

感应热处理技术

3000

问

沈庆通 黄 志 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



感应热处理技术 300 问

沈庆通 黄志 编著



机械工业出版社

本书以问答的形式全面系统地介绍了感应热处理技术。其主要内容包括：感应加热物理基础、感应加热电流频率的选择与电源功率的估算、钢铁感应热处理工艺基础、感应淬火件的力学性能与结构设计、感应热处理的工艺调整与典型零件感应热处理工艺、感应淬火件的质量检验与控制、感应器的设计与制造、感应淬火机床的结构与性能，共计 300 多个问题。本书深入浅出，简明扼要，图文并茂，实用性和针对性强。

本书适合于从事感应热处理工艺、装备设计的技术人员及操作人员阅读，也可供相关专业在校师生及研究人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

感应热处理技术 300 问/沈庆通，黄志编著. —北京：机械工业出版社，2013. 4

ISBN 978-7-111-42072-9

I. ①感… II. ①沈…②黄… III. ①感应热处理 - 问题解答
IV. ①TG156. 99 - 44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 069810 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 版式设计：霍永明

责任校对：张媛 责任印制：乔宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2013 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 15.5 印张 · 310 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-42072-9

定价：35.00 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

社服务中心：(010) 88361066 教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010) 68326294 机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010) 88379649 机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

20 多年前，编者在机械工业出版社出版了《感应热处理问答》，该书以其内容简明、扼要而颇受一些读者所青睐。20 多年过去了，国内外感应热处理无论工艺、标准或设备均有很大改进。编者几十年来一直从事感应热处理专业，接触到国内外本专业的一些资料、装备、信息及发展中的问题。出于对年青感应热处理工作者的责任感，触发了老牛奋蹄的想法，在《感应热处理问答》的基础上增添了新工艺、新装备、新标准等新内容，删去了过时淘汰的装置部分，编写了这本《感应热处理技术 300 问》。

1960 年，美国出版了 C. A. Tudbury 编写的《BASICS OF INDUCTION HEATING》一书。该书以其通俗易懂、图文并茂的特点，在国际感应加热行业中备受关注。因此，优秀的技术图书内容应简明实用、通俗易懂。我国感应热处理专业书籍不多，新资料和为一线工作者服务的专业技术图书更少，一线感应热处理工作者由于缺乏专业培训，接触面窄等诸多原因，常会在摸索中工作与多走弯路，影响了工作进展。

编者根据自己几十年的工作实践及相关技术文献、读者咨询等，历时近三年，编写了这本书。这本书是一本入门级的感应热处理专业技术图书，图表丰富，便于读者阅读参考。

本书由沈庆通、黄志编著。由于编者水平有限，虽然刻意严谨，但仍会有错误，希望读者能不吝赐教。在本书编写过程中，得到了张宗杰、武瑞、王健、李红莉、张晓、何松志、李志超、梁朋涛、杨继贤、于静、孙藏莲等同志的大力支持，V. S. Nemkov、李韵豪、林信智、万光有等专家对本书的出版备加关注，在此一并致谢！

沈庆通

目 录

前言

第 1 章 感应加热物理基础	1
1. 什么是电磁感应现象?	1
2. 什么是趋肤效应?	2
3. 什么是邻近效应?	2
4. 什么是环状效应?	3
5. 什么是有磁路存在时的趋肤效应?	3
6. 什么是工频、高频、中频、超音频、超高频电流?	4
7. 什么是电流透入深度?	5
8. 电流透入深度由浅入深是如何变化的?	6
9. 电流透入深度是否就是淬硬层深度?	6
10. 什么是透入式加热? 什么是传导式加热? 哪种加热类型较好?	7
11. 透入式加热对节能、提高经济效益有何意义?	8
12. 什么是磁场?	9
13. 磁力线的作用是什么?	9
14. 什么是磁导率?	9
15. 什么是磁场强度?	10
16. 什么是磁感应强度?	10
17. 什么是磁通?	10
18. 什么是磁阻?	10
19. 什么是磁能?	10
20. 什么是横向磁场加热? 它的感应器是什么样的?	10
21. 什么是纵向磁场加热? 它的感应器是什么样的?	11
22. 什么是闭合磁路加热感应器?	11
23. 什么是开启式磁路加热感应器?	12
24. 什么是纵向回线加热感应器?	12
25. 什么是软磁材料?	12
26. 铁磁材料有哪些特性?	12
27. 什么是电容量?	12
28. 什么是涡流损耗?	13
29. 什么是磁滞损耗?	13
30. 什么是无功功率?	13
31. 什么是功率因数?	13

