

6016 铝合金汽车板生产技术研究现状

李永欣¹ 王传瑶²

(1.天津忠旺铝业有限公司,天津 301700;2.九江德福科技股份有限公司,九江 332005)

摘要:当前,6016 铝合金汽车板因其优异的性能备受关注。探讨了 6016 铝合金汽车板的全流程生产技术,包括化学成分、熔铸、轧制、热处理、化学处理与静电涂油,阐述了各生产工序的基本原理、技术现状与研究进展。最后,从化学成分设计、熔铸新技术、短流程轧制技术、热处理技术、化学处理技术与关键设备国产化等多个方面,对 6016 铝合金汽车板生产技术的发展方向进行展望。

关键词:铝合金汽车板 化学成分 轧制 热处理 化学处理

中图分类号:U465.2*2 **文献标志码:**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20240174

Research Status of Production Technology for 6016 Aluminum Alloy Automobile Sheet

Li Yongxin¹, Wang Chuanyao²

(1.Tianjin Zhongwang Aluminum Co., Ltd., Tianjin 301700; 2. Jiujiang Defu Technology Co., Ltd., Jiujiang 332005)

Abstract: At present, 6016 aluminum alloy automotive sheet has attracted much attention for its excellent performance. This paper discusses the whole process production technology of 6016 aluminum alloy automobile sheet, including chemical composition, melting and casting, rolling, heat treatment, chemical treatment and electrostatic oiling, and emphatically expounds the basic principle, technical status and research progress of each production process. It finally prospects the development directions of 6016 aluminum alloy automobile sheet production technology in aspects of chemical composition design, new melting and casting technology, short process rolling technology, heat treatment technology, chemical treatment technology and key equipment localization.

Key words: Aluminum alloy automobile sheet, Chemical composition, Rolling, Heat treatment, Chemical treatment

1 前言

据美国能源信息署(Energy Information Administration, EIA)预计,到 2030 年,全球汽车保有量将突破 20 亿辆,全球交通领域的石油消耗量将占总消耗量的 57%,轻量化已经成为汽车工业可持续发展的必然趋势^[1-2]。燃油汽车车体减重有利于降低燃油消耗量并减少 CO₂ 的排放量。相关研究数据显示,汽车整体质量每减轻 10%,燃油效率可提高 6%~8%,汽车动力性能增强,燃料消耗量减

少,可有效降低碳排放。电动汽车质量每减轻 10%,其续航里程可增加 7.5%,并可提高车辆的操控性^[3]。因此,在“碳达峰”和“碳中和”的背景下,汽车轻量化具有极其重要的意义。

当前,采用轻质材料是汽车轻量化的有效措施之一,铝合金是极具前景的汽车轻量化材料,在汽车的四门两盖覆盖件、侧围总成、发动机舱总成、顶盖总成、底板总成与电动汽车电池包总成等部件中均大量应用。在众多变形铝合金中,得到应用的 6××× 变形铝合金汽车板主要有 6014、6016、

作者简介:李永欣(1983—),男,工程师,硕士学位,研究方向为铝合金化学成分设计、表面化学处理及热处理工艺。

参考文献引用格式:

李永欣,王传瑶. 6016 铝合金汽车板生产技术研究现状[J]. 汽车工艺与材料, 2025(1): 46-55.

LI Y X, WANG C Y. Research Status of Production Technology for 6016 Aluminum Alloy Automobile Sheet[J]. Automobile Technology & Material, 2025(1): 46-55.

6022、6111、6181A与6451等。6016铝合金板性能优异,其用量占6×××系变形铝合金板的80%以上。6016铝合金汽车板的生产工艺复杂,部分生产技术直接影响下游汽车主机厂的配套使用。本文综述6016铝合金汽车板的生产技术,包括化学成分、熔铸、轧制、热处理、化学处理、静电涂油等,着重阐述

各生产工序的基本原理、技术现状与研究进展。最后,展望6016铝合金汽车板生产技术的研究方向。

2 化学成分

1984年,瑞士注册了6016铝合金牌号,其化学成分如表1所示。

表1 6016铝合金化学成分(质量分数)

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	其他元素		Al
									单个	合计	
质量分数	1.0~1.5	0.50	0.20	0.20	0.25~0.6	0.10	0.20	0.15	0.05	0.15	余量

2.1 合金元素

为使铝合金具有某些特性,在铝基体中添加或保留的金属或非金属元素称为合金元素。6016铝合金的合金元素为Mg和Si,形成了6016铝合金的强化相 Mg_2Si ,随着固溶体中的 Mg_2Si 含量增加,合金强度不断提高,Wang等^[4]研究了Mg与Si的质量比值不变时Mg和Si含量降低梯度化学成分的6016铝合金,结果表明,随着Mg、Si含量的增加,晶粒尺寸减小,再结晶立方织构得到改善,S织构减弱。6016铝合金的强度随着Mg和Si含量的降低而降低。在 Mg_2Si 相中,Mg与Si的质量比为1.73,当Mg与Si的质量比 >1.73 时,形成Mg过剩型铝合金,Mg过剩会影响铝合金的成形性能,当Mg与Si的质量比 <1.73 时,形成Si过剩型铝合金,随着Si元素含量的增加,合金的硬化速度提高,得到的铝合金峰值硬度更高,有利于6016铝合金汽车板的烤漆硬化响应。因此,在实际生产应用中,铝合金汽车板多选择Si过剩的6016铝合金,尤其在高端品牌汽车的车身覆盖件(主要包括车门覆盖件、发动机罩盖、行李箱后盖、车身上顶盖与翼子板等)中,铝合金的应用更为普遍,如图1所示。

