

● 热喷涂技术丛书

热喷涂工程师指南

—— 王海军 主编 ——



国防工业出版社
National Defense Industry Press

热喷涂技术丛书

热喷涂工程师指南

王海军 主编

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书共分十章,包括概述,热喷涂工件的表面预处理,火焰喷涂技术,电弧喷涂技术,等离子喷涂技术,热喷涂涂层设计,热喷涂技术,热喷涂涂层机械加工技术,热喷涂涂层的检测与分析,热喷涂安全与防护。

本书可作为从事热喷涂技术的工程技术人员的参考书,也可供相关专业的大专院校师生、研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

热喷涂工程师指南 / 王海军主编. —北京:国防工业出版社,2010.8

(热喷涂技术丛书)

ISBN 978-7-118-06967-9

I. ①热… II. ①王… III. ①热喷涂-指南
IV. ①TG174.442-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 151075 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 24 1/4 字数 435 千字

2010 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 40.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

热喷涂是一门具有悠久历史的工艺性技术,学科主要涉及材料学和材料加工工程。热喷涂技术是表面工程的关键技术之一,是维修与再制造的重要手段。相对于其他材料制备技术,具有工艺相对简单、灵活、可喷涂材料种类多、涂层质量好、应用范围广、经济效益大等特点。随着科学技术的进步,现代热喷涂技术在理论与实践上都有了很大的发展。例如:传统的火焰喷涂已发展到超声速火焰喷涂,可以喷涂结合力高、十分致密的 WC - Co、NiCr - Cr₃C₂ 等超硬涂层,已成功替代了对环境有污染的镀硬铬工艺;电弧喷涂已由普通金属丝电弧喷涂发展成为高速金属—陶瓷复合管状丝电弧喷涂,涂层的质量大幅提高,应用范围也得到扩展;冷喷涂可在较低温度(600℃ 以下)下喷涂一些高塑性易氧化的金属材料,获得高致密度和纯净的涂层;装甲兵工程学院最近研制成功的高效能超声速等离子喷涂系统(HEPJet),可在小气体流量(3m³/h ~ 6m³/h)和较低功率(50kW ~ 80kW)下获得超声速粒子射流,能制备超高硬度 WC 硬质合金涂层和梯度功能热障涂层,还可方便地制备纳米结构涂层,相对于国内外普通等离子喷涂,涂层的质量有了显著提高。在涂层后加工领域,电解、超声先进切削、研磨技术的出现,解决了高硬度难加工的金属或陶瓷涂层的精细加工问题,显著提高了涂层后加工的质量和效率。

为了较全面系统地向热喷涂生产领域的工程技术人员普及热喷涂技术的基本知识,推广现代热喷涂技术在先进制造、设备维修和再制造技术领域的应用,我们组织编写了这套《热喷涂技术丛书》。包括《热喷涂实用技术》、《热喷涂技术问答》、《热喷涂材料及应用》和《热喷涂工程师指南》四个分册。该丛书主要供热喷涂技术领域的工程技术人员及蓝领工人阅读使用,也可供先进制造技术领域的设计人员、技术人员及大专院校相关专业的师生参考。

本书为《热喷涂技术丛书》的第四分册,分为十章,主要围绕热喷涂技术的基础理论及相关工艺过程,着重应用实际,全面系统地介绍热喷涂技术的

原理、方法及发展方向,热喷涂工件的表面预处理,热喷涂设备的分类、工艺优化、应用指导及故障与处理,热喷涂材料的分类、选择与制备,热喷涂涂层的设计,热喷涂涂层的后加工手段及实例分析,热喷涂涂层的评价与检测方法以及热喷涂施工安全与防护等内容。为面向热喷涂生产一线的高级蓝领技术人员,无论从热喷涂材料选取以及热喷涂涂层的设计、工艺选择与优化等角度,还是对相关涂层性能的预测角度都提供了一种更为直观的依据。

本书由王海军任主编,各章节编写人员为:第一章王海军、郭永明,第二章谢兆钱、李绪强,第三章郭永明、徐军,第四章蔡志海、朱卫锋,第五章刘明、王海军,第六章王海军,第七章郭永明、徐军,第八章吴志远、韩文政,第九章蔡志海、郭永明,第十章刘明。全书由王海军、郭永明统稿,韩文政教授审稿,韩志海参加了校阅工作。

