

金属热处理 工艺方法 700种

金荣植 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

金属热处理工艺方法 700 种

金荣植 编著



机械工业出版社

本书系统地介绍了 700 多种金属热处理工艺方法。其主要内容包括：金属的退火和正火、金属的淬火、金属的回火和时效、金属的表面淬火、金属的化学热处理、金属的气相沉积、金属的形变热处理和金属的复合热处理。本书全面贯彻了现行的热处理技术标准及相关的金属材料标准，既包含了生产实践中广泛应用的成熟工艺方法，又兼顾了近年来发展的新工艺方法。本书内容覆盖面广，简明扼要，具有系统性、实用性、新颖性。

本书可供热处理工程技术人员和工人使用，也可供从事机械零件设计、制造的工程技术人员，以及相关专业的在校师生和科研人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

金属热处理工艺方法 700 种/金荣植编著. —北京：机械工业出版社，2018.7

ISBN 978-7-111-60733-5

I. ①金… II. ①金… III. ①热处理-技术培训 IV. ①TG15

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 194018 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：陈保华 责任编辑：陈保华 贺 怡

责任校对：刘志文 封面设计：马精明

责任印制：常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2019 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·28 印张·602 千字

0001—2500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-60733-5

定价：89.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88361066

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-68326294

机工官博：weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网：www.golden-book.com

策划编辑：010-88379734

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

前言

热处理工艺在机械制造中占有十分重要的地位,既是制造业的基础技术,又是机械制造的核心技术,其涉及机械、电子、汽车、拖拉机、摩托车、航空航天、军工、高铁、轨道交通、船舶、化工、冶金、家电、建材等各个行业,应用范围十分广泛。近 20 年来我国热处理行业得到快速发展,伴随先进热处理装备的引进,大量先进的热处理工艺也得到了应用,在一定程度上满足了金属零部件的要求。但与先进国家相比,我国的热处理技术还有较大的差距,技术整体处于落后状态。主要表现在热处理后的产品寿命偏低,导致钢材损耗巨大,并且热处理能耗较大、成本较高,难以满足高端机械装备的要求,使我国机械装备处于弱势地位。这已经引起了国家有关部门的高度重视,国家组织了科研院所、高校及企业近 300 位专家编写了《中国热处理与表层改性技术路线图》,指明了未来热处理的发展方向。

雷廷权老师与傅家骥老师于 1982 年编写出版了《热处理工艺方法 300 种》一书。该书于 1998 年进行了修订,出版了《金属热处理工艺方法 500 种》。这两本书深受读者欢迎,共发行了近 10 万册。《金属热处理工艺方法 500 种》一书出版至今已近 20 年了,这期间伴随国民经济的快速发展,我国热处理工艺装备水平不断提升,先进热处理工艺与高效优质材料得到了广泛应用,热处理标准化体系日趋完善。为适应广大读者的需求,重新编写了这本《金属热处理工艺方法 700 种》。

本书全面贯彻了现行的热处理技术标准及相关的金属材料标准,既包含了生产实践中广泛应用的成熟工艺方法,又兼顾了近年来发展的新工艺方法。本书收集并精选了大量的气相沉积工艺方法(如化学气相沉积、物理气相沉积等)、表面相变热处理工艺方法(如磨削加热淬火、高能束加热表面淬火等)、复合热处理工艺方法[如化学热处理或气相沉积+化学热处理复合、化学热处理+气相沉积复合、离子注入+气相沉积复合、表面形变强化+化学热处理复合、化学热处理+表面形变复合、冷形变(或形变热处理)+化学热处理复合等]及新的热处理工艺方法(如数字化淬火冷却控制技术、模压感应淬火、精密控制渗碳、精密气体渗氮、微波渗碳、活性屏离子渗氮、纳米化渗氮、直生式气氛渗碳、太阳能合金化、激光稀土合金化等)。本书以条块形式进行介绍,内容全面、新颖,理论与实际相结合,实用性、针对性强。同时,结合当前热处理生产需要,重点介绍了提高热处理质量、延长工件寿命、节能减排等方面的工艺方法。

本书的编写目的是为热处理工程技术人员、工人,从事机械零件设计、制造的工程技术人员,以及相关专业的在校师生和科研人员提供一本全面了解金属热处理工艺方法的技术资料。

在本书的编写过程中,作者参阅并引用了一些有关方面的专著和文章,在此谨向这些作者表示衷心感谢!

由于作者水平和取材有限,书中难免存在不足之处,恳求读者和专家批评指正。

金荣植

目 录

前 言

第 1 章 金属的退火和正火 1

1. 完全退火	1
2. 亚共析钢钢锭的完全退火	2
3. 亚共析钢热轧钢材的完全退火	2
4. 冷拉钢材料坯的完全退火	3
5. 不完全退火	3
6. 过共析钢及莱氏体钢钢锭的不完全退火	4
7. 过共析钢热轧钢材的不完全退火	4
8. 亚共析钢冷拉坯料的不完全退火	4
9. 扩散退火 (均匀化退火)	5
10. 低温退火	5
11. 钢锭的低温退火	6
12. 热锻轧钢材的低温退火	6
13. 中间退火 (软化退火)	6
14. 冷变形加工时的中间退火	7
15. 热锻轧钢材的中间退火	7
16. 再结晶退火	7
17. 低碳钢的再结晶退火	8
18. 不锈钢的再结晶退火	8
19. 铝合金及铜合金的再结晶退火	8
20. 去应力退火	9
21. 热锻轧材及工件的去应力退火	9
22. 冷变形钢材的去应力退火	10
23. 奥氏体不锈钢的去应力退火	10
24. 铸铁的去应力退火	11
25. 软磁材料的去应力退火	11
26. 非铁金属和耐热合金的去应力退火	11
27. 预防白点退火	11
28. 低碳低合金钢的预防白点退火	12
29. 中合金钢的预防白点退火	12
30. 高合金钢的预防白点退火	13
31. 大型锻件的预防白点退火	13
32. 晶粒粗化退火	13
33. 等温退火	14

