

锻件缺陷 分析与 对策

吕 炎 主编



机械工业出版社

锻件缺陷分析与对策

吕 炎 主编



机械工业出版社

本书较系统地阐述了锻件内部和表面缺陷产生的规律和对策,介绍了锻件主要缺陷产生的机理和大量的缺陷分析实例。

全书共八章,第一、二章对锻件常见的缺陷、锻件质量检验方法等作了一般介绍,第三章介绍了几种主要缺陷形成的机理和对策,第四章介绍了各种锻造成形工序中常见的缺陷和对策,第五章介绍了各类金属材料锻件常见的缺陷和对策,第六和第七章分别介绍了大型锻造和液态(实际是半固态)模锻中常见的缺陷和对策,第八章是锻件缺陷分析实例。

本书供从事锻压生产的技术人员和锻件质量检验人员使用,也可供大专院校锻压专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

锻件缺陷分析与对策/吕炎主编. —北京:机械工业出版社, 1999.8
ISBN 7-111-07290-1

I. 锻… II. 吕… III. ①锻件-缺陷-分析②锻件-缺陷-预防 IV. TO316.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 14801 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:刘彩英 版式设计:张世琴 责任校对:孙志筠

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

北京市密云县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1999 年 8 月第 1 版 第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·21.75 印张·527 千字

0001—2500 册

定价:40.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页,脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、68326677-2527

前 言

锻件质量的优劣对产品的性能和寿命有直接的影响。锻件中的缺陷,有的会影响后续工序处理质量或加工质量,有的严重影响锻件的性能,降低所制成品件的使用寿命,甚至危及安全。因此,提高锻件质量,避免锻件缺陷产生,对我国许多重要工业部门的发展有重大的意义。

本书是应机械工业出版社约请编写的,系产品制造过程中缺陷分析与对策系列丛书之一。

本书是在我们编写的《锻件质量分析》(机械工业出版社1983年出版、1985年再版)、《锻件组织性能控制》(国防工业出版社1988年出版)和《锻压成形理论与工艺》(机械工业出版社1991年出版)等书的基础上编写的。本书的特点是侧重论述锻件内部和表面缺陷产生的规律和对策,包括各种锻造成形方法和各类材料锻件生产过程中常见的缺陷,并对其中几种主要缺陷形成的机理和对策作了详细介绍。书中的部分实例选自《锻件质量分析》一书。这些实例和书中其它实例都是由国内主要生产单位提供的,是多年生产经验的总结,具有较好的代表性和参考价值。对书中每个实例,都按照质量问题、缺陷分析、防止对策等三个方面进行了叙述。本书对正确制定锻造工艺,防止锻件缺陷产生,提高锻件质量有一定的指导意义。

借此机会向参加编写《锻件质量分析》、《锻件组织性能控制》、《锻压成形理论与工艺》的同志和曾提供大量宝贵资料的单位和同志表示深切的感谢!由于涉及到的同志和单位很多,这里不一一列出,请予谅解!

本书第一章第一节、第三章和第五章由吕炎编写,第一章第二、三节由张国庆编写,第二章和第四章第一~四节由单德彬编写,第四章五~七节由薛克敏编写,第六章由郭会光编写,第七章由罗守靖编写,第八章由吕炎、薛克敏、单德彬、郭会光、罗守靖编写,全书由吕炎统稿。

冯贵荣在本书的文字润色加工中做了大量工作,在此表示感谢!

锻件质量问题涉及到的学科比较多,限于编者水平,错误之处在所难免,请读者批评指正。

吕 炎

目 录

前言

第一章 总 论	1
一、锻造对金属组织、性能的影响与锻件缺陷	1
二、锻件质量检验的内容和方法	3
三、锻件质量分析的一般过程	7
第二章 锻造过程中常见的缺陷	10
一、原材料的主要缺陷及其引起的锻件缺陷	10
二、备料不当产生的缺陷及其对锻件的影响	12
三、加热工艺不当常产生的缺陷	13
四、锻造工艺不当常产生的缺陷	14
五、锻后冷却工艺不当常产生的缺陷	16
六、锻后热处理工艺不当常产生的缺陷	17
七、锻后清理工艺不当常产生的缺陷	17
第三章 几种主要缺陷形成的机理和对策	18
一、脱碳	18
二、晶粒粗大	20
三、过热、过烧	25
四、折叠	33
五、流线不顺、涡流和穿流	38
六、裂纹	42
七、白点	49
八、缺陷断口	52
第四章 各主要成形工序中常见的缺陷与对策	59
一、镦粗过程中常见的缺陷和对策	59
二、拔长过程中常见的缺陷和对策	62
三、冲孔过程中常见的缺陷和对策	69
四、扩孔过程中常见的缺陷和对策	71
五、模锻过程中常见的缺陷和对策	72
六、挤压过程中常见的缺陷和对策	75
七、摆动辗压中常见的缺陷和对策	79
第五章 各类金属材料锻件常见的缺陷和对策	86
一、莱氏体高合金工具钢锻件常见的缺陷与对策	86
二、高温合金锻件常见的缺陷与对策	93
三、不锈钢锻件常见的缺陷与对策	98
四、铝合金锻件常见的缺陷与对策	104
五、镁合金锻件常见的缺陷与对策	112
六、铜合金锻件常见的缺陷与对策	119

