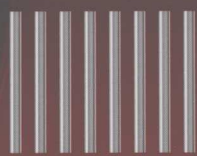


HANJIE
XIUFU
JISHU



焊接 修复 技术

第二版

李亚江 张永喜 王娟 编著



化学工业出版社

HANJIE
XIUFU
JISHU



焊接 修复 技术

第二版

李亚江 张永喜 王娟 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

焊接修复技术/李亚江, 张永喜, 王娟编著. —2 版.
北京: 化学工业出版社, 2008. 4
ISBN 978-7-122-02409-1

I. 焊… II. ①李…②张…③王… III. 补焊
IV. TG455

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 035428 号

焊接修复技术
第二版

责任编辑: 周 红
责任校对: 陈 静

文字编辑: 陈 喆
装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 18½ 字数 460 千字 2008 年 5 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686)

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 45.00 元

版权所有 违者必究

很多机械零部件、重要工程结构的生产运行都离不开掌握各种修复技术的操作者，特别是大型焊接工程结构、各种管道和一些机械设备的关键零部件等，对焊接技术人员和操作者的修复技能要求更高。保证设备正常运行涉及到社会、企业生产和人员的安全，引起相关职能部门和社会各界的普遍关注。目前实用的有关焊接修复技术方面的书籍不多，而近年来社会发展迫切需要阐述简明、深入浅出和实用性强的焊接修复方面的技术书籍。

《焊接修复技术》一书从实用性角度对工程结构中破损零部件的焊接修复技术作了简明阐述，力求简明实用，具有指导实践的意义。该书于2005年出版后得到社会和众多读者的欢迎。本书第二版除了保持原有的突出焊接修复的工艺特点和实用性、反映当前焊接修复技术的应用现状、给出一些典型工程结构破损零部件焊接修复的应用实例外，还更新和补充了新的应用实例，使之更加适合于实际应用。增加了一些新工艺和成功经验，引用了大量生产上经常遇到的各种机械零部件焊接修复的实例。应指出的是，由于实例原作者受当时所处环境和条件的限制，所选用的修复方法和焊接材料不一定是最先进和最合理的，但仍希望读者能从这些实例中得到启发和借鉴。

本书注重技术要点的简明阐述和实际应用，通过对一些焊接修复实例的分析能帮助读者提高焊接修复技能，了解和学会解决一般焊接修复问题的方法和一些特殊的技巧。本书适用性广泛，主要供从事与材料、机械制造和焊接技术相关的工程技术人员、管理人员和操作人员，特别是负责现场施工的技术人员和中、高级技术工人使用，也可供高等院校、科研院所、企事业单位的有关教学和科研人员参考。

本书由李亚江、张永喜、王娟编著。参加本书撰写的人员还有：夏春智、马海军、陈茂爱、沈孝芹、黄万群、蒋庆磊等。

书中内容难免存在不妥和疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

编著者

第 1 章 概述

1.1 焊接修复的特点	1
1.1.1 修复破损或磨损的部件	1
1.1.2 修复-制造新部件: 再制造技术	2
1.2 金属表面的磨损与腐蚀	3
1.2.1 金属磨损及影响因素	3
1.2.2 金属表面的腐蚀及影响因素	10
1.3 焊接修复应用现状及前景	13
1.3.1 焊接修复应用现状	13
1.3.2 焊接修复的应用前景	15

第 2 章 焊接修复方法及所用的材料

2.1 常用的焊接修复方法	18
2.1.1 电弧焊修复	18
2.1.2 金属表面喷涂修复	23
2.2 焊接修复方法的适用性	27
2.2.1 焊接修复方法的选用	27
2.2.2 各种焊接修复方法的比较	30
2.3 焊接修复所用的材料	32
2.3.1 常用修复焊条的特点	32
2.3.2 修复用焊条的型号和牌号	33
2.3.3 修复用焊丝、焊剂的特点	55
2.4 堆焊合金的类型及特点	59
2.4.1 堆焊合金的类型	59
2.4.2 堆焊合金的应用特点	65
2.4.3 堆焊合金的选用	67

第 3 章 焊条电弧焊修复技术

3.1 焊条电弧焊修复的特点及工艺	69
3.1.1 焊条电弧焊修复特点及应用范围	69
3.1.2 焊条电弧焊修复设备及辅助工具	70
3.1.3 焊条电弧焊修复工艺要点	73
3.2 焊条电弧焊修复应用实例	77
3.2.1 轴类零件的焊条电弧焊修复	77
3.2.2 电站设备损坏件的焊接修复	84