34. 球化退火	15
35. 低温球化退火	15
36. 一次球化退火	16
37. 等温球化退火	17
38. 周期 (循环) 球化退火	18
39. 正火球化退火	19
40. 高速钢快速球化退火	20
41. Cr12 钢的高温快速预冷球化退火	21
42. T10A 钢的快速球化退火	21
43. GCr15 钢的快速球化退火	22
44. 保护气氛退火	23
45. 光亮退火	23
46. 快速连续光亮退火	24
47. 盐浴退火	24
48. 装箱退火	25
49. 真空退火	25
50. 真空-保护气氛退火	26
51. 局部退火	27
52. 两次处理快速退火	27
53. 可锻化退火	28
54. 快速可锻化退火	28
55. 球墨铸铁的低温石墨化退火	29
56. 球墨铸铁的高温石墨化退火	29
57. 球墨铸铁的高-低温石墨化退火	30
58. 球状石墨化退火	30
59. 低温石墨化退火	31
60. 锻 (轧) 热退火	31
61. 锻热等温退火	31
62. 铸造余热退火	32
63. 感应加热退火	33
64. 亚温退火	34
65. 常规正火	34
66. 亚温正火	35
67. 等温正火	36
68. 高温正火	37

69. 水冷正火	37	108. 快速加热淬火	63
70. 风冷正火	37	109. 可控气氛加热淬火	64
71. 喷雾正火	37	110. 氮基气氛洁净淬火	65
72. 多次正火	38	111. 滴注式保护气氛光亮淬火	65
73. 消除带状组织的正火	38	112. 涂层淬火	66
74. 球墨铸铁高温完全奥氏体化正火 ...	39	113. 包装淬火	66
75. 球墨铸铁中温部分奥氏体化正火 ...	40	114. 硼酸保护光亮淬火	67
76. 球墨铸铁快速正火	40	115. 真空淬火	67
77. 铸造余热正火	41	116. 真空油冷淬火	69
78. 球墨铸铁余热正火	41	117. 真空高压气体淬火	69
79. 感应穿透加热正火	41	118. 真空硝酸盐淬火	71
80. 球墨铸铁“零保温”正火、 不回火	42	119. 循环加热淬火	71
81. 锻热正火	43	120. 流态床加热淬火	72
参考文献	44	121. 流态床淬火冷却	73
第2章 金属的淬火	46	122. 脉冲淬火	73
82. 完全淬火	46	123. 感应穿透加热淬火	73
83. 不完全淬火	49	124. 渗碳后感应穿透加热淬火	74
84. 中碳钢的亚温淬火	50	125. 通电加热淬火	75
85. 不锈钢的亚温淬火	51	126. 盐浴加热淬火	75
86. 中温渗碳亚温淬火	52	127. 单液淬火	76
87. 低碳钢双相区淬火	53	128. 风冷淬火	78
88. 低碳钢双相区二次淬火	53	129. 有机聚合物水溶液淬火	78
89. 灰铸铁的淬火	54	130. 热浴淬火	79
90. 球墨铸铁的淬火	54	131. 动液淬火	80
91. 高速钢的部分淬火	55	132. 喷液淬火	81
92. 高速钢的低温淬火	55	133. 喷雾淬火	82
93. 余热淬火	55	134. 双液淬火	82
94. 锻热淬火	56	135. 三液淬火	83
95. 铸热淬火	57	136. 大型锻模水-气混合物淬火	83
96. 直接淬火	57	137. 大锻件水-气混合物淬火	84
97. 二次(重新)加热淬火	58	138. 数字化淬火冷却控制技术 (ATQ)	84
98. 两次淬火	58	139. 单槽双液淬火	85
99. 不锈钢的二次淬火	59	140. 间断淬火	85
100. 正火+淬火	59	141. 磁场冷却淬火	86
101. 高温回火+淬火	60	142. 磁场等温淬火	86
102. 预热淬火	60	143. 超声波淬火	87
103. 预冷淬火(延迟淬火)	61	144. 浅冷淬火	87
104. 局部淬火	61	145. 超低温淬火	88
105. 薄层淬火	62	146. 冷处理	88
106. 短时加热淬火	62	147. 液氮气体深冷处理	89
107. “零保温”淬火	62	148. 模具钢的深冷处理	89

149. 高速钢刀具的深冷处理	90
150. 轴承钢的深冷处理	91
151. 铸造铝合金的冷处理	91
152. 磁场深冷处理	92
153. 马氏体分级淬火	92
154. 马氏体等温淬火	94
155. 等温分级淬火	94
156. 真空气体分级淬火	95
157. 贝氏体等温淬火	96
158. 灰铸铁的贝氏体等温淬火	97
159. 球墨铸铁的贝氏体等温淬火	98
160. 分级等温淬火	98
161. 二次贝氏体等温淬火	99
162. 珠光体等温淬火	100
163. 预冷等温淬火	100
164. 预淬等温淬火	100
165. 微畸变淬火	101
166. 无畸变淬火	102
167. 碳化物微细化淬火	102
168. 碳化物微细化处理	103
169. 晶粒超细化淬火	103
170. 晶粒超细化循环淬火	103
171. 晶粒超细化的室温形变淬火	104
172. 晶粒超细化的高温形变淬火	105
173. GCr15 钢的双细化淬火	105
174. 低碳钢的强烈淬火	106
175. 中碳钢的高温淬火	107
176. 超高温淬火	108
177. 过共析钢高温淬火	109
178. 渗碳件冷处理	110
179. 自热回火淬火	110
180. 马氏体等温淬火+ 马氏体分级 淬火	111
181. 渗碳后高压气冷淬火	111
182. 反淬火	112
183. 预应力淬火	112
184. 修复淬火 (缩孔淬火)	113
185. 固溶化淬火 (固溶处理)	113
186. 高温固溶超细化处理	114
187. 水韧处理	114
188. 提高初始硬度的水韧处理	114
189. 铸造余热水韧处理	115

