

doi: 10.3969/j.issn.2095-0411.2022.06.001

变形铝合金液态模锻及其研究进展

邢书明¹, 武彤¹, 孙鸿基¹, 欧黎明¹, 潘琦俊², 胡柏丽², 王超²

(1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100064; 2. 芜湖禾田汽车工业有限公司, 安徽 芜湖 241100)

摘要: 铸造铝合金液态模锻的研究与应用十分活跃, 但变形铝合金液态模锻的研究却鲜有报道。液态模锻是利用金属材料在液相线附近的流变特性进行零件成型的一种工艺技术, 变形铝合金同样可以进行液态模锻。文章首先总结归纳了变形铝合金液态模锻的研究与应用现状, 综合分析了变形铝合金液态模锻技术关键和强韧化机制, 指出液锻变形铝合金将形成一大类新的高强轻质材料, 今后的主要研究课题是: ① 间接液锻成型中复杂工件的开裂、偏析以及成形不完整等缺陷的防控; ② 液锻变形铝合金的热处理工艺优化; ③ 变形铝合金材料的预处理, 模具、设备及液锻工艺等多环节协同控制, 实现变形铝合金的高性能成型。

关键词: 液态模锻; 挤压铸造; 铝合金

中图分类号: TG 316.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2022)06-0001-08

Wrought Aluminum Alloy for Molten Metal Die Forging (MMDF) and Its Progress

XING Shuming¹, WU Tong¹, SUN Hongji¹, OU Liming¹, PAN Qijun², HU Baili², WANG Chao²

(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100064, China; 2. Wuhu Hetian Automotive Industry Co., Ltd., Wuhu 241100, China)

Abstract: The research and application of the molten metal die forging (MMDF for short) of cast aluminum alloy are very active, but the research of MMDF of wrought aluminum alloy is rarely reported. MMDF is a process technology for forming parts by using the rheological properties of metal materials near the liquidus. Wrought aluminum alloy can also be used for MMDF. Firstly, the research and application status of MMDF wrought aluminum alloy was summarized in this paper, and then the key technology and strengthening and toughening mechanism of MMDF wrought aluminum alloy was comprehensively analyzed. Finally, it was pointed out that MMDF wrought aluminum alloy would form a series of new materials with high-strength and light density, and there would be three main research

收稿日期: 2022-05-26。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(510327); 安徽省重点研发资助项目(202004a05020069)。

作者简介: 邢书明(1962—), 男, 河北平山人, 博士, 教授。E-mail: smxing@bjtu.edu.cn

引用本文: 邢书明, 武彤, 孙鸿基, 等. 变形铝合金液态模锻及其研究进展[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2022, 34(6): 1-8.

topics of MMDF wrought aluminum alloy in the future: ① prevention and control of cracking, segregation and incomplete forming defects in indirect MMDF of complex workpiece; ② optimization of heat treatment process of MMDF wrought aluminum alloy; ③ integrated control of the pretreatment of wrought aluminum alloy materials, design and manufacture of the dies, selection of the equipment and MMDF process to realize the high-performance forming.

Key words: molten metal die forging (MMDF); squeeze casting; aluminum alloy

铝合金根据成型制造的类别分为变形铝合金和铸造铝合金两大类。变形铝合金具有良好的塑性变形可成型性,但液态成型工艺性较差,一般只能先铸成锭坯,然后通过锻、轧、挤等塑性变形加工成材或成型零件,很少直接铸造成型;而铸造铝合金则主要通过铸造方法成型零件,很少通过塑性变形成型。两者之间形成了一个明晰坚固的壁垒。然而,液态模锻是利用金属材料在液相线附近的流变特性进行零件成型的一种工艺技术,是一种铸锻交叉融合的材料成型技术。液态模锻技术的研究与应用,正在不断突破这种壁垒,铸造铝合金可以液锻,变形铝合金同样也可以液锻,并可达到接近同种锻件的力学性能水平^[1]。文章从变形铝合金的成分、组织及其应用特点等方面出发,结合液态模锻的成型原理,分析讨论了变形铝合金液态模锻的工艺性能、组织性能特点以及今后的研究重点。

