# 浅述2×××铝合金锻造工艺及其对材料性能的影响

王钰山[1,2]，修伟[1,2]，张星星[1,2]，李沛卓[3]，李豹[1,2,3]

1.国家有色金属复合材料工程技术研究中心　北京　100088
2.有研金属复合材料（北京）股份公司　北京　100088
3.北京有色金属研究总院　北京　100088

**摘要**：简述了2×××系铝合金分类、各种添加元素的作用，以及锻造成形时的变形温度、变形速率、变形程度等工艺参数的选择依据，重点叙述了2×××系铝合金大型锻件原材料选用、锻造和热处理工艺等对微观组织与力学性能的影响，指出了2×××系铝合金的大型复杂锻件成形面临的问题，并提出了具体的建议。

**关键词**：2×××系铝合金；锻造工艺；大型锻件；微观组织；力学性能

# A brief introduction to the forging process of 2×××aluminum alloy and its influence on material properties

WANG Yushan[1,2], XIU Wei[1,2], ZHANG Xingxing[1,2], LI Peizhuo[3], LI Bao[1,2,3]

1. National Engineering & Technology Research Center for Non-Ferrous Metal Composites, Beijing 100088, China
2. GRINM Metal Composites Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100088, China
3. General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China

**Abstract:** Briefly describes the classification of 2××× series aluminum alloys, the roles of various additive elements, and the selection criteria for process parameters such as deformation temperature, deformation rate, and deformation degree during forging. The paper mainly discusses the influence of raw material selection, forging process and heat treatment process of large forgings of 2××× series aluminum alloy on microstructure and mechanical properties. The problems faced in the forming of large and complex forgings of 2××× series aluminum alloys are pointed out, and specific suggestions are put forward.

**Keywords:** 2××× series aluminum alloy; forging process; large forgings; microstructure; mechanical property

## 1　序言

2×××系铝合金是以铜为主要合金化元素的铝合金，其是在Al-Cu合金中添加Mg、Fe、Si等元素发展出了多种合金类型，主要包括Al-Cu-Mg合金（2A10、2024等）、Al-Cu-Mg-Fe-Ni合金（2A70、2618等）和Al-Cu-Mg-Si合金（2218、2A14等）

通信作者：李豹，博士研究生，正高级工程师，主要从事高强韧铝合金材料、铝合金控制凝固与半连续铸造技术、塑性加工技术基础研究和工程应用相关工作，E-mail：libao@grinm.com。

等。相比于Al-Cu合金，该系合金出现时效强化现象，合金强度大幅度提高，同时具有良好的耐热性及易加工等特点，广泛应用于航空航天、船舶、高速列车等领域[1，2]。

近几十年来，我国铝加工行业无论是装备能力还是加工能力，都取得了长足进步。但是，应用于复杂受力环境的高强、高韧铝合金复杂锻件成形技术还存在着一定的差距[3]。特别是具有型腔深、截面突变及高筋薄壁等特征的复杂锻件，成形难度较大。本文浅述2×××系铝合金锻造工艺及大型锻件性能的影响因素，指出2×××系铝合金的大型复杂锻件成形面临的问题，并提出了具体建议。

## 2　2×××系铝合金锻造工艺性能特点

2×××系铝合金是重要的航空用铝合金系列之一。20世纪初，Al-Cu-Mn系铸造合金已经开始用于飞机发动机曲轴箱[4]，随着铝合金时效硬化现象的发现和深入研究，2×××系铝合金逐步成为飞机的主要结构材料[4-8]。随着飞机综合性能要求的不断提升，推动了航空材料及技术的发展。至今，2×××系铝合金已发展到20余种牌号，常用的锻铝有2A02、2A12、2A14和2618等。

### 2.1　2×××系锻造铝合金的化学成分及应用

Cu元素是2×××系铝合金中最主要的强化元素，随着Cu含量的增加，$Al_2Cu$强化相增加，2×××系合金热处理后的强度会迅速增加。Mg元素有一定的强化效果，但Mg含量必须与Cu含量保持适当的比例，主要形成$Al_2CuMg$强化相，热处理后可以获得最大的时效强化效果。Mn元素可以去除合金中的Fe、Si等有害杂质元素，同时也提高其耐蚀性。Fe、Si是铝合金中的杂质元素，可以形成$Al_7Cu_2Fe$、$Mg_2Si$和$(MnFe)_3SiAl_{12}$等脆性相，降低Fe、Si含量可以改善铝合金的塑性和韧性[2]。常用2×××系锻造铝合金的主要化学成分见表1。

