

铝锂合金曲面件超低温成形工艺

凡晓波¹ 洪吉庆¹ 赖小明² 许爱军² 苑世剑¹

(1 大连理工大学机械工程学院, 大连市 11602)

(2 北京卫星制造厂有限公司, 北京市 100090)

文 摘 针对铝锂合金室温成形性差和热成形性能弱化的难题,利用发现的超低温下伸长率与硬化指数同时提高的双增效应,提出铝锂合金曲面件超低温成形新工艺。通过2195铝锂合金板材在不同温度和热处理状态下的超低温变形行为研究,确定发生双增效应的临界温度为低于-140℃,伸长率可提高至40%以上、硬化指数达到0.44;利用建立的超低温成形工艺实验装置,首次试制出直径200 mm的2195铝锂合金球底曲面件,深径比达到0.55、成形极限提高104%;阐明超低温成形试件壁厚分布规律与回弹规律,最大减薄率为10.3%。

关键词 铝锂合金,超低温成形,双增效应,薄壁曲面件

中图分类号: TG394

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.04.015

Process of Cryo-forming for Al-Li Alloy Curved-shaped Components

FAN Xiaobo¹ HONG Jiqing¹ LAI Xiaoming² XU Aijun² YUAN Shijian¹

(1 School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

(2 Beijing Satellite Manufacturing Factory, Beijing 100090)

Abstract To solve the problems of poor formability at room temperature and weakening property at elevated temperature, a new process of cryogenic forming was proposed to form Al-Li alloy curved-shaped component, based on the double increase of elongation and work hardening at cryogenic temperature. The deformation behavior of 2195 Al Li alloy sheet at different cryogenic temperatures and heat treatment states was studied. The critical temperature of double hardening was determined to be lower than -140 °C. The elongation could be increased to more than 40% and the hardening index could reach 0.44. The cryo-forming device was established. The 2195 aluminum lithium alloy spherical bottom with a diameter of 200 mm was formed for the first time. The ratio of depth to diameter reached 0.55, the forming limit was increased by 104%. Finally, the corresponding thickness and springback distributions were clarified, the maximum thinning rate is 10.3%.

Key words Al-Li alloy, Cryogenic forming, Double hardening, Thin-walled component

0 引言

铝合金因具有高比强度和良好的耐腐蚀性能,被广泛应用于航天、航空和汽车领域的主体结构材料^[1],在运载火箭和飞机结构质量占比达到50%以上。相对现役铝铜、铝镁合金,铝锂合金添加了自然界最轻的金属元素Li,不仅密度下降3%~5%,强度还提高了30%以上,仅替代现役材料就可减轻结构质量15%以上。航天航空装备急需铝锂合金来实现材料轻量化^[2-4]。为进一步减重和提高可靠性,从结构上还迫切需求整体结构代替传统的多块分体拼焊结构^[5]。为此,出现了一类整体结构的铝锂合金薄壁曲

面件,如运载火箭燃料贮箱箱底、卫星舱底、新型飞机蒙皮等。

目前,拉深是常用的薄壁曲面件成形制造技术,已在航空、航天、汽车行业得到广泛应用。拉深成形主要用于具有良好室温塑性的低碳钢、不锈钢等材料,或者深度较小、形状相对简单的铝合金曲面件^[6]。但是,新一代装备迫切需要铝锂合金整体结构。受铝锂合金室温塑性差、硬化能力小等限制,整体曲面件拉深成形时极易在过渡圆角或悬空区开裂。结构整体化带来系列深腔、超薄、复杂形状等几何特征,整体曲面件拉深成形又极易起皱。为解决起皱需要加大压边力或设置拉

收稿日期:2021-06-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFA0708804);中央高校基本科研业务费专项资金资助(DUT20ZD101)

第一作者简介:凡晓波,1987年出生,博士,副研究员,主要从事高性能铝合金超低温成形工艺与机理研究工作。E-mail:xbfan@dlut.edu.cn

延筋,但会造成径向拉应力过大,加剧开裂缺陷。铝锂合金整体构件成形开裂缺陷难以解决。

为提高铝合金塑性变形能力,通常是通过加热方式实现^[7-8]。热拉深也被发展起来成形深腔薄壁曲面件,5A06铝合金筒形件深径比达到1.2^[9]。但是,加热条件下材料软化,容易导致曲面件拉深成形的悬空区(传力区)集中变形甚至开裂;更为苛刻的是加热后组织性能不易控制,需要通过成形后热处理来提高构件强度,成形后再淬火会导致薄壁曲面件严重变形且难以校形。现有的铝锂合金薄壁曲面件成形技术均存在巨大挑战。

