

抛(喷)丸 清理工艺与设备

主 编 王守仁 王瑞国
副主编 徐金成 翟永真



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书主要面向抛（喷）丸清理工艺的生产企业和相关研究机构的读者。本书包含喷丸清理工艺及喷丸系统结构设计，抛丸清理工艺及抛丸系统机构设计，抛（喷）丸清理工艺用光机电控制设备及抛（喷）丸清理工艺用材料，抛（喷）丸清理工艺的环境保护等内容。

本书可作为广大读者了解和学习抛（喷）丸清理工艺与设备的基础理论和应用技术书籍，同时也是普通高等学校先进机械制造、材料加工工程及自动化控制专业的参考教材。

图书在版编目（CIP）数据

抛（喷）丸清理工艺与设备/王守仁，王瑞国主编.

—北京：机械工业出版社，2012.4

ISBN 978 - 7 - 111 - 37598 - 2

I. ①抛… II. ①王…②王… III. ①抛丸清理机—高等学校—教材 IV. ①TG234.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 034017 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：季顺利 责任编辑：季顺利 李建秀

版式设计：霍永明 责任校对：张莉娟

责任印制：杨 曦

北京京丰印刷厂印刷

2012 年 4 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·22.75 印张·576 千字

0 001—5 000 册

标准书号：ISBN 978 - 7 - 111 - 37598 - 2

定价：60.00 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

策划编辑：(010) 88379082

社服务中心：(010) 88361066

网络服务

销售一部：(010) 68326294

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010) 88379649

教材网：<http://www.cmpedu.com>

读者购书热线：(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

钢铁等金属材料长期暴露在大气中必然发生腐蚀,形成疏松的铁锈。据不完全统计,我国每年为腐蚀支付的直接费用已达人民币 2000 亿元以上。如果考虑间接损失,花费在腐蚀方面的费用总和估计可达 5000 亿元,约占国民经济总值的 5%,而其他发达国家多年的统计数字也在 3%~5% 之间。世界范围内每年因腐蚀而损失的钢铁材料占总产量的五分之一,对现代工业造成了严重的破坏。铸件、锻件和焊件表面的粘砂、氧化皮和焊渣等清理与后处理是整个生产过程中的重要一环,对于提高零部件表面质量,改善劳动环境,实现绿色节能减排的生产具有重要作用。以前的清理方法常用酸洗、水爆、砂轮磨、砂纸打磨等,这些方法费工、费时、费力,经济性和环保性差。

抛(喷)丸清理工艺与设备可通过机械的方法把丸料(钢丸或砂粒)以很高的速度和一定的角度抛射到工件表面上,让丸料冲击工件表面,然后在机器内部通过配套的丸砂分离器将丸料和清理下来的杂质分别回收,使丸料循环利用,从而达到高效清理的目的。抛(喷)丸清理具有以下优势:能够改善工件的力学性能,提高疲劳强度以适应高效应变力,延长寿命;低成本,高效率,既经济又环保;机械化、智能化程度高。

抛(喷)丸清理工艺与设备的发展,对节约资源,提高资源利用率,实现资源节约型、环境友好型社会具有十分重要的战略意义。为适应清理与涂装需求,结合我国清理机械生产铸造企业的技术现状,为众多使用清理机械和生产清理机械的企业工程技术人员、管理人员以及现场的实际操作者,撰写一本抛(喷)丸清理工艺与设备方面的书籍,是十分必要的。

《抛(喷)丸清理工艺与设备》一书于 2010 年初开始组织策划,2011 年底完成初稿。本书内容注重实用,以抛(喷)丸清理工艺为线索,以抛(喷)丸设备结构设计为轴线,涉及清理工艺、设备、金属磨料、节能环保、自动化智能控制等,既全面总结了近年来抛(喷)丸清理工艺与常用设备的生产及应用方面的成熟经验和应用实例,又对抛(喷)丸清理行业的未来发展进行了汇总与展望,希望对读者从事抛(喷)丸清理应用与生产实践提供有益的指导。

为了使本书内容既贴近生产实际,又具有一定的深度和广度,参加编写的人员都是从事抛(喷)丸清理生产实践多年的学者、企业领导和一线专家。

《抛(喷)丸清理工艺与设备》一书由王守仁、王瑞国任主编,徐金成、翟永真任副主编。第 1 章由王瑞国、吴成民编写,第 2 章由王守仁、李辉、马茹编写,第 3 章由徐金成、王红岩、于航海编写,第 4 章由翟永真、张海平编写,第 5 章由卢军、刘高志编写,第 6 章由宋令慧编写,第 7 章由林江海、夏玉海、张志勇编写,第 8 章由杨思一、李长春编写,第 9 章由刘继广、王德志和侯琳编写。全书由王守仁总策划和统稿。来自济南大学、山东大学、山东理工大学等许多教授专家对本书进行了认真的校对和编撰,同时,山东开泰抛丸机械有限公司、济南铸造锻压研究所以及山东省机械设计研究院为本书提供了翔实的技术资料及帮助,对所有参与本书编写的作者和工作人员以及诸位友

