

钢铁材料及其热处理工艺

浙江大学、上海机械学院、合肥工业大学合编

上海科学技术出版社

钢铁材料及其热处理工艺

浙 江 大 学
上 海 机 械 学 院 合 编
合 肥 工 业 大 学

上海科学技术出版社

钢铁材料及其热处理工艺

浙江大学、上海机械学院、合肥工业大学 合编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海市印刷三厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 29.75 字数 710,000

1978 年 2 月第 1 版 1978 年 2 月第 1 次印刷

书号: 15119·1927 定价: 2.10 元

前 言

遵照伟大的领袖和导师毛主席关于“教育要革命”、“教材要彻底改革”的教导,我们三所院校于一九七四年协作编写了《金属材料及其热处理工艺》教材,供金属材料、热处理工艺及设备专业的学生使用。

一九七六年十月,在热烈庆祝华国锋同志任中共中央主席、中央军委主席,热烈庆祝粉碎王张江姚“四人帮”篡党夺权阴谋的伟大胜利的大好形势下,我们又一次邀请了工人、科技人员参加这本教材的编审工作,全面地重温了毛主席关于教育革命的光辉论述,再次向有关工厂、科研单位及使用本教材的学生作了调查研究,并根据我们三年来的教学实践,对这本教材的内容、系统等重新进行了深入的讨论,作了较大的修改,最后编写成本书,并改名为《钢铁材料及其热处理工艺》。

本书在内容上力求将钢铁材料和热处理工艺有机地联系起来,理论联系实际,注意结合国内(主要是上海及华东其他地区)工厂的实际情况,并反映国内外较为成熟的科学技术新成就。

本书在编写过程中曾得到许多工厂、科研单位、兄弟院校的热情鼓励和大力支持。书中引用和参考了他们所提供的有关资料和图片。在此谨致以深切的谢意。

由于我们的水平不高,深入实际不够,书中一定会有不少的缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

浙江大学、上海机械学院、合肥工业大学
金相热处理教研组

一九七六年十二月

目 录

第一篇 合金钢及其热处理

第一章 调质用钢及其热处理	1
第一节 连杆螺栓的工作条件、性能要求、钢材分析及热处理	2
一、工作条件	2
二、对机械性能与淬透性的要求	2
三、钢材分析	2
四、热处理	5
五、热锻连杆螺栓的断裂分析例子	8
六、冷锻螺栓简介	9
第二节 调质用钢的淬透性	9
一、概述	9
二、淬透性曲线的应用	12
三、调质件对淬火后的硬度、组织和淬硬层深度的要求	14
四、淬裂危险尺寸	15
第三节 调质用钢的机械性能	17
第四节 我国调质用钢简介	20
一、调质用碳素钢	20
二、调质用合金钢	20
第五节 大件的调质淬火	33
第六节 调质用钢的其他热处理	36
一、防止白点的热处理	36
二、消除带状组织的热处理	41
三、提高多冲抗力的热处理	42
附表 1-1 末端淬火试样半马氏体端距和 20°C 水中淬火时钢棒临界直径的关系	44
附表 1-2 末端淬火试样半马氏体端距和在各种介质中淬火时钢棒($l/D \geq 10.0$)的临界直径(D)的关系	45
附表 1-3 端淬试样半马氏体端距和理想淬火临界直径(D_{∞})的关系	45
附表 1-4 按坯料截面与屈服强度选择结构钢钢号用表	46
第二章 弹簧钢及其热处理	48
第一节 弹簧的分类及用途	48
第二节 汽车钢板弹簧	48
一、汽车钢板弹簧的工作条件和性能要求	48
二、四吨汽车钢板弹簧热处理工艺分析	49
三、影响汽车板弹簧使用寿命的主要因素	54
四、提高板弹簧质量的主要措施	56