本书得到了装甲兵工程学院许多同事的帮助与支持,在此深表感谢。

本书在编写过程中参考了许多文献,特别是近年来的相关著作和学术论文资料,在此谨向原文献作者表示诚挚的敬意。

由于作者的水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请各位读者、同行和专家批评指正。

作 者

2010 年 4 月

目 录

第一章 概述	1
1.1 热喷涂涂层形成的基本原理	1
1.2 热喷涂粒子的特性	1
1.2.1 喷涂粒子的加热特性	1
1.2.2 喷涂粒子的加速特性	2
1.3 热喷涂涂层与基体的结合机理	3
1.3.1 热喷涂涂层与基体的结合方式	3
1.3.2 热喷涂涂层与基体结合强度的影响因素	4
1.4 热喷涂技术的特点	4
1.4.1 热喷涂技术的优势	4
1.4.2 热喷涂技术的不足	5
1.5 热喷涂方法、设备与工艺	5
1.5.1 热喷涂方法的分类及特点	5
1.5.2 热喷涂设备	6
1.5.3 热喷涂工艺	7
1.5.4 热喷涂设备的技术参数	10
1.6 热喷涂技术的发展背景	11
1.7 热喷涂技术的发展方向	12
第二章 热喷涂工件的表面预处理	14
2.1 基体表面预加工	14
2.2 基体表面净化处理	15
2.2.1 常用表面除油处理技术	16
2.2.2 常用表面除锈处理技术	19
2.3 基体表面粗化处理	21
2.3.1 喷砂处理	22
2.3.2 机械加工粗化	29
2.3.3 电拉毛	32

2.4	非喷涂表面的保护	32
2.4.1	胶带保护	33
2.4.2	化合物保护	33
2.4.3	机械保护	34
第三章	火焰喷涂技术	35
3.1	燃烧火焰特性	35
3.1.1	火焰的燃烧原理	35
3.1.2	火焰的形貌特点	36
3.1.3	火焰的燃烧方式	37
3.1.4	火焰的传播特性	38
3.2	普通火焰喷涂、喷熔技术	39
3.2.1	线材火焰喷涂技术	39
3.2.2	棒材火焰喷涂技术	44
3.2.3	粉末火焰喷涂技术	45
3.2.4	粉末火焰喷熔技术	48
3.3	超声速火焰喷涂技术	56
3.3.1	概述	56
3.3.2	超声速焰流的形成条件	58
3.3.3	超声速火焰焰流的特征	58
3.3.4	超声速火焰喷涂系统组成与特点	59
3.3.5	超声速火焰喷涂涂层的典型应用	63
3.4	AC-HVAF 喷涂技术	64
3.4.1	AC-HVAF 喷涂工艺原理	64
3.4.2	AC-HVAF 系统组成	64
3.4.3	AC-HVAF 喷涂工艺及涂层特点	66
3.4.4	AC-HVAF 的典型应用	66
3.5	爆炸喷涂技术	67
3.5.1	概述	67
3.5.2	爆炸喷涂原理和特点	68
3.5.3	爆炸喷涂的气体动力学	70
3.5.4	爆炸喷涂设备	72
3.5.5	爆炸喷涂的涂层特点与应用	72
3.6	火焰喷涂故障分析与排除	73
3.6.1	系统故障分析	73