不同的合金成分决定不同的用途，高强度铝合金主要作为结构件使用，耐热铝合金主要应用在功能结构件上。2×××系锻造铝合金的特性及用途见表2。

**表1　2×××系锻造铝合金的主要化学成分**（质量分数）　（%）

| 元素 | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Ni | Zn | Ti | 其他 | | Al |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | 单个 | 合计 | |
| 2A02 | 0.3 | 0.3 | 2.6～3.2 | 0.45～0.7 | 2～2.4 | — | 0.1 | 0.15 | 0.05 | 0.1 | 余量 |
| 2A11 | 0.7 | 0.7 | 3.8～4.8 | 0.4～0.8 | 0.4～0.8 | 0.1 | 0.3 | 0.15 | 0.05 | 0.1 | 余量 |
| 2A12 | 0.5 | 0.5 | 3.8～4.9 | 0.3～0.9 | 1.2～1.8 | 0.1 | 0.3 | 0.15 | 0.05 | 0.1 | 余量 |
| 2A14 | 0.6～1.2 | 0.7 | 3.9～.8 | 0.4～1.0 | 0.4~0.8 | 0.1 | 0.3 | 0.15 | 0.05 | 0.1 | 余量 |
| 2A16 | 0.3 | 0.3 | 6.0～7.0 | 0.4～0.8 | 0.05 | — | 0.1 | 0.1～0.2 | 0.05 | 0.1 | 余量 |
| 2A50 | 0.7～1.2 | 0.7 | 1.8～2.6 | 0.4～0.8 | 0.4～0.8 | 0.1 | 0.3 | 0.15 | 0.05 | 0.1 | 余量 |
| 2A70 | 0.35 | 0.9～1.5 | 1.9～2.5 | 0.2 | 1.4～1.8 | 0.9～1.5 | 0.3 | 0.02～0.1 | 0.05 | 0.1 | 余量 |
| 2A80 | 0.5～1.2 | 1～1.6 | 1.9～2.5 | 0.2 | 1.4～1.8 | 0.9～1.5 | 0.3 | 0.15 | 0.05 | 0.1 | 余量 |
| 2219 | 0.2 | 0.3 | 5.8～6.8 | 0.2～0.4 | 0.02 | — | 0.1 | 0.02～0.1 | 0.05 | 0.1 | 余量 |
| 2618 | 0.1～0.25 | 0.9～1.3 | 1.9～2.7 | — | 1.3～1.8 | 0.9～1.2 | 0.1 | 0.04～0.1 | 0.05 | 0.15 | 余量 |

**表2　2×××系锻造铝合金的特性及用途**[9，10]

| 类别 | 合金及状态 | 强度 | 耐蚀性 | 切削性 | 焊接性 | 特性 | 主要用途 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 高强度铝合金 | 2024-T6 | B | C | A | D | 锻造性能和塑性好，耐蚀性较差，是典型的硬铝合金 | 飞机部件；铁道车辆、汽车部件；机器结构件 |
| | 2124-T6 | B | C | A | D | | |
| | 2424-T6 | B | C | A | D | | |
| 耐热铝合金 | 2219-T6 | C | B | A | A | 高温下保持优良的强度及耐蠕变性，焊接性能良好 | 飞机、火箭部件及车辆材料 |
| | 2618-T6 | B | C | A | C | 高温强度高 | 活塞、增压机风扇、橡胶模具、一般耐热部件 |

注：A代表优；B代表良；C代表一般；D代表差。

### 2.2 2×××系铝合金锻造主要工艺参数

铝合金锻造主要工艺参数有锻造变形温度、变形速率和变形程度等[11]。工艺参数的选择，对合金的可锻性及锻件组织性能有重要的影响。

（1）铝合金的锻造温度范围　铝合金的锻造成形及性能主要与合金组织及相组成有关。为了降低锻造时的变形抗力，提高合金的工艺塑性，需根据合金相图选择合适的锻造温度[11, 12]。

铝合金的锻造温度主要涉及始锻温度和终锻温度，锻造温度首先要保证合金具有较高的塑性，还要保证锻件具有良好的力学性能和组织。在确定始锻温度时应考虑锻造过程中的温升，防止过烧；终锻温度不能过低，考虑加工硬化和再结晶软化对锻件力学性能与晶粒长大所产生的综合影响[12]。常用2×××系铝合金锻造温度见表3。