32. 什么是视在功率?	13
33. 什么是有功功率?	13
34. 什么是磁屏蔽?	13
第2章 感应加热电流频率的选择与电源功率的估算	15
35. 电流频率选择的原则是什么?	15
36. 电流频率选择时,是否都要进行计算?	18
37. 齿轮的电流频率如何选取?	19
38. 齿轮单频法选频的新的数据有哪些?	20
39. 凸轮加热时是否有特殊的频率计算公式?	21
40. 电流频率的选择对淬火零件的强度有何影响?	21
41. 双频加热有哪几种方式?应用在哪些零件上?	21
42. 钢管焊缝用感应加热退火,应如何选择电流频率?	22
43. 钎焊刀具时,如何选择电流频率?	22
44. 钢材透热时电流频率应怎样选择?	22
45. 钢管与铜管加热时如何选择电流频率?	23
46. 非铁金属感应加热时如何选择频率?	24
47. 不同硬化层深度与不同直径零件的电流频率如何选择?	25
48. 最先进的选择电流频率的方法是什么?	25
49. 什么是 GP 型高频电源?	26
50. 什么是 CYP 超音频电源?	27
51. 什么是 KGPS 晶闸管中频电源?	28
52. 什么是 IGBT 晶体管电源?	28
53. 什么是 MOSFET 晶体管电源?	29
54. 什么是便携式感应加热电源?	30
55. 什么是超高频电源?	30
56. 什么是功率密度?它与单位功率是否相同?	30
57. 如何根据工件技术要求选用合适的功率密度?	30
58. 高、中频电源装置的功率怎样选定?	30
59. 典型零件如何根据技术要求计算所需功率与选择电源设备?	40
60. 如何进行功率估算?	41
61. 如何根据轴颈与淬硬层深度选择功率密度与扫描速度?	42
62. 如何对正火后的齿轮进行感应淬火功率估算?	42
63. 设备额定功率不够时,如何感应加热超大工件?	42
64. 感应热处理是否有电耗定额?	43
65. 如何配置中频电热电容器?	43
66. 国产电热电容器有哪些型号与规格?	44
67. 如何配置中频淬火变压器?	44
第3章 钢铁感应热处理工艺基础	47

68. 钢铁感应热处理的金属学基础是什么?	47
69. 什么是奥氏体?	49
70. 什么是铁素体?	49
71. 什么是渗碳体?	50
72. 什么是珠光体?	50
73. 什么是莱氏体?	50
74. 什么是马氏体?	51
75. 什么是临界冷却速度?	51
76. 什么是本质细晶粒钢?	51
77. 钢的晶粒度大小对力学性能有何影响?	52
78. 感应热处理常用钢牌号有哪些?	52
79. 感应淬火对钢有哪些要求?	53
80. 钢中诸元素对钢感应淬火各有何种作用?	54
81. 钢的不同原始组织对感应淬火有何影响?	55
82. 为什么说钢中存在带状组织不适于感应淬火?	56
83. 感应热处理有哪些金属学的特点?	56
84. 感应加热时, 零件截面上的温度是怎样分布的?	58
85. 钢感应淬火温度应怎样选择?	59
86. 感应淬火时, 零件上的应力有哪些? 怎样分布?	59
87. 钢件感应淬火后的表面硬度为什么比普通淬火的高?	60
88. 感应淬火常见加热方法有哪几种? 如何选用?	60
89. 有哪几类铸铁可以进行感应淬火?	61
90. 铸铁感应淬火时应注意哪些方面?	62
91. 感应淬火常用淬火冷却介质有哪些? 应如何选用?	63
92. 聚合物淬火冷却介质在感应淬火中应用效果如何?	65
93. 淬火冷却介质的温度、压力、流量和添加剂含量对冷却能力有何影响?	66
94. 感应淬火有哪些新的冷却方法?	66
95. 感应淬火件的回火有哪几种方法?	67
96. 感应热处理除用于表面淬火外, 还有哪几方面的应用?	69
97. 什么是钢的感应加热自冷淬火?	70
98. 钢件在保护气氛中感应淬火有几种方法? 有何实例?	71
99. 感应退火的目的是什么? 常用于哪些零件?	72
100. 钢管焊缝为什么要进行退火? 退火质量如何检验?	72
101. 零件再结晶退火有否实例?	73
102. 制订与执行感应热处理工艺过程卡应遵守哪些规定?	73
103. 何时应进行感应热处理规范的修订?	74
104. 感应热处理工艺检查包括哪些内容?	74
105. 感应热处理工艺制订中常用的表格有哪些?	75