3.6.2	涂层问题分析	80
第四章	电弧喷涂技术	83
4.1	概述	83
4.1.1	电弧喷涂原理	83
4.1.2	电弧特性	84
4.1.3	电弧喷涂的主要特点	85
4.1.4	电弧喷涂与其他表面技术的对比	86
4.1.5	高速电弧喷涂技术	88
4.2	电弧喷涂系统	93
4.2.1	电弧喷枪	94
4.2.2	电弧喷涂电源	96
4.2.3	线材输送机	98
4.2.4	送丝软管	100
4.2.5	电弧控制器	101
4.3	电弧喷涂涂层制备	101
4.3.1	电弧喷涂涂层材料选择	102
4.3.2	电弧喷涂涂层厚度设计	102
4.3.3	典型环境下的防腐蚀涂层设计	106
4.4	电弧喷涂车间	107
4.5	电弧喷涂工艺指导	108
4.5.1	电弧喷涂的工艺流程	108
4.5.2	电弧喷涂工艺参数的选择	109
4.6	电弧喷涂涂层的封闭处理	114
4.7	电弧喷涂应用实例	116
4.8	电弧喷涂系统维护与故障排除	118
4.8.1	系统维护	118
4.8.2	系统故障及排除	119
第五章	等离子喷涂技术	126
5.1	等离子喷涂的基本知识	126
5.1.1	等离子体	126
5.1.2	自由电弧和压缩电弧	127
5.1.3	等离子弧的类型	128
5.1.4	等离子弧的特点	130
5.1.5	等离子弧的伏安特性	131

5.1.6	等离子喷涂的工作气体	132
5.1.7	等离子喷涂的基本原理和特点	134
5.2	普通等离子喷涂	135
5.2.1	设备	136
5.2.2	工作间	155
5.3	低压等离子喷涂	155
5.3.1	特点	156
5.3.2	设备	157
5.3.3	喷涂工艺	160
5.4	超声速等离子喷涂	162
5.4.1	特点	163
5.4.2	设备	164
5.4.3	典型应用	170
5.5	水稳等离子喷涂	175
5.6	三阴极等离子喷涂	176
5.7	等离子喷涂工艺指导	177
5.7.1	等离子工作气体的选择	178
5.7.2	等离子喷涂参数的选择	179
5.7.3	等离子喷涂的若干工艺问题	181
5.8	零件修复工艺实例	186
5.8.1	重载履带车辆典型零件的修复	186
5.8.2	活塞裙部尺寸加大及修复	189
5.8.3	瓦楞棍的修复	192
5.8.4	沉没辊和稳定辊的修复	193
5.9	等离子喷涂故障分析及排除	193
5.9.1	系统故障分析	193
5.9.2	涂层问题分析	195
第六章	热喷涂涂层设计	198
6.1	概述	198
6.2	热喷涂涂层设计的命名及表示方法	198
6.3	零部件工况分析	199
6.3.1	几何因素	199
6.3.2	应力因素	199
6.3.3	环境因素	199

6.3.4	其他因素	200
6.4	基体表面的设计	200
6.4.1	机械加工	201
6.4.2	脱脂处理	201
6.4.3	预热处理	202
6.4.4	粗化处理	203
6.5	涂层体系的设计	203
6.5.1	底层材料的选择	203
6.5.2	涂层结构的设计	205
6.6	涂层制备工艺的设计	208
6.6.1	涂层制备工艺的选择原则	208
6.6.2	涂层制备工艺优化	209
6.7	涂层后处理工艺设计	212
6.7.1	涂层后热处理	212
6.7.2	涂层后封孔处理	213
6.8	涂层的包装、贮存与运输	215
第七章	热喷涂材料	216
7.1	热喷涂材料分类和要求	216
7.2	热喷涂线材	216
7.2.1	锌、铝、锌铝合金及低熔点合金丝	216
7.2.2	铁基合金丝	217
7.2.3	铜与铜合金丝	217
7.2.4	镍与镍合金丝材	218
7.2.5	复合喷涂丝材	218
7.2.6	其他喷涂丝材	219
7.3	热喷涂(熔)粉末材料	219
7.3.1	常用的底层材料	219
7.3.2	金属及合金粉末	220
7.3.3	陶瓷和金属陶瓷粉末	227
7.3.4	纳米结构粉末	227
7.3.5	塑料粉末	229
7.3.6	复合材料粉末	231
7.4	热喷涂材料参数、性能参考数据	235
7.4.1	自熔性合金粉末	235