七、钛合金锻件常见的缺陷与对策	125
第六章 大型锻件常见的缺陷和对策	134
一、概述	134
二、大型锻件中常见的缺陷与对策	134
三、大型锻件质量控制举例	139
第七章 液态模锻件常见的缺陷与对策	144
一、概述	144
二、液态模锻件常见的缺陷与对策	145
第八章 锻件缺陷分析实例	152
一、碳钢及合金结构钢锻件缺陷分析实例	152
例 1 铜偏析引起铜脆	152
例 2 锡脆	152
例 3 机身大梁夹杂裂纹	153
例 4 原材料折叠	154
例 5 原材料缩管残余	154
例 6 气割下料引起的裂纹	154
例 7 摇臂折叠	155
例 8 20Cr2Ni4A 钢齿轮模锻件碳氮共渗后马氏体粗大	155
例 9 18Cr2Ni4WA 钢齿轮模锻件碳氮共渗后出现网状碳化物	156
例 10 链条侧环强度低	157
例 11 铜脆	157
例 12 齿轮锻件表层的增碳缺陷	158
例 13 千分卡架锻件的加热增碳缺陷	158
例 14 摇臂断裂	158
例 15 40CrNiMoA 钢曲轴过热断口	159
例 16 半轴锻造过热	160
例 17 50A 钢辊锻件锻造加热过烧	161
例 18 车轮轴过烧断裂	161
例 19 连杆弯头部分龟裂	162
例 20 模锻件软点	162
例 21 维氏硬度块硬度不均	162
例 22 GCr15 钢球疲劳麻点破坏	163
例 23 钢管车削的轴承套圈使用寿命低	164
例 24 6160 型柴油机曲轴疲劳强度低	165
例 25 辊锻件的横向裂纹	165
例 26 柴油机连杆断裂	166
例 27 中间轴的中心横向裂纹	167
例 28 60 钢环形锻件扩孔裂纹	169
例 29 二号轴树枝状组织	169
例 30 GCr15 轴承套圈锻件网状碳化物	170
例 31 工业纯铁锻件锻造开裂	171
例 32 摩托车离合齿轮摆辗件齿形充填不饱满	171

二、高速钢及模具钢锻件缺陷分析实例	172
例 33 原材料内裂、缩孔引起的锻裂	172
例 34 W18Cr4V 锻件中心裂纹	172
例 35 W18Cr4V 车刀锻后冷却裂纹	173
例 36 W18Cr4V 铣刀热处理时内孔裂纹	173
例 37 W18Cr4V 指形铣刀热处理时淬裂	173
例 38 W18Cr4V 滚齿刀崩刃	174
例 39 齿形铣刀齿根断裂	174
例 40 中心疏松引起的锻造裂纹	175
例 41 冷冲凹模工作时压裂	176
例 42 落料凹模断裂	176
例 43 M12 六角螺栓切边模刃口崩裂	176
例 44 Cr12 小型冷轧辊硬度不均、表面粗糙度高	178
例 45 滚丝模冷滚成形时产生折叠	178
三、高温合金及耐热不锈钢锻件缺陷分析实例	179
例 46 GH37 合金涡轮叶片开裂	179
例 47 GH135 合金涡轮盘点状偏析	179
例 48 GH33 合金拉杆低倍粗晶	180
例 49 GH135 合金锻坯加热时炸裂	180
例 50 GH135 合金涡轮盘轮缘中心裂纹	181
例 51 GH37 合金涡轮叶片低倍粗晶	182
例 52 GH49 合金涡轮叶片局部粗晶	182
例 53 1Cr18Ni9Ti 管接头裂纹	184
例 54 1Cr18Ni9Ti 环形件锻造裂纹	185
例 55 4Cr14Ni14W2Mo 排气阀过热	185
例 56 4Cr14Ni14W2Mo 排气阀粗晶	186
例 57 3Cr13Ni7Si2 进气阀粗晶	187
例 58 9Cr18 不锈钢轴承的链状碳化物	187
例 59 2Cr13 锻件锻造裂纹	188
例 60 2Cr13 叶片锻件裂纹	190
例 61 1Cr13 高速锤挤压叶片叶背折叠	191
例 62 叶片辊轧折叠	191
例 63 Cr17Ni2 压缩机转子叶片折断	192
四、有色金属锻件缺陷分析实例	192
例 64 铝合金活塞模锻件裂纹	192
例 65 铝合金环形件过烧	193
例 66 LY2 铝合金大叶片局部过烧	193
例 67 LF6 铝合金锻粗裂纹	194
例 68 LF3 铝合金锻件锻造裂纹	194
例 69 LF6 铝合金模锻件穿筋折叠	195
例 70 LC4 铝合金框架形模锻件折叠	195
例 71 三角架模锻件折叠	196
例 72 流线切断	197