近年,研究发现铝合金在超低温条件下具有伸长率与硬化指数同时提高的双增效应,有利于成形铝合金薄壁曲面件^[10-11]。为此,率先提出铝锂合金曲面件超低温介质成形工艺,通过超低温介质冷却或加压,实现薄壁曲面件整体成形。本文着重讨论铝锂合金超低温双增效应、超低温成形新工艺原理及工艺可行性,拟为铝锂合金薄壁曲面件在航天航空领域的应用提供指导。

1 铝锂合金板材超低温双增效应

通过超低温单向拉伸试验测试2195铝锂合金固溶态(W态)板材在常温(25℃)和液氮温度(-196℃)条件下的力学性能,其中板材固溶处理条件为:520℃×30min+水冷淬火,淬火后1h内完成性能测试。图1给出了2195铝锂合金固溶态板材在25℃和-196℃的真实应力应变曲线及力学性能。由图可看出,-196℃条件下力学性能相对常温显著提高。一方面,伸长率(δ)由常温25.5%增加到44.7%,提高了75.3%;另一方面,硬化指数(n 值)由常温0.28增加到0.44,提高了57.1%。超低温条件下,伸长率

与硬化指数同时增加,不仅有利于提高开裂极限,还能够抑制集中变形,提高均匀变形能力。

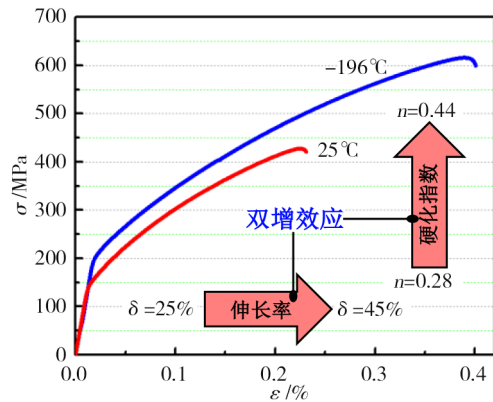


图1 2195铝锂合金固溶态板材超低温真实应力-应变曲线
Fig. 1 True stress-strain curve of 2195-W alloy at cryogenic temperature

铝锂合金为可热处理强化铝合金,热处理状态不同,超低温双增效应也不同。图2给出了2195铝锂合金板材在不同热处理状态条件下的超低温力学性能。由图可看出,不同热处理条件下的低温伸长率相对常温都有一定程度的提升,其中退火态(O态)和固溶态(W态)低温伸长率增加幅度更大。O态板材伸长率由常温的23.8%增加到34.4%,提高了44.5%;板材低温伸长率提高了75.3%;自然时效态(T4)伸长率能够达到31%;其他热处理状态的板材低温伸长率相对常温提升程度较小。用于反映均匀变形能力的硬化指数,在不同热处理状态下的变化规律与伸长率一致,同样是在O态和W态增加幅度更大。因此,超低温成形应根据构件形状复杂程度选择在退火态、固溶态和自然时效态相应成形。