7.4.2	金属陶瓷喷涂粉末	237
7.4.3	镍基喷涂粉末	237
7.4.4	钴基喷涂粉末	240
7.4.5	铁基喷涂粉末	241
7.4.6	铜基喷涂粉末	242
7.4.7	陶瓷喷涂粉末	242
7.4.8	其他喷涂粉末	243
7.5	热喷涂涂层选择指导	244
7.5.1	耐腐蚀涂层	245
7.5.2	耐磨损涂层	246
7.5.3	减摩与封严涂层	248
7.5.4	耐高温热障涂层	249
7.5.5	绝缘或导电涂层	250
7.5.6	修补涂层	251
第八章	热喷涂涂层机械加工技术	252
8.1	热喷涂涂层机械加工的特点	252
8.2	热喷涂涂层的车削加工	253
8.3	热喷涂涂层的磨削加工	259
8.3.1	影响砂轮切削性能的因素及其选用	259
8.3.2	磨削用量的选择	261
8.4	热喷涂涂层的特种加工	264
8.4.1	电解磨削	264
8.4.2	超声振动车削	266
8.4.3	加工激光熔覆硬韧材料齿面的实例	269
第九章	热喷涂涂层的检测与分析	272
9.1	热喷涂涂层的物理性能检测	272
9.1.1	热喷涂涂层的质量检测	272
9.1.2	热喷涂涂层厚度测量	276
9.1.3	热喷涂涂层密度的测定	277
9.1.4	热喷涂涂层孔隙率的测定	279
9.1.5	涂层沉积效率的测定	283
9.2	热喷涂涂层的力学性能检测	284
9.2.1	涂层硬度的测定	284
9.2.2	涂层结合强度的测定	289

9.2.3	涂层的断裂韧性	295
9.2.4	涂层的疲劳强度测试	296
9.2.5	涂层残余应力的检测	297
9.3	热喷涂涂层的形貌与组织结构分析	301
9.3.1	热喷涂涂层结构的金相检测	301
9.3.2	热喷涂涂层的微观形貌分析	306
9.3.3	热喷涂涂层的成分分析	309
9.3.4	热喷涂涂层的相结构分析	312
9.3.5	热喷涂涂层的显微组织分析	313
9.4	热喷涂涂层的耐腐蚀性能检测	316
9.4.1	腐蚀试验方法	316
9.4.2	腐蚀试验结果评定	321
9.5	热喷涂涂层的耐磨损性能检测	323
9.5.1	磨粒磨损试验	323
9.5.2	滑动摩擦磨损试验	325
9.5.3	滚-滑动摩擦磨损试验	325
9.6	热喷涂涂层耐热性能的测定	327
9.6.1	隔热试验	327
9.6.2	热寿命试验	328
9.6.3	热震试验	328
9.6.4	抗高温空气氧化性能试验	329
第十章	热喷涂安全与防护	331
10.1	热喷涂工作气体的安全使用	331
10.2	热喷涂设备的安全使用	332
10.2.1	火焰喷涂设备的安全使用	332
10.2.2	等离子喷涂设备的安全使用	332
10.2.3	电弧喷涂设备的安全使用	333
10.2.4	其他设施设备的安全使用	334
10.3	热喷涂劳动防护	336
10.3.1	人员防护	336
10.3.2	高频电场的防护	339
10.3.3	放射性防护	340
10.4	有毒物质	340
10.5	卫生预防与保健	341

10.6 操作人员警示语.....	341
附录 部分推荐厂商及其产品.....	342
参考文献.....	374

第一章 概述

1.1 热喷涂涂层形成的基本原理

热喷涂技术是利用火焰、电弧、等离子弧等热源,将粉末状(或丝材、棒材)材料瞬间加热至熔融或半熔融状态,同时对这种材料粒子进行加速,撞击基体经扁平化后快速冷却凝固沉积在基体表面形成覆盖层的一种材料成形方法,其基本原理如图 1-1 所示。