例 73	铝合金模锻件穿流	197
例 74	LC4 铝合金大梁模锻件折叠和流线不顺	199
例 75	铝合金机匣模锻件低倍粗晶	200
例 76	LD2 铝合金模锻件低倍粗晶	201
例 77	LC4 铝合金模锻件变形不足力学性能不合格	202
例 78	镁合金镦粗裂纹	202
例 79	镁合金杠杆模锻件裂纹	203
例 80	杠杆模锻件折叠	204
例 81	镁合金模锻件飞边裂纹	204
例 82	紫铜触头开裂	205
例 83	铝铁青铜锻造裂纹	205
例 84	锆青铜滚焊轮硬度低	206
例 85	偏析裂纹	207
例 86	低铝低钒偏析	207
例 87	铸造组织残留	207
例 88	TC4 钛合金叶片锻坯局部过热	208
例 89	TC4 钛合金叶片原材料选择不当引起的室温塑性不合格	208
例 90	TC4 钛合金叶片挤压工艺不当引起的室温塑性不合格	209
例 91	钛合金叶片剪切带	209
例 92	TC4 钛合金压气机盘模锻件过热	210
例 93	TC4 钛合金压气机盘模锻件表面撕裂	210
例 94	TC4 钛合金高速挤压叶片榫头剪裂	210
五、大型锻件缺陷分析实例		211
例 95	12MW 转子锻件夹杂物缺陷	211
例 96	12MW 转子锻件轴身部位 a_K 值低于规定指标	212
例 97	护环液压胀形胀裂和呈喇叭口形	214
例 98	叶轮轮毂冲击韧度低	214
例 99	叶轮白点	215
六、液态模锻件缺陷分析实例		216
例 100	钢平法兰冲击韧度 (a_K) 低	216
例 101	钢平法兰裂纹	217
例 102	钢平法兰气孔缺陷	219
例 103	铝合金梅花爪件折叠、裂纹和冷隔缺陷	220
例 104	铝合金迫弹下体折断	221
参考文献		336

第一章 总 论

锻件的缺陷包括表面缺陷和内部缺陷。有的锻件缺陷会影响后续工序的加工质量，有的则严重影响锻件的性能，降低所制成品件的使用寿命，甚至危及安全。因此，为提高锻件质量，避免锻件缺陷的产生，应采取相应的工艺对策，同时还应加强生产全过程的质量控制。

本章概要介绍三方面的问题：锻造对金属组织、性能的影响与锻件缺陷；锻件质量检验的内容和方法；锻件质量分析的一般过程。

一、锻造对金属组织、性能的影响与锻件缺陷

（一）锻造对金属组织和性能的影响

锻造生产中，除了必须保证锻件所要求的形状和尺寸外，还必须满足零件在使用过程中所提出的性能要求，其中主要包括：强度指标、塑性指标、冲击韧度、疲劳强度、断裂韧度和抗应力腐蚀性能等，对高温工作的零件，还有高温瞬时拉伸性能、持久性能、抗蠕变性能和热疲劳性能等。

锻造用的原材料是铸锭、轧材、挤材和锻坯。而轧材、挤材和锻坯分别是铸锭经轧制、挤压及锻造加工后形成的半成品。锻造生产中，采用合理的工艺和工艺参数，可以通过下列几方面来改善原材料的组织 and 性能：

- 1) 打碎柱状晶，改善宏观偏析，把铸态组织变为锻态组织，并在合适的温度和应力条件下，焊合内部孔隙，提高材料的致密度；
- 2) 铸锭经过锻造形成纤维组织，进一步通过轧制、挤压、模锻，使锻件得到合理的纤维方向分布；
- 3) 控制晶粒的大小和均匀度；
- 4) 改善第二相（例如：莱氏体钢中的合金碳化物）的分布；
- 5) 使组织得到形变强化或形变——相变强化等。

由于上述组织的改善，使锻件的塑性、冲击韧度、疲劳强度及持久性能等也随之得到了提高，然后通过零件的最后热处理就能得到零件所要求的硬度、强度和塑性等良好的综合性能。

但是，如果原材料的质量不良或所采用的锻造工艺不合理，则可能产生锻件缺陷，包括表面缺陷、内部缺陷或性能不合格等。

（二）原材料对锻件质量的影响

原材料的良好质量是保证锻件质量的先决条件，如原材料存在缺陷，将影响锻件的成形过程及锻件的最终质量。

如原材料的化学元素超出规定的范围或杂质元素含量过高，对锻件的成形和质量都会带来较大的影响，例如：S、B、Cu、Sn 等元素易形成低熔点相，使锻件易出现热脆。为了获得本质细晶粒钢，钢中残余铝含量需控制在一定范围内，例如 $Al_{\text{总}} 0.02\% \sim 0.04\%$ （质量