1 变形铝合金液态模锻的工艺适应性分析

1.1 工业纯铝的液锻适应性

充型能力、补缩能力和裂纹敏感性是液态模锻的 3 个主要工艺性能^[2],它们与材料在熔点附近的临界切应力 (τ_c) 有关。临界应力越大,流变充型、流变补缩以及对裂纹的流变焊合的阻力也就越大,其液态模锻的工艺性能就越差^[3]。工业纯铝在熔点附近的临界切应力一般只有数百千帕,相对于液态模锻几十兆帕的压力而言,其变形抗力微不足道。因此,工业纯铝液态模锻的流变充型、流变补缩以及对热裂纹的流变补焊能力毋庸置疑,是优异的液锻材料。

热物理数据见表 1。工业纯铝 ($1\times\times\times$ 系铝合金) 的结晶温度范围很小,1035 工业纯铝只有 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$,是典型铸造铝合金 ZL101 (约 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$) 的 60%,所以,其流动性很好,热裂倾向小。但是,目前尚未见到液锻工业纯铝 ($1\times\times\times$ 系铝合金) 的研究和应用报道。工业纯铝 ($1\times\times\times$ 系铝合金) 体收缩率高,1035 合金体膨胀系数为 $68\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$,体收缩率达 6.6%, $20\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的线收缩系数为 $25.0\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$,线收缩率约 1.8%,比典型的铸造铝合金 ZL101 分别高出了 61%和 50%,预计其产生收缩缺陷及开裂倾向较大,液锻过程应卸压后及早脱模,防止出现收缩受阻开裂。

表 1 典型变形铝合金的热物理参数一览表

Table 1 Thermophysical parameters of typical deformed aluminum alloy

典型合金牌号	液相线 温度/ $^{\circ}\text{C}$	固相线 温度/ $^{\circ}\text{C}$	$\alpha_l\times 10^{-6}/$ K^{-1}	$\alpha_v\times 10^{-6}/$ K^{-1}	结晶潜热/ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	热导率/ ($\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
ZL101	613	557	23.5	—	—	150	870
1035	657	643	25.0	68	390	234	900
2024	638	502	24.7	66	—	190	875
3003	654	643	25.1	67	—	193	893
4032	571	532	21.0	56	—	155	864
5005	652	632	25.6	68	—	205	900
6061	652	582	25.6	—	—	180	896
7075	635	477	25.5	68	—	130 (T6)	960

说明: α_l 为 $20\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的线收缩系数; α_v 为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的体膨胀系数。

1.2 非热处理强化变形铝合金液态模锻的工艺性能

铝-锰($3\times\times\times$ 系)合金、铝-硅($4\times\times\times$ 系)合金及铝-镁($5\times\times\times$ 系)合金都属于非热处理强化型的变形铝合金。这类合金的液态模锻还是个处女地,研究与应用报道甚少。

列入国标的铝-锰($3\times\times\times$ 系)变形铝合金只有19个牌号。铝-锰($3\times\times\times$ 系)合金中含有大量脆性相 $MnAl_6$ 化合物,所以变形加工时很容易开裂。但是,铝-锰($3\times\times\times$ 系)合金液锻工艺性能优良。这首先归因于其结晶温度范围较小,一般不超过 $20\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$,倾向于逐层凝固,不易形成缩松缺陷;其次,其高温强度较高,3003铝合金 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的名义屈服强度有12 MPa,延伸率高达70%,抗热裂能力较强。因此,铝-锰($3\times\times\times$ 系)变形铝合金属于优良的液锻铝合金。值得注意的是,锰在铝中的熔质分配系数很小,在液锻快冷的条件下,枝晶偏析严重,细化枝晶是提高液锻铝-锰($3\times\times\times$ 系)变形铝合金均质性的有效途径。此外,其收缩系数较大,在液态模锻条件下容易收缩受阻产生裂纹,应卸压后及早脱模,防止冷裂。