第三节 螺旋弹簧及其热处理工艺特点	57
一、气阀螺旋弹簧	57
二、强化弹簧钢钢丝绕制的气阀螺旋弹簧	60
第四节 其他常用弹簧钢及其热处理规范	60
一、常用弹簧钢的化学成分、热处理和机械性能	60
二、硅铬、硅锰钨和钨铬钒等弹簧钢的特点和用途	61
三、含硼或钼、铌等新弹簧钢的简介	62
四、某些特殊用途的弹簧钢	63
五、强化弹簧钢钢丝的种类和用途	64
第三章 工模具用钢及其热处理	65
第一节 碳素工具钢及其热处理	65
一、碳钢丝锥的热处理工艺	65
二、碳钢丝锥的选材分析	67
三、碳钢丝锥的热处理工艺分析	69
第二节 合金工具钢及其热处理	76
一、9SiCr 钢圆板牙的热处理工艺	77
二、9SiCr 钢圆板牙的选材分析	77
三、9SiCr 钢圆板牙的热处理工艺分析	78
四、其他常用的合金工具钢	82
五、量具用钢及其热处理	83
第三节 高速钢及其热处理	84
一、W18Cr4V 高速钢	85
二、其他高速钢	99
三、高速钢刀具的化学热处理	105
四、高速钢刀具热处理中产生的缺陷及其防止措施	106
五、高速钢的其他用途	110
第四节 模具用钢及其热处理	110
一、Cr12 型高碳高合金冷冲压模具用钢及其热处理	110
二、其他冷冲压模具用钢及其热处理	117
三、热锻模具用钢及其热处理	120
四、金属压铸模用钢及其热处理	124
五、模具的变形	129
附表 3-1 碳素工具钢应用举例	134
附表 3-2 刀具、量具常用合金工具钢的化学成分、热处理工艺及硬度值	134
附表 3-3 几种类型高速钢的化学成分、热处理规范及硬度值	135
附表 3-4 常用模具钢的化学成分及热处理工艺	136
第四章 滚动轴承钢及其热处理	137
第一节 概述	137
第二节 滚动轴承钢的材料分析	138
一、GCr15 钢及其对冶金质量的要求	138
二、其他铬轴承钢	141
三、无铬轴承钢	141

z

第三节 滚动轴承钢的热处理	142
一、锻后热处理	143
二、最终热处理	147
三、其他热处理工艺举例	155
第五章 不锈钢、耐热钢及其热处理	157
第一节 金属腐蚀基本知识	157
一、腐蚀的现象及定义	157
二、化学腐蚀及保护膜	157
三、电化学腐蚀	159
四、腐蚀损坏的形式及材料抗蚀性的评定	162
第二节 不锈钢及其热处理特点	164
一、不锈钢的钢号、分类及用途	164
二、Cr13 系不锈钢及其热处理特点	166
三、18-8 系不锈钢及其热处理特点	177
四、其他常用不锈钢及其热处理特点	184
五、我国生产的不锈钢简况	189
第三节 耐热钢及其热处理特点	190
一、抗氧化钢	190
二、热强钢	192
三、气阀钢(排气阀钢)	202
第六章 普通低合金钢与超高强度钢	205
第一节 普通低合金钢	205
一、概述	205
二、普通低合金钢的性能要求及常用钢号	208
第二节 超高强度钢	218
一、概述	218
二、超高强度钢的类型及其热处理与性能	219
第七章 合金元素在钢中的作用	228
第一节 合金元素对平衡态钢的组织结构的影响	228
一、合金钢中的合金元素	228
二、合金元素同铁和碳的相互作用	229
三、合金钢中的相组成物和合金元素在平衡态钢中的分布	233
四、合金元素对 Fe-Fe ₃ C 平衡相图的影响	235
第二节 合金元素对钢中相变和热处理的影响	236
一、合金元素对钢在加热时相变过程的影响	236
二、合金元素对珠光体相变和贝氏体相变动力学的影响	239
三、合金元素对马氏体点和残余奥氏体量的影响	241
四、合金元素对钢的淬透性的影响	242
五、合金元素对淬火钢回火转变过程的影响	244
第三节 合金元素对钢的机械性能的影响	248
一、合金元素对铁素体的机械性能的影响	249
二、合金碳化物对钢的机械性能的影响	250