分数)。含量过少，起不到控制晶粒长大的作用，常易使锻件的本质晶粒度不合格；含铝量过多，压力加工时在形成纤维组织的条件下易形成木纹状断口、撕痕状断口等。又如，在1Cr18Ni9Ti奥氏体不锈钢中，Ti、Si、Al、Mo的含量越多，则铁素体相越多，锻造时愈易形成带状裂纹，并使零件带有磁性。

如原材料内存在缩管残余、皮下起泡、严重碳化物偏析、粗大的非金属夹杂物（夹渣）等缺陷，锻造时易使锻件产生裂纹。原材料内的树枝状晶、严重疏松、非金属夹杂物、白点、氧化膜、偏析带及异金属混入等缺陷，易引起锻件性能下降。

原材料的表面裂纹、折叠、结疤、粗晶环等易造成锻件的表面裂纹。

（三）锻造工艺过程对锻件质量的影响

锻造工艺过程一般由以下工序组成，即下料、加热、成形、锻后冷却、酸洗及锻后热处理。锻造过程中如果工艺不当将可能产生一系列的锻件缺陷。

加热工艺包括装炉温度、加热温度、加热速度、保温时间、炉气成分等。如果加热不当，例如加热温度过高和加热时间过长，将会引起脱碳、过热、过烧等缺陷。

对于断面尺寸大及导热性差、塑性低的坯料，若加热速度太快，保温时间太短，往往使温度分布不均匀，引起热应力，并使坯料发生开裂。

锻造成形工艺包括变形方式、变形程度、变形温度、变形速度、应力状态、工模具的情况和润滑条件等，如果成形工艺不当，将可能引起粗大晶粒、晶粒不均、各种裂纹、折迭、穿流、涡流、铸态组织残留等。

锻后冷却过程中，如果工艺不当可能引起冷却裂纹、白点、网状碳化物等。

（四）锻件组织对最终热处理后的组织和性能的影响

奥氏体和铁素体耐热不锈钢、高温合金、铝合金、镁合金等在加热和冷却过程中，没有同素异构转变的材料，以及一些铜合金和钛合金等，在锻造过程中产生的组织缺陷用热处理的办法不能改善。

在加热和冷却过程中有同素异构转变的材料，如结构钢和马氏体不锈钢等，由于锻造工艺不当引起的某些组织缺陷或原材料遗留的某些缺陷，对热处理后的锻件质量有很大影响。现举例说明如下：

1) 有些锻件的组织缺陷，在锻后热处理时可以得到改善，锻件最终热处理后仍可获得满意的组织和性能。例如，在一般过热的结构钢锻件中的粗晶和魏氏组织，过共析钢和轴承钢由于冷却不当引起的轻微的网状碳化物等。

2) 有些锻件的组织缺陷，用正常的热处理较难消除，需用高温正火、反复正火、低温分解、高温扩散退火等措施才能得到改善。例如，低倍粗晶、9Cr18不锈钢的孪晶碳化物等。

3) 有些锻件的组织缺陷，用一般热处理工艺不能消除，结果使最终热处理后的锻件性能下降，甚至不合格。例如，严重的石状断口和棱面断口、过烧、不锈钢中的铁素体带、莱氏体高合金工具钢中的碳化物网和带等。

4) 有些锻件的组织缺陷，在最终热处理时将会进一步发展，甚至引起开裂。例如，合金结构钢锻件中的粗晶组织，如果锻后热处理时未得到改善，在碳、氮共渗和淬火后常引起马氏体针粗大和性能不合格；高速钢中的粗大带状碳化物，淬火时常引起开裂。

锻造过程中常见的缺陷及其产生原因在第二章中将具体介绍。应当指出，各种成形方法

中的常见缺陷和各类材料锻件的主要缺陷都是有其规律的。

不同成形方法，由于其受力情况不同，应力应变特点不一样，因而可能产生的主要缺陷也是不一样的。例如，坯料镦粗时的主要缺陷是侧表面产生纵向或 45° 方向的裂纹，锭料镦粗后上、下端常残留铸态组织等；矩形截面坯料拔长时的主要缺陷是表面的横向裂纹和角裂，内部的对角线裂纹和横向裂纹；开式模锻时的主要缺陷则是充不满、折迭和错移等。各主要成形工序中常见的缺陷将在第四章中详细介绍。

不同种类的材料，由于其成分、组织不同，在加热、锻造和冷却过程中，其组织变化和力学行为也不同，因而锻造工艺不当时，可能产生的缺陷也有其特殊性。例如，莱氏体高合金工具钢锻件的缺陷主要是碳化物颗粒粗大、分布不均匀和裂纹，高温合金锻件的缺陷主要是粗晶和裂纹；奥氏体不锈钢锻件的缺陷主要是晶间贫铬，抗晶间腐蚀能力下降，铁素体带状组织和裂纹等；铝合金锻件的缺陷主要是粗晶、折迭、涡流、穿流等。各类材料锻件常见的缺陷将在第五章中详细介绍。