190. 水韧+时效处理	115
191. 亚温淬火	116
192. 马氏体不锈钢的亚温淬火	116
193. 加压淬火 (模压淬火)	117
194. 光亮淬火	117
195. 自冷淬火	118
196. 强烈淬火 (IQ)	118
197. 太阳能加热淬火	119
198. 磨削加热淬火	120
参考文献	120

第3章 金属的回火和时效

199. 低温回火	124
200. 中温回火	125
201. 高温回火	126
202. 调质处理	127
203. 钢棒的感应加热调质处理	128
204. 钢管的感应加热调质处理	129
205. 球墨铸铁的调质处理	130
206. 调质球化	130
207. 冷挤压用钢的调质球化	130
208. “零保温”调质	131
209. 高速钢的低高温回火	131
210. 修复回火	132
211. 带温回火	132
212. 通电加热回火	132
213. 快速回火	133
214. 淬火钢的高温快速回火	134
215. 渗碳二次硬化处理	135
216. 多次回火	136
217. 淬回火	137
218. 炉膛余热回火	137
219. 自热回火	138
220. 真空回火	138
221. 感应加热回火	139
222. 去氢回火	140
223. 去应力回火	140
224. 加压回火 (压力回火)	141
225. 局部回火	141
226. 自然稳定化处理	142
227. 回归	142
228. 人工时效	142
229. 分级时效	143

230. 两次时效	143	270. 高速钢的激光淬火	171
231. 振动时效 (VSR)	144	271. 结构钢的激光淬火	172
232. 频谱谐波振动时效	144	272. 有色金属的激光淬火	172
233. 超声波时效	146	273. 激光表面熔凝 (LSM)	172
234. 磁致伸缩处理	146	274. 激光表面非晶化 (LSG)	173
235. 磁场回火	147	275. 电子束表面强化	173
236. 铸铁的稳定化处理	148	276. 电子束淬火	174
237. 合金钢的稳定化时效	148	277. 电子束表面非晶化	175
238. 奥氏体稳定化处理	149	278. 电子束表面熔凝	175
239. 奥氏体调节处理	149	279. 电火花表面强化及合金化	176
参考文献	149	280. 太阳能加热表面淬火	177
第 4 章 金属的表面淬火	151	281. 离子束淬火	178
240. 感应淬火	151	参考文献	179
241. 高频感应淬火	152	第 5 章 金属的化学热处理	181
242. 高频感应预正火淬火	153	282. 渗碳	182
243. 高频感应无氧化淬火	153	283. 固体渗碳	182
244. 渗碳后感应淬火	153	284. 分级固体渗碳	183
245. 渗氮后感应淬火	154	285. 高温固体渗碳	183
246. 低淬透性钢的感应淬火	155	286. 固体气体渗碳	184
247. 高速钢的感应淬火	155	287. 稀土固体渗碳	185
248. 不锈钢的感应淬火	156	288. 膏剂渗碳	185
249. 感应加热浴炉处理	156	289. 盐浴渗碳	186
250. 中频感应淬火	156	290. 低氰盐浴渗碳	187
251. 工频感应淬火	157	291. 原料无氰盐浴渗碳	187
252. 感应淬火时的加热方法	158	292. 无毒盐浴渗碳	187
253. 喷液及浸液表面淬火	158	293. 液体放电渗碳	188
254. 埋油感应淬火	159	294. 气体渗碳	188
255. 埋水感应淬火	160	295. 滴注式气体渗碳	189
256. 大功率脉冲感应淬火	160	296. 分段气体渗碳	190
257. 超高频脉冲感应淬火	161	297. 高温可控气氛渗碳	191
258. 超音频感应淬火	162	298. 高温可控气氛循环渗碳	192
259. 双频感应淬火	162	299. 高频感应加热粉末 (或膏剂)	
260. 同步双频感应淬火 (SDF)	163	渗碳	192
261. 模压感应淬火	164	300. 高频感应加热气体渗碳	193
262. 混合加热表面淬火	165	301. 高频感应加热液体渗碳	193
263. 高频感应电阻加热淬火	165	302. 中频感应加热粉末渗碳	193
264. 火焰淬火	166	303. 中频感应加热气体渗碳	193
265. 接触电阻加热淬火	167	304. 天然气渗碳	194
266. 电解液淬火	168	305. 局部渗碳	195
267. 盐浴加热表面淬火	169	306. 二重渗碳	195
268. 激光表面强化	170	307. 真空渗碳	196
269. 激光淬火 (LTH)	170	308. 一段式真空渗碳	197

