

国外热处理 新技术

熊 剑 主编

内 容 简 介

本书介绍了近十年来的国外热处理新技术。内容包括高能量密度热处理, 超硬化合物表面涂覆、离子轰击、离子注入表面强化新工艺, 调压、形变、流态床和复合热处理, 淬火冷却新技术和热处理节能技术, 以及计算机和机器人在热处理中的应用。

本书可供从事热处理工作的工程技术人员参考, 也可用作大专院校金属材料及热处理专业的补充教材。

国 外 热 处 理 新 技 术

熊 剑 主 编

*

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 21 3/4 字数576 千字

1990年7月第一版 1990年7月第一次印刷

印数00,001~3,200册

ISBN 7-5024-0513-5

TG·79 定价15.00元

前 言

热处理是提高金属产品质量的重要技术。国家科学技术发展规划要求, 热处理技术应在“七五”计划的末期, 达到先进工业国家70年代末80年代初的水平。要实现这一目标, 必须全面了解国外同行业的现状水平, 进行解剖、分析、比较和鉴别, 弄清主要的技术关键和实际差距, 吸取先进的科学技术, 促进我国热处理技术的发展。为此, 编写了这本《国外热处理新技术》, 供广大热处理工作者参考。

我们在本书的编写过程中收集了1977至1987年, 即最近十年内国外热处理新技术的资料。力求所选资料具有较高的理论水平, 技术新颖而且工艺先进。本书第1章为国外热处理新技术发展动态, 第2、3、5章介绍激光和电子束热处理、超硬化合物表面涂覆及离子注入表面强化处理, 第4、6、11章介绍离子轰击和流态床热处理以及热处理的节能, 第7、8、9、10章介绍调压(减压或加压)、形变和复合热处理, 以及淬火冷却新技术, 第12章介绍计算机和机器人在热处理中的应用。希望这本书对热处理科技和生产人员有所裨益, 对改进我国热处理工艺现状和开发热处理新技术能起到积极作用。此书也可作为大专院校金属热处理专业在新技术新工艺知识方面的补充教材。

本书第1章的执笔人是国防科技大学张华及长沙交通学院熊剑, 第2、3、6、7章是熊剑, 第4章是熊剑和长沙铁道学院陈南敬, 第5章是湘潭大学周善云, 第8章是长沙交通学院乔明俊, 第9章和附录是湖南省机械研究所赵克定, 第10和12章是长沙交通学院杨瑾珪第11章是陈南敬。由熊剑担任本书主编, 张华教授主审。参加审阅的还有国防科技大学赵清海、张书诚、张家春三位副教授。在编写过程中得到了上述院校有关领导和图书馆的支持, 在此一并致以谢意。

目 录

1 国外热处理新技术发展概况	1
1.1 热处理技术发展的方向.....	1
1.1.1 降低热处理能耗.....	1
1.1.2 热处理工艺自动化——计算机和机器人的引入.....	4
1.1.3 发展多参数热处理和复合热处理.....	6
1.1.4 采用新的加热源和新的加热方式.....	14
1.1.5 发展离子热处理和涂覆超硬化合物的表面改质技术.....	19
1.1.6 使用新的淬火介质和改进淬火方法.....	23
1.2 热处理技术今后的进展与预测.....	24
参考文献	27
2 高能量密度表面热处理	30
2.1 概述.....	30
2.2 激光热处理.....	31
2.2.1 激光的原理与特性.....	31
2.2.2 激光热处理装置.....	33
2.2.3 激光淬火.....	41
2.2.4 其他应用领域.....	59
2.2.5 激光热处理的适用性与质量管理.....	62
2.2.6 激光热处理的发展动向.....	63
2.3 电子束热处理.....	65
2.3.1 电子束热处理的设备与工作原理.....	65
2.3.2 电子束表面淬火方法与工艺控制.....	68
2.3.3 与激光淬火、高频淬火的比较.....	72
2.3.4 电子束表面淬火的特点与存在的问题.....	75
2.3.5 电子束热处理的应用实例.....	78
2.4 高频电阻感应加热淬火.....	81
2.5 钨极惰性气体保护电弧 (TIG) 和等离子转移弧 (PTA) 焊炬加热处理	83
2.6 太阳能热处理.....	88
2.7 高频脉冲感应加热.....	92