第 4 章 感应淬火件的力学性能与结构设计	77
106. 机械零件感应淬火的主要目的有哪些?	77
107. 感应淬火件的耐磨性如何? 与渗碳淬火件相比, 哪种工艺的耐磨性好?	77
108. 感应淬火件的疲劳性能如何? 与调质、正火、渗碳相比, 哪种工艺的性能好?	79
109. 感应淬火件的抗冲击性能如何? 与调质、正火、渗碳相比, 哪种工艺的性能好?	80
110. 感应淬火件的淬硬层深度对零件扭转性能有何影响?	81
111. 淬火件的硬度应如何选用?	83
112. 感应淬火件的淬硬层深度, 一般应如何选择?	84
113. 淬火件的淬硬区域应如何正确标注?	84
114. 感应淬火件的几何形状应如何适应淬火工艺?	85
115. 感应淬火件的技术要求能否与渗碳淬火件的技术要求等同?	86
116. 齿轮超速感应淬火后表面残留应力有多大?	87
117. 感应淬火件上的残留应力有哪些? 它是如何分布的?	87
118. 淬硬区部位及范围对弯曲疲劳性能有何影响?	89
119. 感应淬火件不回火对零件力学性能有何影响?	89
120. 哪些是应尽量避免的不良淬硬层分布?	90
第 5 章 感应热处理工艺调整与典型零件感应热处理工艺	94
121. 感应热处理工艺调整包括哪些内容?	94
122. 如何调整高频及超音频电源设备的电规范?	94
123. 真空管式高频电源与负载不匹配时应如何处理?	95
124. 如何调整中频发电机的电规范?	96
125. 如何调整固态感应加热电源设备的电规范?	99
126. 如何在加热过程中保持较稳定的输出功率?	100
127. 如何调整感应淬火工艺规范?	102
128. 如何调整感应淬火后的回火工艺规范?	103
129. 工艺调试的试样是否必须与生产件尺寸完全一致?	104
130. 在什么情况下使用比 2 连接板或变压器多匝二次绕组?	105
131. 功率分配器有何功能? 常用在什么零件上?	106
132. 曲轴颈感应淬火有哪几种工艺方法?	106
133. 曲轴颈圆角感应淬火工艺是怎样的?	106
134. 凸轮轴感应热处理工艺是怎样的?	108
135. 气缸套感应热处理工艺是怎样的?	110
136. 飞轮齿圈感应热处理工艺是怎样的?	110
137. 半轴感应热处理工艺是怎样的?	111
138. 等速万向节钟形壳感应热处理工艺是怎样的?	113
139. 齿轮感应淬火有哪些工艺方法?	115
140. 齿轮各类感应淬火工艺方法是怎样发展的?	117
141. 同步双频齿轮淬火工艺有什么特点?	119