309. 脉冲式真空渗碳	197	349. 高频感应加热盐浴碳氮共渗	221
310. 摆动式真空渗碳	198	350. 高频感应加热液体碳氮共渗	221
311. 真空离子渗碳	198	351. 流态床高温碳氮共渗	221
312. 高温离子渗碳	199	352. 中温碳氮共渗	222
313. 脉冲式气体渗碳	200	353. 中温气体碳氮共渗	222
314. 流态床渗碳	201	354. 滴注通气式中温气体碳氮共渗 ..	223
315. 流态床高温渗碳	201	355. 滴注式中温气体碳氮共渗	224
316. 激光渗碳	201	356. 分段式中温气体碳氮共渗	224
317. 稀土催渗碳	202	357. 高浓度碳氮共渗	225
318. 连续炉稀土催渗碳	203	358. 真空中温碳氮共渗	225
319. 20Cr2Ni4A 钢的稀土渗碳直接 淬火	203	359. 无毒盐浴碳氮共渗	226
320. 稀土低温渗碳	204	360. 液相感应加热碳氮共渗	227
321. 稀土催渗高浓度气体渗碳	204	361. 低中温碳氮共渗	227
322. 碳化物弥散强化渗碳 (CD 渗碳)	205	362. 低温碳氮共渗	228
323. 高浓度渗碳	205	363. 低温气体碳氮共渗	228
324. 过饱和渗碳	206	364. 氨基气氛低温碳氮共渗	229
325. 离子轰击过饱和渗碳	206	365. 连续炉氨基气氛中温碳氮共渗 ..	230
326. 修复渗碳	207	366. 稀土碳氮共渗	230
327. 薄层渗碳	208	367. 铸铁的低温气体碳氮共渗	231
328. 深层渗碳	208	368. 低温液体碳氮共渗	231
329. 穿透渗碳	209	369. 低温无毒固体碳氮共渗	232
330. 中碳及高碳钢的渗碳	209	370. 快速低温固体碳氮共渗	232
331. 高速钢的低温渗碳	210	371. 离子碳氮共渗	233
332. 不锈钢的低温渗碳	210	372. 离子低温碳氮共渗	234
333. 不锈钢的高温渗碳	210	373. 稀土离子低温碳氮共渗	234
334. 微波渗碳	211	374. 加氧低温碳氮共渗	234
335. 工艺气体消耗近于零的渗碳法 ..	212	375. 真空加氧低温碳氮共渗	235
336. 直生式气氛渗碳	214	376. 低温短时碳氮共渗	235
337. 吸热式气氛渗碳	214	377. 低温薄层碳氮共渗	235
338. 氨基气氛渗碳	215	378. 机械助渗碳氮共渗	236
339. BH 催渗碳	216	379. 渗氮	236
340. 连续式渗碳炉 BH 催渗碳	216	380. 气体一段渗氮	237
341. 箱式多用炉 BH 催渗碳	216	381. 气体二段渗氮	239
342. 缓冲渗碳	217	382. 二段循环渗氮	239
343. 精密控制渗碳	218	383. 气体三段渗氮	240
344. 碳氮共渗	219	384. 短时渗氮	241
345. 高温分段气体碳氮共渗	219	385. 高温快速气体渗氮	241
346. 高温深层气体碳氮共渗	220	386. 不锈钢耐热钢渗氮	242
347. 高频感应加热气体碳氮共渗	220	387. 不锈钢的固溶渗氮	244
348. 高频感应加热膏剂碳氮共渗	221	388. 不锈钢的稀土离子催渗氮	244
		389. 深层可控离子渗氮	245
		390. 铸铁渗氮	246

391. 局部渗氮	246	433. 稀土催化氮碳共渗	271
392. 退氮处理	247	434. 合金化渗氮	271
393. 奥氏体渗氮	247	435. 稀土合金化氮碳共渗	271
394. 耐蚀渗氮	248	436. 稀土离子氮碳共渗	272
395. 纯氮渗氮	248	437. 低真空变压快速气体氮碳共渗	272
396. 氮氮混合气体渗氮	248	438. 增压快速气体氮碳共渗	273
397. 流态床渗氮	248	439. 连续炉气体氮碳共渗	273
398. 压力渗氮	249	440. 渗硼	274
399. 无毒盐浴渗氮	249	441. 低温固体渗硼	274
400. 离子渗氮	250	442. 粉末渗硼	275
401. 低温离子渗氮	251	443. 膏剂渗硼	276
402. 加压脉冲快速气体渗氮	251	444. 辉光放电膏剂渗硼	276
403. 氨气预处理离子渗氮	253	445. 深层膏剂渗硼	277
404. 快速深层离子渗氮	253	446. 离子渗硼	277
405. 热循环离子渗氮 (INTC)	254	447. 真空渗硼	277
406. 循环变温离子渗氮	254	448. 自保护膏剂渗硼	278
407. 真空脉冲渗氮	255	449. 盐浴渗硼	278
408. 洁净渗氮	256	450. 盐浴电解渗硼	279
409. 氯化铵催渗氮	256	451. 低温盐浴电解渗硼	280
410. 四氯化碳催渗氮	257	452. 稀土复合渗硼	280
411. 钛催化渗氮	257	453. 铸铁渗硼	280
412. 电解气相催化渗氮	257	454. 不锈钢渗硼	281
413. 高频感应加热渗氮	258	455. 辉光放电气体渗硼	281
414. 激光渗氮	259	456. 辉光放电膏剂渗硼	281
415. 激光预处理及渗氮	259	457. 液体稀土钒硼共渗	282
416. 活性屏离子渗氮 (ASPN)	259	458. 膏剂硼铝共渗	283
417. 低真空变压快速气体渗氮	260	459. 超厚共渗层硼铝共渗	283
418. 精密气体渗氮	261	460. 硼钛共渗	283
419. 固体渗氮	262	461. 硼碳氮三元共渗	284
420. 表面预氧化渗氮	263	462. 渗硼复合处理	284
421. 氧催化渗氮	263	463. 感应加热渗硼	285
422. 稀土催渗氮	264	464. 激光加热渗硼	285
423. 稀土催化离子渗氮	265	465. 稀土渗硼	286
424. 两次渗氮	266	466. 硼氮共渗	286
425. 氮碳共渗	266	467. 硼铝共渗	287
426. 真空氮碳共渗	266	468. 稀土硼铝共渗	287
427. 氯化铵催化气体氮碳共渗	267	469. 硼硅共渗	288
428. 气体氮碳共渗	267	470. 硼钒共渗	288
429. 盐浴氮碳共渗	268	471. 硼铬共渗	288
430. 固体氮碳共渗	269	472. 固体稀土硼铬共渗	289
431. 奥氏体氮碳共渗	269	473. 电场局部渗硼	289
432. 离子氮碳共渗	270	474. 电脉冲渗硼	290