3.2.3	汽车零部件的焊接修复	93
3.2.4	轧辊及大型卷板机损坏件的焊接修复	97
3.2.5	磨煤机入口端盖及扩径机水罐裂纹的修复	100
3.2.6	煤气发生炉炉底开裂的修复	103
3.2.7	ZG42CrMo 轨道梁和升降立柱的修复	105
3.2.8	尿素吸收塔异种钢及不锈钢复合板的焊接修复	107

第 4 章 气焊修复技术

4.1	气焊修复的特点及工艺	110
4.1.1	气焊修复的特点	110
4.1.2	气焊修复用装置	111
4.1.3	气焊修复工艺	114
4.2	气焊修复实例	123
4.2.1	钢轨的气焊修复	123
4.2.2	变速箱体及齿轮的气焊焊补	125
4.2.3	铸铁汽缸盖及汽缸体主轴承孔的气焊修复	127
4.2.4	滑动轴承及轴瓦的气焊修复	129
4.2.5	铝制缸盖及电极板的气焊修复	132

第 5 章 埋弧堆焊修复技术

5.1	埋弧堆焊修复的分类及特点	134
5.1.1	埋弧堆焊修复的分类	134
5.1.2	埋弧堆焊修复的特点	136
5.2	埋弧堆焊工艺及参数	137
5.2.1	主要工艺参数	137
5.2.2	影响埋弧堆焊修复质量的因素	140
5.3	埋弧堆焊修复应用实例	143
5.3.1	合金结构钢件的埋弧堆焊修复	143
5.3.2	钢轧辊的埋弧堆焊修复	153
5.3.3	阀门密封面的埋弧堆焊	166
5.3.4	药芯焊丝埋弧堆焊修复	167
5.3.5	锻锤底座的埋弧堆焊修复	171

第 6 章 气体保护焊修复技术

6.1	气体保护焊修复的技术特点	173
6.1.1	钨极氩弧焊修复技术	173
6.1.2	熔化极气体保护焊修复技术	174
6.1.3	自保护管状焊丝堆焊修复	177
6.2	钨极氩弧焊修复实例	179
6.2.1	铝青铜阀门密封面的堆焊	179
6.2.2	异种钢蒸汽管道的 TIG 焊接修复	180

6.2.3	大型软面齿轮打齿的 TIG 焊接修复	181
6.2.4	锡青铜古钟的焊接修复	182
6.2.5	船用螺旋桨的 TIG 焊接修复	184
6.2.6	汽轮机转子的钨极氩弧焊修复	185
6.2.7	液力变矩器的钨极氩弧焊修复	188
6.3	熔化极气体保护焊修复实例	188
6.3.1	铝制罐车的 MIG 焊接修复	188
6.3.2	大型球磨机裂纹 CO ₂ 焊修复	190
6.3.3	3T 模锻锤底座裂纹的 Ar + CO ₂ 焊修复	192
6.3.4	42CrMo 链轮的富氩气体保护焊	192
6.3.5	铸钢件的 CO ₂ 气体保护焊修复	194
6.3.6	柴油机机体、汽缸水套及空压机缸体的 CO ₂ 焊修复	194
6.3.7	水轮发电机转子支架裂纹的焊接修复	197
6.3.8	拉丝机卷筒根部磨损的焊接修复	200
6.3.9	电站机转轮室里衬裂纹的修复	202

第 7 章 等离子弧堆焊修复技术

7.1	等离子弧堆焊的特点及工艺	205
7.1.1	等离子弧堆焊的工艺特点	205
7.1.2	等离子弧堆焊方法及材料	207
7.1.3	等离子弧堆焊设备、附件及工艺参数	210
7.1.4	等离子弧堆焊修复的应用范围	214
7.2	等离子弧堆焊修复的应用	215
7.2.1	钴基合金粉末等离子弧堆焊	215
7.2.2	镍基合金粉末等离子弧堆焊	217
7.2.3	铁基合金粉末等离子弧堆焊	217
7.2.4	排丝等离子弧堆焊工艺	218
7.3	等离子弧焊修复应用的实例	221
7.3.1	模具等离子弧堆焊修复	221
7.3.2	压缩机曲轴的等离子弧焊修复	222
7.3.3	排气阀的等离子弧焊修复	224
7.3.4	农机零部件的粉末等离子弧堆焊修复	226
7.3.5	口腔钴铬合金的等离子弧焊修复	228
7.3.6	330MW 汽轮机低压转子叶片断裂修复	229