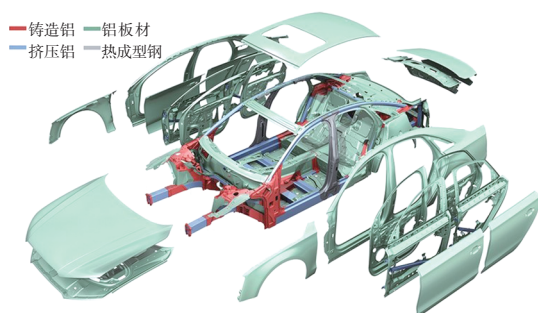


图1 铝合金材料在汽车上的应用(奥迪A8 D4)

2.2 其他微量元素

铝合金中非添加或保留的金属或非金属元素称为杂质。6016合金主要杂质元素有Fe、Cu、Mn、Cr、Zn、Ti等。为提高6016铝合金汽车板的综合性能,除研究以上合金元素和杂质外,在6016铝合金化学成分中加入特殊金属元素的效果也受到研究者的关注。Lu等^[5]研究了Nb元素对6016铝合金组织和性能的影响,结果表明,经过固溶处理或固溶处理+预时效处理后,合金的抗拉强度和塑性均显著提高。随着Nb含量的增加,第二相的数量和尺寸增加。T4P状态下添加质量分数为1% Nb的合金具有较好的综合力学性能,其断后伸长率、抗拉强度、屈服强度、塑性应变比和应变硬化指数分别为34.20%、372.77 MPa、208.54 MPa、0.82、0.32。在6016中加入稀土元素成为一个新的研究方向,如Ce、Y、Er和Y^[6-8],研究表明,铝合金中添加少量稀土元素可改变合金的结晶条件,降低铝液中的含氢量及孔隙率,改善其微观结构和力学性能。稀土元素的强化作用主要表现为细晶强化、有限固溶强化和稀土化合物的第二相强化等。我国稀土资源丰富,为该项研究提供了极大便利。

3 熔铸

熔铸是熔炼与铸造的简称,是铝合金汽车板生产的首道工序,其流程如图2所示。熔铸为后续铝合金轧制提供坯料,其内部组织与外观质量有很强的遗传性,若铸锭冶金质量存在先天问题,后道工序通常难以补救。尤其对汽车板、航空板、易

拉罐、双零铝箔等高端铝合金产品,熔铸技术尤为重要,铸锭质量的优劣直接影响产品质量和生产效率^[9]。

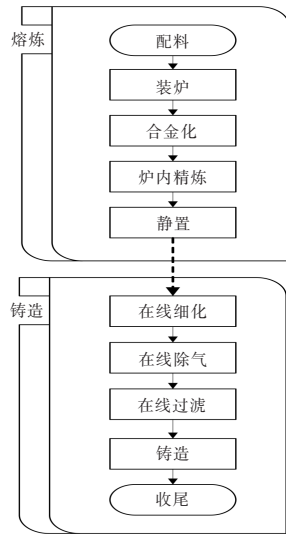


图2 熔铸生产工艺流程

3.1 熔炼

熔炼是将纯铝锭、电解铝液、镁锭、中间合金、金属添加剂、几何废品与工艺废品等各种不同形状和成分的配料,经过熔化、炉内精炼,获得符合合金化学成分的、较纯净的铝合金熔体。由于铝熔体中存在气体(主要为氢气)、非金属夹杂及其他有害金属等影响其纯洁度,导致铸锭产生疏松、气孔、夹渣及裂纹等缺陷,对铸锭的加工性能及制品的力学性能、抗蚀性、加工性能及外观质量均有明显影响。因此,需要利用物理化学原理和相应的工艺措施除去熔体中的非金属夹杂、气体和有害元素。按照净化作用机理,铝合金熔体净化法分为吸附净化法、非吸附净化法与复合净化法,如图3所示。

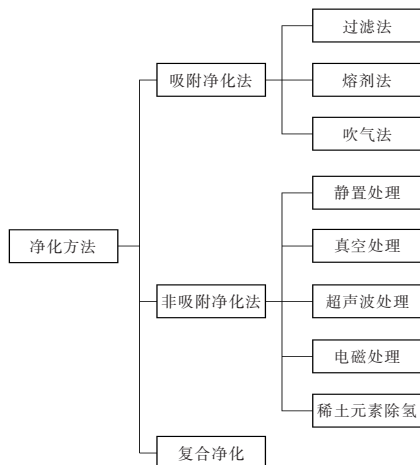


图3 铝合金熔体净化法

3.2 铸造

铸造是通过在线细化、除气、过滤等,将纯净的铝合金熔体直接或间接冷却,在模具内结晶凝固成形状、外观及组织均符合要求的铸锭,为后续热轧加工提供质量合格的坯料。

铸造前需对铝熔体进行细化处理,获得均匀、细小的等轴晶。在线细化剂使用Al-5Ti-B或Al-5Ti-0.2B,现有的细化机理有包晶理论、碳化物-硼化物理论与结合理论等,但目前这些机理不能解释所有的问题。