人的辛勤劳动和努力致以衷心感谢。

本书由姜清河任主审。

由于时间仓促和编者水平所限，书中遗漏和不当之处，恳请读者批评指正。

编者

2011 年 11 月

目 录

前言

第1章 喷丸清理工艺 1

1.1 概述 1

1.1.1 喷丸处理 1

1.1.2 喷丸和喷砂 1

1.1.3 喷丸清理的特点 2

1.2 喷丸喷射的基本参数 2

1.2.1 喷丸强度 2

1.2.2 喷丸覆盖率 2

1.2.3 工件表面粗糙度 3

1.3 钢材表面的喷丸清理质量 3

1.3.1 表面清洁度 3

1.3.2 表面粗糙度 7

第2章 喷丸系统和设备 16

2.1 喷丸系统 16

2.1.1 喷丸喷射的工艺参数 16

2.1.2 喷丸缸 17

2.1.3 真空喷丸器 20

2.1.4 压缩空气与空气压缩机 22

2.1.5 压缩空气输送管道 41

2.1.6 喷砂软管与喷砂软管接头 47

2.1.7 喷丸间 53

2.1.8 喷丸箱 61

2.1.9 喷嘴 65

2.2 喷丸清理设备与机具 71

2.2.1 压送式喷丸机的种类 73

2.2.2 吸送式喷丸机具 89

2.3 高压喷丸清理 90

第3章 抛丸清理工艺 94

3.1 抛丸工艺的应用背景 94

3.2 抛丸清理的分类 95

3.3 抛丸清理的原理 95

3.4 抛丸清理和强化工艺的主要参数 98

3.4.1 抛丸清理的工艺参数 98

3.4.2 抛丸强化的工艺参数 100

3.5 抛丸落砂 101

3.6 抛丸技术的应用范围 105

3.6.1 金属表面的清理 105

3.6.2 金属工件的强化——提高疲劳

强度 106

3.6.3 表面加工 106

3.6.4 其他方面的应用 107

第4章 抛丸器 108

4.1 抛丸系统概述 108

4.2 抛丸器的结构与分析 110

4.2.1 抛丸器的结构与规格 110

4.2.2 抛丸器的结构特点与分析 113

4.3 抛丸器的工作过程 115

4.4 抛丸器的理论基础及计算 116

4.4.1 分析对象的选取 116

4.4.2 分丸轮的作用 117

4.4.3 定向套作用 118

4.4.4 叶轮叶片的形状 119

4.4.5 叶轮叶片的长度 120

4.5 抛丸器的主要参数 121

4.5.1 运动参数 121

4.5.2 结构参数 124

4.5.3 功率 125

4.5.4 抛射距离 126

4.5.5 寿命 127

4.6 选择适宜的铁丸 129

4.7 抛丸清理强化新技术 131

4.7.1 一种新颖的抛丸清理强化机——

ZJ210B 131

4.7.2 新一代水平移动式抛丸机 133

第5章 弹丸气力回收装置 137

5.1 弹丸的回收特点和回收装置 137

5.2 典型的系统布置 140

5.3 系统元件的设计 143

5.3.1 吸嘴 143

5.3.2 输料管 145

5.3.3 输料管启闭阀 147

5.3.4 分离器 148

5.3.5 弹丸卸料 152

5.3.6 旋风除尘器 154

5.3.7 布袋除尘器 155

5.3.8 风机的减振与隔振	160	9.1.1 清理设备的分类	228
5.3.9 风机的消声	161	9.1.2 清理设备的发展概况	229
5.4 气吸系统计算示例	163	9.2 清理设备的选择	230
5.4.1 系统布置	163	9.2.1 选用清理设备的一般原则	230
5.4.2 计算示例	163	9.2.2 各种清理设备的特点及适用范围	230
5.5 系统的测试	167	9.2.3 清理设备的计算	234
5.6 舱内吸丸	172	9.3 普通滚筒清理机	235
5.7 风机及真空袋	175	9.4 喷丸清理设备	237
第6章 弹丸的机械回收装置	183	9.4.1 喷丸清理设备的基本组成及主要部件	237
6.1 设备的形式和布置	183	9.4.2 履带式喷丸清理机	239
6.2 斗式提升机	186	9.4.3 转台式喷丸清理机	240
6.3 振动输送机	188	9.4.4 台车式喷丸清理机	241
6.4 刮板输送机	191	9.5 抛丸清理设备	243
6.5 带式输送机	192	9.5.1 抛丸清理设备的基本组成及主要部件	243
6.6 螺旋输送机	194	9.5.2 滚筒式抛丸清理机	248
第7章 弹丸的贮存和供应	196	9.5.3 履带式抛丸清理机	266
7.1 弹丸特性和制造工艺	196	9.5.4 吊钩式抛丸清理机	279
7.2 放料口流量	197	9.5.5 吊钩(吊链)转盘式抛丸清理机	292
7.3 扇形阀的设计	199	9.5.6 转台式抛丸清理机	292
7.4 弹丸的贮存和供应系统	201	9.5.7 台车式抛丸清理机	300
7.5 集丸地坑	202	9.5.8 吊钩式抛丸清理机	304
7.6 贮丸箱	204	9.5.9 吊链式抛丸清理机	313
7.7 斗壁压力计算	205	9.5.10 辊道式连续抛丸清理机	320
第8章 除尘装置	207	9.5.11 鼠笼式抛丸清理机	322
8.1 通风除尘	207	9.5.12 摇床式抛丸清理机	327
8.1.1 通风除尘系统的布置	207	9.5.13 机械手式抛丸清理机	329
8.1.2 除尘措施	208	9.5.14 组合式抛丸清理机	334
8.1.3 通风除尘的设计参数	210	9.5.15 专用抛丸清理机	337
8.1.4 除尘器形式	211	9.6 抛(喷)丸联合清理设备	344
8.1.5 吸尘器的布置	217	9.6.1 吊钩式抛(喷)丸清理机	345
8.1.6 风机及管道的安装	218	9.6.2 台车式抛(喷)丸清理机	348
8.2 脉冲袋式除尘器	221	9.6.3 吊钩台车式抛(喷)丸落砂清理室	354
8.2.1 抛丸工艺简述	221	参考文献	356
8.2.2 抛丸除尘系统	222		
8.2.3 KTMC 型除尘器	225		
8.3 滤筒式除尘器	225		
第9章 清理设备分类与展望	228		
9.1 清理设备的分类和发展	228		

第1章 喷丸清理工艺

1.1 概述

1.1.1 喷丸处理

喷丸处理也称喷丸强化，是提高零件疲劳寿命的有效方法之一。喷丸处理是将高速弹丸流喷射到工件表面，使工件表层发生塑性变形，形成一定厚度的强化层，强化层内形成较高的残余应力，由于工件表面压应力的存在，当工件承受载荷时可以抵消一部分抗应力，从而提高工件的疲劳强度。

