果表明:在固溶温度为 470~540 ℃时,随着固溶温度的升高,抗拉强度、屈服强度和延伸率均升高,在固溶温度为 540 ℃时到达峰

值。在固溶温度达到570℃后,提高固溶温度会使抗拉强度和屈服强度轻微下降,而延伸率已出现明显下降。观察拉伸断口形貌,固溶温度为470~540℃时拉伸断口微观形貌均为韧窝状,且韧窝深浅和数量随着固溶温度升高而出现变深、变少的趋势。而固溶温度为570~600℃时拉伸断口形貌虽然也有韧窝,但有明显的二次裂纹以及局部类似冰糖状的沿晶特征,这表明该温度下材料的晶界结合力已经弱化,强度和塑性出现下降。

b.金相显微组织和EDS能谱扫描结果表明,在固溶温度为470℃~540℃时,随着固溶温度升高,初生的 Mg_2Si 溶解度逐渐增加,固溶强化效果也随之增强。在固溶温度为570~600℃时,显微组织中已经没有初生的 Mg_2Si 。另一方面,残留的富Fe相和富Cu相受固溶温度变化影响较小,在金相显微组织上没有明显变化。

c.耐晶间腐蚀试验结果表明,晶间腐蚀深度随固溶温度升高而加深。在固溶温度为470℃时,晶间腐蚀程度最小,随着固溶温度的升高,合金中越来越多的 Mg_2Si 溶解到基体中,在后续时效强化中也会伴随着更多的强化相在晶界处析出,提高了合金晶间腐蚀的敏感性,晶间腐蚀深度也随之提高。当固溶温度为570~600℃时,晶界加宽,晶间腐蚀倾向更明显,腐蚀也更加严重。

参考文献:

[1] 赵喆. 铝合金螺栓的研制及其在发动机上的应用[J]. 机

械研究与应用, 2018, 31(3): 161-163+171.

- [2] 李瑞雷, 袁峰, 曹培元, 等. 热处理工艺对汽车螺栓用6056铝合金线材组织和性能的影响[J]. 上海金属, 2021, 43(5): 50-55.
- [3] 侯丹丹, 单际强, 曹国华, 等. T6态6082铝合金的晶间腐蚀行为[J]. 金属热处理, 2017, 42(10): 209-215.
- [4] 侯丹丹. 6082铝合金的微观组织演变规律和晶间腐蚀行为研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2017.
- [5] 曹培元, 袁峰, 李瑞雷, 等. 双级时效对Al-Mg-Si-Cu合金力学性能和耐晶间腐蚀性能的影响[J]. 上海金属, 2022, 44(1): 50-55.
- [6] 刘胜胆, 陈小连, 张端正, 等. 固溶温度对6082铝合金显微组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(3): 582-588.
- [7] 杨文超. Al-Mg-Si-Cu系6005A合金的时效硬化行为及析出相的微观结构表征[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [8] 邓桢桢, 郭世杰, 纪艳丽, 等. 不同固溶制度对6082铝合金力学性能和腐蚀性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(3): 64-72.
- [9] 李慎兰, 黄志其, 蒋福利, 等. 固溶温度对6061铝合金组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(5): 131-136.
- [10] 李有功, 李秋梅, 周龙, 等. 时效制度对7075铝合金晶间腐蚀行为的影响[J]. 有色金属加工, 2020, 49(2): 45-47+37.