大型锻件的锻造和液态模锻涉及到较多的冶金问题，将在第六和第七章中介绍。

二、锻件质量检验的内容和方法

（一）锻件质量检验的内容

锻件缺陷的存在，有的会影响后续工序处理质量或加工质量，有的则严重影响锻件的性能及使用，甚至极大地降低所制成品件的使用寿命，危及安全。因此为了保证或提高锻件的质量，除在工艺上加强质量控制，采取相应措施杜绝锻件缺陷的产生外，还应进行必要的质量检验，防止带有对后续工序（如热处理、表面处理、冷加工）及使用性能有恶劣影响的缺陷的锻件流入后续工序。经质量检验后，还可以根据缺陷的性质及影响使用的程度对已制锻件采取补救措施，使之符合技术标准或使用的要求。

因此，锻件质量检验从某种意义上讲，一方面是对已制锻件的质量把关，另一方面则是给锻造工艺指出改进方向，从而保证锻件质量符合锻件技术标准的要求，并满足设计、加工、使用上的要求。

锻件质量的检验包括外观质量及内部质量的检验。外观质量检验主要指锻件的几何尺寸、形状、表面状况等项目的检验；内部质量的检验则主要是指锻件化学成分、宏观组织、显微组织及力学性能等各项的检验。

具体说来，锻件的外观质量检验也就是检查锻件的形状、几何尺寸是否符合图样的规定，锻件的表面是否有缺陷，是什么性质的缺陷，它们的形态特征是什么。表面状态的检验内容一般是检查锻件表面是否有表面裂纹、折叠、折皱、压坑、桔皮、起泡、斑疤、腐蚀坑、碰伤、外来物、未充满、凹坑、缺肉、划痕等缺陷。而内部质量的检验就是检查锻件本身的内在质量，是外观质量检查无法发现的质量状况，它既包含检查锻件的内部缺陷，也包含检查锻件的力学性能，而对重要件、关键件或大型锻件还应进行化学成分分析。对于内部缺陷我们将通过低倍检查、断口检查、高倍检查的方法来检验锻件是否存在诸如内裂、缩孔、疏松、粗晶、白点、树枝状结晶、流线不符合外形、流线紊乱、穿流、粗晶环、氧化膜、分层、过热、过烧组织等缺陷。而对于力学性能主要是检查常温抗拉强度、塑性、韧性、硬度、疲劳强度、高温瞬时断裂强度、高温持久强度、持久塑性及高温蠕变强度等。

由于锻件制成零件后，在使用过程中其受力情况、重要程度、工作条件不同，其所用材料和冶金工艺也不同，因此不同的部门依据上述情况并按照本部门的要求将锻件分出类别，不同的部门，不同的标准对锻件的分类也是不同的。但不管怎样，对于锻件质量检验的整体来说都离不开两大类检验，即外观质量和内部质量的检验，只不过锻件的类别不同，其具体的检验项目、检验数量和检验要求不同罢了。例如，有的工业部门将结构钢、不锈钢、耐热钢锻件分成Ⅳ类进行检验，有的部门将铝合金锻件和模锻件按其使用情况分成Ⅲ类进行检验，还有的部门将铝合金、铜合金锻件分成Ⅳ类进行检验。表 1-1 是结构钢、不锈钢、耐热钢锻件分成Ⅳ类的检验要求，表 1-2 是铝合金锻件和模锻件质量检验要求。

表 1-1 结构钢、不锈钢及耐热钢锻件质量检验要求

类别	热处理状态	检 验 项 目 和 数 量					
		材料牌号	表面质量和几何尺寸	硬 度	力学性能	低 倍	断 口
Ⅰ	预备	100% 检验	100%，当能确保质量时，模锻件的几何尺寸允许抽检	每热处理炉抽检 10%，但不少于 3 件	每熔批抽检 1 件	每熔批抽检 1 件	每熔批抽检 1 件
	最终			100%	每熔批抽 1 件在 本体上检验，其余 100% 在专用余料上检验		每熔批抽 1 件在 本体上检验，其余 100% 在专用余料上检验
Ⅱ	预备			每热处理炉抽检 10%，但不少于 3 件	每熔批抽检 1 件	每熔批抽检 1 件	按需要每熔批抽检 1 件
	最终			100%	每验收批抽检 1 件或在试料上检验		需化学热处理的零件和有需要的其它件，每熔批抽检 1 件
Ⅲ	预备			每热处理炉抽检 5%~10%，但不少于 3 件	不检验	首批生产或改变主导工艺时抽 1 件检验金属流线和工艺缺陷	不检验
	最终			100%			
Ⅳ	预备			每热处理炉抽检 5%~10%，但不少于 3 件	不检验	不检验	不检验
	最终			每热处理炉抽检 10%，但不少于 3 件，若有一件不合格，则 100% 检验			

注：1. 各类锻件，无论是否有检验断口的要求，当怀疑锻件过热时，应增加断口检验，奥氏体钢锻件不检查断口。

2. 如另有检验要求，可在专用技术文件中规定进行检验。

由表 1-1、表 1-2 可以看出，锻件质量的检验除个别类别的个别项目外均具有抽检的性质，抽检合格，表示整个验收批的锻件质量合乎要求。对于有的类别的锻件规定了不检验项目，不能认为对该类锻件的这些项目不进行控制，而是由于在生产中都采取了相应的质量保证措施，如原材料复验制度、锻件定形制度、定期检验制度、工艺纪律检查制度及合理组批等措施，从而在保证锻件质量的前提下简化检验工序，并保证使用要求。