喷丸是用来清除厚度不小于2mm或不要求保持准确尺寸及轮廓的中型、大型金属制品以及铸锻件上的氧化皮、铁锈、型砂及旧漆膜。喷丸是表面涂（镀）覆前的一种清理方法，广泛用于大型造船厂、重型机械厂和汽车厂等。

喷丸强化是一个冷处理过程，它被广泛用于提高长期服役于高应力工况下的金属零件，如飞机发动机的压缩机叶片、机身结构件、汽车传动系统零件等。

喷丸强化是在一个完全控制的状态下，将无数称为钢丸的小圆形介质高速且连续喷射到零件表面，从而在表面产生一个残余压应力层。当每颗钢丸撞击到金属零件上时，宛如一个微型棒敲打表面，敲出小压痕或凹陷。形成凹陷时，金属表层会产生拉伸。表层下，压缩的晶粒试图将表面恢复到原来形状，从而产生一个高度压缩力作用下的半球凹痕，无数凹陷重叠形成均匀的残余压应力层。最终，零件在压应力层保护下，极大程度地改善了抗疲劳强度，延长了工作寿命。

1.1.2 喷丸和喷砂

喷丸与喷砂都是使用高压风或压缩空气作动力，将其高速地吹出去，冲击工件表面达到清理效果，但选择的介质不同，效果也不相同。

用喷丸进行表面处理，打击力大，清理效果明显。但喷丸对薄板工件的处理，容易使工件变形，且钢丸打击到工件表面（无论抛丸或喷丸）使金属基材产生变形，如 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 ，因其没有塑性，破碎后剥离，而油膜与基材一同变形，所以对带有油污的工件，抛丸和喷丸无法彻底清除油污。在现有的工件表面处理方法中，清理效果最佳的应是喷砂清理。

喷丸处理后，工件表面污物被清除掉，工件表面不被破坏，表面积有所增加。由于加工过程中，工件表面没有被破坏，加工时产生的多余能量就会引起工件基体的表面强化，经过喷丸处理的工件表面为金属本色，由于表面为球状面，光线部分被折射掉，故工件加工后为亚光效果。

喷砂适用于工件表面要求较高的清理。喷砂处理后，工件表面污物被清除掉，工件表面被微量破坏，表面积大幅增加，从而增加了工件与涂/镀层的结合强度。经过喷砂处理的工

件表面为金属本色,但是由于表面为粗糙面,光线被折射掉,故没有金属光泽,所以表面发暗。我国目前通用喷砂设备中多由螺旋输送装置、刮板、斗式提升机等笨重的输砂机械组成。用户需要建一个深地坑及做防水层来装置机械,建设费用高,维修工作量及维修费用大,喷砂过程中产生大量的二氧化硅粉尘(俗称矽尘)无法清除,严重影响操作工人的健康并污染环境。

1.1.3 喷丸清理的特点

- 1) 可以任意使用金属或非金属弹丸,以适应清理工件表面的不同要求。
- 2) 清理的灵活性大,容易清理复杂工件的内、外表面和管件的内壁,并且不受场地限制,可将设备安置在特大型工件附近。
- 3) 设备结构较简单,整机投资少,易损件少,维修费用低。
- 4) 必须配备大功率的空压站,在清理效果相同的条件下,消耗的能量较大。
- 5) 清理表面易有湿气,容易生锈。
- 6) 清理效率低,操作人员多,劳动强度大。

喷丸清理工艺是广泛采用的一种表面强化工艺,其设备简单,成本低廉,不受工件形状和位置限制,操作方便,但工作环境较差。喷丸广泛用于提高零件机械强度以及耐磨性、抗疲劳和耐蚀性等;还可用于表面消光、去氧化皮和消除铸、锻、焊件的残余应力等。

1.2 喷丸喷射的基本参数

1.2.1 喷丸强度

影响喷丸强度的工艺参数主要有:喷丸直径、喷丸流速度、喷丸流量、喷丸时间等。喷丸直径越大,速度越快,喷丸与工件碰撞的动量越大,喷丸的强度就越大。喷丸形成的残余压应力可以达到零件材料抗拉强度的60%,残余压应力层的深度通常可达0.25mm,最大极限值为1mm左右。喷丸强度需要一定的喷丸时间来保证,经过一定时间,喷丸强度达到饱和后,再延长喷丸时间,强度不再明显增加。在喷丸强度的阿尔门(Almen)试验中,喷丸强度的表征为试片变形的拱高。

在阿尔门试验中,喷丸强度常用N试片(用于有色金属试验)、A试片(最常用)、C试片(更高强度)来进行测量,A试片和C试片之间关系为近似三倍的关系。如用C试片测得强度为0.15~0.20mm,就相当于A试片的0.45~0.60mm。试验过程中,先测量试片原有变形,然后将卡好该试片的工装置于喷丸箱内,采用与工件相同的工艺进行喷射。喷丸结束,取下试片,测量变形拱高。

1.2.2 喷丸覆盖率

覆盖率的测量:在工件表面涂上一层彩釉或萤光釉,然后按工艺参数对工件进行喷丸,工件表面喷丸一遍后将工件取出,在显微镜(放大镜)下观察残留涂层在表面所占的比例,如残留20%,则喷丸覆盖率为80%。当残留只有2%,即覆盖率为98%时,可视为全部清除,即覆盖率为100%,此时就有一个所需的时间。若达到400%的覆盖率,就需要所需时间的四倍。

影响覆盖率的因素有零件材料硬度、喷丸直径、喷射角度和距离、喷丸时间等。在规定的喷丸强度条件下，零件的硬度低于或等于标准试片硬度时，覆盖率能达到100%；反之，覆盖率会下降。在相同的喷丸流量下，喷嘴与工件的距离越长、喷射的角度越小、喷丸直径越小，达到覆盖率要求的时间就越短。喷丸强化时，应选择大小合适的喷丸、喷射角度及距离，使喷丸强度和覆盖率同时达到要求值。