第 8 章 喷涂修复技术

8.1	喷涂修复特点及材料	232
8.1.1	喷涂修复的特点	232
8.1.2	喷涂修复所用的设备	233
8.1.3	喷涂修复材料及选用	236
8.2	喷涂修复的工艺要点	245

8.2.1	喷涂修复前的准备	245
8.2.2	喷涂修复工艺参数的选用	247
8.3	喷涂修复应用实例	251
8.3.1	发动机曲轴的喷涂修复	251
8.3.2	液压机柱塞表面的喷涂修复	255
8.3.3	电站锅炉水冷壁的超音速电弧喷涂	256
8.3.4	发动机叶片的等离子弧喷涂	257
8.3.5	套管式高压水冷器的喷涂修复	258
8.3.6	紫铜高炉风口套的喷涂修复	258
8.3.7	高压平板阀闸及钢轨的喷涂修复	259
8.3.8	水箱拉丝机零部件的喷涂修复	261

第 9 章 焊接修复的质量检验

9.1	常见缺陷及防止措施	263
9.1.1	外部缺陷及其防止	263
9.1.2	内部缺陷及其防止	268
9.2	焊接修复的质量检验方法	271
9.2.1	修复层的外观检验	271
9.2.2	修复层的内在质量检验	273
9.2.3	表层硬度及耐磨性检验	279
9.2.4	修复层致密性和耐压检验	281
9.3	焊接修复件的质量检验实例	283
9.3.1	中压储气罐补焊焊缝质量检验	283
9.3.2	不锈钢复合钢脱水罐的焊接质量检验	284
9.3.3	合成氨塔换热器焊接修复后的检验	285

参考文献

第 1 章

概述

机械零部件大多数是用金属材料制造的,在复杂和苛刻的条件下长期工作会出现裂纹、磨损或其他形式的损坏,严重时甚至导致设备报废,因此在很多情况下需要进行焊接修复。先进制造技术的发展趋势影响着焊接技术的发展,优质、高效的焊接新工艺、新材料不断涌现,推动了焊接技术向材料科学与工程等领域的渗透。焊接修复和堆焊作为焊接技术的一个分支也日益引起人们的重视。

1.1 焊接修复的特点

1.1.1 修复破损或磨损的部件

机械产品的损坏往往是个别零部件失效造成的,而零部件失效往往是由于局部表面破坏造成的。将机械产品中那些易损零部件进行焊接修复,可以恢复机械零部件的使用性能,保证设备的生产运行。与一般焊接制造工艺不同的是,焊接修复是采用焊接方法对破损或报废零部件局部进行修复的加工工艺过程。焊接修复的目的在于恢复零部件的尺寸或增加零部件表面耐磨、耐热、耐腐蚀等方面的性能。因此,焊接修复除了具有一般焊接方法的特点外,还有其特殊性。

几乎所有的焊接方法都可用于破损零部件的焊接修复。但目前应用最为广泛的修复方法是焊条电弧焊和气体保护焊。随着焊接材料的发展和焊接工艺的改进,自动化焊接方法在修复中的应用范围日益广泛。如药芯焊丝 CO_2 气体保护焊大大提高了焊接修复的工作效率,改善了焊接工艺性能和操作者的工作条件;应用电弧自熔性合金粉末可获得熔深浅、表面平整、性能优异的表面堆焊层。

我国目前每年的铸铁件产量约为 800 多万吨,其中 10%~15% 具有不同形状的铸造缺陷,需要用焊接方法进行焊补。焊接修复挽救了大量有缺陷的铸铁件并节约了大量资金。在工程和机械零部件中,已经损坏或磨损的铸铁件很多(如机床床身、底座、导轨等),这些铸铁件已经过机械加工,价格昂贵,采用焊接技术对其进行修复的经济效益是很明显的。此外,铸铁件与其他金属进行焊接,生产的各种零部件可提供两种材料各自的优势,成为焊接界与铸造界许多研究者共同关注的热点课题。

铸铁焊补在农机制造与修理、矿山机械、交通运输及其他许多产业部门中具有十分重要的作用。在机床制造业中,铸铁的使用量约占 50%~80%,用于制造各种机床的床身、工作台、变速箱体、导轨等。在农机制造中,铸铁的用量约占 40%~60%,用来制造拖拉机