参考文献	95
3 超硬化合物表面涂覆处理	98
3.1 概述	98
3.1.1 与其他表面处理方法的比较	98
3.1.2 涂覆材料及其与基体的适应性	101
3.1.3 覆膜与基体的粘着性	101
3.2 CVD处理	111
3.2.1 原理与设备	111
3.2.2 CVD处理后材料的特性	114
3.2.3 CVD处理应注意的问题	120
3.2.4 中温CVD (MT-CVD)	123
3.2.5 工具钢用CVD法涂覆TiC	128
3.2.6 CVD处理的效果及应用的局限性	131
3.2.7 CVD处理今后发展动向	137
3.3 PVD处理	139
3.3.1 真空蒸镀	139
3.3.2 真空溅射法	142
3.3.3 离子镀	152
3.3.4 PVD处理应用 举例	160
3.3.5 PVD法与CVD法的 比较	164
3.3.6 PVD处理的今后动向	165
3.4 TD处理 (熔盐浸镀法)	168
3.4.1 处理方法	169
3.4.2 影响涂层厚度的因素	170
3.4.3 碳化物层的性质	170
3.4.4 涂层的各项性能	172
3.4.5 TD处理的应用	177
3.4.6 TD与PVD、CVD的比较	178
参考文献	181
4 离子轰击热处理	183
4.1 概述	183
4.2 离子氮化	187
4.2.1 离子氮化装置	187

4.2.2	离子氮化机理	189
4.2.3	各工艺参数对渗层组织的影响	192
4.2.4	钢在离子氮化后的性能	198
4.2.5	离子氮化的特点及与其他氮化方法的比较	201
4.2.6	离子氮化应用实例	206
4.3	离子渗碳	206
4.3.1	离子渗碳的基本原理	206
4.3.2	离子渗碳设备	208
4.3.3	各工艺参数及材料种类对渗碳结果的影响	208
4.3.4	离子渗碳的特点及与其他渗碳方法的比较	215
4.4	离子渗金属及渗硅、渗硼	219
4.4.1	离子渗钛及渗其他金属	219
4.4.2	离子渗硅	221
4.4.3	离子渗硼	222
4.5	离子多元共渗	223
4.5.1	离子碳氮共渗	223
4.5.2	离子硫氮共渗	224
4.5.3	离子碳氮硫共渗	226
参考文献		227
5	离子注入表面强化处理	229
5.1	概述	229
5.2	离子注入原理	231
5.2.1	离子注入射程和浓度分布	231
5.2.2	沟道效应与辐射损伤	241
5.3	离子注入设备简介	244
5.3.1	离子源	245
5.3.2	离子注入机的其他系统	246
5.3.3	国内外离子注入机类型	249
5.4	离子注入参数的测量简介	249
5.5	离子注入技术的应用	254
5.5.1	注入冶金学	254
5.5.2	金属材料表面强化处理	261
5.6	离子注入工艺与设备的发展	285

5.6.1	离子束混合注入——离子束轰击扩散法	285
5.6.2	离子注入设备的发展	287
参考文献		287
6	流动粒子炉中的热处理	289
6.1	流动粒子炉的结构	289
6.2	流态床热处理特性	292
6.2.1	流态粒子	292
6.2.2	流态化速度与气体流量	294
6.2.3	流态床的传热特性	297
6.2.4	流态床热处理的优点	299
6.3	带保护层的氮基气氛流态床热处理	300
6.3.1	流态床与外界空气之间的相互作用	301
6.3.2	保护层	303
6.3.3	碳势和氮势的均匀性	303
6.3.4	碳势和氮势的稳定性	303
6.3.5	气氛的控制	305
6.4	流动粒子炉中的化学热处理	307
6.4.1	渗碳	307
6.4.2	碳氮共渗	310
6.4.3	氮化和氮碳共渗	322
6.4.4	氮化+氧化及氧氮化处理	328
6.4.5	渗铬和渗硼	329
6.5	流动粒子炉中的其他热处理	332
6.5.1	工具钢流态床热处理	332
6.5.2	流态床等温淬火	334
6.5.3	锉刀的带保护层流态床热处理	336
6.5.4	在流动粒子炉中进行烧结的可能性	336
6.6	流动粒子炉中的脉冲流态化热处理	338
6.6.1	脉冲流态化技术的原理	339
6.6.2	脉冲流态化热处理的经济效果	340
6.7	连续式流动粒子炉热处理	344
6.7.1	冲压件的连续淬火	344
6.7.2	齿轮的连续式流态床渗碳	346