铝-硅($4\times\times\times$ 系)合金也是一种非热处理强化的合金。国标中的铝-硅合金只有9个牌号,其硅含量在4.5%~13.5%。有的(如4A11, 4032等)添加少量的铜、镁、锌、镍进行微合金强化。硅的加入可以显著降低铝的熔点,当硅含量达到12.5%时,其熔点降为 $577\text{ }^{\circ}\text{C}$ (共晶温度)。所以,共晶成分附近的铝硅合金具有优异的流动性,被广泛用作焊接材料。铝-硅合金中杂质元素铁的容限可高达1.0%,比铸造铝合金高出数倍,而其塑性并不差,仍保持在9%以上。此外,其熔点低,结晶温度范围小,凝固模式倾向于逐层凝固,缩松和开裂倾向都小,所以,液态模锻的流变补缩能力优异。不仅如此,液态模锻的高压快冷,可以抑制硅相的长大,进一步降低材料的脆性。所以,铝-硅系变形铝合金是优异的液态模锻合金,可以利用液态模锻技术制备铝-硅焊接材料。

铝-镁($5\times\times\times$ 系)合金是第3种非热处理强化合金。列入现行国标的铝-镁变形铝合金有29个牌号,其主要合金元素镁含量最高可达9.6%,多在3%~6%。铝-镁系合金结晶温度范围比铝-硅合金稍高,一般在 $30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,与常见铸造铝合金相当,其凝固模式为逐层和糊状兼有的混合模式,所以,有一定的缩松倾向。但是,其收缩系数小,不容易开裂,适于液锻成型,总之,铝-镁系变形铝合金的液态模锻工艺性能不错。此外,由于液态模锻可以显著细化晶粒,这种细晶强化就可以与镁的固溶强化协同,加上变形强化,有望使材料的强度和塑性提高到一个新水平,形成一大类新的高强铝合金——液态模锻铝镁合金。

综上所述,非热处理强化型变形铝合金的结晶温度范围较窄,液锻工艺性能良好,可以进行直接液锻、间接液锻、间-直复合液锻。这类合金可以充分利用液态模锻的细晶强化优势,与固溶强化、变形强化协同,进一步提高其性能水平。但是,这类合金的凝固壳强度较高,凝壳的支撑作用明显,液锻工艺参数设计中,开始加压时间要尽量短,密实比压要高,以抵抗凝固壳的变形抗力。

1.3 热处理强化型变形铝合金的液态模锻工艺性

铝-铜($2\times\times\times$ 系)合金、铝-镁-硅($6\times\times\times$ 系)合金以及铝-锌-镁-铜($7\times\times\times$ 系)合金都是热处理强化型变形铝合金。这类合金的液态模锻成型已经引起业界的关注。

铝-铜($2\times\times\times$ 系)合金在中国现行标准中有18个牌号,是典型的高强铝合金,俗称硬铝。其主要合金元素是铜,最大含量不超过7.0%,多为3%~5%,有的还含有Mn, Mg, Ni等微合金化元素。铜在 α 铝中的最大溶解度为5.7%,并随温度降低而减小,共晶点铜含量可高达33.2%。铝-铜合金结晶温度比工业纯铝稍低,但结晶温度范围很宽(2014铝合金的结晶温度范围高达 $131\text{ }^{\circ}\text{C}$),其凝固模式通常为糊状凝固模式,缩松和热裂倾向突出,容易出现枝晶间缩松、偏析和热裂缺陷,所

以其重力铸造性能不好,其铸坯在锻造过程也容易出现裂纹,这恰好为液态模锻提供了用武之地。液态模锻的高压流变补缩特性可以解决其缩松问题,实现致密化成型;液态模锻的高压作用,也可以发挥流变焊接的功能,提高其热裂抗力;液锻的快速冷却作用可以细化晶粒,减小偏析。总之,液态模锻铝-铜($2\times\times\times$ 系)合金具有突出的工艺优势。但是,值得注意的是,铝-铜合金中铝与铜的密度差异大,合金熔体容易出现比重偏析,在合金熔制时要尽量使用中间合金。此外,铝-铜合金的热稳定性好,即使高达 $370\text{ }^{\circ}\text{C}$,其强度还可保持在 30 MPa 左右,延伸率高达 100% (2024 铝合金),因此,这类合金液态模锻时,适宜采用高比压直接液锻,以实现液锻细晶强化与热处理强化的协同强化。