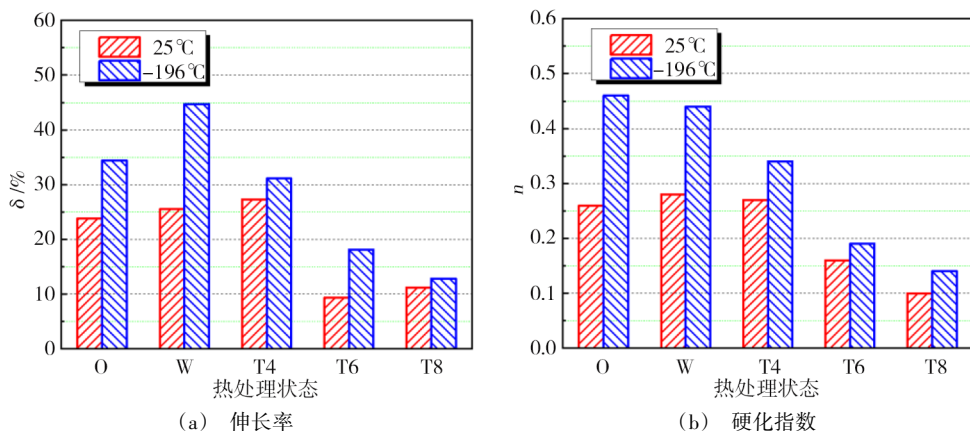


图2 不同热处理状态条件下的2195板材超低温力学性能

Fig. 2 Cryogenic mechanical properties of 2195 alloy under different heat treatment conditions

图3给出了2195铝锂合金固溶态板材在不同温度条件下的伸长率。由图可看出,板材伸长率并不是冷却后就能显著增加,而是需要冷却至一定温度后才大幅增加。当温度冷却至-140℃时,板材伸长

率提高到33.5%。也就是说,板材在达到这个温度以后才逐渐出现比较明显的双增效应。因此,铝锂合金超低温成形应将温度控制在-140℃以下。当然,温度越低,伸长率提高程度越大。为更大可能地

提高成形极限,温度应尽量控制在液氮温度。并且,通过液氮浸泡,板坯温度还更易控制。

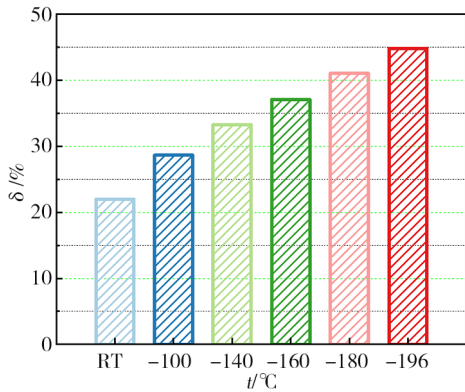


图3 不同温度下的2195铝锂合金固溶态板材伸长率
Fig. 3 Elongation of 2195-W alloy at different temperatures

2 铝锂合金超低温介质成形工艺原理及装置

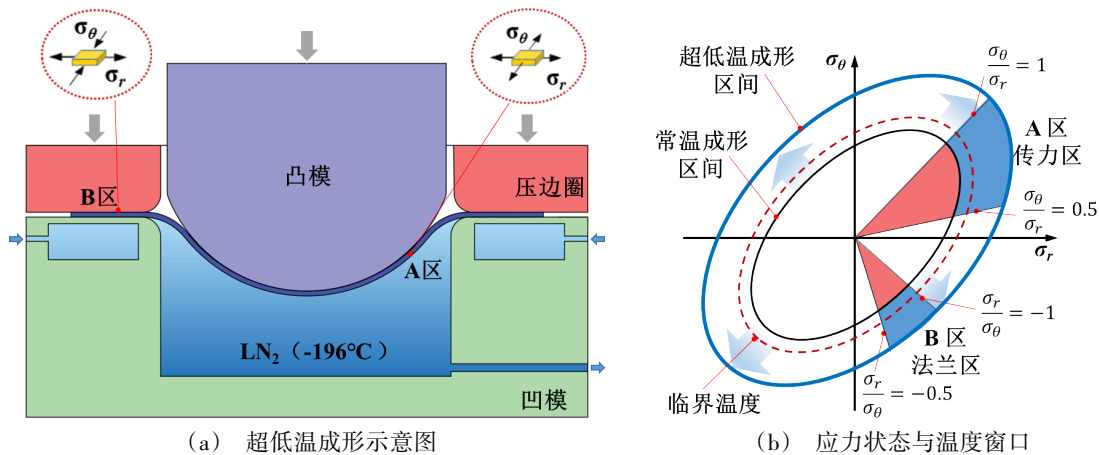
2.1 技术原理

基于铝锂合金超低温双增效应,提出铝锂合金曲面件超低温介质成形新工艺(Cryo-Forming)。通过超低温介质对材料进行冷却或加压,使材料在超低温下成形出薄壁曲面件。图4为薄壁曲面件超低温成形原理图。成形过程是将板材放入模具,在模具内将板材冷却至具有双增效应的临界转变温度以下($<-140\text{ }^{\circ}\text{C}$),使板材在超低温条件下成形出曲面件。需要说明的是,超低温介质不仅用于冷却还可用于增压,实现复杂形