475. 渗硫	290	517. 膏剂感应渗铝	315
476. 液体渗硫	291	518. 高频感应加热膏剂渗铝	315
477. 离子渗硫	292	519. 中频感应加热膏剂渗铝	316
478. 低温离子渗硫	292	520. 热喷涂-扩散渗铝	316
479. 低温液体电解渗硫	293	521. 熔盐电解渗铝	316
480. 铸铁渗硫	294	522. 直接通电加热粉末渗铝	317
481. 硫氮共渗	294	523. 铝稀土共渗	317
482. 离子硫氮共渗	295	524. 渗铬	318
483. 气体氧硫氮共渗	296	525. 固体渗铬	318
484. 低温硫氮碳三元共渗	296	526. 液体渗铬	319
485. 硫氮碳三元共渗	297	527. 双层辉光离子渗铬	319
486. 离子氧氮硫三元共渗	298	528. 真空渗铬	320
487. 离子硫氮碳共渗	299	529. 稀土硅镁-三氧化二铬-硼砂盐浴 渗铬	321
488. 稀土离子硫氮碳共渗	299	530. 铬稀土共渗	321
489. 盐浴硫氮碳共渗	300	531. 铬铝共渗	322
490. 盐浴稀土硫氮碳共渗	300	532. 铬硅共渗	322
491. 蒸汽处理	301	533. 铬铝硅三元共渗	323
492. 硫氮共渗蒸汽处理	301	534. 稀土渗铬	323
493. 氧化处理	302	535. 铬钒共渗	324
494. 钢铁发蓝	302	536. 铬铌共渗	324
495. 常温发黑	303	537. 渗钛	325
496. 氧氮共渗	304	538. 固体渗钛	326
497. 氧氮碳三元共渗	305	539. 盐浴渗钛	326
498. 磷化	305	540. 气体渗钛	326
499. 高温磷化	306	541. 双层辉光离子渗钛	327
500. 中温磷化	307	542. 钛铝共渗	327
501. 常温磷化	307	543. 渗钒	327
502. 渗硅	307	544. 硼砂浴渗钒	328
503. 熔盐电解渗硅	309	545. 中性盐浴渗钒	329
504. 离子渗硅	309	546. 固体粉末渗钒	329
505. 机械能助渗硅	309	547. 渗钒真空淬火	330
506. 盐浴硫氮碳钒四元共渗	309	548. 稀土钒硼共渗	330
507. 碳氮氧硫硼五元共渗	310	549. 硼砂浴渗钒、铌 (TD 法)	331
508. 渗金属	310	550. 渗铌	331
509. 渗铝	311	551. 盐浴渗铌	332
510. 粉末包埋渗铝	312	552. 渗锌	332
511. 低温粉末渗铝	312	553. 粉末渗锌	333
512. 料浆法渗铝	313	554. 热浸镀锌	333
513. 料浆法稀土渗铝	313	555. 渗锰	334
514. 气相渗铝	313	556. 渗锡	334
515. 热浸镀铝	314	557. 机械能助渗	335
516. 热浸镀稀土铝合金	315		

558. 机械能助渗锌	335
559. 机械能铸渗铝	336
560. 硼砂浴覆层 (TD 法)	336
561. 铸渗	337
562. 离子注入	338
563. 离子注入氮	339
564. 离子注入钽、碳	340
565. 离子注入金属	340
566. 离子注入稀土	341
567. 等离子体源离子注入 (PS II)	342
568. 激光表面合金化 (LSA)	342
569. 激光稀土合金化	343
570. 电子束表面合金化	344
571. 太阳能合金化	345
参考文献	345
第 6 章 金属的气相沉积	353
572. 化学气相沉积	353
573. 常压化学气相沉积 (CVD)	355
574. 化学气相沉积金刚石	355
575. 化学气相沉积类金刚石	355
576. 等离子体化学气相沉积 (PCVD)	356
577. 直流等离子体化学气相沉积 (DC-PCVD)	357
578. 脉冲直流等离子体化学气相 沉积	358
579. 物理气相沉积 (PVD)	359
580. 电阻蒸镀	359
581. 电子束蒸镀	359
582. 激光蒸镀	360
583. 真空蒸镀	360
584. 电弧加热蒸镀	361
585. 反应蒸镀	361
586. 溅射镀	362
587. 直流二极溅射	363
588. 直流三极或四极溅射	363
589. 磁控溅射	364
590. 非平衡磁控溅射	365
591. 反应溅射	365
592. 离子束溅射	366
593. 离子镀	366
594. 磁控溅射离子镀	367

595. 空心阴极离子镀 (HCD)	367
596. 多弧离子镀	368
参考文献	369
第 7 章 金属的形变热处理	370
597. 高温形变淬火	372
598. 锻热淬火	374
599. 锻热调质	376
600. 锻热固溶处理	377
601. 锻热预冷淬火	377
602. 锻热淬火+快速等温退火	377
603. 辊锻余热淬火	378
604. 锻后余热浅冷淬火自热回火	378
605. 轧热淬火	378
606. 轧后余热控速冷却处理	379
607. 螺纹钢钢筋轧后余热热处理	379
608. 弹簧钢的卷制余热淬火	380
609. 挤压余热淬火	380
610. 高温形变正火	381
611. 形变球化退火	382
612. 高温形变等温淬火	383
613. 低温形变淬火	383
614. 等温形变淬火	385
615. 低温形变等温淬火	386
616. 珠光体低温形变	386
617. 诱发马氏体的形变时效	387
618. 马氏体及铁素体双相组织室温 形变强化	388
619. 过饱和固溶体形变时效	388
620. 表面冷形变强化	389
621. 表面高温形变淬火	389
622. 预先形变热处理	390
623. 超塑形变处理	391
624. 9SiCr 钢的超塑形变处理	391
参考文献	392
第 8 章 金属的复合热处理	394
625. 高温固溶+高温回火+高温淬火 (固溶双细化处理)	394
626. 高温固溶淬火+循环加热淬火	394
627. 高温固溶+球化	395
628. 真空淬火+深冷处理	395
629. 调质+低温淬火	396
630. 回火+表面氧化	396