6.7.3 刨煤机刀片导板的连续等温淬火	348
参考文献	349
7 真空热处理	350
7.1 真空热处理炉	352
7.1.1 真空热处理炉的型式	352
7.1.2 真空热处理炉的连续化	353
7.1.3 可实现多种方式冷却的真空热处理炉	358
7.2 真空热处理的加热和冷却技术	360
7.2.1 真空加热技术	360
7.2.2 真空冷却技术	363
7.3 真空化学热处理及真空钎焊	393
7.3.1 真空渗碳	393
7.3.2 真空碳氮共渗	411
7.3.3 真空钎焊	412
7.4 真空热处理尚待解决的问题	414
7.4.1 真空热处理的温度	414
7.4.2 真空热处理的真空度	414
7.4.3 加热器的材料	414
7.4.4 隔热	416
7.4.5 测温	416
7.5 高温等压 (HIP) 处理及其应用	417
7.5.1 HIP处理装置	418
7.5.2 HIP处理的应用	420
参考文献	424
8 形变热处理	426
8.1 概述	426
8.1.1 形变热处理按工艺分类	426
8.1.2 形变热处理按材料分类	427
8.2 形变过程的数学模型	427
8.2.1 双相合金的数学模型	427
8.2.2 形变过程显微组织的基本模型	435
8.3 形变热处理技术	442
8.3.1 多次表面形变热处理对钢材机械性能的影响	442

8.3.2	形变热处理对低合金钢性能的影响	446
8.3.3	形变速度对合金钢性能的影响	449
8.3.4	形变热处理对高锰钢性能的影响	452
8.3.5	原始组织和形变热处理规范对X12M钢机械性能的影响	457
8.3.6	热形变速度对耐热合金 (XH62BMKTIO) 性能与组织的影响	460
8.3.7	时效合金的形变热处理	465
8.3.8	形变热处理提高镁基合金的抗蠕变强度	467
8.3.9	形变热处理对铜-铬合金强化机理的影响	473
参考文献		478
9	复合热处理	480
9.1	概述	480
9.2	复合热处理的分类	481
9.3	复合热处理工艺	483
9.3.1	与氮化有关的复合热处理	483
9.3.2	与渗碳和碳氮共渗有关的复合热处理	502
9.3.3	与渗硫有关的复合热处理	507
9.3.4	与烧结工件有关的复合热处理	511
9.3.5	前后处理工序相结合的复合热处理	514
9.3.6	电镀与热处理复合工艺	516
9.3.7	多元共渗	519
9.4	复合热处理的应用举例	526
9.4.1	调质类工件的复合热处理	526
9.4.2	渗碳类工件的复合热处理	529
9.4.3	工模具的复合热处理	531
9.4.4	氮化加淬火复合热处理的应用	533
参考文献		537
10	淬火冷却新技术	538
10.1	淬火介质的研究	538
10.1.1	评价淬火冷却过程的新观点	538
10.1.2	淬火介质冷却性能的评定方法	543
10.1.3	淬火冷却试验测定冷却曲线	545

10.1.4	淬火冷却试验测定再湿润率	549
10.1.5	喷射冷却试验	553
10.1.6	淬火介质性能的改进	555
10.1.7	聚合物水溶液新型淬火介质	559
10.1.8	亚硫酸盐废碱液新型淬火介质	570
10.1.9	杂质对聚合物淬火介质性能的影响	572
10.1.10	淬火介质的腐蚀问题	575
10.2	淬火新方法	577
10.2.1	水-空气混合剂冷却	578
10.2.2	强烈淬火法	578
10.2.3	沸腾水淬火	582
10.2.4	热油淬火	583
10.2.5	超冷处理	584
10.2.6	流态床淬火	586
参考文献		590
11	热处理的节能	591
11.1	概述	591
11.2	CALECIF系统	592
11.2.1	为CALECIF系统确定工艺过程	594
11.2.2	为CALECIF系统选择热处理装置	596
11.2.3	装炉工件的特性	596
11.3	可节能的热处理工艺	598
11.3.1	工艺参数	598
11.3.2	工艺操作	599
11.4	热处理节能设备	603
11.4.1	热处理炉的改进	603
11.4.2	废热利用设备	604
11.4.3	采用气氛监控仪	606
11.5	热处理节能材料	607
11.5.1	快速渗碳钢	607
11.5.2	快速氮化钢	608
11.5.3	锻造淬火用非调质钢	608
11.5.4	火焰淬火用钢	609