三、合金元素对退火、正火态钢的机械性能的影响	250
四、合金元素对淬火-回火态钢的机械性能的影响	252

第二篇 钢的表面热处理

第八章 化学热处理与化学热处理用钢	255
第一节 渗碳与渗碳钢	255
一、汽车变速箱渗碳齿轮用钢及热处理	255
二、有关渗碳工艺的其他问题	277
三、渗碳钢	281
四、渗碳后的其他热处理	286
第二节 氮化与氮化用钢	288
一、磨床氮化主轴用钢及热处理	289
二、有关氮化工艺的其他问题	297
三、氮化设备及装置	303
四、其他钢种的氮化	305
五、辉光离子氮化	307
六、软氮化	315
第三节 碳氮共渗	320
一、气体碳氮共渗	321
二、液体碳氮共渗	326
三、固体碳氮共渗	327
第四节 其他化学热处理	328
一、渗硼	329
二、渗铬	334
三、渗铝	339
第九章 感应加热表面热处理	344
第一节 高频感应加热设备(高频机)的操作与调试	344
一、线路说明	346
二、高频机操作步骤	350
三、高频机的安装	351
第二节 高频机的调试	352
一、部件的检查	352
二、控制部分的调试	353
三、高压整流器及其调试过程	357
四、振荡部分的调试	369
第三节 高频机常见的故障及其排除	377
第四节 感应加热表面淬火工艺	379
一、感应热处理设备的选用	379
二、高频感应加热表面淬火工艺与操作	384
三、回火	395
四、淬硬层深度(δ)	397

五、高频淬火的金相组织等级	439
六、其他操作要点	439
第五节 齿轮的高频淬火	401
一、频率的选用与淬硬层的形状	401
二、加热电参数的确定	402
三、齿轮高频淬火的操作要点	403
四、淬火变形	404
五、淬硬层沿齿廓分布的低淬透性钢	405
第六节 感应器的结构、制作原理及类型	406
一、感应器的类型及其组成部分	406
二、感应器的设计要求和有关的电效应	406
三、感应器的结构及尺寸	408
四、高频感应器举例	411
五、中频感应器举例	414
第七节 高频淬火常见的淬火缺陷及补救方法	415
一、高频淬火后硬度不足	415
二、淬裂	417
三、淬硬区分布不当	418

第三篇 铸铁及其热处理

第十章 灰铸铁、可锻铸铁和合金铸铁	421
第一节 灰铸铁	421
一、灰铸铁的牌号、性能及用途	421
二、铁碳合金双重相图和铸铁的石墨化	422
三、化学成分和冷却速度对铸铁组织的影响	425
四、石墨的形态、大小及分布对灰铸铁性能的影响	427
五、灰铸铁的热处理	430
第二节 可锻铸铁	432
一、可锻铸铁的牌号、性能及用途	432
二、可锻铸铁的退火	434
第三节 合金铸铁	435
一、汽车发动机凸轮轴用铸铁	435
二、气缸套用高磷铸铁	435
三、耐酸铸铁	436
第十一章 球墨铸铁及其热处理	436
第一节 概述	436
第二节 球墨铸铁的牌号、性能及用途	439
第三节 球墨铸铁的制得	440
一、球墨铸铁的球化处理	440
二、球墨铸铁的孕育处理	441
三、球墨铸铁的化学成分	443

四、球墨铸铁结晶过程的特点	444
第四节 合金球墨铸铁	446
一、稀土镁铜球墨铸铁	446
二、稀土镁钼球墨铸铁	446
三、稀土镁铜钼球墨铸铁	447
四、稀土镁锡球墨铸铁	447
五、稀土镁锰球墨铸铁	447
六、稀土镁钨球墨铸铁	448
第五节 球墨铸铁的热处理	448
一、退火	449
二、正火	452
三、等温淬火	456
四、调质处理	460
五、感应加热表面淬火	464
六、气体软氮化	465
七、热处理强化和冷加工硬化的复合强化	465

第一篇 合金钢及其热处理

第一章 调质用钢及其热处理

调质用钢属于结构钢。结构钢按其是否含有合金元素而分为碳素结构钢和合金结构钢；按用途不同则分为建筑用结构钢和机械制造用结构钢。它们是机械制造、农机制造、车辆、建筑、桥梁、锅炉、造船等工业中用量最大、用途最广的金属材料。

结构钢的含碳量范围很广。由05沸钢的含碳 $\leq 0.06\%$ 到85钢的含碳 $0.82\sim 0.90\%$ 。其中含碳量大致为 $0.30\sim 0.55\%$ （碳素钢）和 $0.25\sim 0.50\%$ （合金钢）的中碳钢所制的机件由于常须进行调质处理（淬火后再经高温回火），故又称为调质用钢。含碳量低于 $0.20\sim 0.25\%$ 的低碳钢常用作渗碳件，故又称为渗碳用钢。它们的钢号及技术条件列于国家标准《GB 699-65，优质碳素结构钢的一般技术条件》和冶金工业部部标准《YB 6-71，合金结构钢技术条件》中。