表3　2×××系铝合金锻造温度　（℃）

| 合金 | 锻造温度 |
|---|---|
| 2A02 | 350～450 |
| 2A11 | 380～480 |
| 2A12 | 380～460 |
| 2A14 | 350～470 |
| 2A16 | 400～460 |
| 2A50 | 380～480 |
| 2A60 | 380～480 |
| 2A70 | 380～480 |
| 2A80 | 380～480 |

（2）变形速率　研究表明，锻造变形速率对铝合金的塑性和变形抗力有一定影响[11]。在相同的应变速率下，2×××系铝合金的流动应力随着变形温度的升高而逐渐降低；在相同的变形温度条件下，随着变形速率的增加，流变应力不断增加，宏观变形抗力也随之增加。

随着应变速率的增加，大多数铝合金的工艺塑性在锻造温度范围内不会显着降低[11]。但是，一些合金化程度高的铝合金具有缓慢的再结晶速率，在动态变形过程中加工硬化显著增大[12]。

（3）变形程度

1）每一火次/工作行程的变形程度。单一火次变形程度的确定主要考虑合金在锻造过程中不开裂和保证锻件具有细小均匀的晶粒组织。变形温度、应变速率与合金工艺塑性决定锻造过程是否开裂，变形程度对锻造过程的变形温度、应变速率有重要影响。确定单火次变形程度时，应根据合金塑性图与选择的变形温度、应变速率相当的塑性曲线[12]。在实际生产中，还需要考虑人员、设备和物料转移等情况的影响，特别是变形温度。另外，为了保证锻件具有良好的组织性能，单火次变形程度还应大于或小于相应温度下的临界变形程度。

2）总变形程度。在锻造过程中，铝合金铸棒的总变形程度不仅决定锻件的力学性能，而且决定了锻件的横向和纵向力学性能差异大小[11, 12]。

## 3　2×××系铝合金大型锻件性能的影响因素

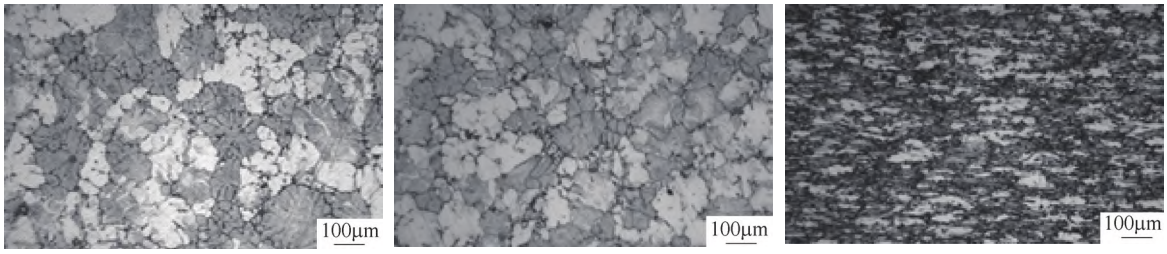
大型铝合金锻件有“成形”与“成性”的双重要求，“成形”取决于设备能力、模具制造技术等，“成性”则与原材料选用、锻造工艺及热处理工艺等有关。

### 3.1 原材料选用

目前，铝合金锻件原材料大部分采用挤压棒材和铸棒。考虑到锻件的力学性能及其横纵向力学性能均匀性，锻件选材还是优先考虑挤压棒材。但是，国内大规格挤压棒材受生产设备载荷限制，挤压比较小时变形不充分，棒材质量往往不能保证，尤其是大型锻件产品，只能采用铸棒原材料，经过多道次镦拔变形后进行锻造成形。

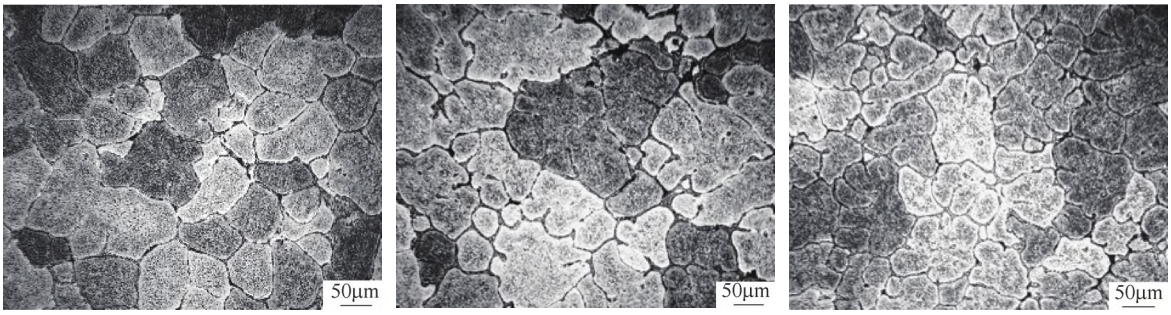
图1所示为常规生产的$\phi$300mm规格2A14铝合金挤压棒的微观组织。从图1可看出，棒材心部为等轴晶，晶粒尺寸在120～164μm，且存在蔷薇状组织，晶界上可见黑色的第二相颗粒；1/2半径处也是等轴晶，其晶粒尺寸小于心部晶粒尺寸100～120μm，晶界处存在黑色的第二相颗粒相比于心部的第二相颗粒细小、弥散；棒材边缘为变形拉长晶粒，还有一定数量的再结晶晶粒。