142. 低淬透性钢齿轮感应淬火有什么特点?	119
143. 齿轮沿齿沟单齿淬火工艺是怎样的?	120
144. 小模数机床齿轮采用高频与超音频感应淬火, 结果有什么不同?	121
145. 转向齿条高频电阻加热淬火工艺是怎样的?	121
第 6 章 感应淬火件的质量检验与控制	122
146. 感应淬火件的质量检验一般包括哪些项目?	122
147. 如何测量感应淬火件的淬硬层深度?	123
148. 钢件感应淬火后如何进行金相检验?	123
149. 珠光体球墨铸铁件感应淬火后如何进行金相检验?	123
150. 机床灰铸铁导轨感应淬火后如何进行金相检验?	124
151. 钢铁件的感应淬火质量控制对设备有什么要求?	124
152. 钢铁件的感应淬火回火过程质量控制有哪些内容?	125
153. 感应淬火件淬硬层深度波动的影响因素有哪些?	126
154. 如何解决感应淬火件的变形问题?	126
155. 感应淬火件硬度达不到技术要求的原因有哪些?	127
156. 哪些工艺不当会造成感应淬火件产生裂纹? 解决措施是什么?	128
157. 哪些材料因素会使感应淬火件产生裂纹? 解决措施是什么?	128
158. 造成感应淬火件产生裂纹的不合理结构设计有哪些?	129
159. 如何解决感应淬火件出现磨削裂纹的问题?	129
160. 如何解决感应淬火件的局部烧熔问题?	129
161. 什么是硬化层剥落? 如何解决?	130
162. 什么是硬化层崩落?	130
163. 什么是硬化层边棱开裂、掉圈? 如何解决?	130
164. 我国与感应热处理相关的现行标准有哪些?	130
第 7 章 感应器的设计与制造	132
165. 感应器的设计与制造应达到哪些要求?	132
166. 感应器设计时, 如何应用相关理论与法则?	132
167. 感应器设计时, 基本结构尺寸应如何确定?	133
168. 感应器设计的基本原理有哪些?	135
169. 感应器的耦合效率哪种形式较高?	137
170. 高频感应器设计典型结构有哪些?	137
171. 中频感应器设计时, 基本结构、尺寸如何确定?	140
172. 感应器的水冷及喷水装置如何设计?	141
173. 感应器上的附加装置有哪些?	142
174. 中频感应器在什么情况下需附加导磁体? 其导磁体如何设计?	142
175. 多孔或多加热区的感应器应如何设计?	143
176. 什么是直接接到中频电源上的多匝感应器?	143
177. 导电板结构与感应器效率有很大关系吗?	144

178. 喷液器应如何设计?	144
179. 喷液器的典型结构有哪些?	146
180. 感应器有效圈冷却水流量应如何计算?	147
181. 感应器(或喷液器)当增高压力时,它的流量如何变化?	148
182. 什么是无触点开合感应器?	148
183. 双孔或多孔感应器设计时应注意什么?	149
184. 什么是磁通截留器?其主要功能是什么?	150
185. 什么是集流器?其主要功能是什么?	150
186. 集流器的典型结构有哪些?	151
187. 内孔加热感应器有何特点?	153
188. 内孔淬火感应器有几种类型?	153
189. 缸套内表面淬火感应器有何特点?	154
190. 长内孔淬火感应器设计的特点有哪些?	154
191. 超高频电源可否用于小内孔淬火?	155
192. 两个凸轮靠得很近时,应如何设计感应器?	155
193. 同时进行双滚道淬火的感应器有何长处?	156
194. 快换感应器夹头的典型结构有哪些?	157
195. 加热兼喷液的有效圈与通有冷却水只能加热的有效圈各有什么优缺点?	158
196. 如何选用单匝与多匝感应器?	159
197. 多匝感应器比单匝感应器优越的实例有哪些?	159
198. 工件采用扫描淬火感应器或一次加热感应器,其能耗对比有否实例?	160
199. 感应器有效圈上喷陶瓷涂层有何效果?	160
200. 导磁体的作用是什么?	160
201. 多匝感应线圈两端镶装导磁体有何效果?	161
202. 导磁体是否可用作屏蔽?	161
203. 导磁体反装有什么作用?	161
204. 导磁体有多少品种?	161
205. 硅钢片作导磁体时,其厚度应如何选用?	163
206. 如何选用导磁体?	164
207. 如何用简单的方法比较导磁体的质量?	164
208. 可加工导磁体加工时应注意什么?	165
209. 导磁体安装使用时应注意什么?	165
210. 导磁体胶应如何选用?	165
211. 何谓泥糊状导磁体?如何将其固定到有效圈上?	166
212. 导磁体必须磷化吗?如何防止导磁体腐蚀?	167
213. 导磁体失效现象与原因有哪些?	167
214. 什么是树脂浇注体感应器?	167
215. 什么是耐火水泥浇注体感应器?	168
216. 屏蔽器的材料与厚度应如何确定?	168