镁和硅同时加入就形成了铝-镁-硅($6\times\times\times$ 系)合金。现行国标中这类合金共有 27 个牌号。它们的镁含量不超过 1.2% ,硅含量不超过 1.7% 。固溶于铝中的镁和硅在时效处理时可以形成 Mg_2Si 强化相,实现热处理析出强化,所以镁硅质量比一般控制在 1.73 左右。这类合金与铝-铜合金类似,结晶温度范围较宽,一般都在 $50\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$,甚至可达 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ (6351 铝合金液相线温度 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$,固相线温度 $555\text{ }^{\circ}\text{C}$),其凝固模式为典型的糊状凝固模式,缩松倾向突出,容易出现晶间缩松、枝晶间偏析和热裂缺陷。液态模锻的高压流变补缩特性可以防止枝晶间缩松,实现致密化成型;液态模锻的高压作用,也可以发挥流变焊接的功能,提高其热裂抗力;液锻可以消除件/型间的气隙,具有快速冷却作用,可以细化晶粒,减小偏析。总之,铝-镁-硅($6\times\times\times$ 系)合金可以液态模锻。但是,这种合金的开裂倾向大,对液态模锻同样是个挑战。铝-镁-硅($6\times\times\times$ 系)合金液锻的基本原则是采用高比压、直接液锻,按照同时凝固原则设计液锻方案,复杂形状工件的间接液锻是亟需攻克的难题之一。

锌、镁、铜同时加入,就形成了铝-锌-镁-铜($7\times\times\times$ 系)合金。国标中这类合金共有 18 个牌号。它们的锌含量最高 7.0% ,镁含量不高于 4.0% ,铜含量不超过 2.0% 。有的还进行 Be, Ti, Zr 等微合金化。这类合金与铝-铜合金类似,结晶温度范围非常宽(7075 合金的结晶温度范围高达 $158\text{ }^{\circ}\text{C}$),所以其凝固模式为典型的糊状凝固模式,铸件缩松倾向突出,容易产生枝晶间偏析和热裂缺陷,其重力铸造工艺性能不好,铸锭的锻造加工工艺性能也不好,一旦变形速度过大,就出现裂纹缺陷。这种工艺性能较差的合金为液态模锻提供了发展空间。液态模锻的高压流变补缩特性可以有效解决缩松缺陷,提高抗热裂能力、减小偏析。因此,可以说铝-锌-镁-铜($7\times\times\times$ 系)合金也是可以液锻成型的材料。但是,这种合金的枝晶间缩松、开裂倾向大等特点对液态模锻同样是个挑战,这种合金液锻时,应遵守同时凝固原则,进行高比压、慢速加压、直接液锻。同时凝固可以减小热应力,降低开裂风险;高比压可以强化枝晶间的补缩作用,消除晶间疏松;慢速加压可以防止出现枝晶骨架的断裂,形成微裂纹;直接加压液锻可以确保工件内的压力衰减较小,实现均质化成型。

综上所述,热处理强化型的变形铝合金可以液锻成型,液锻细晶强化与热处理强化协同,可能使其强度水平与锻件相媲美。但是,因这类合金结晶温度范围宽,热裂敏感性和缩松倾向高,宜按照同时凝固原则进行模具和工件温度场的调控,进行低浇温、高比压、慢速直接加压液锻。复杂工件的间接液锻成型是今后研究的重点。

2 液态模锻变形铝合金的组织与性能

2.1 液态模锻工业纯铝的组织与性能

由于工业纯铝($1\times\times\times$ 系铝合金)近似于纯铝,其结晶温度范围很窄,凝固模式为逐层凝固,液态模锻的高压可达 100 MPa ,足以使其发生塑性变形,完全可以消除晶间缩松,所以预计液锻工业纯铝的致密度可以与轧制件或锻造相媲美。

液锻过程的冷却速度比常规铸造的冷却速度高数倍^[4],不容易导致成分过冷,固液界面的稳定性

高,所以其凝固组织细小,倾向于形成胞状晶或胞状树枝晶,这种细小规则的晶粒等于增加了大量晶界,预计液锻工业纯铝的强度和塑性优于常规铸造工业纯铝。但是,液锻工业纯铝内大量的晶界会使其传导性能比常规铸造及固态锻造有所降低。此外,工业纯铝的结晶温度范围和液态模锻的快冷,将使最后凝固位置容易出现杂质富集的现象,导致液锻大壁厚零件的均质性有所降低。