在线除气的主要目的是降低熔体中的氢含量。常用的净化气体有N₂、Ar、N₂+Cl₂、Ar+Cl₂,主要方法有旋转喷嘴惰性气体浮游(Spinning Nozzle Inert-gas Floatation, SNIF)、熔体在线处理(Melt In-line Treatment, MINT)、ALPUR等,国内铝加工企业多采用混合气与SNIF法进行联合除气,并采用ALSCAN、HDA-IV、ELH-IV、Telegas II型测氢仪,其中,ALSCAN测氢仪应用较为广泛。

在线除渣主要是去除铝熔体中的夹杂物,如氧化物、氯化物、氮化物与硅酸盐等。现有过滤除渣方式有陶瓷泡沫过滤(Ceramic Foam Filter, CFF)、深床过滤(Deep Bed Filter, DBF)、管式过滤(Porous Tube Filter/Porous Cartridge Bonded Particle Filter, PTF/PCBPF)^[10-12],3种过滤设备性能指标的对比如表2所示。为提高过滤精度,采用CFF+CFF、CFF+BDF、CFF+PTF的双级过滤。6016铝合金汽车板通常需要采用双级过滤。本文认为铝合金汽车板冲压与易拉罐罐身用铝合金板带的薄壁拉伸减薄冲压不同,不必采用CFF+BDF、CFF+PTF双级过滤组合,采用CFF+CFF双级过滤即可,由此可降低生产成本。常用的渣含量检测方法有液态金属清洁度分析(Liquid Metal Cleanliness Analyzer, LiMCA)法、多孔盘过滤片(Porous Disk Filtration Apparatus, PoDFA)法、超声探头熔体夹杂在线检测法等,普遍采用LiMCA在线测渣仪实时监测熔体的渣含量。针对现有过滤进行研究,开发新型的过滤材料也是重要的研究方向^[11-15]。

表2 过滤设备性能指标对比

项目	CFF	DBF	PTF
过滤效果	中	优良	优
杂质直径/ μm	≥ 20	≥ 20	≥ 20
过滤效率/%	[75, 90]*	≥ 90	≥ 99
除气效果	低	良	低
合金更换	中	难	较难
使用范围	大部分铝合金	所有铝合金	所有铝合金
过滤成本	低	较高	高

*注:不同PPI型号陶瓷泡沫过滤板过滤效率不同。

铸造采用瓦格斯塔夫(Wagstaff)自动化扁锭铸造系统,使用铝合金结晶器或石墨环结晶器,严格执行铸造工艺。国内外多采用立式直冷(Direct Chill)半连续铸造技术生产6016铝合金汽车板用铸锭。铸造完成后,检查铸锭外观质量。由于铸造的铝合金铸锭头尾与表面存在铸造缺陷,如偏析瘤、皱褶、缩孔、夹杂及裂纹等,需要锯切、铣面去除表面缺陷,并取样检测组织是否合格。部分铝加工生产企业配备有铸锭无损探伤设备,用于检测铣面后铸锭内部缺陷。

近年来,铝合金熔铸生产新技术主要有:

a. 熔体处理技术:炉前电解铝包除碱金属技术、炉侧旋转除气技术。

b. 铸造技术:扁锭的可调节能变形结晶器(Adjustable Flexible Mould, AFM)技术、电磁搅拌铸造技术、短流程铸造技术。

c. 自动化与智能化技术:超声测液位技术、激光诱导击穿光谱(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)在线化学成分检测技术、铸造安全检测技术、自动化与智能化集成技术。

熔铸是6016铝合金汽车板生产的首道工序,铸锭质量直接影响最终产品质量。采用CFF双级过滤可兼顾过滤效果与生产成本,新型高效的过滤材料、高效细化剂及其细化机制、智能在线检测技术等依然是研究的热点。另外,熔铸是铝合金汽车板生产中能源消耗的主要工序,如何实现节能降耗,提高产品的市场竞争力与占有率,是需要持续改进的课题。

4 轧制

根据轧制温度不同,铝合金轧制分为热轧、冷轧和温轧,但温轧并未在铝加工生产中得到应用,铝合金汽车板普遍采用热轧加冷轧的方式生产。铸轧是将熔铸与轧制串联的短流程生产方式,可减少部分中间生产设备,大幅降低生产成本。

4.1 热轧

热轧是指铝合金在其再结晶温度以上进行轧制,热轧为冷轧提供坯料。通过热轧将铝合金铸造组织转变为加工组织。铸锭在热轧机三向压缩应力的作用下,通过多道热轧的反复变形完成热轧,硬化和软化同时发生。轧制变形破碎了粗大柱状晶,使材料的组织成为均匀细小的等轴晶粒,还能使某些细小的裂纹得以愈合,缩孔和疏松被压实,变为较致密的组织结构。高温原子热运动能力加强,在应力作用下借助原子自由扩散,有利于缓解铸锭化学成分的不均匀性。热轧分为热粗轧和热精轧,6016铝合金汽车板的生产多采用1(热粗轧)+4/5(热精轧连轧机组)生产。

热轧的主要技术参数有均匀化温度、开轧温度、热轧速度、热轧压下制度、精轧卷取张力与卷取温度,以上参数对6016铝合金组织与性能有很大影响。Ouhiba等^[16]研究了6016铝合金热变形保温过程中粗再结晶晶粒的形成,探讨了粗大再结晶晶粒发展的可能因素,指出储存能量是导致某些再结晶晶粒过度生长而损害其他晶粒的关键因素,且由于高驱动压力与储存能量相关,Smith-Zener钉扎无法防止。王亮等^[17]阐述了铝合金板罗平(Roping)线的产生原因、检测方法及操作步骤。通过拉伸试验、弯曲试验分析了罗平线的影响因素,结果表明,铝合金板的各向异性、弯曲角度、表面状态对罗平线均有一定影响,严格控制热轧的开轧温度和终轧卷取温度是保证铝合金汽车板罗平线合格的有效途径。