217. 什么是感热体? 如何应用?	168
218. 如何制造既保证有效圈定位精度又经济的感应器?	169
219. 制造感应器的工夹具有哪些? 感应器的检验工具与夹具有哪些?	169
220. 感应器矩形管的成形方法有哪几种?	170
221. 感应器的水流量测试有哪些方法?	170
222. 感应器的绝缘测试有什么作用?	171
223. 感应器负载测试有什么作用?	171
224. 感应器的密封试验有哪些方法?	171
225. 感应器合理使用与维护的要点有哪些?	171
226. 如何提高导磁体的使用寿命?	172
227. 感应器失效的形式有哪些?	172
228. 如何提高感应器的使用寿命?	173
229. 感应器使用寿命如何计算?	174
230. 如何提高感应器效率?	174
231. 感应器的电感与哪些因素有关?	175
232. 感应器有效圈载流密度的上限是多少?	175
233. 感应器常用金属材料有哪些? 应如何选用?	175
234. 感应器常用绝缘材料有哪些? 应如何选用?	176
235. 感应器钎焊用的焊料与焊剂有哪些? 如何选用?	177
236. 感应器零件用钎焊连接时应注意什么?	178
237. 感应器用的标准件(外购)有哪些品种和规格?	178
238. 用实心铜块加工制作感应器有什么优缺点?	178
239. 怎样保证感应器的质量与产品的一致性?	179
240. 外圆与内孔同时加热的感应器是什么样的?	180
241. 感应器用柔性电缆是什么样的?	180
242. 钢丝螺套在感应器上是怎样应用的?	180
第 8 章 感应淬火机床的结构与性能	182
243. 感应淬机床有哪几种类型? 其主要技术参数有哪些?	182
244. 淬火机床的主要组成部分有哪些?	183
245. 淬火机床中常用的机械、电气部件有哪些?	185
246. 淬火机床常用的数控系统有哪些?	187
247. 通用淬火机床的传动方式一般有几类? 哪种比较稳定?	187
248. 淬火工件扫描淬火时, 应如何选取工件移动或变压器感应器组移动方式?	187
249. 淬火机床主顶尖的转速应如何选取?	188
250. 工进速度、快进与快退速度应如何选择?	189
251. 通用淬火机床一般有哪些功能? 如何确定?	189
252. 什么是紧凑结构感应淬火装置? 有何特点?	190
253. 什么是拾取式淬火机床?	191

254. 什么是双输出电源淬火装置？	192
255. 钟形壳全自动淬火机床是怎样的？	193
256. 什么是族类零件感应淬火机床？	194
257. 国产通用淬火机床有哪些典型品种与规格？	195
258. 专用感应淬火装置有哪些特点？	196
259. 专用感应淬火装置有哪些典型品种与规格？	196
260. 曲轴感应淬火机床是如何发展的？	199
261. 半自动曲轴浸液淬火机床是怎样工作的？	199
262. 自动更换感应器的半自动曲轴淬火机床是怎样工作的？	201
263. AKWH 全自动曲轴淬火机床是怎样工作的？	201
264. 全自动柔性曲轴淬火机床是怎样工作的？	202
265. 静止加热曲轴颈淬火装置有什么优点？	203
266. 立式凸轮轴淬火机床一般有哪两种结构？	204
267. 一次加热凸轮轴所有淬火表面的淬火机床是怎样的？	205
268. 双工位气缸套淬火机床是怎样工作的？	205
269. 三工位气频气缸套回火机床是怎样工作的？	206
270. 全自动半轴淬火机床是怎样工作的？	207
271. 卧式履带销自动淬火机床是怎样工作的？	208
272. 链轨节一次加热淬火机床是怎样工作的？	209
273. 链轨节扫描加热淬火机床是怎样工作的？	210
274. 驱动轮淬火机床是怎样工作的？	211
275. 导向轮淬火机床是怎样工作的？	212
276. 什么是埋液淬火机床？	212
277. 气门端头淬火装置是怎样的？	213
278. 双工位驱动轴淬火机床是怎样工作的？	213
279. 盘形薄件淬火机床是怎样工作的？	215
280. 螺钉头全自动感应淬火机床是如何工作的？	215
281. 滚珠丝杠淬火机床有哪些特点？	216
282. 铰杆感应淬火机床是怎样工作的？	217
283. 冷轧辊双频感应淬火机床是怎样工作的？	217
284. 大直径冠齿轮一次加热淬火机床是怎样工作的？	218
285. PC 钢筋热处理生产线是怎样工作的？	219
286. 国产钢筋、钢丝热处理生产线发展情况如何？	219
287. 等速万向节钟形壳感应热处理生产线是怎样工作的？	220
288. 双频齿轮感应淬火生产线是怎样工作的？	221
289. 大回转支承滚道淬火机床的结构是什么样的？	223
290. 什么是在线净功率监控器？	224
291. 什么是无触点感应器自动定位控制？	224
292. 什么是功率切换器？	225