图2所示为采用电磁搅拌技术制备的$\phi$300mm规格2A14细晶均质铸棒金相组织。从图2可看出，2A14铝合金铸棒心部为等轴晶，平均晶粒尺寸在144μm；$R$/2处也是等轴晶，其平均晶粒尺寸与心部差异不大，但出现了较短的枝晶；边缘晶粒尺寸




a）心部　　b）*R*/2处　　c）边缘

图1　2A14铝挤压棒不同位置的金相组织（100×）




a）心部　　b）*R*/2处　　c）边缘

图2　2A14铝铸棒不同位置的金相组织（200×）

与心部、*R*/2处接近，但枝晶数量相比*R*/2处有所增加。

2A14铝合金铸棒经过镦拔变形，再使用压力机将$\phi$300mm规格2A14铝挤压棒和改锻后铸棒模锻成形为某大型复杂锻件，如图3所示。然后，对2个锻件采用相同的工艺制度进行热处理，并按图3所示的位置取样进行室温力学性能对比测试，结果如图4所示。

从图4可看出，2A14铝合金铸棒改锻制备的锻件各个取样位置力学性能均性较好。2A14挤压棒制备的锻件断后伸长率总体低于2A14铝铸棒，其中5$^{\#}$取样位置的抗拉强度、屈服强度、断后伸长率测试结果相比差距较大，其他1$^{\#}$、2$^{\#}$、3$^{\#}$、4$^{\#}$取样位置，两种材料所制锻件的抗拉强度、屈服强度差距不大。

图5所示为锻件5$^{\#}$位置微观组织。从图5可知，挤压棒制备锻件5$^{\#}$位置有残留的铸态组织，铝铸棒制备锻件5$^{\#}$位置则是变形拉长的晶粒。由此可知，2A14挤压棒心部铸态组织并不能够通过后续的等温模锻消除，因此残留铸态组织会使锻件的性能下

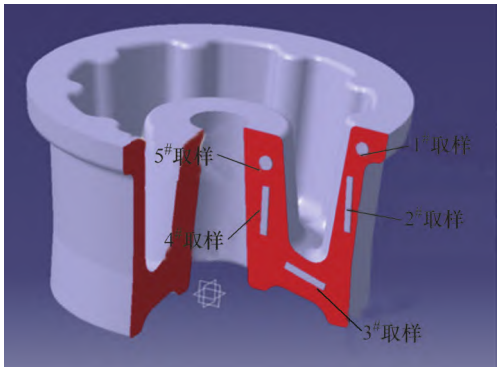
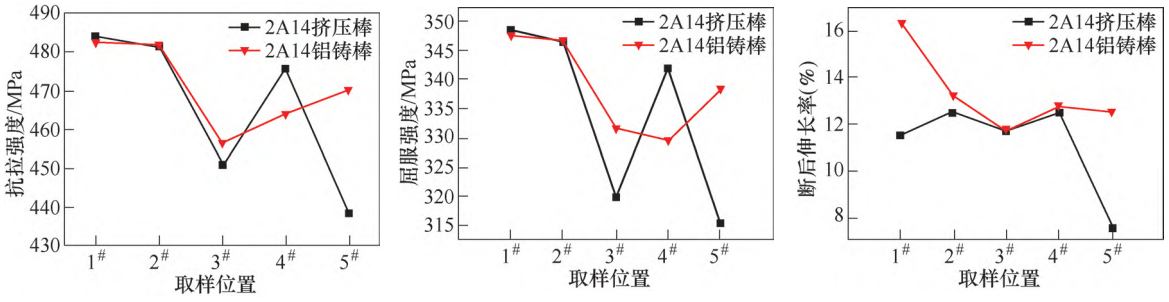
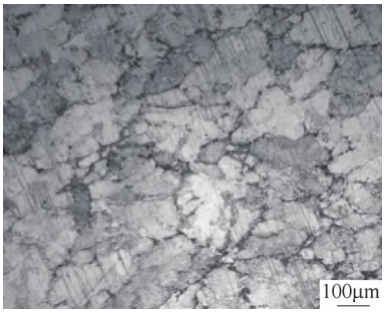