总之，锻件质量检验的内容涉及的范围很广，项目也很多，在实际工作中应根据设计对产品的要求及技术标准所要求的项目进行锻件质量的检验。

表 1-2 铝合金锻件及模锻件质量检验要求

类别	检 验 项 目 和 数 量							
	表面质量 和几何尺寸	化学成分	力 学 性 能		显微组织	断 口	低 倍	超声波探伤
			抗 拉 性 能	硬 度				
I	100%	每 熔 次 抽 检 一件	余料部位 100% 和 每批（炉）抽检一 件	不检验	每 批 （ 炉 ） 抽 检 一件	需方有要 求时每批抽 检一件	每批抽检 一件	需方有 要求时， 每批 100%
II	100%		每批（炉）抽检 一件	100%				
III	100%		不检验	100%		不检验	首批或工 艺改变时抽 检一件	

注：1. 化学成分可由原材料保证。

2. 在确保质量的前提下，Ⅲ类件的硬度每批可抽检 5% 且不少于 5 件。

3. 低倍和断口组织检查不允许重复试验。

（二）锻件质量检验的方法

当今时代，人们对产品的使用要求更高了，相应对制造产品的锻件也提出了更高的要求。而锻件质量问题的表现形式又多而杂，某些类型的锻件缺陷又将严重地降低锻件的性能，威胁使用的安全性、可靠性，缩短了使用寿命，这类缺陷的存在其后果是严重的。因此对锻件质量的检验也提出了更高的要求，即绝不能将带有缺陷的锻件放过去，特别是不能放过那些严重影响使用性能的带有缺陷的锻件。要做到这一点，就要在进行锻件质量的检验和控制时，除充分地沿用常规的检测方法及手段外，也要采用反映当代水平的更快速更准确的检测手段和方法，使之对锻件质量的评估、锻件缺陷性质的判断、产生原因的判断及形成机理的分析更准确，更符合实际，从而保证不放过缺陷锻件，并能采取得当的解决措施来改进和提高锻件质量。

如前所述，锻件质量的检验分为外观质量的检验和内部质量的检验。外观质量的检验一般来讲是属于非破坏性的检验，通常用肉眼或低倍放大镜进行检查，必要时也采用无损探伤的方法。而内部质量的检验，由于其检查内容的要求，有些必须采用破坏性检验，也就是通常所讲的解剖试验，如低倍检验、断口检验、高倍组织检验、化学成分分析和力学性能测试等，有些则也可以采用无损检测的方法，而为了更准确地评价锻件质量，应将破坏性试验方法与无损检测方法互相结合起来进行使用。而为了从深层次上分析锻件质量问题，进行机理性的研究工作还要借助于透射型或扫描型的电子显微镜、电子探针等。

通常锻件内部质量的检验方法可归结为：宏观组织检验法、微观组织检验法、力学性能检验、化学成分分析法及无损检测法。

宏观组织检验就是采用目视或者低倍放大镜（一般倍数在 $30\times$ 以下）来观察分析锻件的低倍组织特征的一种检验。对于锻件的宏观组织检验常用的方法有低倍腐蚀法（包括热蚀法、冷蚀法及电解腐蚀法）、断口试验法和硫印法。

低倍腐蚀法用以检查结构钢、不锈钢、高温合金、铝及铝合金、镁及镁合金、铜合金、钛合金等材料锻件的裂纹、折迭、缩孔、气孔偏析、白点、疏松、非金属夹杂、偏析集聚、流线的分布形式、晶粒大小及分布等。只不过对于不同的材料显现低倍组织时采用的浸蚀剂

和浸蚀的规范不同。

断口试验法用以检查结构钢、不锈钢（奥氏体型除外）的白点、层状、内裂等缺陷、检查弹簧钢锻件的石墨碳及上述各钢种的过热、过烧等，对于铝、镁、铜等合金用来检查其晶粒是否细致均匀，是否有氧化膜、氧化物夹杂等缺陷。

而硫印法主要应用于某些结构钢的大型锻件，用以检查其硫的分布是否均匀及硫含量的多少。

除结构钢、不锈钢锻件用于低倍检查的试片不进行最终热处理外，其余材料的锻件一般都经过最终热处理后才进行低倍检验。

断口试样一般都进行规定的热处理。

微观组织检验法则是利用光学显微镜来检查各种材料牌号锻件的显微组织。检查的项目一般有本质晶粒度，或者是在规定温度下的晶粒度，即实际晶粒度，非金属夹杂物，显微组织如脱碳层、共晶碳化物不均匀度，过热、过烧组织及其它要求的显微组织等。