- | | | | |
|------------------------------------|-----|--------------------------------------|-----|
| 631. 盐浴氮碳共渗复合热处理
(QPQ) | 397 | 669. 渗碳+渗硼 | 416 |
| 632. 流态床发蓝+淬火 | 398 | 670. 渗碳+硼稀土共渗 | 416 |
| 633. 淬火+发蓝 | 399 | 671. 渗氮+渗硼 | 417 |
| 634. 离子氮碳共渗+离子后氧化复合
处理 | 400 | 672. 氮碳共渗+渗硼 | 417 |
| 635. 亚温淬火+浅层氮碳共渗 | 400 | 673. 膏剂渗硼+粉末渗铬 | 418 |
| 636. 真空淬火+氮碳共渗 | 401 | 674. 粉末渗铬+电解渗硼 | 418 |
| 637. 等温淬火+气体氮碳共渗 | 401 | 675. 镀铬+渗钒 | 418 |
| 638. 等温淬火+稀土硫氮碳共渗 | 401 | 676. 高温固溶处理+硼氮共渗 | 419 |
| 639. 分级淬火+低温碳氮共渗 | 402 | 677. 镀镍+渗硼 | 419 |
| 640. 真空气淬+回火+蒸汽氧化处理 | 402 | 678. 镀镍+稀土渗硼 | 420 |
| 641. 真空气淬+回火+离子镀 TiN | 403 | 679. 镀钴+渗硼 | 421 |
| 642. 淬火+化学复合镀 | 403 | 680. 化学热处理+表面形变 | 421 |
| 643. 离子渗碳+离子渗氮 | 404 | 681. 渗碳 (碳氮共渗)+喷丸强化
处理 | 422 |
| 644. 碳氮共渗+真空气淬 | 405 | 682. 表面形变强化+化学热处理 | 423 |
| 645. 低温碳氮共渗+重新加热淬火 | 405 | 683. 喷丸+多元共渗 | 424 |
| 646. 低温碳氮共渗+淬火 | 405 | 684. 表面纳米化预处理+渗氮 | 425 |
| 647. 中温碳氮共渗+低温碳氮共渗 | 406 | 685. 喷丸纳米化预处理+气体渗氮 | 425 |
| 648. 碳氮共渗+镍磷镀 | 406 | 686. 机械研磨 (SMAT)+离子渗氮 | 425 |
| 649. 渗氮+淬火 | 407 | 687. 冷形变 (或形变热处理)+化学热
处理 | 426 |
| 650. 离子渗氮+回火 | 407 | 688. 冷形变渗碳 | 426 |
| 651. 渗氮+离子镀 | 408 | 689. 低温形变淬火+渗硫 | 426 |
| 652. 离子渗氮+等离子体化学气相
沉积 | 408 | 690. 锻热淬火+渗氮 | 426 |
| 653. 高频感应淬火+离子渗氮 | 408 | 691. 高温形变淬火+硼稀土共渗 | 427 |
| 654. 离子渗氮+中频感应淬火 | 408 | 692. 高温形变淬火+低温碳氮共渗 | 427 |
| 655. 离子氮碳共渗+离子渗硫 | 409 | 693. 锻热调质+碳氮共渗+高温淬火+
等温淬火 | 427 |
| 656. 离子渗氮+离子注入 | 409 | 694. 锻热调质+稀土渗硼+等温淬火 | 428 |
| 657. 盐浴渗氮+离子注入 | 409 | 695. 锻热调质+渗氮+渗硼 | 428 |
| 658. 氮碳共渗+淬火+氮碳共渗 (NQN) | 410 | 696. 锻热调质+氧氮共渗 | 429 |
| 659. 钎合金渗硅+离子渗氮 | 410 | 697. 锻热调质+高温渗碳淬火+高温
回火 | 429 |
| 660. 等离子渗金属+等离子渗碳+
真空高压气淬 | 410 | 698. 锻热固溶处理+高温回火+等温
淬火+高温回火 | 430 |
| 661. 离子注入+物理气相沉积 | 411 | 699. 锻热淬火+高温回火 | 430 |
| 662. 激光硬化+离子渗氮 | 411 | 700. 锻热淬火+高温回火+等温
淬火 | 431 |
| 663. 离子渗氮+激光淬火 | 412 | 701. 高温形变正火+低碳马氏体
淬火 | 432 |
| 664. 氮碳共渗+激光淬火 | 412 | 参考文献 | 432 |
| 665. 激光熔凝+渗氮 | 413 | | |
| 666. 渗硼+等温淬火 | 414 | | |
| 667. 渗硼+感应加热处理 | 415 | | |
| 668. 渗硼+渗硫 | 415 | | |

第1章

金属的退火和正火

退火是将工件加热到适当温度，保持一定时间，然后缓慢冷却的热处理工艺。正火是将工件加热奥氏体化后，在空气或其他介质中冷却获得以珠光体为主的热处理工艺。正火与退火常作为预备热处理安排在工件的加工流程中，用以消除冶金及冷热加工过程中产生的缺陷，并为后续的机械加工及热处理准备良好的组织状态。对性能要求不高的钢件，正火也可作为最终热处理。