图3　2A14某大型复杂锻件模型及取样位置

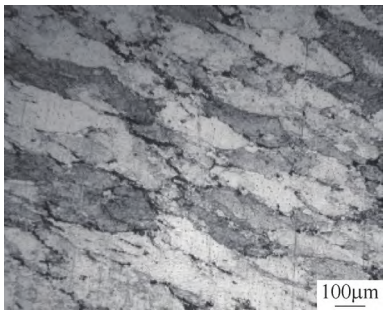



a）抗拉强度　　b）屈服强度　　c）断后伸长率

图4　2A14某大型复杂锻件室温力学性能结果




a）挤压棒制备锻件




b）铝铸棒改锻制备锻件

**图5　锻件5#位置组织照片**

降，尤其是冲击韧度和疲劳性能等。

大型锻件原材料的选用关系到锻件最终的力学性能。近些年，铝合金棒材与铸锭时常出现气孔、夹渣，以及缩尾切除不彻底、粗晶环等质量问题，导致最终的锻件产品质量不合格。这些问题是由于原材料的选用标准不合理，存在选用老旧标准的情况；另外，生产源头控制不严格。在这种情况下，原材料的选用应该制定明确的技术要求，应包括对工艺过程的控制要求、产品质量的要求，以及明确的检验要求等。

### 3.2　锻造工艺

等温锻造技术是制造大型难变形铝合金锻件的有效手段。等温锻造变形死区较小，甚至可以避免变形死区，获得组织均匀的锻件[13]。从质量控制的角度来看，等温锻造的过程大幅降低了人员操作的影响[14]。大型铝合金锻件现行成形工艺流程[15]为：棒材下料→镦粗→粗车→多火次等温模锻成形，如图6所示。其中，变形程度、变形温度、变形速率对2×××系铝合金大型锻件性能有较大的影响。

（1）变形程度　变形程度对大型复杂锻件的影响主要体现在其性能和内部组织结构上。随着坯料变形量的增加，锻件的强度和硬度也增加，塑性和抗冲击腐蚀性能降低[16]。相关研究表明[11]，

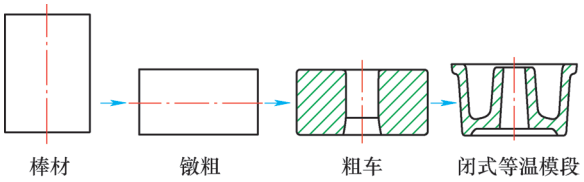



**图6　某2×××系铝合金大型锻件成形工艺流程**

铝合金的临界变形程度大都在12%～15%，为防止落入临界变形区，终锻温度下的变形程度均应＞12%～15%。变形程度并不是越大越好，若变形程度过大，则容易导致锻件开裂。2×××系铝合金（2A02、2A70、2A80、2A14等）每火次允许的变形程度见表4。

**表4　2×××系铝合金每火次允许的变形程度（%）**

| 合金 | 水压机（镦粗） | 挤压模锻 |
|---|---|---|
| | 变形程度 | |
| 2A50 | 80～85 | 90 |
| 2A02、2A70 2A80、2A11 | 70 | |
| 2A12、2A14 | 70 | 85 |

（2）变形温度　2×××系铝合金在变形量相同的情况下，低温变形的合金热处理后更容易获得细小的、具有大角度晶界的等轴再结晶晶粒，其室温拉伸性能也更好[4]。但是，大型铝合金锻件等温锻造过程变形温度的确定并不是在可锻温度范围内选择最低的温度，还要考虑到设备所能达到的载荷。因此，2×××系铝合金大型锻件变形温度一般接近可锻温度的上限。