1.2.3 工件表面粗糙度

影响表面粗糙度的因素有零件材料的强度和硬度、喷丸直径、喷射的角度和速度、零件的原始表面粗糙度。

在其他条件相同的情况下，零件材料的强度和表面硬度值越高，塑性变形越困难，弹坑越浅，表面粗糙度值越小；喷丸的直径越小，速度越慢，弹坑就越浅，表面粗糙度值就变小；喷射的角度大，喷丸速度的法向分量越小，冲击力越小，弹坑越浅，喷丸的切向速度越大，喷丸对表面的研磨作用就越大，表面粗糙度值就越小。零件的原始表面粗糙度也是影响因素之一，原始表面越粗糙，喷丸后表面粗糙度值降低越小；相反，表面越光滑，喷丸后表面变得越粗糙。当对零件进行高强度的喷丸后，深的弹坑不但加大表面粗糙度值，还会形成较大的应力集中，严重削弱喷丸强化的效果。

1.3 钢材表面的喷丸清理质量

1.3.1 表面清洁度

我们讨论钢材表面喷丸清理质量的出发点是为了获得良好的、能达到涂装设计确定寿命的金属涂层或非金属涂层。金属涂层和非金属涂层与钢材基体的结合属于机械结合，两者之间不发生化学反应。因此，涂漆前表面清洁度的重要性及其等级很早就被人们所认识，一些国家为此制定了相应的标准。国际标准化组织在一些国家标准的基础上制定了与喷丸清理有关的标准，是喷丸清理质量评定的基本工具。

根据国际标准化组织发布的 ISO8501-1 标准（见图 1-1），钢材表面喷丸清理质量分成以下四个等级：

- 最彻底清理级 Sa3；
- 很彻底清理级 Sa2.5；
- 较彻底清理级 Sa2；
- 非彻底清理级 Sa1。

我国采用“等效采用”的办法直接将 ISO8501-1 国际标准转变为 GB 8923—1988 国家标准。国家标准将这四种清理等级分别称为“使钢材表面洁净的喷射或抛射除锈”、“非常彻底的喷



图 1-1 国际标准化组织发布的
表面清洁度标准
(ISO 8501-1、SSPC、BS7079)

射或抛射除锈”、“彻底的喷射或抛射除锈”和“轻度的喷射或抛射除锈”。

四种清理等级无法用量化的办法来区分,也难以用语言和文字来表达,因此,ISO8501-1 标准是一种利用专门的照片进行直观评定的标准,每一种清理等级都有一张对应的 1:1 的照片,评定时,将清理后的表面与标准提供的照片进行对照,确定清理质量是否达到了涂装设计规定的要求。

作为标准的主要部分,用来评定清理质量高低的照片是不许褪色或有色差的,因此,ISO 8501-1 标准中的照片是用专门技术印刷在特殊材料上的,永不褪色。用以普通的印刷技术印刷在纸张上的照片来评定清理质量的高低就缺乏公正性和权威性,难以被大家所接受。

ISO 8501-1 标准对四种清理等级分别做了如下的文字说明:

(1) 最彻底清理级 (Sa3) 不使用放大镜观察,整个被清理表面呈现完全一致的金属本色。清理后的表面上不存在油脂和脏物,也不存在氧化皮、锈、旧漆和杂质。

(2) 很彻底清理级 (Sa2.5) 不使用放大镜观察,清理后的表面上不存在油脂和脏物,也不存在氧化皮、锈、旧漆和杂质。未被清除彻底的杂质只是以依稀可见的片状或条状存在。

(3) 较彻底清理级 (Sa2) 不使用放大镜观察,大部分的氧化皮、锈、旧漆和其他杂质被清除。残留在表面上的氧化皮、锈和旧漆与基体结合牢固。

(4) 非彻底清理级 (Sa1) 不使用放大镜观察,清理后的表面上不存在油脂和脏物,松动的氧化皮、锈、旧漆和其他杂质被全部清除。

1950 年,在国际涂装领域非常有名的钢结构涂漆委员会在美国成立,它的英文全名叫 Steel Structures Painting Council,简称 SSPC。钢结构涂漆委员会专门从事与金属保护有关的资料收集、整理、研究、鉴定、测试、文件制定和分发工作。该委员会由长期从事钢结构保护的专家学者组成,并在美国和世界各地拥有成千上万的会员,他们的工作为委员会制定表面处理和防护涂层技术要求奠定了基础。SSPC 技术要求是从事钢结构表面处理和涂漆工作所必不可少的技术文件。美国钢结构涂漆委员会对四种清理等级的文字说明在国际涂装领域也是被广泛采用的:

(1) 最彻底清理级 (Sa3) 清理后的钢材表面呈完全一致的银灰色,有一定的表面粗糙度以提高涂层的附着力。表面上的油脂、污垢、氧化皮、锈、腐蚀生成物、氧化物和其他杂质均被彻底地清除干净。

(2) 很彻底清理级 (Sa2.5) 清理后的钢材表面上不存在油脂、污垢、氧化皮、锈、腐蚀生成物、氧化物和其他杂质,允许存在由于清理不彻底而出现的阴影或色差,但每平方英寸 ($1\text{in}^2 = 6.4516 \times 10^{-4}\text{m}^2$) 上至少要有 95% 以上的表面达到最彻底清理级的水平,其余部分仅出现轻度的阴影和色差。

(3) 较彻底清理级 (Sa2) 清理后的钢材表面上不存在油脂、污垢、锈皮和其他杂质,锈、氧化皮和旧漆被清除。允许存在由于锈和氧化皮清除不够彻底而出现轻度的阴影或色差,其面积在每平方英寸上不超过 33%。如果钢材表面已经发生点蚀,蚀点深处允许有少量的锈或旧漆存在。

(4) 非彻底清理级 (Sa1) 表面经全面清理,油脂、污垢、松动的氧化皮和松动的漆皮被清除,与基材结合牢固、不能用非常锋利的铲刀清除的氧化皮、锈、油漆和涂层允许在清理后残留在表面上。表面上出现大量分布均匀的金属斑点。