4.2 冷轧

冷轧为铝合金在其再结晶温度以下进行的轧制,冷轧过程不会发生动态再结晶,只能上升至回复温度。6016铝合金经冷轧后,少量晶体产生加工硬化,晶粒被破碎拉长形成纤维组织,其强度和

变形抗力增加,塑性降低。6016 铝合金热轧带材在冷轧机三向压缩应力的作用下,晶粒沿长度方向被压扁、拉长、变细,并出现纤维组织;经过充分冷轧后出现了亚结构,提高了铝合金强度,并形成了纤维状的变形织构,在晶粒内部和晶粒间形成微裂纹。铝合金汽车板生产多采用 4 辊或 6 辊连续可变凸度(Continuously Variable Crown, CVC)冷轧机或冷连轧机生产。

冷轧的主要技术参数有冷轧压下率、轧制速度、轧制张力,通常与热处理工艺联合调控铝合金汽车板织构与性能。为调控 6016 铝合金汽车板的晶粒度和织构,可选择热轧坯料直接退火后冷轧,或冷轧后进行中间淬火或退火,再次进行冷轧。徐燕萍等^[18]研究了冷变形量对 6016 铝合金板 r 值(塑性应变比)的影响,淬火后主要有立方织构和 R 织构,且不同冷轧工艺会导致淬火后形成不相同的织构组分,使材料表现出不同程度的各向异性。段晓鸽等^[19]研究了热轧退火后常规轧制(NR)、横向轧制(TR)、交叉轧制(AR)等对 6016 铝合金组织和平面各向异性的影响。结果表明,AR 轧制能有

效改善 6016 铝合金板再结晶退火后的组织均匀性和塑性各向异性。

毛化轧制技术(Skin Pass)起源于汽车用钢板,为改善板材的成形性与涂漆性能,铝合金汽车板冷轧也引入了该技术。其方法是在冷轧成品道次,使用毛化处理的冷轧辊配合特殊轧制控制技术,进行加工率为 2%~10%的冷轧,将轧辊的毛化形态转移至板表面。毛化轧制技术本质上只能称为轧辊的毛化技术,轧辊的不同毛化技术比较如表 3 所示。随着轧辊表面毛化技术的发展,喷丸毛化(Shot Blast Texturing, SBT)技术已不再使用,Topocrom 技术的轧辊使用寿命是其他工艺的 3~6 倍,但易产生大量有毒废物,严重污染环境,现已被逐步淘汰。激光毛化(Laser Texturing, LT)会导致局部金属熔化,易产生氧化和毛化层破裂,毛化效率较低。电子束毛化(Electron Beam Texturing, EBT)技术需要在真空条件下进行,工艺技术尚不成熟。电火花毛化(Electron Discharge Texturing, EDT)工艺成熟,毛化效率高、成本较低,应用广泛^[20]。

表 3 轧辊的不同毛化技术比较

项目	物理加工(熔化汽化、加工)				电化学加工
	SBT	EDT	EBT	LT	Topocrom
毛化坑分布方式	随机	随机	确定	确定	确定
表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	1.5~5.0	0.5~15	0.5~10	0.8~10	0.8~20
峰值数量 P_c	低	高	高	高	高
R_a 与 P_c 的相关性	强	中	弱	弱	弱
表面形貌遗传性	受限	好	好	衰减明显	好
均匀性/再现性	差	好	好	好	好
单根毛化时间/min	20~25	25~60	30~35	30~90	60
环境污染评价	中	中	低	中	高
设备投资成本(设定 SBT 成本为 1)	1	2~3	4~5	3~4	4~5
设备运行成本	低	中	高	高	中
备注	易残余受喷丸颗粒且受辊面硬度的影响	可毛化高硬度、耐磨性好的材料	不受轧辊硬度限制,需真空条件	可控性强,不受轧辊硬度限制	可显著延长轧辊使用寿命

6016 铝合金汽车板采用 EDT 技术,毛化轧制后表面呈鱼鳞状,表面粗糙度为 $(1.0\pm 0.3)\mu\text{m}$;对于不需要毛化的轧制表面,通过普通轧辊即可实现,表面称为轧制光面(Mill Finish, MF),其粗糙度为 $(0.4\pm 0.2)\mu\text{m}$ 。采用 EDT 的表面形成很多凸

起和凹坑,在静电涂油后可形成很多小油池储存润滑介质,不仅对铝合金板表面有保护作用,也有利于板的冲压成形。与 MF 相比,EDT 处理后的表面的具有以下优势:板材表面的润滑油分布更均匀、附着力更好;提高板材的运输、处理与储