（3）变形速率　2A14铝合金是2×××系铝合金中典型的锻铝合金，属于Al-Cu-Mg-Si系铝合金。相关研究表明[17]，2A14铝合金属于高层错能合金，在热塑性变形中动态回复剧烈，位错较难积累，不易发生“形核＋长大”机制的非连续动态再结晶（DDRX），只有在变形温度和速率较高的情况下，才可能出现部分非连续动态再结晶，2A14铝合金在热变形时主要发生连续动态再结晶（CDRX），动态再结晶晶粒在后续固溶时效处理过程中比较稳定，不易长大，因此在热变形过程中获得细小的动态再结晶晶粒，能够显著提高力学性能。对于挤压态的2A14铝合金在应变速率较高时，固溶处理后发生严重的静态再结晶，出现粗大晶粒，致使锻件力学性能偏低；而应变速率较低时，

在成形中达到相同应变量时所经历的变形时间更长，动态再结晶过程也进行得更充分，在固溶处理后再结晶晶粒未发生静态再结晶。但变形速率不能太慢，等温锻造时间过长，可能引起严重再结晶组织，出现异常长大的粗大晶粒，从而降低锻件的性能[13, 18]。

### 3.3 热处理工艺

2×××系铝合金属于Al-Cu系可热处理强化变形铝合金，即通过控制热处理工艺（温度-时间），可以调控合金中强化相的析出、分布和形貌等，从而改善合金性能。热处理工艺参数包括淬火加热温度和保温时间、淬火冷却速度、时效温度和时间。

目前，2×××系铝合金的淬火处理一般采用单级固溶制度，由于合金中存在低熔点非平衡共晶相，因此为防止过烧，淬火的加热温度一般要低于共晶温度[19]，如2A14铝合金的共晶转变温度为509℃，淬火加热温度在499～505℃。为了防止铝合金在固溶过程中晶粒异常长大，在保证强化相完全溶解的前提下，尽量采取快速加热和短期保温制度。固溶保温时间主要取决于铝合金的合金成分、原始组织及加热温度等。固溶温度越高，溶质原子溶解速率越大，所需保温时间就越短。大型铝合金锻件生产过程中不仅要考虑合金本身的特点，还需了解热处理炉的情况、具体锻件的尺寸、装炉量等，这些因素均会对固溶效果产生影响。另外，淬火冷却速度对于固溶效果至关重要，其效果应大于在冷却过程中过饱和固溶体不会分解的最小冷却速率。铝合金的淬火冷却介质通常是水，但是常规水淬容易导致锻件中产生大的残余应力，最终导致变形甚至报废。为了克服这一缺点，可以采用适当升高水温，这种方式对于大型铝合金锻件的淬火很适用。

铝合金在固溶和淬火处理之后，过饱和固溶体倾向于自发脱溶，析出第二相或是形成溶质原子偏聚区以及亚稳定过渡相[19]。合金在脱溶过程中，随着脱溶过程的进行，合金强度和硬度提高。2×××系铝合金典型的脱溶序列为：SSS（过饱和固溶体）→GP区→（$CuAl_2$）相[20]或SSS（过饱和固溶体）→GP区→（$Al_2CuMg$）相[21]。GP区与中间过渡相对合金的性能有显著影响，其析出数量决定了合金时效的效果。

在一定的时效温度下，硬度随着时效时间的延长而升高，在达到时效峰值后随即下降，发生过时效；对于相同的合金，时效温度越高，合金脱溶的速度越快，达到时效峰值的时间就越短，但增强效果降低[22]。

## 4 2×××系铝合金大型复杂锻件成形面临的问题及解决措施

随着装备需求和技术要求的提高，大型整体锻件的制备迫在眉睫，但是大型整体锻件对成形设备能力和制造技术提出了更高的要求。如何实现大型整体锻件的“成形和成性”，是大型整体铝合金锻件制造中的基本问题[22-25]。同时，要针对大型整体锻件进行仿真模拟、模具设计和锻造工艺优化，防止锻件中出现流线不畅、穿流和涡流等缺陷[13]。

大型复杂锻件通常具有型腔深、截面突变、高筋薄壁等特征。深的型腔成形时金属流动的自由面行程长，若坯料分配不合理，则易出现金属堆积的情况，进而发展为折叠缺陷。这类缺陷解决的有效手段是设计合理的坯料形状，目前大部分锻造厂家是依靠有经验的技术人员进行结构调整，具有盲目性且试错成本高；随着有限元在塑性成形中的应用，采用数值模拟技术设计坯料形状，以解决成形时出现的金属堆积问题。应用数值模拟技术设计坯料形状，不仅效率高，而且试错成本低，未来这将是等温锻造模具设计、制造，以及坯料形状设计的有效工具或手段。