达到上述四种清理等级的表面状态不但受制于清洁程度的高低,还与工件表面的原始状

态有关。ISO 8501-1 标准为此将清理前的钢材表面原始状态分成四个等级，分别用大写英文字母 A、B、C、D 表示。四种表面原始状态和清洁度等级见表 1-1。

表 1-1 四种表面原始状态和清洁度等级

清洁度等级	表面原始状态			
	A	B	C	D
最彻底清理级 (Sa3)	ASa3	BSa3	CSa3	DSa3
很彻底清理级 (Sa2.5)	ASa2.5	BSa2.5	CSa2.5	DSa2.5
较彻底清理级 (Sa2)	—	BSa2	CSa2	DSa2
非彻底清理级 (Sa1)	—	BSa1	CSa1	DSa1

注：A—致密氧化皮全面覆盖，几乎未发生锈蚀的表面。

B—锈蚀业已开始，氧化皮已开始剥落的表面。

C—氧化皮由于锈蚀而开始脱落或可被铲除，尚未出现清晰可见的腐蚀坑的表面。

D—氧化皮由于锈蚀而脱落，已出现全面腐蚀坑的表面。

A 级表面原始状态的钢材表面在清理前有致密的氧化皮保护，因此，不存在较彻底清理级和非彻底清理级的表面状态。

涂装工程的设计和施工过程中的表面清洁度等级要求要由腐蚀工程师确定。确定表面清洁度等级要求的主要依据是：被涂装对象的腐蚀环境；涂层配套和被涂装对象的预期使用寿命。

1) 对于工业性涂装，非彻底清理级 (Sa1) 不推荐使用。

2) 较彻底清理级 (Sa2) 适用于轻度腐蚀环境中使用的钢结构件或涂装设计规定的场合。

3) 很彻底清理级 (Sa2.5) 是工业性涂装中使用相当普遍的清理等级要求，使用高性能涂料的涂装设计和施工大多规定选用这种等级要求。船舶、化工设备、海上工作平台、港口机械、码头设施、冶金机械、采油设备、市政工程、航天航空等都要求涂漆前的表面达到很彻底清理级。

4) 最彻底清理级 (Sa3) 是最高级别的清理等级要求，清理成本最高，只有在一些使用特殊材料的场合和特别重要的工程和零部件涂装施工中采用，例如核电站、汽轮机和海上平台等的重要部件。使用无机锌涂料和金属喷涂的工件也往往要求表面清理达到最彻底清理等级。

达到同一清洁度等级的不同工件的表面由于清理条件的不同会有不同的外观特征，有很多因素会影响到清理后表面的外观特征。颜色并不是评定表面清洁度等级的必要条件，氧化皮、锈和旧漆等有害物质被清理的程度才是评定清理等级时不可忽视的。

钢结构件的原材料、加工或处理和其他一些因素会影响清理后表面的外观特征，这些因素包括钢材的种类、硬度、化学成分、钢结构件的成形和处理、磨料的种类和粒度、喷嘴至被清理表面的距离及其与表面的夹角、磨料颗粒撞击表面时的速度等。表面清洁度检查时应根据表面上的有害物质的清除程度而不是仅根据颜色来判断表面清洁度是否已经达到技术条件所规定的质量要求。

用于制作 ISO 8501-1 国际标准表面清洁度照片的是用石英砂进行干喷砂清理后的钢板表面，不能完全代表其他不同条件下造成的表面状态。采用不同磨料清理后的清洁度标准样板

会有助于正确评定清洁度等级。

清洁度样板用钢板制成，用透明的塑料封装防潮。使用不同磨料会产生不同的表面清洁度状态，清洁度评定用样板就有不同的种类，要根据使用的磨料选用不同的清洁度样板。清洁度样板要妥善保管，封装用的塑料一旦开裂，样板就失效了。

清理等级要求越高，清理效率就越低，清理成本也越高。实际上，清理等级高低是以消耗人力、能源、材料和时间的多少为代价的。因此，清理等级定得过低虽然不可取，但清理等级要求偏高也是不恰当的，这会使清理成本大幅度提高，造成不必要的经济损失。一般来说，涂料的使用和施工说明书中都会对表面处理提出要求，这是规定清理等级的主要依据之一。表 1-2 列出了喷丸清理等级与清理效率、磨料消耗的关系及不同等级的相对费用。

表 1-2 喷丸清理等级与清理效率、磨料消耗的关系及不同等级的相对费用

喷丸清理等级	清理效率/ (m ² /d)	磨料消耗/ (kg/d)	相对费用
非彻底清理级 (Sa1)	483	3180	1
较彻底清理级 (Sa2)	232	3630	2 -
很彻底清理级 (Sa2. 5)	139	4536	5
最彻底清理级 (Sa3)	93	5670	9 +

注：清理条件为两支 9.5mm 喷嘴，三人作业，0.56MPa 工作压力，工件原始表面状态为 B，磨料粒度为 30 ~ 80 目 (0.18 ~ 0.6mm)，每天工作 8h。

喷丸清理的效率和清理成本还与钢材表面的原始状态有关，致密氧化皮覆盖的新钢材清理效率就要低一些，清理成本也就要高一些。作者曾经看见过清理一个渔船的场面，渔船表面上锈垢的厚度大约有 10mm 左右，清理这样的表面效率肯定是很低的，代价必然是很高的。

曾有这种做法，有一定浓度的氯化钠（食盐）溶液泼洒在氧化皮覆盖的钢板表面，加速钢材表面的锈蚀，喷丸清理的效率就可以提高一些。作者认为该方法不宜推广，因为，喷丸清理难以把钢材表面上的氯化钠清除彻底，残留的氯化钠会使涂层提前失效。

对于长期暴露于工业大气、污染或锈蚀相当严重的钢材或钢结构件以及在空气含盐浓度较高的环境中清理的工作，除了要用表面清洁度标准来评定清理等级以外，还要测定表面上残留的可溶性盐类的浓度，Elcometer 公司的 Bresle Patch 就是专门为此而开发的，测定表面上残留的可溶性盐类浓度的贴片和注射用针如图 1-2 所示。