状曲面件成形。为实现板坯在临界温度下变形,可将成形模具进行预冷,通过深冷模具间接冷却板坯,并减少深冷板坯与模具接触后的热交换。为实现大尺寸板坯高效、均匀冷却,也可在模具型腔内充填超低温介质。通过超低温介质浸泡直接冷却板坯,避免大尺寸模具冷却的问题。当然,也可将板材先预冷后再转移到模具内进行成形。总之,超低温介质成形的核心是确保变形区板坯始终在临界转变温度以下。

2.2 铝合金曲面件超低温成形工艺装置

作为一种全新的成形技术,需要合适的工艺实验装置。超低温成形工艺装置关键在于如何实现板坯冷却和加压。通过自增压储罐快速充填和缓冲,实现超低温介质闭环流动和排气;通过超低温介质直接冷却板坯,或者将模具深冷后间接冷却板坯;通过闭环调节超低温介质流量实现温度精确控制;并通过超低温泵实现超低温介质增压,建立了315 t超低温成形工艺装置,如图5所示。该装置使用的超低温介质为液氮,最低温度 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。需要注意的是,超低温成形需要将板坯冷却至合适的超低温温度场,板坯和模具之间发生着复杂的热交换。超低温成形模具设计不仅要考虑冷却均匀性,还要考虑热胀冷缩、构件回弹等引起的尺寸偏差。超低温成形模具制造则需要选择具有良好低温性能的模具钢。在模具内均布置有冷却通道,利于液氮循环冷却。



(a) 超低温成形示意图

(b) 应力状态与温度窗口

图4 铝合金曲面件超低温介质成形原理

Fig. 4 Principle of cryogenic forming for aluminum alloy curved-shaped components



图5 超低温成形工艺实验装置

Fig. 5 Experimental device of cryogenic forming

3 铝锂合金球底件超低温成形工艺实验

3.1 试件

薄壁曲面件拉深成形时,悬空区应力状态由法兰区一拉一压逐渐转变成贴模区的双拉应力状态,存在拉-压应力分界圆。为了防止悬空区起皱,拉-压分界圆的位置势必会向法兰区转移。当板坯塑性不足或硬化能力差不能将变形转换出去时,就会超出材料的成形极限而引起开裂。超低温成形工艺实验以直径200

mm、壁厚1 mm的球底件为研究对象,采用半径为5 mm、中心距为126 mm的圆槽拉延筋来防止球底曲面件悬空区起皱,压边力为7.5 t。图6(a)为常温成形试件。试件在凸模下行拉深至54 mm时,就在板坯与凸模接触的过渡区域发生开裂。当采用凹模区板坯温度-196 ℃、法兰区板坯温度-40 ℃的超低温成形时,拉深高度达到110 mm时,试件仍然完好,如图6(b)所示。超低温成形深度相对常温成形增加了104%,说明超低温成形能够显著提高成形极限。

在薄壁曲面件超低温成形过程中,当压边力较小时,会发生起皱缺陷;当压边力过大时,又会造成开裂。图7是压边力为10 t条件下的超低温成形试件。压边力增大,导致板坯流料阻力增大,虽然能够有效地避免起皱趋势,但是球底试件拉深至106 mm时,在接近凹模圆角的悬空区发生开裂。也就是说,超低温成形需要合理地匹配超低温温度场和压边条件。



(a) 常温成形 (b) 超低温成形
图6 不同温度条件下成形半球试件

Fig. 6 Hemispherical specimens at different temperatures



图7 10 t压边力下的超低温成形试件

Fig. 7 Cryogenic forming specimen at a blank holder force of 10 t

3.2 壁厚分布规律

图8为超低温成形试件壁厚分布规律,其中壁厚(t)通过PZX-7超声波测厚仪测量。由图可明显看出,凹模区壁厚从点到凹模圆角先后经历了两个减薄区,发生在偏离中心截面30°和75°范围内。并且,垂直轧制方向壁厚减薄程度小于沿轧制方向壁厚减薄程度。其中,最小壁厚为0.88 mm,出现在临近凹模圆角区域。总体来看,凹模区域壁厚减薄程度相对均匀,最大减薄率仅为10.3%,各区壁厚偏差率小于5%。这是由于,超低温条件下应变硬化能力显著提高,可以避免变形始终集中在几何弱化区域。局部变形增大,会引起材料自身变形抗力增大而不再