的汽缸体、汽缸盖、差速器、曲轴，以及排灌机械、脱粒机等。在交通运输业中铸铁主要用于制造重型汽车、机车、轮船的柴油机汽缸、底座等。汽车、农机铸铁零部件焊接修复方法的举例见表 1.1。

表 1.1 汽车、农机铸铁零部件焊接修复方法的举例

零部件名称	焊接修复部位	焊补方法	备 注
汽缸体、较大的汽缸盖	汽缸平面正中部位、气门导管内的裂缝；长裂缝或断裂；缸盖平面上的裂缝	预热气焊；镍基铸铁焊条电弧冷焊	也可用 Z208 焊条，电弧热焊
汽缸体、小汽缸盖、变速箱体、磨壳	汽缸平面上裂缝或缸孔间全部开裂；孔间裂缝；边角处的裂缝，破裂	用加热减应区法气焊	也可用 Z208 焊条，加热减应区法电弧热焊及半热焊
汽缸体、汽缸盖、变速箱体、拖拉机后桥壳	非加工面上的裂缝、破洞	采用铜-钢焊条，电弧冷焊；破洞处可以用低碳钢薄板补板	也可用 Z116、Z117、Z100、J422、J506 焊条，电弧冷焊
拖拉机、柴油机上的铸铁件，如前横梁、平衡臂、牵引臂、箱盖、机座	断裂	采用 Z208 焊条，不预热或半预热焊	—
变速箱、吊耳、变速箱拨叉等	裂缝及断裂	采用 Z116、Z117、Z408、不锈钢焊条、J422、J506 焊条，小电流、多层电弧冷焊	磨损面可用黄铜钎焊
球墨铸铁曲轴	键槽损坏	采用 Z116、Z117、J422、J506 焊条，电弧冷焊	—

在铸铁生产过程中，浇铸后的铸铁件不可避免会产生气孔、夹渣、缩孔、裂缝等缺陷，而且有缺陷的铸铁件所占的比例通常是比较高的，这些缺陷使铸造成品率大为降低。以重型机床的床身为例，它的重量达数十吨，若因铸造缺陷而报废，不仅损失巨大，还会给重新熔炼带来很大困难。有的大型铸铁件已经进行机械加工，在机械加工接近完成时才发现缺陷，若这时报废，既浪费了材料、工时，又提高了成本。因此，在机械制造中将铸铁焊补作为一道工序，既可保证铸铁件质量、提高成品率、降低成本，又能挽回因铸铁件报废所造成的经济损失。

有些大型设备是工厂的关键设备，当大型设备的铸铁件（如冲压机床身）在使用过程中出现裂纹或损坏时，会严重影响正常生产。在这种情况下，焊接修复技术将发挥它独到的作用，花费最小的代价，在最短的时间内予以修复并恢复正常生产。

国内采用焊接修复技术解决了许多设备零部件失效难题并取得重大经济效益。由于采用了新技术，经过修复后的零部件不仅恢复了其原有的性能，而且修复后的零部件的性能还会大大超过新件，例如，重型载重汽车的轴承内外圈配合面修复后，相对耐磨性比更换新件高好几倍；变速箱的输出法兰盘采用超音速火焰喷涂修复后，使用寿命是更换一个新件的 2 倍多。长江三峡工程中挖泥船的发动机曲轴因局部磨损，不能工作，如购买新轴，从订购到交货需三个多月时间，停产损失更为严重，采用电弧喷涂技术进行修复，总费用仅为曲轴价格的 3%。

1.1.2 修复-制造新部件：再制造技术

现代工业的发展对各种机械设备零部件的性能要求越来越高，一些在高速、高温、高

压、重载荷、腐蚀介质等条件下工作的零部件,往往因其局部损坏而使整个零部件报废,最终导致设备或装备停用。

机械零部件的修复伴随着机械制造,有制造就要有零部件修复。近 20 多年来,由于人们环保意识的增强,“用后丢弃”的观念开始向“再制造”的观念转变。另一方面,随着先进制造技术的不断发展,使原先的原样修复变成为可实现超过原始性能的改进性修复。原先的被动修复变为制造与修复纳入设备和零部件的设计、制造与运行全过程的系统工程。未来的制造与维修工程将是一个考虑设备和零部件的设计、制造、运行直至报废的全过程,以优质、高效、节能为目标的系统工程。

