铝合金锻造生产技术

中国锻压协会首席专家　赵一平

铝及铝合金是应用最广泛的一种有色金属，其产量仅次于钢铁。若按地壳中的蕴藏量而论，约占地壳质量的8.13%，是铁蕴藏量的一倍多，比其他有色金属蕴藏量的总和还要多。由于铝及铝合金性能优异，因此其已经广泛应用于机械、汽车、轨道交通、船舶、建筑、桥梁、化工、电力、电子、仪表、五金以及家庭生活用品等各个领域。

铝合金代替某些钢铁可大幅减轻机械产品的质量，增加结构的稳定性，因此在航空航天及国防工业中，铝及铝合金更是必不可少的材料。如铝合金在飞机上的使用量为15%～50%。

一、概述

近年来，汽车用铝合金锻件获得快速发展，加之全球气候变暖，能源紧张，能源价格不断攀升。而且，消费者要求乘车舒适，操控灵活，这都对汽车工业提出了严峻的挑战，加快了汽车工业轻量化的发展速度。

一般认为，由于常用铝合金的强度极限是钢的1/2，用铝合金锻件替代同一钢质锻件，确保其在同一强度水平上，铝合金锻件各部位断面面积需为原来的两倍，然而铝合金的密度只有钢的1/3，所以采用铝合金锻件，其质量可减少1/3。

1. 汽车轻量化的目的

（1）降低燃料消耗　一辆轿车质量减轻10%，油耗可降低8%～10%。燃料消耗减少，排放CO_2气体等有害气体也减少了。一辆汽车每使用1kg铝，可取代1.5kg钢材，在使用周期内可减少40kg CO_2。近年来，能源紧张，气候转暖，人们进一步认识到资源的有限性及燃料节约的重要性，必须谋求降低燃料消耗的途径，因此汽车轻量化具有重要意义。

（2）提高驾驶性能　减轻弹簧下面零部件的质量，可提高车架的固有振动频率，改善乘车的舒适感和驾车的安全性。悬挂件采用铝合金可以获得更佳的安全性和操纵性。

2. 欧美日汽车广泛采用铝合金锻件

（1）铝合金锻件在国际上是一种发展趋势　因为汽车轻量化具有重要意义，所以欧美汽车巨头都纷纷投入大量的人力、财力研究，采用铝合金代替钢材制作部分零件，降低汽车质量。2009年，日本铝合金锻件产量为3万多t，占整个模锻件的2.7%，本田汽车公司2004年10月发表的战略报告中指出，每辆轿车将使用200kg铝合金零件（约占轿车总重量20%），其中40kg是铝锻件。但我国每辆轿车铝锻件用量仅有5kg。

铝合金锻件在国际上是一种发展趋势，大多数锻件用于车桥、底盘构件，如挤压轮毂、传动轴及悬挂件等铝合金锻件（如图1、图2所示）。并开始用于发动机零件，如连杆、活塞等铝合金锻件。据统计，铝锻件在世界锻件总量中由1985年的0.5%上升到2002年15%。随着节能环保的发展，今后铝合金锻件必将有很大发展。

随着汽车工业对安全环保和节能要求的提升，以及汽车轻量化要求的不断提高，促进了有色金属锻件，特别是铝合金锻件的快速发展。

（2）铝合金锻件质量减轻、效果好　近年来，

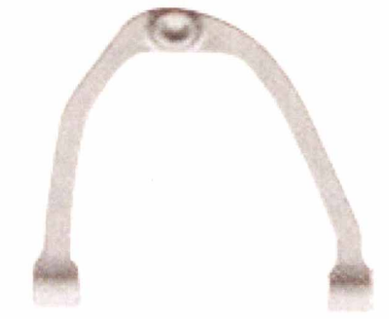


图1　铝控制臂锻件



图2 铝合金轮毂

汽车和摩托车使用铝合金锻件都在迅速发展，如汽车前轴，若用铝合金代替铸件，质量下降43%。使用锻铝活塞，发动机功率增加10%。悬挂零件大多数为铸铁件，采用铝合金锻件代替铸铁件可减重35%～40%，相对铝铸件减重25%，因此减轻汽车质量，铝合金锻件具有很大优势。铝合金轮毂，重量轻，与铸造铝轮毂相比，重量可减轻25%～30%，既节油又减少污染，而且铝合金轮毂锻件散热性好，可降低对轮胎的损害，一辆重型载货汽车一年可节省轮胎费用5000美元，还可延长刹车系统的使用寿命。