综上所述,关于液锻工业纯铝的研究近乎空白。液锻工业纯铝与重力铸造相比,预计力学性能较高,但传导性能并无改善。今后的研究方向是如何在力学性能有所提高的同时,确保高的传导性能和良好的均质性。

2.2 液态模锻非热处理强化铝合金的组织与性能

非热处理强化合金的强化机制主要是固溶强化和变形强化,目前其液锻成型的研究与应用报道较少。但是,液锻非热处理强化合金,除了固溶强化和变形强化外,还可以通过变质处理、高压凝固等途径实现细晶强化,因此,液锻非热处理变形铝合金的细晶强化、固溶强化以及变形强化三者的协同强化是今后的一个发展方向。

铝-锰($3\times\times\times$ 系)合金属于非热处理强化的铝合金,其液锻的研究与应用尚未见报道。但是,它强度比工业纯铝高,耐腐蚀性与工业纯铝接近,是一种中等强度的耐蚀铝合金,用途广、用量大,液锻成型意义重大^[5]。铝-锰($3\times\times\times$ 系)合金的主要合金元素锰含量最高1.6%,多在1.0%~1.5%。锰在 α 铝中的最大溶解度为1.82%,铝-锰二元合金的共晶锰含量为1.9%,两者差异很小,可以预计,液态模锻条件下,溶质锰的再分配很容易出现非平衡凝固组织——共晶组织,液锻铝-锰($3\times\times\times$ 系)合金的基体组织是锰溶入铝中形成的固溶体 α 铝,晶界上分布有共晶组织和铝锰化合物 $MnAl_6$ 。液态模锻的高冷速和必要的变质处理,可以使其中的共晶组织比较细小,对塑性的影响较小。液锻铝-锰合金的强化机制仍以基体的固溶强化为主,锰铝结合形成 $MnAl_6$ 化合物弥散质点,可以显著细化再结晶晶粒。预计液锻铝-锰合金强度较高,塑性较好。进一步提高铝-锰合金力学性能的主要途径是对合金进行必要的变质处理,细化凝固组织,与固溶强化和变形强化协同强化。

铝-硅($4\times\times\times$ 系)合金中的硅含量最低4.5%,最高可达13.5%,属于亚共晶铝硅合金。当硅含量在共晶含量附近时,液锻的快冷作用,可能使其获得100%的共晶组织。这种共晶组织具有良好的耐磨性和耐热性^[6]。远离共晶点的铝-硅($4\times\times\times$ 系)合金,其组织主要由硅溶入铝中形成的固溶体 α 以及共晶组织组成,两者的比例取决于硅含量。硅对固溶体 α 有一定的固溶强化作用。液锻过程的快速冷却,会使硅在合金中的溶解度提高,提升其固溶强化效果,进一步提高耐磨性和耐热性。但是,由于铝-硅($4\times\times\times$ 系)合金主要用于焊接,很少用于零件成型,所以未见其液锻成型的报道。如果液锻成型铝-硅($4\times\times\times$ 系)合金,在液锻件出模后缓冷条件下,还会析出一定的单质硅。这种硅相的形成,将使材料脆性增大。因此,液锻铝-硅($4\times\times\times$ 系)合金件出模后进行快速冷却,有利于提高强度和塑性。

铝-镁($5\times\times\times$ 系)合金是第3种非热处理强化合金。这种合金密度小,抗腐蚀能力好,是防锈铝之一。该合金作为一种轻量化材料在交通运输业中大量应用。每增加1%的镁,可以提升34 MPa,但是,当含镁量超过5%时,晶界形成网状 β 相,晶间腐蚀和应力腐蚀会加重。因此,如何在保持良好耐蚀性的前提下,提高材料的强塑性是本合金系的发展方向。铝-镁($5\times\times\times$ 系)合金的组织与铝硅系合金类似,也是固溶体加共晶组织,其强化作用主要是镁的固溶强化和固溶体的变形强化,其F态力学性能很高,极限强度可达580 MPa以上(5A12),条件屈服强度500 MPa左右,且塑性很好,伸长率可高达10%。液态模锻的高压快冷有助于提高铝-镁($5\times\times\times$ 系)合金中镁的固溶度,进而固溶强化效果更加突出,但是,液态模锻的变形量较小,其变形强化贡献不明显。如果采用大塑性变形