早在 1984 年,美国《技术评论》就提倡旧品翻新或再生(称为“重新制造”),在重新制造中大量采用各种先进技术,把因损坏、磨损或腐蚀等而失效的可能维修的机械零部件翻新如初。日本也提出了“再生工厂技术的概念”。1990 年 10 月在法国召开的欧洲国家维修团体联盟第 10 次会议的主题是“维修——对未来的投资”,反映了发达国家对维修的新认识。我国现在需要对“再制造”技术从可持续发展的战略高度进行再认识。制造技术将统筹考虑整个设备寿命周期内的维修策略,而修复技术也将渗透到产品的再制造工艺中。“维修”已被赋予了更广泛的含义。随着先进制造技术及设备的不断发展,制造与维修将越来越趋于统一。

工程结构件修复-再制造的费用,一般虽然只占产品价格的 5%~10%,却可以大幅度地提高产品的性能及附加值,从而获得更高的利润。据统计,采用焊接修复措施的平均效益可达原零部件的几倍或十几倍以上,再制造技术(例如采用表面工程措施)的效益甚至可达 20 倍以上。

用堆焊修复的方法提高零部件耐磨性的重要意义在于它符合“再制造工程”发展的要求。再制造工程技术属于绿色先进制造技术,是对先进制造技术的补充和发展。破损或报废产品的再制造是对其产品全寿命周期管理的延伸和创新,也是实现可持续发展的重要技术途径。

1.2 金属表面的磨损与腐蚀

凡是使用金属材料(特别是钢结构)的领域都不同程度地存在着工件表面磨损和腐蚀问题。金属表面的磨损与腐蚀涉及机械、材料、物理、化学等许多学科。金属磨损是由工件接触面间的相互机械作用造成金属表面不断损失或破坏的现象。

1.2.1 金属磨损及影响因素

磨损是一个复杂的微观破坏过程,它是金属材料本身和它相互作用的材料以及工作环境综合作用的结果。金属磨损的评定方法主要有三种:金属材料的磨损量、耐磨性和冲蚀磨损率。

① 磨损量 包括长度磨损量、体积磨损量和重量磨损量。长度磨损量是指由于磨损而造成的零件表面尺寸的改变量,在设备的磨损监测中常使用长度磨损量。体积磨损量和重量磨损量是指由于磨损而造成的零件体积或重量的改变量,一般先测定试样的重量磨损量,然后再换算成体积磨损量进行比较。

② 耐磨性 指在一定工作条件下材料抵抗磨损的能力。材料耐磨性分为材料的相对耐

磨性和绝对耐磨性。相对耐磨性是指两种材料 A 与 B 在相同的磨损条件下磨损量的比值,其中材料 A 作为参考试样。

相对耐磨性 = 试验材料磨损量(B)/参考试样磨损量(A)

这里的磨损量一般是指体积磨损量,特殊情况下也可使用其他磨损量。

绝对耐磨性(或称耐磨性)常用磨损量或磨损率的倒数表示,使用较多的是体积磨损量或体积磨损率的倒数。

③ 冲蚀磨损率 在冲蚀磨损中一般用冲蚀磨损率来度量磨损,也就是

冲蚀磨损率 = 材料的冲蚀磨损量(重量或体积)/造成该磨损量所用的磨料量

冲蚀磨损率须在稳态磨损中测量,因为在其他磨损阶段中所测量的冲蚀磨损率有较大的差别。

(1) 金属磨损的形式

1) 黏着磨损

黏着磨损指金属与金属之间相对移动时,由于两接触面凹凸不平,在摩擦过程中接触面积上产生较高的应力,使接触面上发生塑性流动,造成接触点间的黏着或焊合。此时材料会从一个表面转移到另一个表面上,有时又会转移回原来的表面,如此摩擦下去,一部分转移的材料会因此加工硬化、疲劳、氧化而脱离出来,形成游离的磨屑,造成零件表面材料的耗失,形成黏着磨损。

黏着磨损有氧化磨损(轻微磨损)、金属磨损和擦伤三种形式。黏着磨损多发生于润滑不良或不进行润滑的滑动摩擦零件中,如轴、轴承、履带轮、制动轮、阀门密封面、切削刀具、模具等零件,常常会出现这种磨损形式。它一般要求堆焊合金有较小的摩擦系数,堆焊合金的硬度和耐磨性应与接触界面相互摩擦的母材相近。

2) 磨料磨损

当硬质颗粒或表面粗糙物体(称为磨料,如岩石、矿石、砂土、硬金属屑等)在压力作用下,对金属表面进行显微切削,即产生磨料磨损。它是一种工件表面损伤中常见的磨损形式。按应力状态不同,磨料磨损分为下列三种形式。