截面突变易出现充型不满、折叠缺陷；高筋薄壁等结构处金属的流动阻力存在差异，在模锻充型阶段金属流动流向冲突，也易出现折叠缺陷。某2A14铝合金大型复杂锻件的成形缺陷如图7所示。

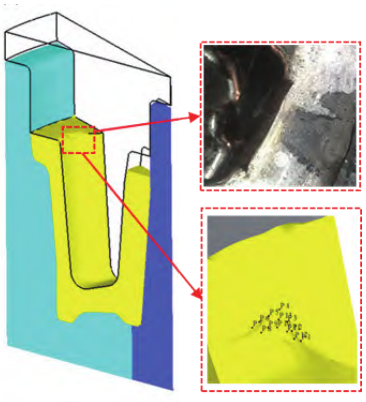


图7 某2A14铝合金大型复杂锻件的成形缺陷

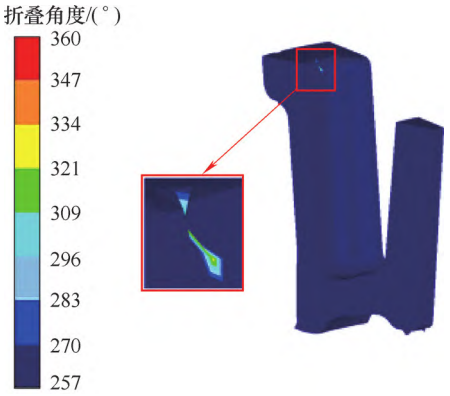
图7所示中的缺陷是模锻充型阶段出现的，这类缺陷可以通过增加成形火次（或降低压下量）来解决，具体解决方案如下。

1）机械加工去除缺陷部位多余金属。

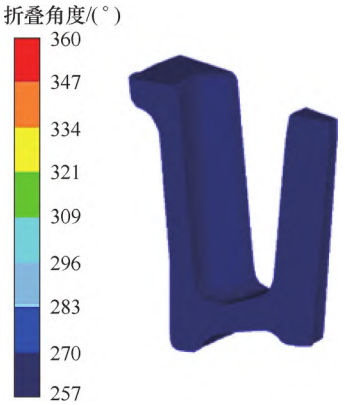
2）压下速度降低1/3。

3）减少单火次行程，充型阶段单火次行程由60mm降低至50mm。

图8所示为有限元模拟软件进行模拟优化前后折叠角对比。当折叠角＞270°时，金属流线可能出现汇流，即出现折叠[26]。从图8可看出，优化前锻件存在折叠角度＞270°的情况，折叠角最大区域达到了329°；优化后整个锻件没有折叠角度＞270°的区域。




a）优化前




b）优化后

**图8　模拟优化前后折叠角对比**

## 5　结束语

随着大型整体锻件需求的增加，锻件技术要求的持续提高，对2×××系铝合金锻造工艺技术的持续探索，未来2×××系铝合金锻造过程的开发将主要集中在以下方面。

1）针对材料的热加工特性，合理选择锻造过程中的工艺参数，特别是变形温度、变形速率和变形程度等。

2）持续研究有限元模拟仿真技术在锻造成形中的应用，不仅是模拟成形过程中温度和应力场的变化，显微组织的模拟与控制将成为一个关注点。

3）提升铝合金加工设备水平，开发特殊的加工方式，使合金产生三维的剧烈塑性变形来提高合金的综合性能。

**参考文献：**

[1] 徐崇义，李念奎. 2×××系铝合金强韧化的研究与发展[J]. 轻合金加工技术，2005，33（8）：13-17.

[2] 罗先甫，查小琴，夏申琳. 2×××系航空铝合金研究进展[J]. 轻合金加工技术，2018，46（9）：17-25.

[3] 刘兵，彭超群，王日初，等. 大飞机用铝合金的研究现状及展望[J]. 中国有色金属学，2010，20（9）：1705-1715.

[4] 刘东亮. 多向锻造2A14铝合金组织与力学性能研究[D]. 长沙：中南大学，2014.

[5] LIU J，KULAK M . A new paradigm in the design of aluminum alloys for aerospace applications[J]. Materials Science Forum，2000，127：331-337.

[6] ROGACKI J R. Materials for air and space[J]. Advanced Materials and Processes，2000，158（3）：63-65.

[7] BUCCI R J，WARREN C J，STARKE J. Need for new materials in aging aircraft structures[J]. Journal of Aircraft，2000，37（1）：122-129.