调质用钢主要用来制造机器零件。机器零件的品种规格成千上万，所用的钢号又有许多，而各种钢号的化学成分和性能不同，其热处理规范也不尽相同。如何选择钢号并进行热处理才能满足零件的技术要求呢？一般的原则是根据零件的工作条件和性能要求（主要是根据机械性能要求）来选定。当然也要考虑供应方便、价格低廉等要求。由于机器零件主要要求兼有高的强度和良好的塑性与韧性，即所谓良好的综合机械性能，所以在制造过程中往往需要进行调质处理。

毛主席教导我们说：“就人类认识运动的秩序说来，总是由认识个别的和特殊的事物，逐步地扩大到认识一般的事物。人们总是首先认识了许多不同事物的特殊的本质，然后才有可能更进一步地进行概括工作，认识诸种事物的共同的本质。当着人们已经认识了这种共同的本质以后，就以这种共同的认识为指导，继续地向着尚未研究过的或者尚未深入地研究过的各种具体的事物进行研究，找出其特殊的本质，这样才可以补充、丰富和发展这种共同的本质的认识，而使这种共同的本质的认识不致变成枯槁的和僵死的东西。”为了掌握调质用钢的选用原则及其热处理工艺，本章首先以6120柴油机上的40Cr钢连杆螺栓作为具体例子，分析其工作条件、性能要求、选材依据及热处理特点等，从中找出规律性的东西，以点带面，触类旁通。然后介绍调质用钢的淬透性和机械性能，我国的调质用钢简况，大钢件的调质处理、防白点退火，消除带状组织及提高多冲抗力等的热处理。

第一节 连杆螺栓的工作条件、性能要求、钢材分析及热处理

一、工作条件

连杆螺栓是用来紧固连杆大端及其端盖的。装配时,螺栓按规定的要求拧紧,因而受到均匀的拉伸应力。发动机工作时,曲轴在旋转,产生了离心力,离心力的大小在周期性地变化,使螺栓受到反复交变应力。曲轴和连杆大端孔之间有贮存润滑油的间隙,在活塞换向时,对连杆大端施加了冲击力,因而也使连杆螺栓受到冲击力。如果安装时连杆螺栓稍有偏斜,它还受到附加应力(如剪切应力)等。因此连杆螺栓的工作条件相当繁重。若选用的钢材和热处理不当,则连杆螺栓往往容易脆断而打碎气缸,造成重大事故;或者过量变形而失效,以致发动机不能正常工作。连杆螺栓的直径不能太大,否则就要增大连杆大端的尺寸或者削减曲轴直径,这在设计上是不希望的。

二、对机械性能与淬透性的要求

根据连杆螺栓的工作条件和所受载荷情况,要求它具有足够高的抗拉强度、屈服强度和疲劳强度以保证其安全工作。考虑到螺栓所受的反复应力和安装时偏斜引起的附加应力,设计时一般要根据螺栓所受的最大拉伸应力取较大的安全系数来计算。其次,连杆螺栓要具有一定的伸长率和冲击韧性,以保证工作时具有缓冲应力集中的能力,使其不致因局部过载而失效,并能承受冲击。由于连杆螺栓受到均匀的拉伸应力,在截面上的应力大小是相同的,因此要求螺栓在淬火时能完全淬透,高温回火后的硬度达到 HRC 30~35,截面金相组织为均匀的回火索氏体(允许有少量的游离铁素体或粒状碳化物),才能具有较好的综合机械性能。对于截面较大的 40Cr 钢连杆螺栓,如直径 ≥ 30 毫米时,有的厂认为油淬不透,就不作金相检验,而只按规定的机械性能检验其是否合格。

三、钢材分析

制造连杆螺栓的常用钢号有 40Cr 和 35CrMo 等。连杆螺栓有热锻和冷锻的两种(后者

的原始组织为球化退火组织即铁素体和粒状碳化物)。不论哪一种连杆螺栓,它们在成形后都须进行调质处理。现以 6120 柴油机(6 表示气缸数,120 表示气缸直径为 120 毫米)上的 40Cr 钢热锻连杆螺栓为例来说明。对它的主要技术要求如下:淬火后 HRC ≥ 50 , 心部基本上都是中等以下大小的马氏体(见表 1-6),其数量在 95% 以上;高温回火后 HRC 30~35, $\sigma_b \geq 95$ 公斤/毫米², $\sigma_s \geq 80$ 公斤/毫米², $\delta \geq 10\%$, $\psi \geq 42\%$, $\alpha_k \geq 6 \sim 7$ 公斤·米/厘米², 心部组织为均匀的回火索氏体,允许少量的游离铁素体。图 1-1 为连杆螺栓调质处理时的和成品的图形尺寸。