二．铝合金的种类

1. 铝和铝合金

纯铝具有高塑性、高热导率、高电导率、抗蚀性和低密度等优点，易于加工成形和切削。纯铝密度为2.71g/cm^3，约为钢的1/3，是轻量化的理想材料。纯铝的主要缺点是强度低，只有80～100MPa。为了提高铝的强度等力学性能，在铝中加入Mn、Mg、Cu、Si、Fe、Ni、Zn等合金元素，组成了不同用途的铝合金。铝合金根据其成分和生产工艺特点，可以分为铸造铝合金和变形铝合金两大类。

变形铝合金和铸造铝合金概略区分见图3。在共晶温度点*D*的左边，相应成分的铝合金都属于变形铝合金。其特点是合金元素含量少、具有较高的塑性，适于压力加工。*D*点右边都是铸造铝合金，由于铸造铝合金中含有较多的共晶体，塑性低，不适于压力加工。

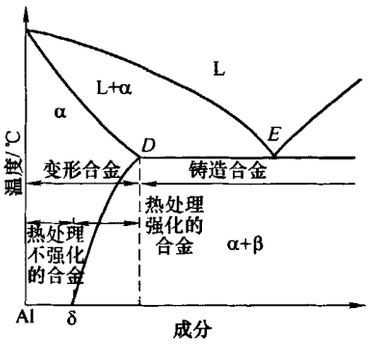


图3 铝合金分类

2. 变形铝合金的分类

大多数变形铝合金都有较好的可锻性，可用来生产各种形状和类别的锻件。变形铝合金又可根据不同 工艺方法分类。

（1）按照热处理分类 变形铝合金按其热处理强化的能力可以分为两组：热处理不能强化的铝合金和热处理可以强化的铝合金。

（2）按照合金化系统分类 变形铝合金按合金化元素可分为纯铝、铝锰合金系、铝镁合金系、铝铜锰合金系等。

（3）按照使用性能分类 变形铝合金按其使用和工艺性能又可分为防锈铝、硬铝、超硬铝和锻铝四类。

防锈铝主要包括Al-Mn和Al-Mg两个系的合金，这类铝合金属于不能热处理时效强化的铝合金，锻造退火是单相固溶体，故抗腐蚀性能高，塑性好。且承受压力加工的能力很强，可施以冷压力加工使之产生加工硬化，其焊接性也很好，但切削性较差（因太软），其抗腐蚀性能好，并有良好的低温性能，通常被用来制作抗腐蚀及受力不大的零部件，如油管、油箱和铆钉等。

硬铝基本上是Al-Cu-Mg系合金。各种硬铝都可以进行时效强化，其特点是具有强烈的时效硬化能力，热处理后强度最高可达500MPa，耐热性也较好，可用于制造各种承力构件。铝合金中铜、镁的含量越高，时效强化效果越显著，强度就越高，但塑性和抗蚀性则下降。根据合金的合金化程度、力学性能和工艺性能，硬铝可分为铆接硬铝（2A01，2A10）、中强硬铝（2A11）、高强硬铝（2A06，2A12）和耐热硬铝（2A02）。目前，硬铝是航空工业中应用最广泛的一类变形铝合金，

时效硬化强，被用来制作飞行器中的各种承力构件等。但硬铝的抗蚀性差，特别在海水中尤甚，另外焊接性能也较差。

超硬铝是Al-Cu-Mg-Zn系的合金，如7A04。淬火时效处理后的室温强度可超过600～700MPa，是强度最高的一种变形铝合金，此外断裂韧性也优于硬铝，并具有良好的热加工能力。这种合金的缺点是抗疲劳性能差，对应力集中敏感，有明显的应力腐蚀倾向，耐热性能也低于硬铝。

锻铝基本上是Al-Cu-Mg-Si系合金和Al-Cu-Mg-Fe-Ni系合金。在这类铝合金中合金元素的种类虽多，但每种元素的含量都较少，因而具有良好的热塑性，可提高铝合金的使用温度，并具有良好的焊接、加工、抗腐蚀和抗疲劳等性能，主要用于生产各种锻件，适宜制作航空用特别是形状复杂的大型锻件。常用的锻造铝合金有6A02、2A50和2A14等。其供应状态一般是淬火＋人工时效。