存的性能,降低表面缺陷形成的风险;在板材冲压车间更易自动拆垛;改善板材的成形性能;涂漆后表面均匀美观。

4.3 铸轧

铸轧是铝合金带坯的连续铸轧法和连铸连轧法的统称,是将生产工序连成一条生产线,也称为短程无头轧制(Endless Rolling)、短流程轧制。主要的铸轧技术有双辊式连续铸轧、哈兹雷特(Hazelett)双带式连铸连轧、凯撒微型双钢带连铸连轧、劳纳法(Caster II)连铸连轧、英国曼式(MAN)连铸连轧、奥科宁克(原美铝)Micromill™连铸连轧等。奥科宁克公司的Micromill™技术取得了130余项专利,产品已在汽车制造中应用。与现有铝合金板相比,Micromill™技术生产的铝合金板材成形性提高40%,强度提高30%,从铝液到铝合金卷材的生产时间由20天缩短至20 min,具有更优良的表面质量^[21]。2016年,美铝公司与意大利达涅利公司达成Micromill™生产技术的合作协议,但近年来该技术几乎销声匿迹。不少研究者利用双辊式连续铸轧尝试生产6016铝合金汽车板,虽取得了很大进展,但生产技术尚不成熟^[22-25]。

轧制是铝合金汽车板生产的重要工序,6016铝合金汽车板普遍采用热粗+热连轧生产出热轧带材,随后使用6辊CVC冷轧或冷连轧机生产至成品厚度,并采用EDT轧制技术。但这些轧制设备与控制系统大多需要进口,如何实现国产化、降低生产成本是未来的研究方向。铸轧流程短、成本低,但因其成形性能不足,表面质量差,目前不能实现铝合金汽车板材的批量生产。

5 热处理

热处理是铝合金通过加热、保温及冷却的手段获得预期的组织与性能的过程。热处理是6016铝合金汽车板生产的关键技术,主要包括均匀化、退火、固溶淬火及预时效。

5.1 均匀化

为减少铝合金铸锭化学成分的偏析和组织的不均匀性,将其加热到高温并长时间保温,以消除或减少偏析及残余应力、改善后续加工性能的热

处理过程称为铸锭均匀化。Fe在6×××系铝合金中的相有针状 β -AlFeSi相与椭球状 α -AlFeSi相。 β -AlFeSi相会在塑性变形时产生裂纹,对铝合金冲压产生不利影响。铸锭均匀化促使 β -AlFeSi转化为 α -AlFeSi,消除 β 相产生的负面影响。崔立治等^[26]研究了不同均匀化热处理时间对6016铝合金组织和性能的影响,确定了6016铝合金铸锭均匀化的最优工艺为加热到560℃,保温8h。铸锭经过该工艺均匀化热处理后,轧制热处理后的板材具有良好的综合力学性能。

5.2 退火

退火是将变形铝合金加热至再结晶温度以上,保温一段时间后冷却,使铝合金发生再结晶,从而消除加工硬化的热处理过程。6016铝合金汽车板成品的平均晶粒度尺寸为30~50 μm ,晶粒大小均匀,不仅有利于冲压成形,且表面不会因晶粒粗大形成“橘皮纹”表面缺陷,影响涂漆美观。退火可减轻或消除罗平(Roping)线的不利影响。李大林等^[27]研究了冷轧过程的中间退火对6016铝合金表面Roping线和组织性能的影响,结果表明,450℃的中间退火处理可使6016铝合金板表面Roping线完全消失,且包边性能最优。丁轩等^[28]研究了汽车外板用6016铝合金生产过程中微观结构的演变规律和中间退火工艺对综合性能的影响,结果表明,连续退火比箱式退火晶粒细化作用更强,中间退火前冷轧压下量对结晶相破碎效果显著,中间退火处理弱化了T4P态板中的不均匀屈服延伸,箱式退火的慢升温速率和长时间保温导致 Mg_2Si 相沿晶析出并粗化。

5.3 固溶淬火

固溶淬火是指将铝合金加热到某一适当的温度,并在此温度保温,使可溶组分充分溶入固溶体中,随后淬火(风淬或水淬),使可溶组分形成过饱和固溶体的热处理过程。铝合金的固溶温度原则上根据相图中低熔点相共晶温度和铝合金的溶解度曲线确定。6×××系铝合金板的固溶温度一般为510~579℃,固溶时间应该保证析出相能够充分溶解到基体中,固溶处理后必须立即淬火,形成过饱和固溶体,防止强化相析出^[29]。在实际生产中,6016铝合金汽车板固溶温度多采用

530~575 °C,在保证板材不过烧的情况下,采用高温可提高生产效率。6016固溶淬火处理后会自发析出弥散性,析出的次序为:过饱和固溶体(SSSS),原子团簇,纪尼埃-普雷斯顿(Guinier-Preston, GP)区, β'' ($A_{12}Mg_5Si_4$), β' (Mg_9Si_5)、U1、U2、B', β (Mg_2Si)、 $Si^{[30]}$ 。 β'' 与 β' 相与铝基体共格或半共格,具有强化作用,而 β 相与铝基体不共格,无强化作用。由于高温固溶淬火,铝合金板、带材表面会产生变形或板形不良,为保证后续化学处理和静电涂油均匀,需进行板形拉伸矫直,但会加速析出物的产生,对后续冲压成形产生不利影响,因此,在保证板形的情况下,使用尽可能小的矫直拉伸率。