贴片的四周涂有粘性材料，使用时，将贴片粘贴在待测试的表面上，其中间部分与被测试表面间保持有一定的间隙，然后用注射器向间隙内注入一定量的蒸馏水（溶剂），并反复吸出/注入多次，使贴片所包围的面积上的盐类全部溶解在蒸馏水中。最后用注射器将溶液全部吸出，用导电计测定该溶液的食盐浓度，从而得出被测表面单位面积上可溶性盐类的浓度。施工现场测定表面可溶性盐度的参数如图 1-3 所示。



图 1-2 测定表面上残留的可溶性盐类浓度的贴片和注射用针

类浓度的贴片和注射用针

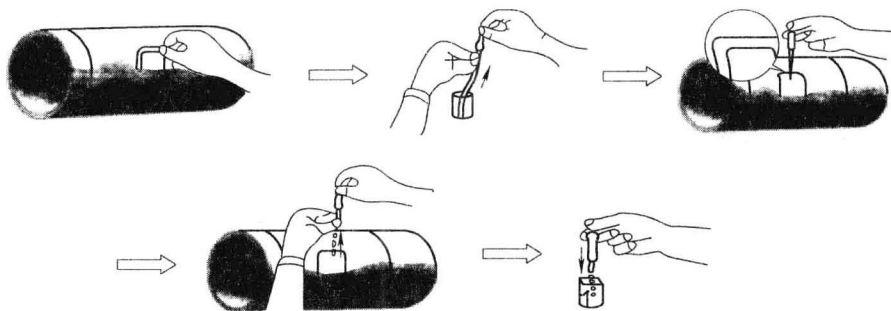


图 1-3 施工现场测定表面可溶性盐度的参数

1.3.2 表面粗糙度

熟悉四种清洁度等级之间的差别并能根据需要制定正确的清洁度技术要求，只是喷丸清理工作的一部分。为了获得性能良好的涂层，钢材表面不但要达到技术要求规定的清洁度，还要求表面具有一定程度的表面粗糙度，使涂层在钢材表面上具有更好的附着力。

确定适当的表面粗糙度值与确定正确的清洁度要求同样重要。如果表面没有足够的表面粗糙度，涂层就不能很好地附着在清理后的表面上，涂层就会提前失效。

钢材表面喷丸清理时，不论达到何种清洁度等级，表面清洁度和表面粗糙度都会同时产生，但表面粗糙度值很可能没有达到与涂层配套所规定的要求。

分配任务或工程招标时，忽略对表面粗糙度的要求是一个很大的错误。这个现象目前还很普遍。制定涂装技术要求的技术人员在处理涂层失效事故时往往会罗列出清洁度方面的各种各样原因，就是不会想到对表面粗糙度值提出具体的要求。要知道，涂层提前失效的许多事例中，表面粗糙度值不当可能是更为直接的原因。

有些学者甚至认为，表面粗糙度对涂层附着力的作用甚至大于表面清洁度的作用，这足以说明表面粗糙度在保证涂层寿命中的重要性。

什么是表面粗糙度？表面粗糙度是怎样形成的？表面粗糙度怎么控制？表面粗糙度值多大为好？表面粗糙度值怎样确定？怎样利用正确的设备和磨料来获得恰当的表面粗糙度？这些问题都将在下面逐一讨论，使读者理解表面粗糙度在保证涂层质量中的重要性。

通常把喷丸清理时磨料颗粒作用于工件表面而产生的表面不平整度叫做表面粗糙度。磨料颗粒在被处理表面（特别是钢材表面）上的切削、撞击和冲刷作用使表面产生大量的凹陷和隆起，我们把凹陷部分称为波谷，把隆起部分称为波峰。每一个磨料颗粒都会在被清理表面上造成一个波峰和一个波谷。

表面粗糙度值和涂层厚度一样，都用微米（ μm ）表示。表面粗糙度值是最低波谷的底部与最高波峰的峰顶之间的垂直距离。表面粗糙度的评定用标准表面粗糙度样板，表面粗糙度计及拓片可用来评定和记录表面粗糙度值的大小。

高性能涂料问世前，涂料使用说明书往往对需要涂装的表面只提出喷丸清理的清洁度要求。高性能涂料问世后，美国的涂料商、喷丸清理和油漆工程的承包商与美国钢结构涂漆委员会（SSPC）和腐蚀工程师协会（NACE）等机构合作，经过大量的实验和应用实际，发布了许多很有实用价值的指导性技术资料，使表面处理和涂漆的设计、施工和质量检查有一个统一的依据，使涂层的保护性能达到预期的目的。

在与喷丸清理有关的英语资料中，对应于喷丸清理产生的表面粗糙度的单词至少有三

个,其中,用得最妙的是“anchor”这个单词,这个单词的主要意思是“锚”。“anchor”十分形象地把表面粗糙度对涂层附着力的作用表达了出来。

表面粗糙度至少还有另外三个作用:

1) 使涂层与工件表面间的实际结合面积增加,有利于提高涂层结合力。磨料粒度和实际表面积与理论表面积之比见表 1-3。

表 1-3 磨料粒度和实际表面积与理论表面积之比

磨料粒度/目 (mm)	实际表面积/理论 表面积之比	磨料粒度/目 (mm)	实际表面积/理论 表面积之比
85 (0.18)	1.19	25 (0.71)	1.43
52 (0.3)	1.21	22 (0.85)	1.53
41 (0.355)	1.28	18 (1.0)	1.61
36 (0.5)	1.33	16 (1.2)	1.63
80 (0.6)	1.41		

2) 图层在固化过程中会产生很大的内应力,表面粗糙度的存在可以有效地消除图层中的应力集中,防止涂层开裂。

3) 表面粗糙度的存在可以支撑一部分涂料的质量,有利于消除流挂现象,对于垂直涂装的表面,作用尤为明显。

表面粗糙度是由磨料颗粒以很高的速度接触表面时,撞击、切削和冲刷的联合作用造成的,因此,磨料的粒度、硬度、颗粒形状、工件本身材质的硬度、压缩空气的压力、喷嘴与工件表面间的距离以及喷嘴与工件表面法向之间的夹角决定了表面粗糙度的大小和轮廓形状。