钢的退火工艺，按加热温度可分为两大类：①临界温度（ Ac_1 或 Ac_3 ）以上的退火（相变重结晶退火），包括完全退火、不完全退火、等温退火、球化退火、晶粒粗化退火、均匀化退火等；②临界温度以下的退火，包括扩散退火、软化退火、再结晶退火、去应力退火、预防白点退火等。按加热冷却方法及所用设备可分为加热炉退火、盐浴退火、火焰退火、感应加热退火、装箱退火、包装退火、真空退火等。按工件表面状态可分为光亮退火与黑皮退火等。

铸铁件的退火工艺主要包括脱碳退火、各种石墨化退火及去应力退火等。有色金属工件主要有再结晶退火、去应力退火及铸态的扩散退火等。

正火与退火相似，区别在于前者加热温度较高、冷却速度较快、所得组织较大地偏离平衡状态等。正火通常分为常规正火与高温正火。相关标准有 GB/T 16923—2008《钢件的正火与退火》等。

1. 完全退火

完全退火简称退火，是将工件完全奥氏体化后缓慢冷却，获得接近平衡组织的退火，如图 1-1 所示。

所谓“完全”是指退火时钢的内部组织全部进行了重结晶。完全退火的目的是细化晶粒、均匀组织、消除内应力、降低硬度、提高塑性，以便于随后的变形加工或切削加工，并为工件的淬火准备适宜的显微组织。此工艺可应用于钢锭、锻轧、铸造及冷拉伸钢材的热处理。完全退火适用于亚共析钢，不宜用于过共析钢，过共析钢缓慢冷却后会析出网状二次渗碳体，使钢的强度、塑性和韧性大大降低。完全

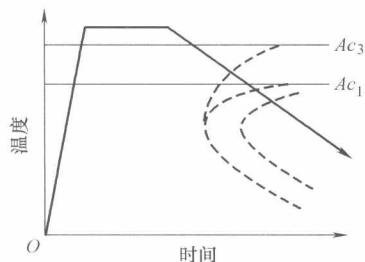


图 1-1 钢的完全退火工艺曲线

退火也适用于和中碳合金钢的、焊接件、轧制件等，有时用于高速钢、高合金钢淬火返修的工艺。

某些高合金钢为使碳化物固溶，应适当提高奥氏体化温度。为改善低碳钢的可加工性，可采用 900~1000℃ 高温退火，以获得 4~6 级的粗奥氏体。为了消除亚共析钢铸件、锻件、焊接件的粗大魏氏组织，需将奥氏体化温度提高到 1100~1200℃，随后补充进行常规完全退火。

2. 亚共析钢钢锭的完全退火

$w(C) > 0.3\%$ 、淬透性较好或尺寸较大的非合金钢及合金钢钢锭，均需进行完全退火，以消除铸造应力、改善铸态组织、降低表面硬度，以及便于存放和表面清理。钢锭表面的各种缺陷应在锻轧前清除，否则会在加工中扩大，甚至形成发裂而使钢锭报废，这对于 Cr、Al、Ti 等元素含量高的钢锭尤为重要。部分亚共析钢钢锭完全退火温度见表 1-1。

表 1-1 部分亚共析钢钢锭完全退火温度

钢种	牌 号	温度/℃
结构钢	40、40Mn2、40Cr、35CrMo、38CrSi、38CrMoAl、30CrMnSi	840~870
弹簧钢	65、60Mn、55Si2Mn、60Si2Mn、50CrVA	840~870
热模钢	5CrNiMo、5CrMnMo	810~850

以上各种钢锭完全退火时的加热速度常取 100~200℃/h。保温时间 $\tau = 8.5 + Q/4$ ，这里 Q 为装炉量 (t)， τ 为保温时间 (h)。冷却速度常取 50℃/h。出炉温度为 600℃ 以下。

3. 亚共析钢锻轧钢材的完全退火

中碳钢及中碳合金结构钢热锻轧后，易得到较粗的珠光体及不同程度的网状铁素体，晶粒大小不均，硬度也常偏高，不易切削和冷变形加工。对此，需进行完全退火来加以改善，同时也为工件的调质处理做好组织准备。

亚共析钢锻轧钢材完全退火温度常取 $A_{c3} + 20 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 。当钢中含有强碳化物形成元素 (Mo、W、V、Ti 等) 时，可适当提高退火温度，以使碳化物较快溶入奥氏体中；而当含有易使晶粒粗化的元素 (如 Mn) 时，应适当降低退火温度。常用亚共析钢完全退火温度见表 1-2。

表 1-2 常用亚共析钢完全退火工艺规范

牌号	临界点/℃			退火		
	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	加热温度/℃	冷却	硬度 HBW
35	724	802	680	850~880	炉冷	≤ 187
45	724	780	682	800~840	炉冷	≤ 197
45Mn2	715	770	640	810~840	炉冷	≤ 217
40Cr	743	782	693	830~850	炉冷	≤ 207
35CrMo	755	800	695	830~850	炉冷	≤ 229

(续)

牌号	临界点/℃			退火		
	Ac_1	Ac_3	Ar_1	加热温度/℃	冷却	硬度 HBW
40MnB	730	780	650	820~840	炉冷	≤207
40CrNi	731	769	660	820~850	炉冷<600℃	≤250
40CrNiMoA	732	774	—	840~880	炉冷	≤229
65Mn	726	765	689	780~840	炉冷	≤229
20Cr	766	838	702	860~890	炉冷	≤179
20CrMnMo	710	830	620	850~870	炉冷	≤217
38CrMoAlA	800	940	730	840~870	炉冷	≤229

锻轧钢材一般使加热速度控制在以下范围：装炉量为 5~10t 的 150~200℃/h；装炉量为 15~30t 的 100~120℃/h；装炉量为 ≥50t 的 50~75℃/h。