11.5.5 等温淬火钢	609
11.6 热处理生产管理的改进和微机应用	610
参考文献	614
12 计算机及机器人在热处理中的应用	616
12.1 计算机在热处理中的应用概况 (CAD、CAM和CAMS)	616
12.2 用于热处理的计算机系统	617
12.2.1 计算机分类	617
12.2.2 计算机的构成	618
12.3 用计算机进行热处理的有关计算	620
12.3.1 化学热处理过程的热力学计算	620
12.3.2 预测表面渗碳淬火后的组织和硬度分布	626
12.4 用计算机控制热处理工艺过程	634
12.4.1 热处理工艺的基本因素	634
12.4.2 热处理工艺的控制	635
12.5 热处理生产管理计算机化	657
12.5.1 热处理事务的办公自动化 (OA)	658
12.5.2 热处理的物料运送	659
12.5.3 工艺控制和质量管理	659
12.5.4 设备的维护	659
12.6 热处理数学模型的实例	660
12.7 机器人在热处理中的应用	667
12.7.1 工业机器人的种类	667
12.7.2 机器人热处理及其前景	668
12.7.3 Parb FA型机器人	670
参考文献	675

1 国外热处理新技术发展概况

1.1 热处理技术发展的方向

关于热处理技术的发展,全面说来,应包括热处理基础理论,热处理设备,热处理新技术,热处理全面质量管理等几个重要方面。本书主要介绍热处理新技术的发展。近十年来,国外热处理新技术发展的方向,可归纳为以下几个方面:

(1) 尽可能地降低热处理能耗。

(2) 将计算机和机器人引入热处理,向生产自动化发展。

(3) 由双参数热处理和单一热处理改变为多参数热处理和复合热处理。

(4) 采用新的加热源和新的加热方式。

(5) 发展离子热处理和涂覆超硬化合物的表面改质新技术。

(6) 使用新的淬火介质和改进淬火方法。

1.1.1 降低热处理能耗

在先进工业国家,热处理成本的约25~40%是能源成本。随着生产的发展热处理能耗也大幅度增加。对于那些能源紧缺或大部能源靠进口的国家(如日本),节能成为最大的技术目标,对热处理节能的研究也最活跃^[1,2]。

关于热处理节能对策,大致有以下四个主要方面:(1)改进热处理工艺和改换热处理方法;(2)改进热处理设备;(3)采用节能新材料;(4)改进生产组织和技术管理。在第11章中对以上内容作了专题介绍。

最近的一项节能技术重要成果,是波兰的巴雷科斯基和萨莱用系统方法对热处理节能进行的综合研究。在第5届国际材料热处理大会上(1986年10月)提出了计算热处理炉中能源消耗的国际计算机系统(CALECIF)^[3]。该系统可用于热处理工厂和生

产热处理设备的工厂。他们还研究了工件形状对热处理能耗的影响，以便利用该系统计算各种形状的工件在热处理中的能耗^[4]。

另外，在文献〔1〕，〔5〕中，用 $H_E = f_1(C_M, C_A, F, W, T, t, P)$ 来表示热处理效果(H_E)与各因素的关系。 C_M 为材料的成分； C_A 为保护气氛的成分； T 为温度； F 为工件的形状， W 为工件的质量， t 为时间， P 为压力或应力。从热处理节能的角度看，可将 C_A 、 T 、 t 、 P 的设定与控制以及 C_M (材料的变换)视为热处理软件，将各种热处理设备装置、仪表及控制系统视为热处理硬件。在实际生产中，往往不是单独地运用某一项节能对策，而是在创立最优软件和硬件的基础上，进行全面的生 产技术管理，实现热处理软件和硬件的最佳组合和综合运用，这是热处理节能的最有效的途径。所谓全面管理系统，不仅是对热处理软件和硬件而言，而且还包括直至工件流通管理的各项内容，使用有效的计算机的全面管理系统，除节能效果显著外，还可使热处理成为柔性的生产过程。