5.4 预时效

预时效是在固溶淬火后,为抑制自然时效产生的沉淀硬化,使铝合金过饱和固溶体预析出的热处理过程。刘蒙^[31]研究了固溶淬火+预时效+自然时效制度对6016铝合金加工成型及烤漆性能的影响。结果表明,6016铝合金固溶淬火后(T4态)具有一定的自然时效硬化倾向,不利于加工成型和烤漆硬化。采用预时效能抑制自然时效硬化倾向,明显提高烤漆的硬化速度和硬化能力。韩欣等^[32]对汽车覆盖件用6016铝合金板进行了室温到100 °C的预时效处理,发现80 °C×8 h的预时效最优。虽然生产中常使用60~100 °C的预时效来抑制自然时效,但自然时效产生的沉淀析出依然存在,因此,6016铝合金汽车板预时效完成后,必须在6个月内使用完毕。

热处理是6016铝合金汽车板生产的关键技术,不同的热处理作用不同,通常与轧制技术共同调控晶粒尺寸和织构的分布,以获得优良的综合性能。研究热处理的机理,开发新的铝合金汽车板热处理技术,延长铝合金汽车板保质期成为重要的研究方向,需尽快推进气垫炉等设备的国产化进程。

6 化学处理

铝的化学活性很高,能与空气中的氧气迅速反应,在自然条件下形成氧化薄膜,但氧化膜不够均匀致密,因此,经常采用化学处理或电化学处理

的表面处理技术使铝材表面产生一层新的均匀的转化膜或钝化膜,提高铝合金汽车板的耐蚀性、可焊性与粘接性等。

6.1 碱洗

铝合金在冷轧制过程中以轧制油作为介质,起到润滑、冷却和清洗的作用。目前铝合金冷轧机均配备轧制油吹扫系统,但在铝合金板表面依然残留少量轧制油和铝粉。在带材表面进行化学转化前,通常使用碱洗去除。为避免环境污染以及干扰后续酸洗工序,碱洗后进行1~2级纯水漂洗,去除残留在铝板表面的碱液。6016铝合金汽车板普遍使用达因笔判定表面是否清洗干净。

6.2 酸洗

碱洗难以清除铝合金表面的氧化物与粘铝层,因此,需要酸洗彻底去除铝合金板表面的缺陷,为化学转化处理提供清洁、新鲜的铝合金基体表面,便于化学转化膜层的附着。酸洗工序通常使用硫酸、氢氟酸或硫酸和磷酸以及表面活性剂。为避免环境污染以及干扰后续表面处理工序,酸洗后需要进行1~2级纯水漂洗,去除残留在铝板表面的酸液。

6.3 化学转化

6016铝合金汽车板常用的化学转化法有钛、锆盐转化法,有机硅烷处理,Alcoa 951[®]处理,磷化处理,阳极氧化等^[33],国内铝合金汽车板生产厂大都采用钛、锆盐转化法,并用X射线荧光光谱仪检测膜重。钛、锆盐法不使用六价铬酸盐,属于绿色环保型化学转化处理方法,化学处理液主要由含钛、锆的金属盐、氢氟酸和表面活性剂组成,通过喷淋、浸渍的方式形成转化膜。膜层主要由锆、钛及铝的络合物等组成,如图4所示,其优点是操作简单,化学转化处理后,用挤干辊挤干,无需漂洗,然后热风烘干,降低了用水成本。所得转化膜面密度为2~8 mg/m²,膜层均匀稳定,与有机聚合物的结合力很强,耐腐蚀性能优异,且对材料成形或锌-磷化处理无任何负面影响^[34]。有机硅烷处理、Alcoa 951[®]处理在北美地区的铝加工企业与汽车主机厂应用广泛,磷化处理与阳极氧化应用较少。

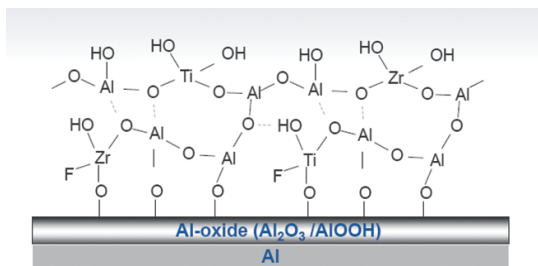


图4 化学转化膜的组成

6016 铝合金汽车板表面化学转化处理过程中,通过碱洗去除油,酸洗去除氧化皮,普遍采用钼盐转化法形成钝化膜,提高铝合金汽车板的耐蚀性与粘接性等。铝合金汽车板的化学处理药剂均为国外品牌,国内对铝合金汽车板生产专用化学药剂属于空白,开发具有自主知识产权的、无铬绿色环保的化学处理技术极其重要。另外,国内对现有化学转化膜机理与耐腐蚀机理的研究较为笼统。

7 静电涂油

铝合金汽车板采用固体(加热后呈液态)或

液态润滑介质,不同汽车主机厂对润滑介质的要求不同,铝合金汽车板主要润滑介质如表4所示。固态润滑剂又称干膜润滑剂(Dry Film Lubricants, DFL),在铝合金汽车板生产中应用广泛,无需清洗即可直接进行粘接。通过静电涂油机对6016铝合金汽车板进行预润滑(润滑介质在冲压成形后很容易除去)以及对板表面进行涂层(该涂层留在成形工件表面,起到抗腐蚀的作用,有利于表面粘结处理),可显著提高铝板的冲压成形性能。铝合金汽车板材专用生产线通常配备静电涂油机,但大多设置在预时效炉后,对不需要预时效处理的板材可直接涂油,而对需要预时效处理的6016铝合金汽车板,由于预时效温度为60~100℃,会使涂油挥发,且卷取后会造铝卷端面涂油流动,不满足涂油标准,因此,预时效处理的板材需要在预时效完成并降低至室温后,转移至其他生产线,如重卷机、切边机,进行静电涂油。