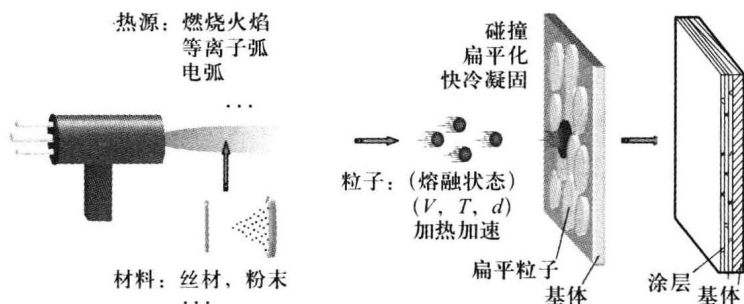


图 1-1 热喷涂技术原理

热喷涂涂层的形成时间非常短,一般在数十微秒内完成,一般包括以下 3 个基本过程。

(1) 热喷涂粒子的产生过程。

(2) 热喷涂粒子与热源相互作用形成熔融或半熔融状态的过程。

(3) 热喷涂粒子加热加速后,高速撞击基体,伴随横向流动扁平化后快速冷却凝固的过程。

1.2 热喷涂粒子的特性

1.2.1 喷涂粒子的加热特性

在温度为 T_g 的气流中,设有球形粒子直径为 d_p ,温度为 T_p ,在 d_t 时间内气流

传给粒子的热量为 d_Q , 则根据对流换热规律有:

$$d_Q = hA(T_g - T_p)d_t \quad (1-1)$$

式中: h 为气体与粒子的换热系数; A 为粒子的表面积, $A = \pi d_p^2$ 。

设粒子热传导率较高, 在 d_t 时间内将热量 d_Q 均匀传入粒子内部, 使其产生 dT_p 的平均升温, 则有:

$$d_Q = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p c_p dT_p \quad (1-2)$$

由式(1-1)与式(1-2)可得

$$\frac{dT_p}{d_t} = \frac{6h}{\rho_p c_p d_p} (T_g - T_p) = \frac{6Nu\lambda_g}{\rho_g c_p d_p^2} (T_g - T_p) \quad (1-3)$$

式中: Nu 为努塞尔数, 为热传导热阻与界面换热热阻之比; 由下式给出:

$$Nu = \frac{hd_p}{\lambda_g} = 2 + 0.6 Pr^{1/3} Re^{1/2} \quad (1-4)$$

式中: Re 为雷诺系数; Pr 为普朗特数, $Pr = c_g \eta_g / \lambda_g \approx 1$; 且

$$Re = \frac{\rho_g v_g d_p}{\eta_g} \quad (1-5)$$

式中: λ_g 为气体的热导率; c_p 为粒子的比热容; c_g 为气体的比热容; η_g 为气体的黏度; v_p 为粒子与气体的相对速度; ρ_g 为气体密度; 其中下标 p 表示粒子参数, 而下标 g 表示气流参数。

1.2.2 喷涂粒子的加速特性

气流对固体粒子的加速可以根据气固两相粒子的流体的作用考虑。设有速度均匀的气流, 其速度为 v_g , 气体密度为 ρ_g , 在气流中粒子直径为 d_p , 密度为 ρ_p , 沿气流方向的运动速度为 v_p , 当忽略粒子的重力等其他作用时, 气流对粒子的作用主要为拖曳力。

在上述条件下有:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d A \rho_g (v_g - v_p) |v_g - v_p| \quad (1-6)$$

式中: C_d 为阻力系数, 取决于雷诺数(Re)的大小; ρ_g 为气体的密度; A 为粒子截面积, $A = \pi d^2/4$ 。

根据牛顿运动定律, 则有:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_d \quad (1-7)$$

由 $A/m_p = \frac{3}{2d_p\rho_p}$, 即得

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{3C_d \rho_g}{4d_p \rho_p} (v_g - v_p) |v_g - v_p| \quad (1-8)$$

上式变形后可得

$$\frac{dv_p}{dx} = \frac{3C_d \rho_g}{4d_p \rho_p v_p} (v_g - v_p) |v_g - v_p| \quad (1-9)$$

式(1-8)与式(1-9)即为球形粒子在气流中的加速方程。一般情况下,气流速度为粒子运动轨迹的函数,同时,粒子在运动过程中因速度的变化引起拖曳系数的变化,因此,在已知加速气流速度规律时,需要逐次计算获得粒子的速度。

1.3 热喷涂涂层与基体的结合机理

1.3.1 热喷涂涂层与基体的结合方式

通常认为热喷涂涂层与基体之间的结合方式有以下几种。

1. 机械结合

熔融或半熔融状的粒子撞击到经过粗化处理的基体表面时,铺展成扁平状的液态薄片覆盖并紧贴在基材表面的凹凸点上,在冷凝时收缩咬住凸点(或称抛锚点),形成机械结合。机械结合是热喷涂涂层与基体结合的最主要形式。