3. 常用变形铝合金的化学成分

常用变形铝合金的化学成分见表1。

表1 常用变形铝合金的化学成分（质量分数） (%)

合金牌号	Zn	Cu	Mg	Mn	Ni	Fe	Si	杂质
5A02	0.25	0.1	2.0～2.8	0.15～0.4	—	0.40	0.40	≤0.8
3A21	0.10	0.20	0.5	1.0～1.6	—	0.70	0.60	≤1.75
5A03	0.20	0.10	3.2～3.8	0.3～0.6	—	0.5	0.5～0.8	≤0.85
5A06	0.20	0.10	5.8～6.8	0.5～0.8	—	0.40	0.40	≤0.15
2A02	0.10	2.6～3.2	2.0～2.4	0.45～0.7	—	0.3	0.3	≤0.8
2A11	0.30	3.8～4.8	0.4～0.8	0.4～0.8	—	0.7	0.7	≤1.8
6A02	0.20	0.2～0.6	0.45～0.9	0.15～0.35	—	0.5	0.5～1.2	≤0.8
2A70	0.30	1.9～2.5	1.4～1.8	0.2	0.9～1.5	0.9～1.5	<0.35	≤0.95
2A50	0.30	1.8～2.6	0.4～0.8	0.4～0.8	0.10	0.7	0.7～1.2	≤1.1
2A80	—	1.9～2.5	1.4～1.8	—	1.0～1.5	1.1～1.6	0.5～1.2	≤0.6
2A14	0.30	3.9～4.8	0.4～0.8	0.4～1.0	0.10	0.7	0.6～1.2	≤1.2
6061	—	0.15～0.4	0.8～1.2	0.15	Cr 0.04～0.35	0.7	0.4～0.8	—
7A04	5～7	1.4～2.0	5.8～6.8	0.5～0.8	0.1～0.25	0.50	0.50	≤1.1

注：余量为Al。执行标准为GB/T3190－2008。

由表1可见，变形铝合金含有很多合金元素，这会引起铝合金工艺塑性和抗腐蚀性严重下降，甚至使压力加工难于进行。所以变形铝合金中的合金元素要严格控制。

三、变形铝合金的可锻性分析

大多数变形铝合金都有较好的可锻性，但由于各种铝合金中的合金元素和含量不同，其变形抗力和摩擦阻力相差很大，所以可锻性也相差很大。

1. 各种铝合金流动应力分析

（1）各种铝合金的流动应力相差较大 各种铝合金的流动应力随成分不同而改变，铝合金流动应力的最高值约为最低值的两倍。铝合金高温流动应力与碳钢比较，有3种情况：一是比碳钢低，少量铝合金流动应力较碳钢低，一些低强度铝及铝合金，如1100和6A02，其流动应力较碳钢为低；二是与碳钢相当，如2219，其流动应力和碳钢非常相当；三是比碳钢高，高强度铝合金，尤其是Al-Zn系合金，如7075，7049等，其流动应力显著高于碳钢。

（2）多数常用铝合金高温流动应力比钢大 比较表2、表3可知，多数常用铝合金高温流动应力比碳钢和合金钢大，而且随着温度的下降，铝合金的

表2 几种常用变形铝合金在不同温度下的强度极限

合金牌号	温度/℃						
	20	300	350	370	400	450	500
	强度极限/MPa						
5A02	230	120	120	105	90	60	20
3A21	170	86	78	55	50	43	35
2A02	440	230	130	100	75	50	20
2A12	460	150	135	110	85	50	40
2A50	370	160	90	75	60	45	20
2A70	360	135	75	65	45	28	20
6A80	380	90	60	50	37	28	16
2A14	460	140	130	110	90	75	30
7A04	560	100	75	65	55	35	—

表3 部分常用钢材在不同温度下的强度极限

钢号	温度/℃					
	20	800	900	1000	1100	1200
	强度极限/MPa					
20	470	90	77	48	31	20
45	600	110	83	51	31	21
40Cr	1000	149	93	60	44	27
1Cr18Ni9Ti	554	185	91	55	38	18
Cr12MoV	737	203	101	56	29	8

变形抗力增大，但是温度对各种铝合金变形抗力的影响程度有所不同，有的增长快、有的增长缓慢。这种情况从图4中也可看出，然而变形抗力增长速度都比碳钢和低合金结构钢迅速。