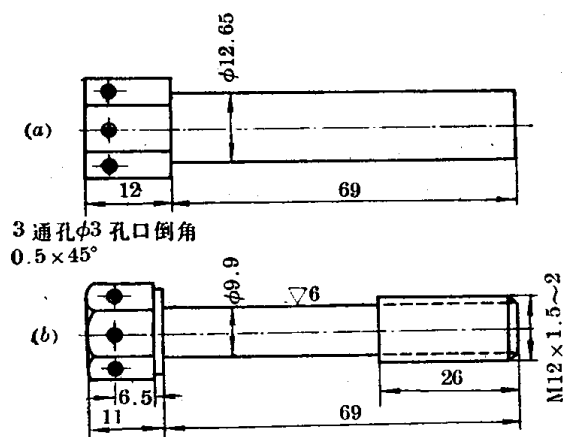


图 1-1 6120 柴油机上的 40Cr 钢连杆螺栓
(a) 调质处理时尺寸; (b) 产品尺寸

该连杆螺栓为何不用 40 或 45 钢而用 40Cr 钢制造?“有比较才能鉴别。”让我们比较

一下 45 钢和 40Cr 钢的情况。

钢在不同状态下具有不同的机械性能。调质状态下的综合机械性能要比退火、正火的好。表 1-1、1-2 分别为 45 钢和 40Cr 钢的性能数据。在退火和正火状态下,虽然塑性和韧性较高,但强度较低;淬火并低温回火状态的强度虽较高,但塑性和韧性却较低。只有淬火并高温回火状态下的综合机械性能才较好。调质用钢(不论碳钢或合金钢)在完全淬透的情况下,经高温回火到相同的硬度时,它们的其他机械性能如强度、塑性和韧性等都差不多(表 1-3)。也就是说,如果 45 钢和 40Cr 钢都完全淬透并回火至同一硬度的话,例如 HRC 30~35,那么它们的强度、塑性和韧性等都大致相同,即 45 钢和 40Cr 钢都可满足连杆螺栓的机械性能要求。但是如果不完全淬透的话,即使回火后的硬度与完全淬透后回火的相同,其屈服强度、伸长率、面缩率和冲击值等都要低些,其降低程度随淬透程度的减少而增大。

表 1-1 45 钢在不同状态下的机械性能

状 态	σ_b kG/mm ²	σ_s kG/mm ²	δ %	ψ %	a_k kG·m/cm ²	硬 度
1. 820~840°C 退火	53.2	28.1	32.5	49.3	≥6	HB 160~200
2. 820~840°C 正火	67~72	34	15~18	45~50	≥5	HB 170~240
3. 820~840°C 油淬	90	62	18~20	48		HRC 45~50
4. 820~840°C 水淬	110	72	7~8	12~14		HRC 50~60
5. 820~840°C 水淬 180~200°C 回火 (ϕ 20~40 mm)	≥130	≥115	≥6	≥22	1.5~2.5	~HRC 50
6. 820~840°C 水淬 560~620°C 回火 (ϕ 20~40 mm)	70~85	45~56	15~17	45~50	6~8	HB 196~241
7. 完全淬透(HRC 55) 520°C 回火	100	84	20	55	11	HRC 30

表 1-2 40Cr 钢在不同状态下的机械性能

状 态	σ_b kG/mm ²	σ_s kG/mm ²	δ %	ψ %	a_k kG·m/cm ²	硬 度
1. 850~860°C 退火	58.5	29.5	—	53.4	6.2	≤HB 207
2. 850~860°C 正火	69.2	39.6	19.3	51.3	8.2	≤HB 250
3. ϕ 25 mm, 860°C 正火, 再 860°C 油淬, 200°C 回火	196	159	4.5	34	2.8	HRC 55
300°C 回火	170	152	5.9	45	2.0	HRC 48
400°C 回火	150	142	6.7	53	4.9	HRC 44
500°C 回火	112	109	9.5	59	9.6	HRC 38
600°C 回火	92	84	12.7	68	14.6	HRC 29
700°C 回火	70	62	16.4	70	21.2	HRC 23
4. 连杆螺栓要求的指标	≥95	≥80	≥10	≥42	≥6~7	HRC 30~35