表4 铝合金汽车板冲压润滑介质

项目	Zeller+Gmeli(德杰)	Fuchs(福斯)	Quaker(奎克)	Henkel(汉高)
型号	MULTIDRAW DRYLUBE E 1	ANTICORIT PL 39 SX	FERROCOAT N 6130-NT	PARCO PRELUBE MP 404
用途	汽车板冲压	汽车板冲压	汽车板冲压、清洗	汽车板冲压
油品状态	常温固态	常温半固态	常温液体	常温液体
凝固点/℃	40	45		
涂油方式	静电涂油	静电涂油	静电涂油	静电涂油
建议用量/g·m ⁻²	0.6~1.3	1.0	1.3~1.7	0.1~0.15
保质期/月	≥36	≥36	≤12	≤12

Gruber 等^[35]以涂有 Multidraw Drylube E1 的6016 铝合金汽车板为基材,研究了干膜润滑剂(Dry-Film Lubricants)对汽车行业用6xxx 铝合金粘接接头的粘结强度和腐蚀行为的影响。结果表明,干膜润滑剂对粘附铝样品的耐腐蚀性能以及金属-粘附界面腐蚀渗透的影响显著。

使用静电涂油机对6016铝合金汽车板进行预润滑,能够显著提高铝板的冲压成形性能与耐腐蚀性能,通常采用干膜润滑。研究润滑介质对后续冲压成形、焊接及粘接的影响,对汽车铝板应用具有重要意义。但当前润滑介质与涂油机均为国外进口。

8 结束语

通过对6016铝合金汽车板的化学成分、熔铸、轧制、热处理、化学处理、静电涂油等全流程生产技术的探讨,阐述了各工序的基本原理、技术现状与研究进展。主要得出以下结论:

a. 为提高6016铝合金汽车板的烤漆硬化响应性能,在实际生产应用中多选择Si过剩的6016铝合金,有针对性地加入稀有或稀土元素改善铝合金化学成分,有利于提升铝合金性能。

b. 熔铸是铝合金汽车板生产的首要工序,其铸锭质量直接影响产品质量和生产效率。采用双级CFF过滤可兼顾过滤效果与生产成本。

c. 轧制是 6016 铝合金汽车板生产的重要技术,6016 铝合金汽车板的生产大都采用热粗+热连轧生产出热轧带材,随后采用 6 辊 CVC 冷轧或冷连轧机生产至成品厚度。铝加工企业普遍采用工艺成熟且成本较低的 EDT 技术。尽管铸轧技术流程短且成本低,但目前不能实现汽车板材的批量生产。

d. 热处理是 6016 铝合金汽车板生产的关键技术,不同的热处理工艺作用不同,通常与轧制技术共同调控晶粒尺寸与织构的分布,以获得优良的综合性能。

e. 6016 铝合金汽车板表面化学转化处理中,通过碱洗除油、酸洗去除氧化皮,普遍采用铬盐转化法形成钝化膜、提高铝合金汽车板的耐蚀性与粘接性等。

f. 使用静电涂油机对 6016 铝合金汽车板进行预涂油能显著提高铝板的冲压成形性与耐腐蚀性能,干膜润滑油在铝合金汽车板生产中应用广泛。

为进一步拓宽 6016 铝合金汽车板的应用范围,后续研究方向有:

a. 添加新的化学元素,提高铝合金汽车板的综合性能。

b. 开发新的熔铸技术及其过程自动检测技术,实现自动化与智能化。

c. 推进铝合金铸轧汽车板生产技术产业化,降低生产成本。

d. 研究热处理的机理,开发新的铝合金汽车板热处理技术,延长铝合金汽车板保质期。

e. 研究铝合金汽车板化学转化机理,开发新型绿色环保型转化处理技术。

f. 铝合金汽车板生产设备国产化研究与替代。

g. 使用 CAE 模拟铝合金汽车板生产工艺条件,缩短产品开发周期。

参考文献:

- [1] DU K, HUANG S H, HOU Y, et al. Characterization of the Asymmetric Evolving Yield and Flow of 6016-T4 Aluminum Alloy and DP490 Steel[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 133: 209-229.
- [2] OTA Y, MASUDA T, KIMURA S. Technical Trends in Aluminum Alloy Sheets for Automotive Body Panels[J]. *Kobelco Technology Review*, 2020, 38: 16-20.
- [3] 娄元豪, 王优强, 邢照斌. 汽车轻量化研究进展[J]. *汽车工艺与材料*, 2023(9): 1-7.
- [4] WANG X J, SUN W, CHEN J F, et al. Microstructures and Properties of 6016 Aluminum Alloy with Gradient Composition[J]. *Rare Metals*, 2020, 40: 2154-2159.
- [5] LU B, LI A, WU C, et al. Effect of Niobium on Microstructure and Properties of 6016 Aluminum Alloy[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 2044(1).
- [6] 康学良. 稀土元素铈对 6016 铝合金均匀化过程的影响[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2016.
- [7] LI A, WANG L Z, HU Y, et al. Effect of Rare Earth Elements and Heat Treatment Process on Microstructures and Properties of 6016 Aluminum Alloy[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 2044(1).
- [8] 卢博, 李安敏, 饶宇, 等. 稀土 Y 及热处理对 6016 铝合金组织与性能的影响[J]. *材料导报*, 2022, 36(19): 139-146.
- [9] 戴有涛. 铝合金熔铸技术的发展现状及趋势[J]. *有色金属加工*, 2019, 48(4): 1-4+18.
- [10] SYVERTSEN M, JOHANSEN I, KVITHYLD A, et al. Evaluation of CFF and BPF in Pilot Scale Filtration Tests[C]// *Light Metals 2020*, 2020: 963-971.
- [11] KVITHYLD A, SYVERTSEN M, BAO S, et al. Aluminium Filtration by Bonded Particle Filters[C]// *Light Metals 2019*, 2019: 1081-1088.
- [12] BERGIN A, VOIGT C, FRITZSCH R, et al. Performance of Regular and Modified Ceramic Foam Filters (CFFs) during Aluminium Melt Filtration in a Pilot-Scale Setup [C]// *Light Metals 2022, Anaheim*, 2022: 640-648.
- [13] VOIGT C, WERZNER E, FRITZSCH R, et al. Influence of Filter Surface Roughness on the Pressure Drop of Ceramic Foam Filters[J]. *Open Ceramics*, 2023: 15.
- [14] LI X K, LI L Y, XU L L, et al. Preparing β -SiAlON Ceramic Foam Filters with High Oxidation Resistance[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(22): 34510-34519.
- [15] HASSANABADI M, BERTO T, AKHTAR S, et al. Hydraulic Characterization of Ceramic Foam Filters Used in Aluminum Filtration[J]. *Materials*, 2023, 16(7).
- [16] OUHIBA S, NICOLAY A, BOISSONNET L, et al. Formation of Coarse Recrystallized Grains in 6016 Aluminum Alloy During Holding After Hot Deformation[J]. *Metallur-*

- gical and Materials Transactions A, 2022, 53(7): 2402-2425.
- [17] 王亮, 张泽东, 杜敏, 等. 铝合金汽车板罗平线的影响因素[J]. 理化检验(物理分册), 2020, 56(2): 21-24.
- [18] 徐燕萍, 任月路, 许泽兵, 等. 冷轧工艺对6016铝合金 r 值的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(23): 41-44.
- [19] 段晓鸽, 江海涛, 米振莉, 等. 轧制方式对6016铝合金薄板组织和塑性各向异性的影响[J]. 材料工程, 2020, 48(8): 134-141.
- [20] 杨建军, 潘恩海, 朱蔚, 等. TOPOCROM毛化工艺在落料线上的应用初探[J]. 锻压装备与制造技术, 2016, 51(4): 31-33.
- [21] 孟林, 王祝堂. 铝材的无头轧制[J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(12): 1-5+36.
- [22] SAKAGUCHI H, HAGA T, WATARI H, et al. High Speed Twin Roll Casting of 6016 Aluminium Alloy Strip[J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2007, 20(2): 495-498.
- [23] SAKAGUCHI H, HAGA T, INUI H, et al. Casting of 6016 Aluminum Alloy Strip Using Twin Roll Caster with 1500 Diameter Rolls[J]. Journal of Japan Foundry Engineering Society, 2007, 79(9): 523-529.
- [24] HAGA T. High Speed Roll Caster for Aluminum Alloy[J]. Metals, 2021, 11(3): 520.
- [25] WEI B W, JIANG T, LI S J, et al. Improving Element Uniformity and Mechanical Properties of Al-Mg-Si Alloy Fabricated by Twin Roll Casting with Superheat Melt Treatment[J]. Materials Research Express, 2022, 9(1).
- [26] 崔立治, 孙中国, 王如川. 均匀化处理时间对6016铝合金组织和性能的影响[J]. 世界有色金属, 2022(9): 1-3.
- [27] 李大林, 朱鹏程, 王萍, 等. 中间退火处理对6016冷轧铝合金板 Roping 纹和组织性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(11): 157-160.
- [28] 丁轩, 甘玉荣, 张春菊, 等. 中间退火工艺对6016铝合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(8): 174-179.
- [29] 张琪. 汽车覆盖件用6xxx系铝合金板材的研究、产业化现状及发展趋势[J]. 有色金属加工, 2020, 49(1): 1-5.
- [30] LU Q, LI K, CHEN H N, et al. Simultaneously Enhanced Strength and Ductility of 6xxx Al Alloys Via Manipulating Meso-Scale and Nano-Scale Structures Guided with Phase Equilibrium[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 41: 139-148.
- [31] 刘蒙. 预时效对6016铝合金时效硬化和烤漆性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(8): 229-231+235.
- [32] 韩欣, 刘晓滕, 王家毅, 等. 预时效工艺对汽车用6016铝合金板时效稳定性和烘烤响应的影响[J]. 轻合金加工技术, 2021, 49(5): 26-30.
- [33] 刘贞山, 李英东, 赵经纬, 等. 汽车轻量化用铝合金材料及应用技术的研究[J]. 中国材料进展, 2022, 41(10): 786-795+807.
- [34] 陶志民, 麻慧琳, 李延成, 等. 6016铝合金板材表面预处理对电阻点焊的影响[J]. 轻合金加工技术, 2021, 49(12): 49-52.
- [35] GRUBER R, SINGEWALD T D, BRUCKNER T M, et al. Influence of Dry-Film Lubricants on Bond Strength and Corrosion Behaviour of 6xxx Aluminium Alloy Adhesive Joints for the Automotive Industry[J]. Lubricants, 2023, 11(10): 437.