发生后继屈服,使变形扩展其他区域,表现出均匀变形。也就是说,超低温条件下不仅能显著提高成形极限,壁厚分布还更加均匀,有利于实现深腔曲面件均匀成形。

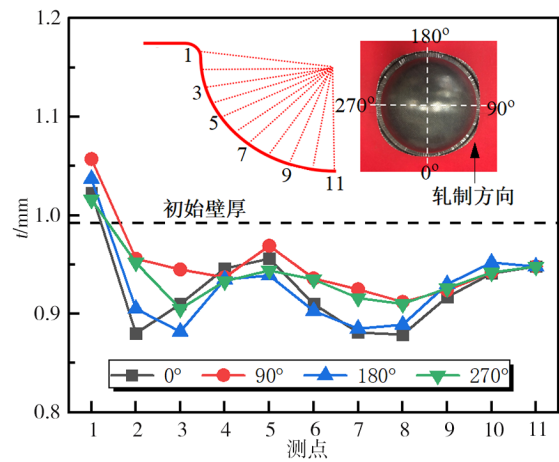


图8 超低温成形试件壁厚分布规律

Fig. 8 Thickness distributions of cryogenic forming specimen

3.3 回弹规律

图9为超低温成形试件回弹规律,其中:回弹程度由成形试件型面与模具型面尺寸偏差反映,正偏差相当于试件型面向外扩张、负偏差相当于试件型面向内收缩,三维型面通过EinScan Pro 2X 3D扫描仪测量。由图可看出,试件型面尺寸偏差沿环向比较均匀,由底部至四周沿径向呈现先向内收缩再向外扩张的分布规律。偏离中心截面45°区域尺寸偏差最小;在试件底部区域,最大向内收缩了0.93 mm;在试件开口区域,最大向外扩张了0.98 mm。为更直观地反映各区域尺寸偏差,图10给出了与板坯轧制方向呈0°、45°和90°的截面轮廓。在45°方向截面轮廓尺寸偏差相对较小。总体来说,超低温成形回弹规律主要受材料热胀冷缩和变形弹复两方面的影响。超低温成形模具型面应根据回弹规律进行尺寸补偿设计。

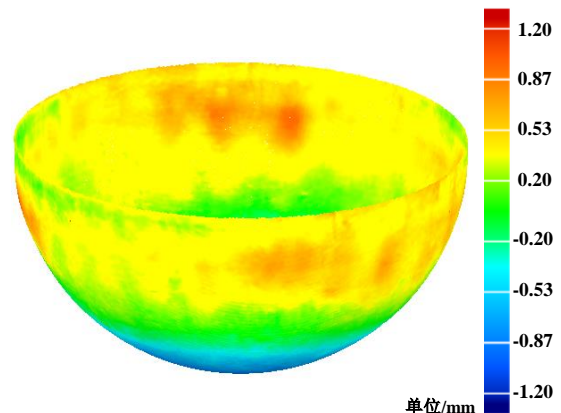


图9 超低温成形试件型面与模具型面尺寸偏差

Fig. 9 Dimensional deviation between die surface and specimen surface of cryogenic forming specimen