的液态模锻,则有可能使其强度达到或超过传统的锻件水平。诸葛跃等^[7]利用液锻 5083 铝镁合金成功制备了直径 370 mm 的航空法兰盘,给出了最优的液锻工艺,有效解决了原热模锻中的夹层、夹渣、裂纹、皱折、气孔、焊补等问题,提高了产品零件的表面质量和力学性能,使零件的力学性能接近模锻件。王向荣^[8]研究液锻 5035 变形铝镁合金发现,一旦存在缩松缺陷,在随后的阳极氧化处理中会出现白点,影响美观,但通过改进阳极氧化装挂方式以及增加碱蚀、活化等工序,可以最大限度地减少白点的产生。

2.3 液态模锻热处理强化型铝合金的组织性能

铝-铜($2\times\times\times$ 系)合金是典型的热处理强化型合金。这类合金的强化作用以 Al_2Cu 的析出强化为主,其变形加工后经过 T6 处理,极限强度可达 560 MPa 以上,条件屈服强度 450 MPa 左右,塑性很好,伸长率可高达 24%,所以其冷变形工艺性能优越^[9]。液锻铝-铜($2\times\times\times$ 系)合金铝热处理前的基体组织与固态锻造铝-铜($2\times\times\times$ 系)合金没有明显区别,也是以铜溶于铝形成的 α 固溶体为基体,晶界上还存在少量的共晶组织及化合物。经过固溶热处理后,晶界的这些共晶组织和化合物会有一定的溶解,在随后的时效过程,析出 Al_2Cu 弥散相,起到析出强化作用。实际上,这类合金通常都还添加小于 2% 的镁,进一步提高强度。侯立群等^[10]对液态模锻 2A50, 2A14, 2A12 等铝-铜($2\times\times\times$ 系)变形铝合金的组织性能进行了研究,结果表明,在 200 MPa 压力下液锻,它们的极限强度分别达到了 340, 425, 425 MPa,屈服强度分别达到了 310, 390, 320 MPa,伸长率分别达到了 4.5%, 3.5%, 9.5%。CHEN 等^[11]研究了超声辅助的挤压铸造 2024 铝合金的组织性能,结果表明,当超声功率 1.8 kW、作用 30 s 时,液态模锻 2024 铝合金框架零件成型完整,无缺陷,T6 处理后的极限强度、屈服强度和伸长率分别达到了 372, 246 MPa 和 8.5%,可见,液态模锻可以使变形铝合金顺利成型,并具有高强高塑的力学性能。JAHANGIRI 等^[12]研究了压力和浇铸温度对 AA2024 铝合金的缩松、显微组织、硬度及屈服应力的影响规律,也证明了液态模锻可以实现铝-铜($2\times\times\times$ 系)合金的强韧化。

液锻铝-镁-硅合金(6 系变形铝合金)的研究和应用相对较多。孙跃军等^[13]研究证明,液锻 6061 铝合金的力学性能可以与锻造 6061 相媲美,经双级时效处理后,强度高达 368 MPa 的同时,伸长率高达 10% 以上。易蒲淞等^[14]研究了液态模锻 6082 铝合金和固态锻造 6082 铝合金的高温流变性能与变形激活能,发现,当液锻比压为 100 MPa 时,即使在 500 °C 真应力还可达 20~55 MPa,当液锻比压为 100, 50 MPa 下的激活能分别为 223.056, 198.52 kJ/mol,均高于任治华^[15]所得 6082 铝合金固态挤压棒材的激活能 176.76 kJ/mol。孟凡博^[16]和袁晓光等^[17]系统研究了液锻 6061 轮毂的组织性能和成形性能,结果表明,液锻 6061 不仅可以成型汽车轮毂这样的复杂大型零件,而且所得轮毂本体取样的力学性能可与锻造轮毂媲美:其外轮缘部位的综合性能最高,抗拉强度可达到 371 MPa,伸长率高达 16%;内轮缘的抗拉强度稍低,也达到 362 MPa,伸长率保持 10% 的水平;轮辐部位的抗拉强度最低,为 346 MPa,伸长率为 9%;轮辋部位的抗拉强度为 358 MPa,伸长率为 10%。LIU 等^[18]的 6101 的液锻研究表明,6101 锻造铝合金可以采用液态模锻顺利成型,成型件的强度和塑性都随着液锻压力的提高而提高。KANG 等^[19]研究了硅含量和压力对铝-镁-硅合金组织性能的影响,进一步证实了成型件的强度和塑性都随着液锻压力的提高而提高。