表面粗糙度和表面清洁度一样,也要由腐蚀工程师根据涂装要求来确定,决定表面粗糙度值大小的主要依据是涂层的种类和最终涂层的厚度。

在缺乏制定表面粗糙度值所需的条件或技术资料时,可以暂时把表面粗糙度值确定在最终涂层厚度的 25 % ~ 30% 之间。例如,最终涂层厚度要求是 150 μm ,则把表面粗糙度值确定在 38 ~ 45 μm 范围内即可。另一种方法是根据底漆的厚度来确定表面粗糙度值的高低,表面粗糙度值不能大于底漆厚度,喷涂底漆后立即涂第二道漆的可以除外。

表面粗糙度值偏低,对提高涂层附着力不利;表面粗糙度值偏高,涂装设计规定的涂层厚度就有可能无法把表面粗糙度中的所有波峰全部遮盖住,时间不长就会出现点蚀,造成涂层提前失效。

保持整个喷丸清理过程中磨料粒度的一致性在保证表面粗糙度前后一致的必要前提,不同用途的磨料绝对不能混用或代用。例如,有一家钢结构件制造公司承接了一项钢结构件制造工程,这个工程中的钢结构件有的需要涂装,有的需要对高强度螺栓连接的结合面打毛,以提高结合面之间的摩擦因数。用于打毛的磨料不但粒度大,而且硬度高,由于涂漆前表面处理所需的磨料一时跟不上,该公司就把打毛用的磨料用上了。工件运到工地不久,问题就暴露出来了,密密麻麻的点蚀让人大吃一惊,只好重新打磨,再刷上一遍涂料。这个问题的根源就在于大粒度、高硬度的磨料造成的表面粗糙度用设计规定的涂层无法有效地覆盖,易发生锈蚀。磨料种类和硬度与表面粗糙度值及磨料粒度的关系见表 1-4。

表 1-4 磨料种类和硬度与表面粗糙度值及磨料粒度的关系 (单位: 目、mm)

材料种类和 硬度	表面粗糙度值/ μm						
	13	25	38	51	63	76	102
石英砂 (莫氏 5~6)	80、120	30、50	20、40	16、30	12、25	10、20	8、16
矿砂 (莫氏 7)	90	80	55				
金刚砂 (莫氏 7~8)	100	80	60	40	36	24	16
燧石 (莫氏 6.5~7)		30、60	20、50	16、35	10、30	8、25	6、20
煤渣 (莫氏 7)		50、100	40、70	30、60	20、40	16、30	12、20
铜/镍炉渣 (莫氏 7~7.5)		70、100	60、80	40、80	30、50	20、40	16、30
氧化铝 (莫氏 8)	从经济性考虑, 氧化铝磨料只能用于喷丸间或喷丸箱, 回收再利用						
	120	80	50	40	36	24	16
碳化硅 (莫氏 8)	从经济性考虑, 碳化硅磨料只能用于喷丸间或喷丸箱, 回收再利用						
	150	100	80	50	40	36	30
核桃壳 (莫氏 8)	核桃壳一般只用于清理或去毛刺, 不以改善表面粗糙度为目的, 需回收再利用						
	35、60	14、30	6、10				
塑料磨料 (莫氏 3~4)	塑料磨料通常用于清除旧漆皮, 清理硬度不高的表面, 不以改善表面粗糙度为目的, 需回收再利用 粒度有: 12、16、16、20、20、30、20、30、30、40、40、60、60、80						
玉米棒磨料 (莫氏 4.5)	用于清除电动机、碎石、木材等表面, 可产生轻微的表面粗糙度 粒度有: 6、10、8、12、12、20、14、30、18、40、35、60、40、100						
钢砂、铁砂 R_c 为 40~68 μm	只用于喷丸间和喷丸箱, 回收再利用, 只要使用恰当, 经济性最好						
	G-200	G-120	G-80	G-50	G-40	G-25	G-16
塑料磨料 (莫氏 5~6)	用于表面抛光处理, 粒度: 粗级 20、30 到细级 170、325						
钢丸、铁丸 R_c 为 40~58 μm	通常用于抛光清理, 仅列出粒度范围, 选用时要考虑其他因素 粒度范围: S780~S70						

可利用表 1-4 选择合适的磨料, 最好再做一些现场试验, 依此确定所需磨料的种类和粒度。试验时, 至少要连续喷丸 230kg (金属磨料 600kg) 的磨料, 而且要保证试验条件与实际工作条件相同, 试板的材质与所需处理的工件材质一致。试件要经过直观评定, 以技术数

据对清理等级和表面粗糙度是否符合技术要求做出评定,要将试验时空气压缩机的容量排出压力、空气软管的规格和长度、喷嘴的规格和型号、喷嘴至被清理表面之间的距离及二者之间的夹角等内容记录在案。如试验结果符合要求,就应该定购足够数量的磨料。反之,应重复同样的试验,直至取得满意的结果,并把最终的试验结果做好记录,以备后用。

如果试验用的样板或现场钢结构中的试验用表面需要在整个施工过程中保留以作参考,就要用干燥的压缩空气将这些表面清理干净后涂上清漆。清理工作结束,用相同的清理方法将钢结构试验表面上的清漆清除干净,然后涂上规定的涂料。

根据表面粗糙度要求认真选择适当的磨料,使表面粗糙度始终保持在允许的范围内是每一位涂装管理人员和施工人员的责任。只重视清洁度要求而忽视表面粗糙度要求的现象必须克服。

除磨料以外,压缩空气的压力也会对表面粗糙度造成很大的影响。我们知道,喷丸清理是以压缩空气为动力的清理作业,磨料颗粒在压缩空气的推动下加速到相当高的速度后获得足够的动能。