293. 什么是接地故障断路器?	226
294. 什么是能量监控器?	226
295. 什么是功率分配器?	227
296. 流量监控用在哪些方面? 常用哪些流量计?	227
297. 淬火机床上哪些阀件与管件是必要的? 其功能如何?	228
298. 感应加热装置对冷却水的哪些项目指标有要求?	230
299. 感应加热装置对冷却水质的具体要求有哪些?	230
300. 设计感应加热装置冷却系统及管路时应注意哪几方面?	232
301. 设计淬火冷却介质管路时应注意哪些方面?	233
302. 感应加热装置使用的测温仪器有哪些?	234
303. 感应加热装置在什么工作条件下使用机器人或机械手?	235
参考文献	236

第 1 章 感应加热物理基础

1. 什么是电磁感应现象？

金属能够在感应器内加热，主要依靠电磁感应现象。电磁感应能够将电能经由真空、空气或其他介质所形成的空间传送到所需加热的金属上去。

电磁感应的实质是：交变的磁场能够引起交变的电场。反过来说，交变的电场能引起交变的磁场，如图 1-1 所示。

当一匝或数匝线圈内通过交变电流时，线圈周围便产生交变磁场，置于交变磁场中的导体（金属零件）便产生电动势 E (V)，即

$$E = 4.44fn\phi \times 10^{-8} \quad (1-1)$$

式中 f ——电流频率 (Hz)；

ϕ ——磁通的振幅；

n ——回路的匝数。

当加热金属零件时，回路即是零件本身，此时， $n = 1$ 。

导体在电动势的作用下产生涡流，其值可用下式表示：

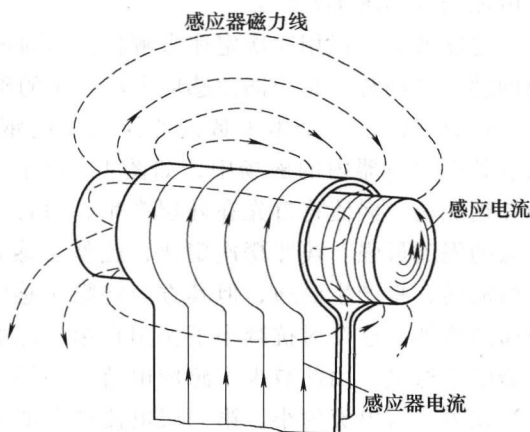


图 1-1 螺管状感应器与圆柱形工件

$$I = \frac{E}{Z} \quad (1-2)$$

式中 I ——涡流 (A)；

E ——电动势 (V)；

Z ——金属导体的阻抗。

这个涡流就使金属本身发热，使金属自身进行加热。根据焦耳-楞次定律，涡流产生的热量 Q (J) 可由下式计算：

$$Q = I^2 R t \quad (1-3)$$

式中 I ——涡流 (A)；

R ——金属零件电阻 (Ω)；

t ——加热时间 (s)。

当加热的金属零件为铁磁材料时，交变磁场使铁磁材料反复磁化，磁畴不断转向，并产生摩擦，消耗能量，称为磁滞损耗。磁滞损耗也使金属零件发热，但这部分热量比涡流的热量小得多。

2. 什么是趋肤效应?

趋肤效应也称集肤效应或表面现象。当直流电通过一导体时,导体截面上各点的电流密度是均匀的。当交流电通过导体时,导体表面处的电流密度较大,导体内部的电流密度较小。当高频交流电通过导体时,导体截面上的电流密度差更加增大,电流主要集中在导体表面,这种现象称为趋肤效应。趋肤效应作用下从表面到心部的相对电流密度如图 1-2 所示。