[8] FILATOV YA，YELAGIN VI，ZAKHAROV V. New Al-Mg-Sc alloys[J]. Materials Science and Engineering A，2000，280：97-101.

[9] 刘静安. 铝合金锻压生产现状及锻件应用前景[J]. 轻合金加工技术，2005，33（6）：1-4.

[10] 刘静安，盛春磊，王文琴. 铝合金锻压生产技术及锻件的应用开发[J]. 轻合金加工技术，2010，38（1）：13-17，57.

[11] 刘静安，王文志，罗立新. 铝合金可锻性及热力学参数确定原则分析[J]. 轻合金加工技术，2011，39（12）：37-43.

[12] 刘静安，刘煜，卡进良. 铝合金锻压过程中温度、变形速率、变形程度的变化与控制：“2018年中

国铝加工产业年度大会”论文集[C]. 北京：中国有色金属加工工业协会，2018.
[13] 叶升平. 2A14铝合金轮毂等温锻造研究[D]. 长沙：中南大学，2015.
[14] 刘鹏辉，郭鸿镇，王涛，等. 等温锻造温度对7050铝合金组织与性能的影响[J]. 热加工工艺，2009（1）：107-109.
[15] 于洋. 某飞机轮毂挤压成形及热处理工艺研究[D]. 太原：中北大学，2024.
[16] 张艳秋，徐福昌，单德彬. 变形程度对复杂铝合金锻件组织性能的影响[J]. 材料科学与工艺，2009，17（6）：806-809.
[17] 孙梦黎，李姚君，丁佐军，等. 2A14铝合金的动态再结晶模型及热变形组织演变[J]. 金属热处理，2018，43（4）：19-23.
[18] 刘文胜，郭伦文，马运柱，等. 2A14铝合金热变形的显微组织及流变行为[J]. 中国有色金属学报，2013（8）：2091-2097.
[19] 刘文胜，刘东亮，马运柱，等. 2XXX系铝合金的热处理工艺研究进展[J]. 轻合金加工技术， 2013（6）：12-20.
[20] 罗苏，吴锡坤. 铝型材加工实用技术手册[M]. 长沙：中南大学出版社，2006.
[21] 李慧中，张新明，陈明安，等. 热处理制度对2519铝合金晶间腐蚀性能的影响[J]. 材料热处理学报，2005， 26（1）：20-23.
[22] 邓文卫，易幼平，湛利华，等. 大型铝合金航空模锻件局部加载成形工艺研究[J]. 热加工工艺，2011，40（11）：29-31，34.
[23] 张李骊. 钛合金盘件等温成形工艺优化与过程控制[D]. 西安：西北工业大学，2004.
[24] 胡建军，许洪斌，金艳. 塑性成形数值仿真精度的提高途径[J]. 锻压技术，2009，34（2）：149-152.
[25] 戴亮，姚泽坤，梁新民，等. 不同截面形状结构件等温成形规律的物理模拟[J]. 锻压技术，2004，29（6）：23-26.
[26] 于秋华，刘淑梅，刘雅辉. 基于DEFORM3D的曲轴热锻工艺优化[J]. 热加工工艺，2015，44（11）：132-134，137.

（收稿日期：20241218）

（上接第145页）

定期做好管道排污及清洗工作，避免此类事故的再次发生。

**参考文献：**

[1] 石仲谋，陈建华，刘保平，等. 石油液化气钢瓶腐蚀穿孔失效分析[J]. 石油化工设备，1999（5）：19-21.
[2] 胡文涛. 等温变换炉换热管泄漏原因分析[J]. 氮肥与合成气，2022，50（9）：48-51.
[3] 吉楠，李长亮，宋文文，等. 某注气井3Cr钢油管腐蚀原因[J]. 机械工程材料，2022，46（12）：85-90，97
[4] 白龙. 锅炉氧腐蚀过程及其控制措施[J]. 全面腐蚀控制，2019，33（5）：87-91.
[5] 张仁珊，刘宇，任耀剑，等. 火电厂锅炉20G水冷壁管失效分析[J]. 热加工工艺，2024，53（2）：78-81.
[6] 张琴. 某输气管道内腐蚀原因分析与研究[J]. 石油和化工设备，2024，27（4）：215-217.
[7] 王艳飞. L360钢在$H_2S$-$CO_2$-Cl-体系中元素硫沉积下的点蚀机理[D]. 西安：西安石油大学，2021.
[8] 唐婷. P110钢在含S和$CO_2$环境中的腐蚀行为研究[D]. 西安：西安工业大学，2017.

（收稿日期：20241224）