关于热处理节能材料，在第11章中叙述了锻造淬火用非调质钢，这里介绍一些可完全省去调质热处理的非调质钢的情况。

众所周知，调质处理是耗能最多的热处理工序之一，每年用于中碳钢调质的能耗就相当可观。利用非调质钢的目的即在于省去调质热处理，使材料在热锻或热轧状态即能达到调质钢经调质处理后所具有的性能，从而取代调质钢，获得显著的节能效果。几种非调质钢的基本成分及与调质碳钢工艺流程的比较见表1-1^[6]。

非调质钢在热锻或热轧后空冷或进行简单的控制冷却(如吹风冷却)，其显微组织由铁素体和层片状珠光体组成。钒、铌、钛等碳化物形成元素在轧、锻后的冷却过程中以碳化物形式微细地析出，电镜照片上可看到在铁素体中存在直径 $0.05\mu\text{m}$ 以下的析出物。析出硬化作用使非调质钢的强度不低于或高于调质钢调质处理后的强度，碳化物析出获得的屈服强度增量见图1-1。

表 1-1 非调质钢的基本成分与工艺流程

类 别	基本成分	工 艺 流 程
热 锻 型 非调质钢	碳钢($C > 0.3\%$) + V	轧材 → 热锻 → 调质 → 切削加工 → 工件 ↑ ↑
直接切削型 非调质钢	碳钢($C > 0.3\%$) + V 或 Nb	轧材 → 调质 → 切削加工 → 工件 ↑ ↑
螺栓线材用 非调质钢	碳钢($C < 0.2\%$) + V, Nb, Ti 的一种	轧材 → 螺栓成形 → 调质 → 工件 ↑ ↑

注：虚线是碳素调质钢的工艺流程；实线是非调质钢的工艺流程。

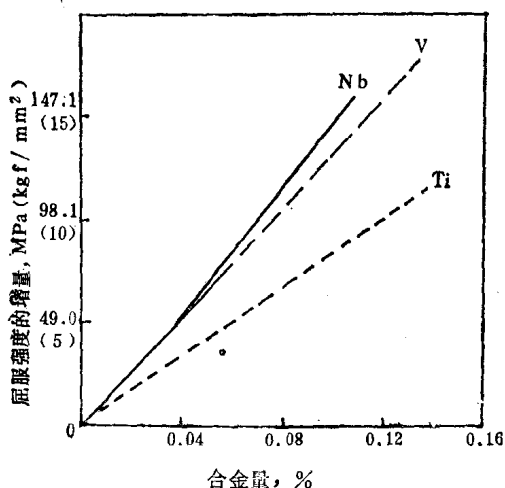


图1-1 碳化物的析出使屈服强度增加

非调质钢的塑性和韧性比调质钢稍差。不过，许多锻造成形的工件按其用途主要要求强度性能，往往并不需要像调质钢调质后那样高的塑性和韧性^[7,8]。比如曲轴、连杆等重要工件便不是由一次或很少几次冲击引起失效，而是在小能量多次冲击条件下

表 1-2 非调质钢应用实例

类 别	应 用 实 例
热 锻 型	前轮轮毂，转向节，转向节轴，连杆，连杆盖，曲轴，螺母，平衡锤等
直接切削型	活塞杆，拉杆，转向离合器，减震器，导轨托架，销子，前桥，U形螺栓等

工作的，非调质钢在这类工件上的应用非常成功。表1-2列出了非调质钢的应用实例^[9,10]。

以前，总认为结构钢要在淬火回火或调质状态使用，但非调质钢出现后便打破了这一概念。目前，非调质钢多用于取代碳素调质钢。为进一步扩大非调质钢的应用范围，对高韧性非调质钢的研究也很活跃。以后的趋势是更进一步用非调质钢来取代调质合金钢^[11]。

开发与应用非调质钢，是80年代热处理节能技术的一项重大进展。还应指出，应用非调质钢不仅有着巨大的节能效益，而且还节省了与调质工序有关的设备、材料、人力消耗；避免了因调质处理的两次加热冷却带来的变形、开裂、硬度不均匀等热处理缺陷，对提高产品质量十分有利；采用非调质钢便于在线操作，提高生产率；也使制定生产计划变得容易，降低成本，等等。

1.1.2 热处理工艺自动化——计算机和机器人的引入

美国林德伯格 (Lindberg) 公司在1984年评述说^[12]：“今后热处理技术最紧迫的课题将不是冶金学的，而是电子学方面的内容。特别是，具有集成电路的微处理机，已给予热处理界以巨大的冲击，而我们只不过刚刚看到它的真正潜力。这个潜力并不在于就目前技术水平而言具有充分可靠性和高能力的个别装置，而在于把各个装置连结起来形成集成信息网”。