力学性能和工艺性能的检验则是对已经过规定的最终热处理的锻件和试片加工成规定试样后利用拉力试验机、冲击试验机、持久试验机、疲劳试验机、硬度计等仪器来进行力学性能及工艺性能数值的测定。

化学成分的测试一般是采用化学分析法或光谱分析法对锻件的成分进行分析测试，随着科学技术的发展，无论是化学分析还是光谱分析其分析的手段都有了进步。对于光谱分析法而言，现在已不单纯采用看谱法和摄谱法来进行成分分析，新出现的光电光谱仪不仅分析速度快，而且准确性也大大地提高了，而等离子光电光谱仪的出现更大大地提高了分析精度，其分析精度可达 10^{-6} 级，这对于分析高温合金锻件中的微量有害杂质如Pb、As、Sn、Sb、Bi等是非常行之有效的方法。

以上所说的方法，无论是宏观组织检验法，还是微观组织检验法或性能及成分测定法，均属于破坏性的试验方法，对于某些重要的、大型的锻件破坏性的方法已不能完全适应质量检验的要求，这一方面是因为太不经济，另一方面主要是为了避免破坏性检查的片面性。无损检测技术的发展为锻件质量检验提供了更先进更完善的手段。

对于锻件的质量检验所采用的无损检测方法一般有：磁粉检验法、渗透检验法、涡流检验法、超声波检验法等。

磁粉检验法广泛地用于检查铁磁性金属或合金锻件的表面或近表面的缺陷，如裂纹、发纹、白点、非金属夹杂、分层、折迭、碳化物或铁素体带等。

该方法仅适用于铁磁性材料锻件的检验，对于奥氏体钢制成的锻件不适于采用该方法。

渗透检验法除能检查磁性材料锻件外，还能检查非铁磁性材料锻件的表面缺陷，如裂纹、疏松、折迭等，一般只用于检查非铁磁性材料锻件的表面缺陷，不能发现隐在表面以下的缺陷。

涡流检验法用以检查导电材料的表面或近表面的缺陷。

超声波检验法用以检查锻件内部缺陷如缩孔、白点、心部裂纹、夹渣等，该方法虽然操作方便、快且经济，但对缺陷的性质难以准确地进行判定。

随着无损检测技术的发展，现在又出现了诸如声振法，声发射法、激光全息照相法、CT法等新的无损检测方法，这些新方法的出现及在锻件检验中的应用，必将使锻件质量检验的水平得以大大地提高。

值得提出的是锻件质量检验结果的准确性，虽然有赖于正确的试验方法和测试技术，但也有赖于正确的分析和判断。只有正确的试验方法，而没有准确的分析判断，也不会得出恰当的结论。因此，锻件质量的分析实际上是各种测试方法的综合应用及各个测试结果的综合分析，对于大型复杂锻件所出现的质量问题不能单纯地依赖于某一种方法，从这一点上可以说各种试验方法在分析过程中是相辅相成的，各种试验方法的有机配合，并对各自试验结果进行综合分析，才能得出正确的结论。同时就锻件质量分析的目的而言，除了正确的检验外，还应进行必要的工艺试验从而找出产生质量问题的真正原因并提出圆满的改进措施及防止对策。

当然，在实际工作中究竟选用那些检测方法，运用何种检测手段应根据锻件的类别和规定的检测项目来进行。在选择试验方法和测试手段时，既要考虑到先进性，又要考虑到实用性、经济性，不能单纯地追求先进性，能用一种手段解决问题就不要用二种或更多种，测试手段的选择应以准确地判定缺陷的性质和确切找出缺陷产生的原因为出发点，有时测试手段选择得过于先进反而会导致不必要的后果以致造成不应有的损失。

还应指出，对于检验而言，无论那种检验或试验都有相应规定的标准试验方法，我们必须依据规定的试验方法进行试验或检验，表 1-3 给出了部分试验方法标准。

表 1-3 部分试验方法标准

检 验 项 目	方法标准代号	检 验 项 目	方法标准代号
化学成分	GB223	显微组织	GB/T13298
拉力试验	GB228		GB/T13299
冲击试验	GB229	钢的硫印	GB4236
高温持久	GB6395	晶间腐蚀	GB1223
高温拉伸	GB3652	冷弯试验	GB232
高温蠕变	GB2039	高温合金低倍、高倍	GB/T14999
旋转弯曲疲劳	GB2107	铝及铝合金显微组织	GB3246
布氏硬度	GB231	铝及铝合金低倍组织	GB3247
洛氏硬度	GB/T230	镁及镁合金显微组织	GB4296
低倍组织	GB226	镁及镁合金低倍组织	GB4297
断口试验	GB1814	两相钛合金高低倍	GB5168
晶 粒 度	GB6394	锻制圆饼超声波检验	GB1786
脱 碳 层	GB224	钢锻件超声波检验	GB/T6402
非金属夹杂	GB10561		

三、锻件质量分析的一般过程

锻件质量分析的目的就是弄清问题，找出原因，采取适当措施从而制造出符合技术标准规定的锻件，以满足产品设计和使用的要求，并制定出切实可行的防止对策，预防类似缺陷的再发生，使锻件质量不断提高。