2. 外摩擦因素大和粘附力强

铝合金与模具表面的摩擦因素是钢的3倍，流动速度只是钢的1/2，粘附力强。

3. 锻造变形时流动性（可锻性）差

铝合金流动性（可锻性）是指铝合金在外力作用下充填锻模型腔的能力。流动性主要取决于合金的变形抗力和外摩擦因素。变形抗力越小，外摩擦因素越少，流动性（可锻性）就越好。

4.各种铝合金可锻性相差大

由上分析可知，铝合金的可锻性（流动性）决定于其变形抗力和外摩擦因素，各种铝合金的可锻性相差很大。图4为10种铝合金在各自锻造温度范围内每吸收单位能量所产生的变形率，同时也考虑达到某种特定变形要求的难易程度和产生裂纹的倾向性。此10种铝合金在铝合金锻造生产中很具有代表性。

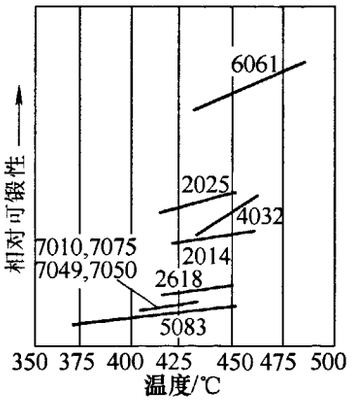


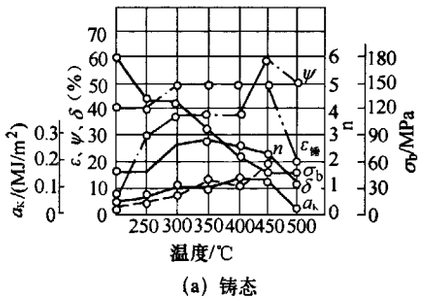
图4 几种铝合金可锻性比较

由图4中可看出，各种铝合金的可锻性随着温度的增加而增加，但温度对各种铝合金的影响程度有所不同。如含硅量高的4032合金的可锻性对温度变化很敏感，而高强度Al-Zn-Mg-Cu系7075等铝合金受温度影响在图中为最小。

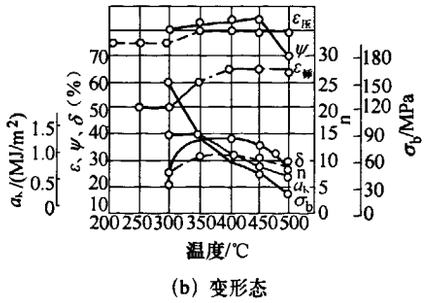
图4中各种铝合金的可锻性相差很大，其根本原因在于各种铝合金中合金元素的种类和含量不同，强化相的性质、数量及分布特点也大不相同，从而严重影响铝合金的塑性及对变形的抵抗能力。即铝合金的可锻性与合金系及合金化程度密切相关。图4中所示铝合金中属于我国常用的牌号有6061、6063、7075、7050、2014和2618等。

5.铝合金的工艺性能

常用铝合金锻造变形特点是变形抗力大和外摩擦因素大、粘附力强、流动性（可锻性）差，所以对于铝合金锻造，要在充分了解合金的锻造工艺性能后才能制定出合理的锻造工艺。每种铝合金的工艺性能可以从其三种工艺性能图获得，即工艺塑性图、应力－应变曲线图和再结晶图，而每种铝合金都有自己特有的工艺性能图。以2A50铝合金为例说明，其工艺塑性见图5，应力－应变见图6，再结晶见图7。



(a) 铸态



(b) 变形态

图5 2A50铝合金工艺塑性

由图5可知，该合金的最佳塑性温度，铸态在300～450℃，变形态在350～450℃，超过450℃时

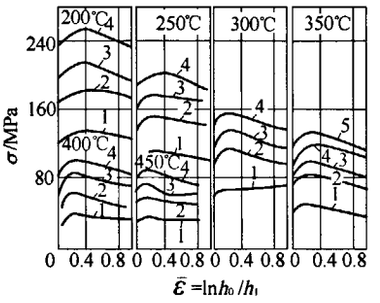
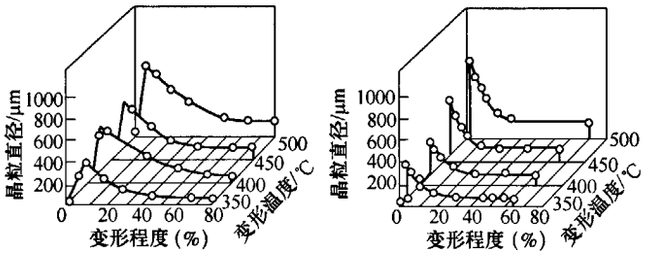