计算机与仪表之间，具有双向传递信息的功能。利用计算机监控热处理过程的实施状况，控制精度高和再现性好，有利于提高产品质量且质量稳定。

在气体渗碳和真空渗碳^[13~15]，高频淬火^[16]，模具热处理^[17]及其他热处理中，广泛应用计算机对处理过程进行多参数（包括温度、时间、压力、气氛或碳势、工件位置及工件移动或转动速度、装料和装卸等等）的控制。

计算机控制要先通过实验确立数学模型，然后据此编制程序。化学热处理的影响因素较多，因而数学模型的确立也较困难。近年来这方面的研究较活跃，在第4届国际材料热处理大会上关于用数学模型和计算机控制的论文就有6篇。本书第12章中介绍了渗碳过程的数学模型。

现在，计算机不仅用于热处理工艺参数的控制，而且还用于整套热处理设备、生产线以至整个热处理车间的自动控制和生产管理。日本一家工厂的热处理车间，有连续渗碳炉、周期渗碳炉、连续软氮化炉等37台设备，从送料到检验完毕，全由计算机控制。每班只要三人操作，一人负责全部生产、技术、质量管理，一人现场巡回，一人负责质量检验。

归纳起来，电子计算机在热处理中的应用包括以下几个方面：

（1）生产过程的自动控制与质量管理。关于自动控制已如上述。另外，利用计算机在自动检验机上对热处理后的工件作全数质量检验（不是抽检），更可保证质量。

（2）热处理生产管理。从接到热处理委托单到产品检验合格制成交货单，都可实施计算机管理。还可纪录并存储运行过程中的各种数据。如计算消耗、工资、产值、成本、利润及进行经济核算、等等。

（3）计算机辅助设计。用计算机进行热处理炉、热处理车间设计中的各项计算。

（4）预测工件热处理后的性能。在计算机中贮存多种、大量的材料成分、工艺方法、热处理后所获性能的数据与曲线，建立数据库，可用来预测某种材料经某种热处理后的性能。

（5）设备的保养。目的是使设备保持在良好的工作状态。

所使用的电子计算机具有检测温度敏感元件的老化、预知加热器断线、预知故障及出现故障时发出警报并处理故障等功能。

关于机器人在热处理中的应用,在第12章中也作了较详细的介绍。由于热处理的操作环境差,更由于热处理自动化、柔性化、多样化的发展,应用机器人是大势所趋^[18]。

至于热处理自动化的发展,从1984到1990年的趋势是逐渐增长。但对增长的程度有不同意见,一种认为将增长3倍,另一种认为只增长30%^[19]。还有一种意见认为,增长的程度将因热处理的类型不同而异。到1990年,在控制方面整个生产过程将自动化。在大量生产条件下,装卸料将使用机器人。总之,对于大规模生产和连续生产而言,自动化程度将趋向提高和完善。不过,从安全角度看,还需要一定的人工控制。

专业热处理工厂一般设置中央计算机,用来监视分布于各处的微处理机,微处理机调节各工艺参数,进行复杂数据的登录与分析及对过程的控制。专业厂作为热处理中心,要能进行多种产品,多种工艺的生产,即柔性化(flexibility)生产。单一产品连续大量生产易于自动化,可做到整个处理过程中无需人的操作,而对于同一天内要处理多种产品的设备来说,常需要人的操作和高价计算机的控制,因此比较难以自动化。

1.1.3 发展多参数热处理和复合热处理

我们熟知的传统热处理,就主要控制参数而言,多为常压下的温度-时间二参数热处理(如普通淬火、退火等),或温度-时间-成分的三参数热处理(如普通渗碳、氮化等)。就工艺方式而言,多为单一的热处理(如高频淬火就只是高频淬火,氮化就只是氮化等),这样,免不了使热处理的效果单一化^[20,21]。

近十年来及今后热处理技术发展的明显趋向是:(1)在传统热处理的控制参数的基础上再附加其他控制参数,成为新型的多参数热处理。(2)由单一热处理方式变为复合热处理。

1.1.3.1 真空热处理——调压热处理之一

这是一种附加压力的多参数热处理。“压力”是指环境压力