喷丸清理时,压缩空气的流量和压力必须恒定,否则,表面清洁度和表面粗糙度就会发生变化。在磨料的质量、粒度不变的前提下,磨料颗粒的速度一旦改变,表面粗糙度值就会发生变化。喷丸清理的工作压力(喷嘴进口处的压力,下同)变化 0.07 MPa,表面粗糙度值就会高出或低于设计要求。大部分的表面粗糙度设计要求只允许有 $\pm 13\mu\text{m}$ 的偏差,要是压缩空气工作压力发生 0.07 ~ 0.1 MPa 的变化,表面粗糙度值的变化肯定会超过 $\pm 13\mu\text{m}$ 。

影响表面粗糙度大小的第三个因素是喷丸工人的操作习惯。喷丸清理时,喷嘴与工件间的距离以及喷嘴与被清理表面间的夹角变化会改变表面粗糙度值的大小。喷嘴离工件太远,磨料撞击表面时的速度就会降低。长文丘里型喷嘴离开工件表面约 460 mm 时,磨料颗粒的速度最高。当喷嘴离开工件表面 610 ~ 762 mm 时,磨料颗粒撞击表面时的速度就会明显下降,表面粗糙度值就会大幅度减小。喷丸清理时,喷嘴应尽可能垂直于工件表面并注意保持喷嘴与被清理表面之间的距离。喷丸工人要经过良好培训,使他们熟悉喷丸清理所使用的设备和材料,了解它们对喷丸清理效率和清理质量的影响,懂得清洁度等级和表面粗糙度的概念。只有这样,喷丸工人才能胜任喷丸清理这种特殊的作业,否则,清理质量将无法得到保证。

工作条件如下:

工作压力: 0.62 ~ 0.66 MPa;

喷嘴: 长文丘里型喷嘴;

喷射距离: 457 ~ 610 mm;

喷射角度: $85^\circ \sim 90^\circ$;

工件材质: 碳钢。

如不提高工作压力,只提高磨料的运动速度,在硬度较大的工件表面所造成的表面粗糙度值会低于表 1-4 的数值。

喷嘴对表面粗糙度的影响容易被忽视。我们知道,磨料颗粒的速度越高,磨料颗粒的动能就越大,动能与速度之间的关系用公式表示为

$$E = \frac{mv^2}{2}$$

式中 m ——磨料颗粒的质量;

v ——磨料颗粒的速度。

磨料颗粒的速度除了与压缩空气的压力有关以外,还要受到喷嘴的影响,因为不同内部结构的喷嘴具有不同的空气动力学特性。空气动力学性能好的喷嘴能量损耗小,压缩空气和磨料的流动顺畅,磨料的出口速度就高。相反,内部结构不合理、制作粗糙的喷嘴空气动力学性能就差,能量损耗大,压缩空气和磨料的流动不畅,磨料的出口速度就低。

在0.7MPa压力条件下,经直桶形喷嘴(其内部结构为收缩段加平直段)喷出的磨料颗粒的速度为97m/s,而经文丘里型喷嘴(其内部结构为收缩段加平直段加扩散段)喷出的磨料颗粒的速度可以达到200m/s,是前者的两倍多。根据动能公式,二者的动能就要相差三倍。

因此,在相同的涂装工程中,喷嘴的品牌和类型不要随意改动,绝对不要选用价格低廉而制作粗糙的喷嘴,这不但会降低清理效率、提高清理成本,而且还会影响表面粗糙度。另外,喷嘴磨损到一定程度就应该及时报废,以免喷嘴口径扩大致使工作压力下降而造成磨料速度降低。磨料速度降低就会直接影响到表面粗糙度值。

与表面粗糙度有关的还有以下几个问题:

- 1) 喷丸清理时间的长短对表面粗糙度的大小几乎没有影响。
- 2) 喷嘴与表面之间的夹角会影响表面粗糙度值的大小,但在 $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 之间变化时不是很明显。
- 3) 用大颗粒磨料清理难以清理的表面可以提高工作效率,但会使表面粗糙度值偏高。用小粒度磨料对表面粗糙度值偏高的表面重新清理一遍,可以使表面粗糙度降低到规定的要求。
- 4) 研究表明,对于常用的钢结构涂装,粒度大于1.2mm的磨料造成的表面粗糙度值偏高,因此,选用磨料时一定要注意到涂装设计对表面粗糙度的要求。

美国的A. B. Williams先生从事涂装工作数十年,是精通涂装设计、工艺、设备和材料的涂装专家,下面是他亲身经历的一个故事:

有一年,Williams先生去一家化工厂做一个技术讲座,技术讲座开始前,Williams先生遇到该厂的喷丸清理/涂漆主管,和他交谈了一会儿。Williams先生问:“你们的清洁度要求通常定在哪一级?”那位主管说:“很彻底清理级(Sa2.5)。”Williams先生又问:“表面粗糙度值你们定多少?”那位主管显得很吃惊地说:“我不理解你的意思,这很重要吗?”Williams先生就把什么是表面粗糙度以及表面粗糙度对涂装质量的影响简单地跟那位主管说了一遍,那位主管听完他说:“我的天,我现在明白了为什么过去的15年中,我们的涂层在6个月内就失效了。”然后,他们俩去工厂的仓库看,看到仓库里都是石英砂,粒度为(10/30)目,这种磨料可以造成 $90\mu\text{m}$ 的表面粗糙度,但涂层的干膜厚度却只有 $50\mu\text{m}$ 。Williams先生建议把磨料的粒度改为(20/40)目,问题就彻底解决了。你是不是也碰到过类似的问题呢?

熟悉了表面粗糙度的重要性以后,我们再来讨论表面粗糙度的轮廓曲线。

我们把喷丸清理后工件的表面垂直切开,在放大镜下观察,就能发现被清理过的那一边是一条连续的曲线,我们把这条曲线称为表面粗糙度轮廓曲线。表面粗糙度轮廓曲线由无数首尾相连的波峰和波谷组成。

表面粗糙度轮廓曲线有两种形状,一种是波浪形的,另一种是锯齿形的。用丸粒状磨料清理工件表面就生成波浪形表面粗糙度轮廓曲线,用砂粒状或柱粒状磨料清理表面就形成锯