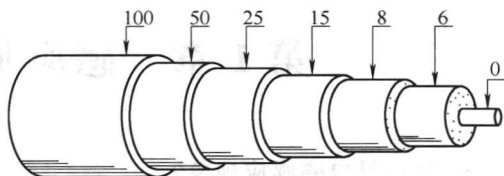


图 1-2 趋肤效应作用下从表面到心部的相对电流密度

趋肤效应可以用楞次定律来解释:当通过零件的磁通发生变化时,产生在零件内的感应电动势,总企图使感应电流产生的磁通反抗原有磁通的变化。

设想零件是一个由无数同心层组成的钢棒,当它处在感应器内的磁场中,如图 1-3 所示,因为邻近磁场,涡流将首先在外层产生,而且钢棒外层的涡流最强。按照楞次定律,此外层感应电流的流动,将产生磁通,但其方向将阻止感应器磁通的增加。这个对抗减小了作用在第二层的感应器的磁通量,因此减少了感应电流,即第二层电流比第一层电流为小。第二层电流产生的磁通对抗感应器产生的磁通,使作用于第三层的磁通量更小。在这种情况下,感应器磁通量与感应电流呈现出向钢棒中心逐步减弱的现象。

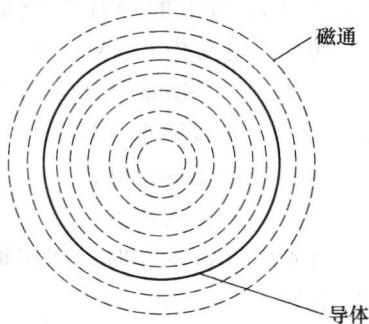


图 1-3 处在磁场中的钢棒

3. 什么是邻近效应?

导体内交变电流的分布受到邻近导体内交变电流的影响,这种现象叫做邻近效应。

图 1-4a 表示两个平行导体 A 和 B, A 中的导体丝 a_1 所交链导体 B 的磁通量比导体丝 a_2 所交链的为少,故在 a_1 中的互感电动势就比 a_2 中的为小。当导体 A、B 带有同方向电流时, a_1 和 a_2 的互感电动势与电流的方向基本相反,使 a_1 的电流密度比 a_2 的为大。当导体 A、B 带有反方向的电流时,因感应电动势与电流有基本一致的方向, a_2 的电流密度比 a_1 处为大。

邻近效应在实际应用中,基本上有以下两种情况:

1) 当两个平行导体通入方向相反、大小相等的电流时,电流集中到导体互相靠近的侧面,见图 1-4b。

2) 当两个平行导体通入方向相同、大小相等的电流时,电流集中到导体相距最远的外侧,见图 1-4c。

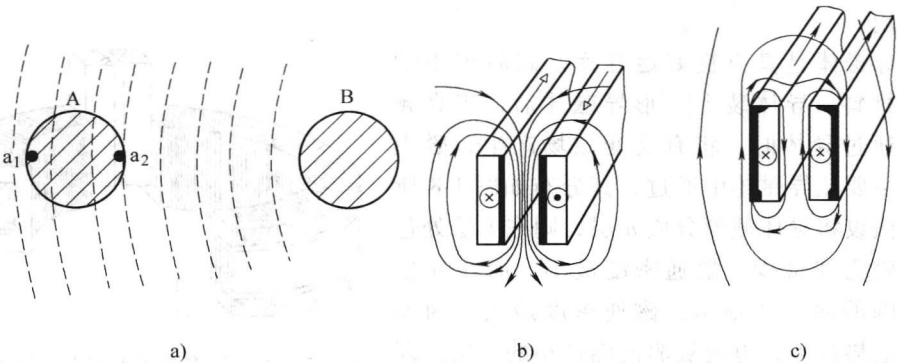


图 1-4 邻近效应时导体内电流的分布

a) 导体丝 a_1 比 a_2 交链磁通量为少 b) 平行导体通入方向相反、大小相等电流时 c) 平行导体通入方向相同、大小相等电流时

4. 什么是环状效应？

高频电流流过环状导体时，最大电流密度分布在环状导体内侧，这种现象称为环状效应，如图 1-5 所示。环状效应的实质也就是环形感应器的邻近效应。

环状效应使感应器上的电流密集到感应器内侧，对加热零件外表面十分有利，但对加热零件内孔时，此效应使感应器电流远离加热零件表面，对加热是不利的，见图 1-6。

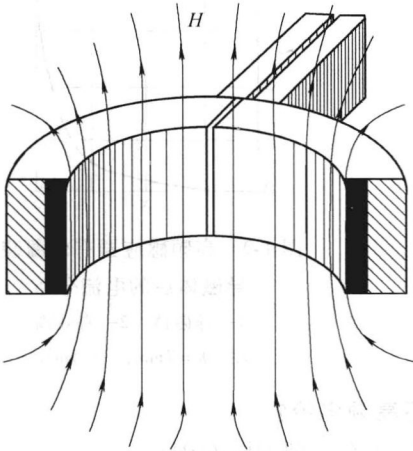


图 1-5 环状效应

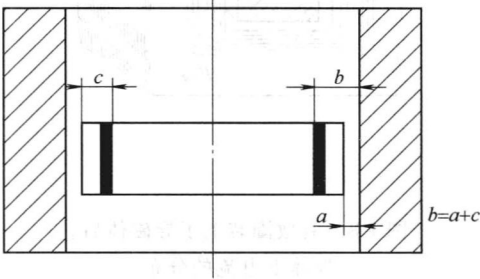


图 1-6 内孔加热时环状效应使电流远离加热表面

5. 什么是有磁路存在时的趋肤效应？

感应器的有效圈上装了 $\square$ 形导磁体，就能使高频电流从导磁体开口一边的导体表面流过，如图 1-7 所示。这就是有磁路存在时的趋肤效应，也称为导磁体的驱

流作用。

导磁体是具有良好磁导率、磁阻很小的磁性材料。导体装上□形导磁体后,当高频电流通过导体时,将有交变磁场产生,磁力线将主要从导磁体中通过,其分布如图 1-8 所示。假设将导体截面分成 n 层,则在 1 层处包围的磁力线最少,磁通密度最小,而在 n 层处包围的磁力线最多,磁通密度最大,因而自感电势最大,电流被驱向感抗小的 1 层,即高频电流从导磁体开口一边的导体表面流过。

图 1-9 所示为高频感应器 ($f = 200\text{kHz}$) 有效圈装上导磁体后的电流分布。

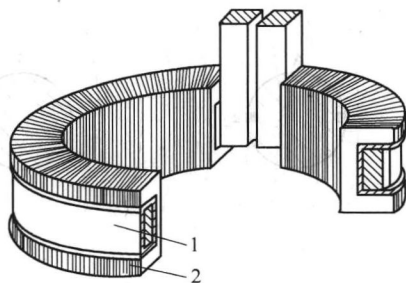


图 1-7 感应器有效圈上装上了导磁体
1—有效圈 2—导磁体

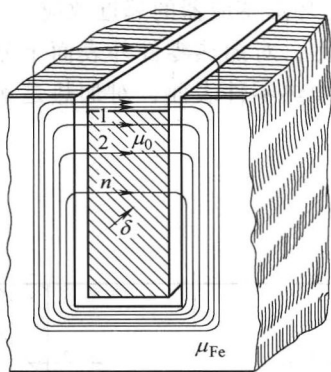


图 1-8 有效圈装上了导磁体后,
导体上电流的分布

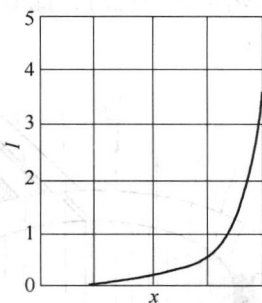
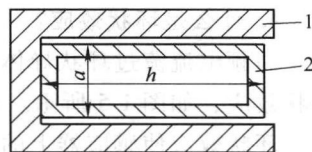


图 1-9 高频感应器有效圈装上
导磁体后的电流分布
1—导磁体 2—有效圈
注: $h = 7\text{mm}$, $a = 5\text{mm}$ 。

6. 什么是工频、高频、中频、超音频、超高频电流?

- 1) 工频电流也称线频电流,其频率为市电频率,即 $50 \sim 60\text{Hz}$ 。
- 2) 高频电流是泛指比常用频率 ($50 \sim 60\text{Hz}$) 高的一切电流的频率。由于中频、超音频电流名词的出现,现在高频电流主要指 $100 \sim 6000\text{kHz}$ 的电流频率。
- 3) 中频电流一般指 $500 \sim 10000\text{Hz}$ 电流频率。
- 4) 超音频电流一般指大于 20kHz , 小于 100kHz 的电流频率。
- 5) 超高频电流指比一般高频电流更高的兆赫级电流,如 12MHz 。