铝-锌-镁-铜($7\times\times\times$ 系)合金是目前强度最高的热处理强化变形铝合金。这类合金的热处理是调节性能最重要的途径。同时加入锌和镁,可以形成 MgZn_2 强化相,产生明显的强化作用和抗应力腐蚀开裂能力,其含量可以在 0.5%~12% 大范围调节,2.7% 时的综合效果最好^[20]。侯立群等^[10]研究发现,7A04 铝合金熔体不经变质处理,只进行液态模锻后其组织细小,在 450 °C, 7 h 和 460 °C,

7 h 固溶及 120 °C, 24 h 时效后, 其屈服强度、抗拉强度和伸长率分别达到 410, 475 MPa 和 7.5%, 其断口形貌为细小韧窝, 表现为韧性断裂。可见, 变形铝合金即使不做变质处理, 在液态模锻条件下也可以实现高性能成形。袁松阳^[21]研究了 7075 铝合金液态模锻的组织性能, 证明随着液锻压力的增加, α -Al 晶粒由枝晶状转变为蔷薇状, 第二相的分布也越来越均匀; 液锻 7075-Sc 合金热处理前的屈服强度、抗拉强度和延伸率达到 258.5, 344.5 MPa 和 5.3%。李超^[22]对液锻 7075 铝合金端盖件的工艺与性能进行了系统研究, 发现液锻 7075 件的缺陷主要是冷隔和浇不足、表面缺陷和内部缩松、缩孔, 通过提高保压时间、控制金属液温度和模具温度、改变模具润滑等方法可以解决。同时, 发现液锻 7075 件的组织性能存在不均匀性。ZHENG 等^[23]研究了液锻 7075-T4 的低周疲劳行为, 证实了液态模锻铝-锌-镁-铜 (7×××系) 合金有利于提高材料的疲劳性能。王刚^[24]的研究证明, 液锻比压对 7055 铝合金的组织性能有显著影响, 随着液锻比压的提高, 晶粒细化、强度和塑性提高。液锻比压 75 MPa 时的强度和塑性不能与锻造 7055 相媲美, 但当液锻比压提高到 175 MPa 时, 液锻变形铝合金 7055 的性能可以与锻造 7055 相媲美^[25], 其强度可达 500 MPa 以上, 延伸率还可以保持在 8% 以上。

3 结论与展望

综合上述分析, 可以归纳出如下结论:

1) 变形铝合金的液锻工艺性能良好, 可以液态模锻。工业纯铝 (1×××系铝合金) 适于直接液锻, 也可以间接液锻, 液锻过程应遵循顺序凝固原则进行流变补缩, 并及时开模, 防止收缩开裂。其他变形铝合金宽结晶温度范围宽, 液态模锻的缩松倾向、热裂倾向以及偏析倾向都较大, 需要高压直接液锻成型。变形铝合金间接液锻是今后的一个研究课题。

2) 热处理强化型的变形铝合金可以液锻成型和细晶强化, 液锻细晶强化与热处理强化协同, 可以使其强度水平与锻件相媲美。不能热处理强化的液锻变形铝合金, 需要进行液锻细晶强化、固溶强化及变形强化, 同样可以实现高强高塑高韧的液锻变形铝合金的成型。