钢材退火加热时的保温时间 $\tau = (3 \sim 4) + (0.4 \sim 0.5)Q$ ，这里 Q 为装料量 (t)， τ 为保温时间 (h)。非合金钢的冷却速度最好控制在 200℃/h 上下，低合金钢应不大于 100℃/h，高合金钢应不大于 50℃/h。对装炉量大于 5t 的加热炉，常采用开启炉门冷却甚至空冷（正火）的方法获得低碳及低碳合金钢所需的加工性能。退火时冷却到 650~600℃ 以下时，相变已完成，可出炉空冷。

4. 冷拉钢材料坯的完全退火

一般热轧钢材由于终轧温度较高、轧后冷却速度不一导致组织性能不均、内应力较大、硬度偏高、冷拉时表面易产生拉伤、模具磨损也较大。此外，由于坯料端部需加热，使组织发生变化、硬度及内应力也偏高、冷拉时易折断。对此，冷拉伸变形前大部分热轧坯料需进行退火（或正火），使其硬度保持在 207~255HBW。中碳钢、合金结构钢、弹簧钢及易切削钢（如 40、40Cr、35SiMn、30CrMnSi、60Si2Mn、50CrVA、Y20 等）冷拉坯料常需进行完全退火：退火加热温度为 $Ac_3 + 20 \sim 30^\circ\text{C}$ ，加热速度为 100~120℃/h，保温时间为每吨装炉量不超过 1h，随炉冷却至 600℃ 出炉空冷。高合金钢及尺寸较大的锻坯可取 20~50℃/h 的冷却速度。马氏体不锈钢（20Cr13 等）常取 15~20℃/h 的冷却速度。

5. 不完全退火

不完全退火是将工件部分奥氏体化后缓慢冷却的退火，包括：相变区退火、亚温退火、临界区退火。钢的不完全退火工艺曲线如图 1-2 所示，即加热温度在 Ac_1 与 Ac_3 （或 Ac_{cm} ）之间，加热到温后短时保温，之后缓慢或控速冷却，以得到铁素体和珠光体组织。加热时珠光体转变为奥氏体，而过剩相（铁素体或碳化物）大部分保持不变。不完全退火的目的与完全退火相似，都是通过相变重结晶来细化晶粒、

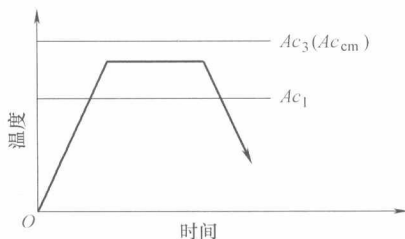


图 1-2 钢的不完全退火工艺曲线

改善组织、去除应力、降低硬度、改善切削性能。不完全退火由于重结晶不完全而导致细化晶粒的程度较差，但能够缩短工艺周期，可用于晶粒未粗化的锻轧件等。

6. 过共析钢及莱氏体钢钢锭的不完全退火

过共析钢不完全退火可减少溶入奥氏体中的碳化物含量、降低奥氏体的稳定性、提高退火冷却速度、缩短冷却时间。此外，还可以消除铸造应力、改善铸态组织、降低表面硬度，以及改善切削加工性。常用过共析钢（包括莱氏体钢）钢锭的不完全退火温度见表 1-3。

表 1-3 过共析钢钢锭的不完全退火温度

钢种	牌 号	温度/℃
非合金工具钢、 低合金工具钢	T7、T10、T12、9Mn2V、9SiCr、Cr2、CrMn、CrWMn	810~850
冷作模具钢、高速钢	3Cr2W8V、W18Cr4V、W9Mo3Cr4V	900~950
轴承钢	GCr15、GCr15SiMn	810~850

钢锭不完全退火时的加热速度为 $100 \sim 200^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。保温时间 $\tau = T + Q/4$ ，这里 τ 为保温时间（h）， Q 为装炉量（t）， T 为基本保温时间，合金工具钢及轴承钢的 $T = 6.5\text{h}$ ，莱氏体钢的 $T = 2.5\text{h}$ 。冷却速度一般控制在 $50^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 左右；高合金钢取 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 或更慢。非合金工具钢及低合金工具钢可在炉冷到 600°C 以下时出炉，高合金工具钢最好冷却到 350°C 以下再出炉，以免产生新的内应力并使硬度偏高。

7. 过共析钢锻轧钢材的不完全退火

工具钢、轴承钢及冷作模具钢等应用此工艺，可得到球状珠光体及球状碳化物组织，降低硬度，改善切削加工性能。多数情况下其加热速度 $\geq 100^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ，对于含合金元素较多的钢可采用稍慢的加热速度。保温时间根据装炉量、钢材种类而定。保温后随炉冷却。冷却速度随钢种而异，非合金工具钢加热速度 $\geq 50^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ，合金钢加热速度 $\leq 30^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。冷却到 600°C 左右时，即可出炉空冷。常用非合金工具钢及合金工具钢不完全退火时的加热温度见表 1-4。

表 1-4 非合金工具钢及合金工具钢不完全退火时的加热温度

钢种	牌 号	温度/℃
非合金工具钢	T8、T10、T11、T12	750~770
合金工具钢	9Mn2V、9SiCr、CrWMn	770~810
	Cr12V、Cr6WV、Cr12MoV	830~870

8. 亚共析钢冷拉坯料的不完全退火

亚共析钢冷拉坯料常采用完全退火，而一部分低、中碳钢及合金结构钢，如 15、45、30Mn2、40CrMn、40MnB 等，因晶粒长大倾向较大且不均匀，用完全退火不易控制晶粒度，以及为了降低钢材脆性，所以宜采用不完全退火。其加热温度