表 1-3 调质用钢完全淬透后回火至同一硬度时的机械性能(适用于 $C \geq 0.30\%$ 的碳素钢和合金钢)

硬 度		σ_b	σ_s	δ	ψ	A_k
HRC	HB	kG/mm ²	kG/mm ²	%	%	kG·m
14	197	65~72	48~55	22~28	60~68	13.27~17.98
16	207	69~76	51~59	21.5~27.5	59~67	11.20~17.02
18	217	72~80	53~63	21~27.5	58~66	10.78~16.32
20	223	74~82	55~65	20.5~26.5	57.5~65.5	9.68~15.90
22	235	78~87	59~69	20~25.5	56.5~64.5	8.85~15.21
24	248	83~92	65~75	19.5~24.5	55~63	8.30~14.24
26	262	87~97	69~80	18.5~24	54~61.5	7.60~13.55
28	277	92~102	75~86	18~22.5	52~60	6.64~12.86
30	293	97~108	81~92	17~22	51~59	5.95~11.34
32	311	102~114	88~99	16~20.5	49~57	5.12~10.37
34	321	106~119	92~102	15.5~20	48~56	4.42~9.82
36	341	112~126	99~110	14.5~18.5	46~54	3.60~8.57
38	363	120~135	107~119	13.5~17	43.5~51.5	2.49~7.05
40	379	124~141	114~125	12.5~16	42~50	1.66~5.95
42	401	132~149	123~130	11~15	40~49	~4.42

制造 6120 柴油机连杆螺栓的工艺流程如下:

1)落料($\phi 12.2 \times 107$ 毫米棒材); 2)热冲六角头; 3)退火($HB \leq 207$, 一般得 $HB170$); 4)冷勒六角头; 5)初劈头; 6)六角头部钻孔; 7)热处理: 调质, $HRC 30 \sim 35$; 8)车外圆; 9)劈头(倒角与接触面); 10)平头倒角; 11)磨中径(无心磨床); 12)滚丝; 13)发黑处理。

最终热处理——调质处理在 7) 工序。此时杆部的有效截面为 $\phi 12.65$ 毫米, 六角头已钻孔。要求完全淬透, 心部具有 95% 以上中等以下大小的马氏体和淬火硬度在 $HRC 50$ 以上。由于水淬易裂而选用油淬。在油淬的前提下, 若用 45 钢制造的话, $\phi 12.65$ 毫米螺栓的心部连 50% 马氏体也得不到(见表 1-4), 所以从淬火开裂和淬透性考虑, 用 45 钢制造是不能满足要求的。如果用 40Cr 钢制造的话, 由表 1-5 可知, 连杆螺栓不论在水中或油中都可完全淬透, 心部可得 95% 马氏体。因此 6120 柴油机连杆螺栓用 40Cr 钢制造并油淬的话, 既可不裂, 又可保证完全淬透, 满足机械性能和金相组织的要求。

表 1-4 40、45 钢与 40Cr 钢的淬火临界直径 (mm)

钢 号	50% M		95% M	
	$D_{\text{水}}$	$D_{\text{油}}$	$D_{\text{水}}$	$D_{\text{油}}$
40 或 45	11~20	3.5~9.5	5~12	1~4
40Cr	43	25~32	17~30	10~15

表 1-5 40Cr 钢水淬、油淬后的表面硬度、中心硬度和淬硬层深度

试样直径 mm	水 淬			油 淬		
	硬 度, HRC		淬硬层深度 mm	硬 度, HRC		淬硬层深度 mm
	表 面	中 心		表 面	中 心	
12.5	59	59	全部	56	56	全部
25	59	55	全部	53	47	全部
50	59	38	12.5	43	34	1~2
75	57.5	32	10.0	42	26	1~2
100	57	28	8	32	25	—
125	56	27	7	31	22	—

[注] 淬硬层深度测至 50% 马氏体处。

四、热 处 理

(一) 热处理工艺的选择

由表 1-2 知道, 用 40Cr 钢制造连杆螺栓时, 只有在调质状态下才能满足所要求的综合机械性能。退火与正火状态的强度由于先共析铁素体的存在而不够高; 淬火并低温回火状态的强度虽然很高, 但塑性、韧性却太低。因此根据所要求的机械性能, 只有选用调质热处理。