图6 2A50铝合金应力－应变曲线



(a) 压力机上镦粗　　(b) 锻锤上镦粗

图7 2A50铝合金再结晶

变形塑性下降，所以铝合金的锻造温度范围很窄。从该图还可以看出，在相同温度条件下，变形状态下的允许变形程度大于铸态。压力机上镦粗的允许变形程度大于锻锤的。由图6可以看出，合金的变形抗力随变形温度的降低和应变速率的提高而提高，而且该合金在300℃以上，变形抗力降低比较缓慢。由图7可以看出，该合金的临界变形程度比较明显，其临界变形区在2%～20%。

由以上2A50铝合金的工艺性能分析，可制定出该合金科学合理的工艺参数。其变形温度范围：模锻为470～360℃，铸锭为450～380℃，临界变形程度为2%～20%。

四、铝合金锻造工艺特点

1. 加热特点

（1）锻造温度范围很窄和精确测量　在合理的锻造温度范围内对铝合金进行锻造，可获得均匀且细小的再结晶组织，保证铝锻件的物理和力学性能。铝合金允许的锻造温度范围很窄，一般在120℃以内（碳素钢的锻造温度范围为500℃左右），某些高强度铝合金的锻造温度范围甚至不到100℃。常用变形铝合金锻造温度范围可查表4。

表4　常用变形铝合金的锻造温度范围　(℃)

合金牌号	锻造温度范围	合金牌号	锻造温度范围
5A02	470～360	2A80	470～360
3A21	470～360	2A14	460～360
5A03	470～380	6061	480～370
5A06	470～400	7A04	430～350
2A02	460～360	2A90	470～360
2A11	470～360	2A01	470～360
6A02	500～380	2B50	480～380
2A70	470～360	7A04	450～380
2A50	470～360	2A12	460～360

因铝合金锻造温度范围很窄，高于锻造温度范围时易产生过烧，可能将坯料打碎；低于锻造温度范围时，易使锻件产生各种缺陷，如粗晶粒和裂纹等。实际采用的温度范围比这更窄。美国对铝合金采用更窄的锻造温度范围，一般不超过85℃。如美国6061铝合金始锻温度为482℃，终锻温度为432℃，温度范围仅为50℃；而日本6061铝合金始锻温度为480℃，终锻温度为435℃，温度范围仅为45℃。另外，由于各种锻造设备打击速度各异，其产生热效应不同，故锻造温度也不同，如锤上锻造温度一般比压力机锻造温度低20～30℃。

由于铝合金锻造温度范围很窄，所以铝合金锻造加热必须严格均匀地控制在规定范围内，并必须准确无误地控制。为此，加热炉炉温和坯料温度必须准确测量。

（2）导热性能良好但加热保温时间长　尽管铝合金的锻造温度范围很窄，但是铝合金导热性良好，比结构钢热导率大3～4倍，是不锈钢的5～10倍，由于铝合金热导率高，所以一般任何尺寸的坯料均不需要预热，可直接在高温炉内加热（一般要求坯料加热到锻造温度上限）。由于铝合金的相组成复杂，为了保证强化相的充分溶解，其加热时间比一般碳钢的加热保温时间长。铝合金加热不产生松散的氧化皮，但是会产生氧化膜。一般冷收缩率取0.6%～1.0%较为合适。