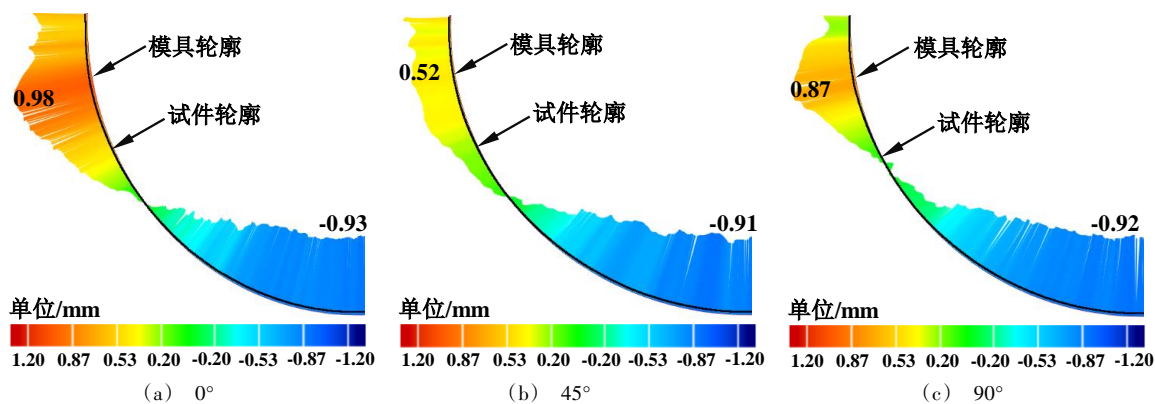


图10 超低温成形试件典型截面尺寸偏差

Fig. 10 Dimensional deviation of typical section of cryogenic forming specimen

4 结论

研究了2195铝锂合金板材超低温双增效应,确定了双增效应的温度区间和热处理状态,超低温条件下的伸长率提高至45%、硬化指数达到0.44;基于发现的双增效应,提出铝锂合金曲面件超低温成形新工艺方法,显著提高成形极限;首次试制出直径200 mm、壁厚1 mm的2195铝锂球底曲面件,深径比达到0.55、最大减薄率10.3%、与模具型面的最大偏差0.98 mm。超低温成形不仅能提高成形极限,还能提高均匀变形程度,可为铝锂合金薄壁曲面件整体成形提供新途径。

参考文献

[1] DURSUN T, SOUTIS C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys [J]. *Materials & Design*, 2014, 56: 862-871.

[2] 冯朝辉, 于娟, 郝敏, 等. 铝锂合金研究进展及发展趋势[J]. *航空材料学报*, 2020, 40(1): 1-11.

FENG Zhaohui, YU Juan, HAO Min, et al. Research progress and development trend of Al-Li alloy [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2020, 40(1): 1-11.

[3] 吴秀亮, 刘铭, 臧金鑫, 等. 铝锂合金研究进展和航空航天应用[J]. *材料导报*, 2016, 30: 571-578.

WU Xiuliang, LIU Ming, ZANG Jinxin, et al. Research progress and aerospace application of aluminum lithium alloys [J]. *Material Reports*, 2016, 30: 571-578.

[4] 李劲风, 郑子樵, 陈永来, 等. 铝锂合金及其在航天工业上的应用[J]. *宇航材料工艺*, 2012, 42(1): 13-19.

LI Jinfeng, ZENG Ziqiao, CHEN Yonglai, et al. Al-Li alloys and their application in aerospace industry [J]. *Aerospace*

Material & Technology, 2012, 42(1): 13-19.

[5] YUAN S J, FAN X B. Developments and perspectives on the precision forming processes for ultra-large size integrated components [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2019, 1(2): 1-18.

[6] YUAN S J. Fundamentals and processes of fluid pressure forming technology for complex thin-walled components [J]. *Engineering*, 2021, 7(3): 358-366.

[7] ZHENG K L, POLITIS D J, WANG L L, et al. A review on forming techniques for manufacturing lightweight complexshaped aluminium panel components [J]. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2018, 1(2): 55-80.

[8] FAKIR O, WANG L L, BALINT D, et al. Numerical study of the solution heat treatment, forming, and in-die quenching (HFQ) process on AA5754 [J]. *Int. J. Mach. Tool. Manu.*, 2014, 87: 39-48.

[9] ZHANG Z C, XU Y C, YUAN S J. Reverse deep drawability of 5A06 aluminum alloy plate at elevated temperatures [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(6): 1538-1545.

[10] 陈鼎, 陈振华. 铝合金在低温下的力学性能[J]. *宇航材料工艺*, 2000, 30(4): 1-7.

CHEN D, CHEN Z H. Mechanical properties of pure aluminum alloys at cryogenic temperatures [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2000, 30(4): 1-7.

[11] CHENG W J, LIU W, FAN X B, et al. Cooperative enhancements in ductility and strain hardening of a solution-treated Al-Cu-Mn alloy at cryogenic temperatures [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 790: 139707.