(二) 调质热处理工艺分析

现以某厂生产的 6120 柴油机 40Cr 钢制的连杆螺栓为例来说明。其调质热处理工艺如下:

淬火: 860~870℃ 盐浴炉加热 15~20 分钟, 淬油 (20~60℃), 油中冷透, HRC≥50。该厂将螺栓一个一个插入带孔两层板式夹具中垂直悬挂。装好后放在炉旁烘干和预热。

回火: 在 520~550℃ 硝盐浴中回火 1.5 小时, HRC 30~35。

下面就对以上的工艺进行分析。

1. 淬火温度

连杆螺栓经热冲六角头后进行球化退火 (680℃ 保温 3 小时后升至 770℃ 保温 2 小时再炉冷至 580~550℃ 出炉, HB170), 以便随后的勒光六角头工序能顺利进行, 所以在调质淬火前钢具有球状珠光体组织。球状珠光体在加热时向奥氏体的转变比片状珠光体更为缓慢。40Cr 钢在正火或完全退火状态下的组织为铁素体和片状珠光体, 其 $A_{c1} \approx 735^\circ\text{C}$, $A_{c3} \approx 780^\circ\text{C}$ 。具有片状珠光体的 40Cr 钢的淬火温度选 840~850℃ 就可满足要求。今用 860~870℃ 较高的淬火温度, 主要是为了让球状珠光体更好地完全转变为奥氏体, 以充分发挥碳和铬增大淬透性的有利作用, 使连杆螺栓淬火后心部基本上都是中等以下大小的马氏体组织 (小于或等于 5 级, 参见表 1-6)。但是为了避免得到粗大的马氏体, 淬火温度又不能过高。该厂曾发现气缸盖螺栓 (40Cr 钢) 超过 870℃ 淬火时, 虽也经 520~550℃ 回火, 但装机运转后会有断裂的现象, 因此限制淬火温度不超出 870℃。

2. 淬火加热时间

连杆螺栓经炉旁烘热后, 即转入 860~870℃ 盐浴炉中加热。由于装炉量较大, 选用

的加热时间较长,达15~20分钟(40Cr钢不预热的盐浴淬火加热时间一般为0.5~1.0分/毫米)。其目的主要是为了保证透热以及渗碳体粒子充分溶入奥氏体中,并使后者成分均匀。

3. 淬火介质

用20号机械油。采用油淬而不用水淬是为了防止已钻孔的六角头部淬裂,同时仍能保证淬透,使表面与心部均可达到HRC≥50的要求。

4. 脱碳情况

表面脱碳是连杆螺栓使用寿命不长的原因之一,必须严加注意。从连杆螺栓的工艺流程看,它在淬火前经过热冲和退火等几次加热,调质以后尚须车外圆与磨中径,留下的加工余量为:杆部每边 $\frac{12.65-9.9}{2}=1.38$ 毫米;螺纹部分每边 $\frac{12.65-11.14}{2}=0.76$ 毫米(螺纹部分在磨中径后和滚丝前的尺寸为φ11.14毫米,滚丝后为M12×1.5)。根据40Cr钢在箱式电炉加热保温2小时空冷后的脱碳层情况(表1-7)可知,即使加热至1100℃,脱碳层也只有0.65毫米深,仍在加工余量之内。对产品进行分析的结果也说明,螺栓在盐浴炉内加热,表面脱碳层较少,影响不大。

表 1-6 40Cr 钢(φ20×20mm)盐浴加热再在 20 号机械油中淬火后的表面硬度和马氏体的大小级别

加 热 温 度, °C	保 温 时 间, 分	HRC	马氏体大小级别
820	8	56	3~3.5 级
860	8	54	4~5 级
900	8	54	6 级
1000	8	54	7 级

[注] 马氏体级别越小,表示马氏体越细短。1~2 级为细短马氏体, 3~5 级为中等大小马氏体。

表 1-7 40Cr 钢在箱式电炉保温 2 小时空冷后的脱碳深度和晶粒度号数

加 热 温 度, °C	脱 碳 深 度, mm	晶 粒 度 号 数
800	0.11	8
850	0.15	7.5
900	0.25	6.5
950	0.30	6
1000	0.35	4.5
1100	0.65	3