2. 锻造变形时流动性（可锻性）差

在锻造温度下，变形抗力大，外摩擦因素多，粘附力强，流动性（可锻性）差。

3. 锻造过程极易产生的缺陷

（1）起皮　在铝锻件表面产生小的薄片状起层或脱落，铝合金对于表面起皮非常敏感，通常

在固溶处理后才能观察到，当用尖的工具撬开起皮后，就会发现露出的表面呈灰色、深褐色、黑色或白色，颜色与起皮的原因有关。

起皮一般有以下4种类型：

一是粘连起皮。由于铝合金粘附力强，在模锻时，坯料流动与模壁粘连，导致起皮。在起皮与锻件表面之间夹着一层黑色润滑剂，这类起皮通常呈现出断续的形态。

二是氢气起皮。在加热或热处理过程中，吸收了过多的氢气而造成。起皮下面的金属呈白色状。起皮的位置没有规律。

三是过烧起皮。因为过热而引起，起皮下面的金属呈现灰白色。氢气起皮和过烧起皮的锻件采用抛磨无济于事，锻件应报废。

四是熔炼起皮。铝合金在熔炼过程产生缺陷而引起的起皮。当固溶处理的温度过高时，由熔炼原因造成的起皮就会显现出来。建议采购时，在采购合同中应提出要求。

（2）大晶粒（粗晶） 铝合金锻件在锻造过程中易产生大晶粒（粗晶）。产生粗晶原因较多：加热温度和锻造温度过高或过低，均易形成粗晶组织；变形速度太快，容易使锻件产生粗晶和晶粒结构不均匀；在临界变形程度下锻造时，易产生大晶粒；其他因素产生大晶粒，如模具表面粗糙、变形剧烈不均匀、淬火温度高和时间长等也都会导致产生大晶粒。

晶粒粗大和晶粒结构不均匀导致铝合金锻件力学性能降低和不稳定，对锻件疲劳强度、耐腐蚀性能和冲击韧度均有影响，因此，如飞机机轮及螺旋桨叶片产生粗晶就报废。对于结构件（如汽车控制臂）通常采用检查粗晶区的力学性能，如符合技术条件则合格，不符合技术条件则报废。

（3）裂纹 铝合金对裂纹非常敏感，在制坯和模锻过程中极易生产裂纹，应及时清除，若没有及时清理，会迅速扩大造成锻件报废。

（4）其他缺陷 各种形状钢锻件易产生的缺陷，如变形、折叠、未充满、穿晶及涡流等，铝合金锻件也易产生。

4. 锻造辅助工序多

由于铝合金在锻造过程中极易产生各种缺陷，所以在下料、制坯、预锻和终锻等工序完成后，都要进行蚀洗，以检查锻件表面缺陷并修伤，故铝合金锻造辅助工序多。

五、工艺参数对铝合金锻件质量的影响

工艺参数（变形温度，变形程度和变形速度）对铝合金锻造质量影响很大，因此在工艺编制、模具设计和生产过程都要严格遵守，才能锻造出优质的铝合金锻件。

（1）变形温度 对于可热处理强化的铝合金，锻造温度影响锻件固溶热处理后的锻件组织和力学性能；对于不可热处理强化的铝合金，锻造温度影响锻件的晶粒尺寸，因此锻造温度对锻件的组织和力学性能起极其重要的作用。

变形温度对于铝合金有如此重要作用，是因为若加热或锻造温度过高（在低于过烧温度情况下），锻件将形成粗晶组织。晶粒长大而塑性下降，并易起皮；若锻造温度过低，锻件将产生加工硬化，在随后的热处理过程中，因为加工硬化区的激活能大，将首先产生再结晶，随后该部分晶粒急剧长大形成粗晶，从而降低锻件组织和力学性能。

因此，铝合金变形温度必须严格控制在一定范围内，并确保加热温度均匀。

（2）变形程度 铝合金有临界变形程度，一般在2%～20%，但是每种铝合金的临界变形程度均不相同，这可以从每种铝合金的再结晶图中找到，例如2A14在15%以下、2A16在2%～9%、7A04在20%以下等。在此临界变形程度内锻造易产生粗晶，导致组织不均匀，从而降低锻件力学性能，应避免在临界变形程度下锻造。

（3）变形速度 铝合金对应变速率比较敏感，变形速度太快，不仅容易使锻件产生起皮、折叠和晶粒结构不均匀等缺陷，而且还增大变形抗力。如铝合金由压力机上锻造改为锤上锻造时，合金的变形抗力增大0.5～2倍，这是因为铝合金在变形时产生的加工硬化来不及被再结晶软化。另外，应变速率大，锻造时由于变形热引起锻件温度升高，一旦进入脆性区，锻件晶粒组织可能不均匀或开裂。因此，为了保证锻件具有细小、均匀的晶粒组织和优良的力学性能，避免产生各种缺陷，应对工艺参数严格控制。MW （20110516）