3) 液锻变形铝合金将形成一大类新的高强轻质材料, 今后的主要研究课题是: ① 复杂工件的间接液锻成型中开裂、偏析以及成形不完整等缺陷的防控; ② 液锻变形铝合金的热处理工艺优化; ③ 变形铝合金材料的预处理, 模具、设备及液锻工艺等多环节协同控制, 实现变形铝合金的高性能成型。

参考文献:

- [1] 齐丕骧. 变形铝合金挤压铸造[J]. 特种铸造及有色合金, 2008, 28(10): 769-772, 735.
- [2] 邢书明, 李春奎. 挤压铸造的工艺性能和实验表征方法[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(6): 601-605.
- [3] 黄永攀, 李道火, 黄伟. 挤压铸造条件下铝基复合材料铸造流动性研究[J]. 铸造, 2004, 53(11): 898-900.
- [4] KIM S W, DURRANT G, LEE J H, et al. The microstructure of direct squeeze cast and gravity die cast 7050 (Al-6.2Zn-2.3Cu-2.3Mg) wrought Al alloy[J]. Journal of Materials Synthesis and Processing, 1998, 6(2): 75-87.
- [5] 李广钦, 左秀荣. 铸态及均匀化处理 3003 铝锰合金的组织性能[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(3): 63-66.
- [6] 刘学, 田源, 李美玲, 等. 过共晶铝硅合金的研究进展[J]. 有色金属加工, 2021, 50(3): 12-13.
- [7] 诸葛跃, 王家宣, 李春. 5083 铝合金法兰盘液态模锻成形技术[J]. 金属铸锻焊技术, 2009, 38(7): 80-84.
- [8] 王向荣. 挤压铸造 5035 铝镁合金阳极氧化染黑色后白点故障分析[J]. 电镀与涂饰, 2021, 40(1): 71-74.
- [9] 汪先送. Al-Cu 合金挤压铸造及热处理的工艺优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [10] 侯立群, 邢志媛, 李素梅, 等. 常用铝合金挤压铸造状态下的组织和性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33

- (11): 1021-1023.
- [11] CHEN G, YANG M, JIN Y, et al. Ultrasonic assisted squeeze casting of a wrought aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 266: 19-25.
- [12] JAHANGIRI A, MARASHI S P H, MOHAMMADALIHA M, et al. The effect of pressure and pouring temperature on the porosity, microstructure, hardness and yield stress of AA2024 aluminum alloy during the squeeze casting process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 245: 1-6.
- [13] 孙跃军, 崔泽文, 高艳静, 等. 双级时效对液态模锻 6061 铝合金性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(1): 26-29.
- [14] 易蒲淞, 郭鹏, 李文彬, 等. 挤压铸造 6082 铝合金的高温流变行为和变形激活能分析[J]. 精密成形工程, 2020, 12(5): 81-87.
- [15] 任治华. 6082 铝合金筋板型长轴类锻件形/性控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018: 16-20.
- [16] 孟凡博. 6061 铝合金的凝固特性及其液态模锻轮毂成形性[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
- [17] 袁晓光, 孟凡博, 林雪健, 等. 液态模锻 6061 铝合金轮毂组织及性能[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(5): 504-508.
- [18] LIU T, WANG Q D, SUI Y D, et al. Microstructure and mechanical properties of overcast 6101-6101 wrought Al alloy joint by squeeze casting[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(4): 298-304.
- [19] KANG B K, SOHN I. Effects of Si content and forging pressure on the microstructural and mechanical characteristics in semi-solid forging of Al-Si-Mg alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2019, 50(7): 1-10.
- [20] 万彩云. AlZnMgCu 合金微观组织及强化析出相的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [21] 袁松阳. 7075 铝合金常规挤压铸造与流变挤压铸造微观组织和力学性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [22] 李超. 7075 铝合金端盖件液态模锻成形工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [23] ZHENG C K, ZHANG W W, ZHANG D T, et al. Low cycle fatigue behavior of T4-treated Al-Zn-Mg-Cu alloys prepared by squeeze casting and gravity die casting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(11): 3505-3514.
- [24] 王刚. 液态模锻 7055 铝合金的组织与力学性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [25] 王营, 邢书明. 铝合金液态模锻流变充型能力预报模型[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2021, 33(5): 15-24.

(责任编辑:李艳)