5. 回火温度

根据淬火后回火温度对综合机械性能的影响(表1-2、图1-2),选择在520~550℃温度范围内回火能满足要求。

6. 回火时间

将夹具连同螺栓装入一铁筐中,放在540℃的硝盐浴炉内回火1.5小时后取出空冷。盐

浴装料后降温，约经半小时回升至 540℃。回火时间从装料入炉时计算。为了防止工件在硝盐浴中回火时发生腐蚀现象，有的厂在硝盐浴内加入 5% NaOH，取得良好的效果。

7. 回火冷却

回火冷却采用空冷。含铬的结构钢一般来说是有第一类回火脆性和第二类回火脆性倾向的材料。由表 1-2 或图 1-2 可以看出，40Cr 钢在 300℃ 回火后的冲击值仅为 2.0 公斤·米/厘米²，比 200℃ 回火的冲击值 (2.8 公斤·米/厘米²) 低。关于 40Cr 钢的第二类回火脆性，由于含铬较少，螺栓尺寸又不大，因而不显著。表 1-8 为 40Cr 钢 860℃ 油淬后，调质回火时不同冷却条件对冲击值的影响。油冷与空冷差不多，而炉冷的冲击值则要低得多。在实践中一般认为 40Cr 钢截面在 50 毫米以下回火时可以空冷，但不能炉冷。特别是在 480~650℃ 回火时炉冷的话，要引起第二类回火脆性。今连杆螺栓堆在铁筐中一起空冷，虽然冷速较小，但由于螺栓尺寸较小，对冲击值影响仍然不大。

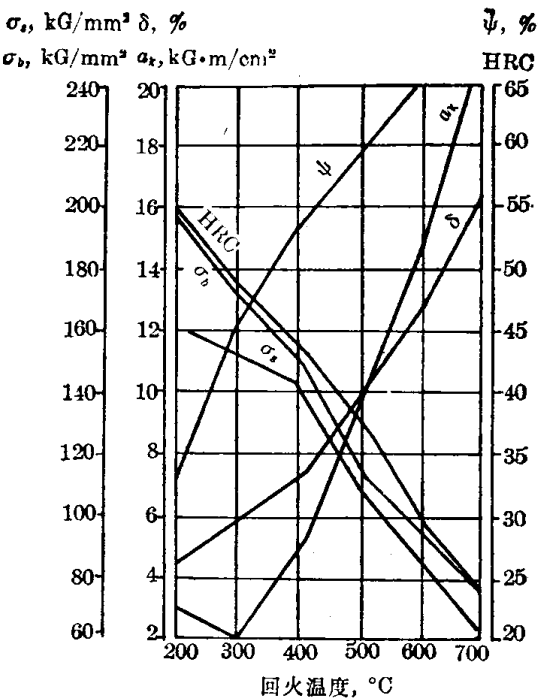


图 1-2 40Cr 钢 860℃ 油中淬火、再在不同温度回火后的机械性能

表 1-8 40Cr 钢 860℃ 油淬后，调质回火时不同冷却条件对冲击值 a_k 的影响

回 火 温 度 °C	a_k , kG·m/cm ²		
	油 冷	空 冷	炉 冷
650	17.0	17.0	12.6
600	15.0	15.8	9.9
550	10.8	13.8	6.3
500	6.0	9.2	—
450		8.5	3.7
400		5.5	—
试样尺寸, mm	15×15×150	φ60×150	15×15×150

8. 调质处理后的金相组织评级

热锻连杆螺栓在调质处理后的金相组织主要是回火索氏体，允许有少量的游离铁素体或粒状碳化物。按某厂标准，40Cr、40MnB 或 35CrMo 钢制的连杆螺栓调质后依心部游离铁素体的数量分为如下 5 级：1 级无游离铁素体；2 级含微量铁素体；3 级含少量铁素体；4 级含中等数量铁素体；5 级含较多量铁素体。1~3 级合格，4~5 级不合格。

9. 其他

连杆螺栓的钻孔工序不排在调质以后而在调质以前进行，这是因为调质后硬度较球化退火后的高 (达 HRC 30~35)，需钻的孔小而深，不适宜于钻孔工序的进行。

有的厂在生产连杆螺栓的过程中发现热冲六角头 (工序 2) 后，虽经退火 (工序 3)，但在