2. 扩散微冶金结合

在喷涂放热型喷涂材料时,基体表面微区内接触温度可高达基材的熔点,因此,有可能使熔融粒子向基材发生扩散,形成金属键结合的微区冶金结合,从而提高涂层与基体间结合性能。常用的自粘结喷涂粉末有 Ni-Al 和 NiCr-Al 复合粉末,这种复合粉末常采用包覆形式,如 Ni 包 Al 和 Al 包 Ni 两种形式。其次 Al 与 Co、Cr、Mo、Nb、Ta、W 及 Si 与 Co、Cr、Mo、Nb、Ta、W、Ti 中的一种或几种制成的复合粉末也有自粘结效应。另外 Mo、W、Ta 这些难熔金属喷涂到低熔点的钢铁表面时,也可以引起基体表面局部熔化,与基体形成微冶金结合,这类材料也称为自粘结材料。

例如,在低碳钢上用钼丝进行火焰喷涂时,结合层发现有 Fe_3Mo_2 、 Fe_7Mo_6 等,厚度可达 $1\mu\text{m}$ 左右,原因是飞行中的高温钼粒子表面在急剧氧化与升华的同时,形成极薄的氧化物层,因此当覆盖着很薄氧化物层的熔融钼粒子撞击基体表面时,在撞击的瞬间氧化物膜破碎,洁净的高温钼接触基体表面,使钼粒子与基体之间形成微冶金结合。在电弧喷涂、等离子喷涂时也有同样的现象。

3. 物理结合

当基材表面极其干净或进行活化处理以后,基材与涂层之间产生分子间力

形成物理结合,高分子材料(塑料)喷涂时会考虑这种结合方式。

总之,喷涂层与基体之间结合以机械结合为主,某些情况下会产生扩散微冶金结合、物理结合。

1.3.2 热喷涂涂层与基体结合强度的影响因素

影响热喷涂涂层结合强度的因素主要与基体及喷涂粒子的状态有关,通常提高涂层结合强度的措施包括以下几点。

- (1) 选择合适的工艺,使喷涂粒子碰撞基体前要保持良好的熔融状态。
- (2) 尽可能地提高喷涂粒子与基体碰撞时的瞬间动能。
- (3) 基体在喷涂前要进行预热处理(预热温度一般小于 150°C)。
- (4) 基体表面应尽可能的清洁(除油、除锈等)。
- (5) 基体表面要喷砂粗化,增加涂层与基体的接触面积。
- (6) 喷涂过程中,要及时抽走环境中的粉尘,保持喷涂层表面清洁;还要对基体进行适时冷却,防止基体过热。
- (7) 有些涂层喷涂后采用重熔处理,使涂层与基体形成微冶金的结合方式。

1.4 热喷涂技术的特点

1.4.1 热喷涂技术的优势

热喷涂技术作为表面涂层的制备方法之一,与其他的表面工程技术相比,其在施工和经济方面具有以下优点。

- (1) 基体材料的种类、尺寸大小和形状几乎不受限制。

可制备涂层的基体包括金属材料、无机材料(玻璃、石膏、塑料等)、有机材料等,涂层的制备可以在整体表面上进行,也可以对大型构件的局部进行喷涂。

- (2) 涂层材料的种类广泛,涂层功能多。

只要具有熔点,且熔点远低于沸点的材料均可用于喷涂,具体包括金属及其合金、陶瓷、塑料以及它们的复合材料。应用热喷涂技术可制备出耐磨损、耐腐蚀、耐高温、抗氧化、隔热、绝缘、自润滑等多种功能的涂层。

- (3) 涂层厚度可以在较大范围内变化。
- (4) 基体材料的性能在喷涂后不发生改变。

除火焰喷熔工艺外,在喷涂施工中,基体受热温度低($< 200^{\circ}\text{C}$),基体的组织结构与性能不发生变化,工件的变形可以忽略。

- (5) 涂层可以替代零部件表面为了提高硬度采取的热处理工艺。