由于锻件在锻后还要经过热处理，甚至表面处理工序及机械加工工序，制成零件后还要投入使用，因此，锻件质量分析工作除了对锻后的锻件进行质量分析外，也包括对锻后在热处理、表面处理、冷加工过程中和使用过程中发现的锻件质量问题的分析。此时，在锻件上或已制成品件上，也可能出现锻后的后续工序工艺不当、使用维护不当或者设计与选材不当

引起的质量问题，出现了除锻造工艺不当之外的其它影响因素，因此在进行半成品件、成品件、使用件的质量分析时，只有在排除了设计、选材、热处理、表面处理、冷加工及使用维护的因素后，才能准确地进行锻件本身的质量分析工作，从而寻找出锻件质量问题产生的原因和提出改进措施及防止对策。

在实际工作中，若要判定半成品件、成品件或使用件的故障究竟是什么原因造成的并不是一件非常容易的事情。相对而言，半成品件或成品件出现的故障分析起来可能稍容易些，而对于使用件的故障或者失效原因的分析就要费些周折。在进行这些故障件的分析时首先应了解故障件的使用经历和制造经历，即要了解设计情况、选材情况、冷工艺情况、热工艺情况、受力情况、使用维护情况包括环境情况，只有对以上各项情况进行全面了解之后，并根据故障件的宏观、微观形貌特征，这些形貌特征在什么情况下出现，是否具有产生这种形貌特征的条件，并通过材质分析、力学性能分析、金相组织分析，配以电子显微镜、电子探针等一些高级手段，通过与各方面专业人员的学习、交流、分析，按照失效分析的程序得出故障件产生故障的真实原因，并能得知故障产生的原因是否为锻件质量问题。

锻件质量问题产生的原因是多方面的，通过对锻件的宏观、微观分析，有时还要进行模拟试验，从而得出质量问题产生的原因究竟是锻造工艺本身还是其它影响因素（如原材料、热处理、表面处理或者试验本身的失误等）；是锻造工艺制定得不合理不完善还是工艺纪律不严格没有严肃认真地执行工艺，这些都只有在经过细致的研究分析之后才可得出结论。

既然锻件的质量问题包括外观质量和内部质量问题，而各种问题之间又有可能是互相联系的，因此分析的着眼点应是全面的，要考虑到锻件缺陷与力学性能的联系，锻件缺陷本身的互相影响。

因此，锻件质量分析工作一般可分为现场调查阶段、试验研究分析阶段、提出解决措施及防止对策阶段。而在实施这几个阶段的工作之前，最好能制定实施方案，内容包括这三个阶段所要进行的工作、工作程序、完成时间。该实施方案在实施过程中可进行适当的补充和修改。制定实施方案是分析大型复杂锻件及使用件质量问题的重要一环。

在现场调查阶段，主要是调查锻件所用原材料的材料牌号、化学成分、材料规格、材料保证单上的试验结果，进厂复验的各种理化测试和工艺性能测试的结果，甚至还要查明原材料的冶炼和加工工艺情况。与此同时还应调查锻造的工艺情况，包括锻件应该用的材料、规格、下料工艺、锻造加热的始锻和终锻温度，所用锻压设备、加热设备、加热工艺、锻造的操作、锻后的冷却方式、预备热处理的工艺情况等。必要时还要调查操作者的情况和环境情况及执行工艺的原始记录。对于在后续工序和使用中出现的锻件质量问题还应调查后续工序的工艺及使用情况。

现场调查切忌主观，即调查情况要客观全面，实事求是，调查的情况一定要保证原始，现场调查情况的真实性直接影响以后试验研究分析和结论的正确性。

试验研究分析阶段的工作是比较复杂的，这是进行锻件质量分析的关键阶段，该阶段工作的优劣直接影响质量问题判断的正确性及产生原因分析的准确性，该阶段的工作一定要与现场调查阶段的工作结合起来进行。

在该阶段，首先要查明锻件质量问题的客观反映，锻件缺陷的部位、宏观及微观的形貌特征，从而分析出缺陷的性质，通过宏观及微观的试验分析并辅以化学成分、力学性能测试、原材料的情况，必要时结合工艺执行情况和进行模拟试验，找出缺陷或质量问题产生的

原因。

在该阶段还要注意选择合适的试验方法及测试手段，避免由于测试手段或方法上的问题或分析思路不当而导致分析结论的差错。

在进行试验分析过程中，必要时还要进行现场再调查，以排除因外界因素的干扰而影响分析结论正确性的可能。

在提出解决措施阶段，就是在有了准确的锻件缺陷产生原因的基础上，结合生产实际提出切实可行的预防措施和解决办法。这里包括对锻造设备、加热设备、生产环境，所用原材料、锻造工艺人员素质等提出改进意见和措施，并且要在生产实践中得到验证，不断地修正改进措施，以使提出的改进措施及防止对策具有实用性、正确性甚至先进性，从而使锻件质量得以不断提高。