① 凿削式磨料磨损 磨料以很大的冲击力切入金属表面,切削作用下大颗粒金属形成严重的沟槽。如挖掘机斗齿、破碎机颚板等。这种带有严重冲击的磨损条件,常采用具有高韧性的耐磨堆焊材料,其中奥氏体高锰钢堆焊合金应用广泛,有时也在表面堆焊高铬合金铸铁或马氏体铸铁堆焊合金,以进一步提高其耐磨性。

② 高应力磨料磨损 是在两个零件表面夹有磨料,在很大的压应力作用下相互摩擦产生的。由于磨料与金属接触点上有很高的压应力,磨料被碾碎,同时引起金属表面的显微划伤或使金属表面的硬化相(如粗大碳化物)剥落。如球磨机的磨球和衬板、挖掘机的链条和链轮等属于这类磨料磨损。

③ 低应力磨料磨损 是固态磨料以某种速度自由地与所接触的金属表面做相对运动引起的。这类磨损的特点是,作用在磨料上的应力较低,对零件表面的冲击力小,一般的磨损形态为表面擦伤。人们还把含有磨料的气体或液体流冲击金属表面所引起的磨损,称为气相或液相磨料磨损,它们也属于低应力磨料磨损,如推土机铲刃、农机犁铧、泥浆泵叶轮、粉尘排除叶片的磨损等。

3) 疲劳磨损

摩擦副表面相对滚动或滑动时,由于承受反复的加热和冷却作用,导致金属产生裂纹,

从而造成金属表面破坏的现象。如热轧辊、热锻模、热铸模、装料机料斗等热加工设备或工具,工作过程中,表面都会受到一定程度的热疲劳作用。疲劳磨损虽然存在着应力疲劳和应变疲劳之分,但对于大多数的点蚀和剥落而言,均属于应力疲劳磨损。

4) 腐蚀磨损

腐蚀磨损是腐蚀和磨损同时(或交互)起作用的一种磨损。摩擦相互作用表面在液体(或气体)工作环境或在润滑剂中发生化学或电化学反应,在表面上形成的腐蚀产物常黏附不牢,在摩擦过程中剥落,而新的表面又继续和介质发生反应,这种腐蚀和磨损的交互重复过程,称为腐蚀磨损。

腐蚀磨损是一种极其缓慢的磨损形式。但钢铁零部件在含有少量水汽的空气中工作时,反应产物由氧化物变成氢氧化物,可使腐蚀磨损加速。在一定条件下,例如空气中含有少量二氧化硫或二氧化碳,也会使腐蚀磨损速度加快。

当腐蚀成为磨损的主要因素时,常出现几种综合磨损,如金属与金属间的摩擦,开始时可能是黏着磨损和腐蚀磨损,但由于腐蚀产物一般具有磨料的特性,因此会出现腐蚀磨损和磨料磨损同时或交互存在,使零部件表面的磨损加剧。零部件表面的接触应力较高时,会增加局部腐蚀作用,形成点蚀,亦即腐蚀和循环应力共同作用下,比两种作用单独存在时的磨损更严重。

5) 冲击磨损

金属表面由于外来物的连续高速冲击而引起的磨损称为冲击磨损。冲击磨损的破坏过程取决于外来磨粒的大小、形状、浓度、速度和冲击角等。冲击角较小时,冲击磨损主要由物体的切削作用引起,磨损速度则取决于工件表面的硬度。采用含有大量硬质相的合金,能够有效缓解冲击磨损。冲击角较大时,外来物的冲撞使工件表面发生变形,从而导致表层剥离或凹痕,采用能够吸收较多冲击能而不产生变形或开裂的材料作堆焊合金可以减小冲击磨损。

6) 微动磨损

机械零部件配合较紧的部位,在载荷和一定频率振动条件下,使零件表面产生微小滑动引起的磨损称为微动磨损,也可认为是疲劳磨损、黏着磨损、磨料磨损与腐蚀磨损兼而有之的一种综合磨损形式,例如紧密配合的轴颈处的磨损。

影响微动磨损的因素很多,主要有载荷、振幅、循环次数、环境条件、材料性能以及润滑剂等,这些因素之间相互影响。微动磨损存在临界振幅,即在此振幅以下不发生磨损。临界振幅随不同材料、载荷及环境条件而不同。在振幅小于 $50\mu\text{m}$ 时,低碳钢摩擦副没有任何微动磨损发生,因此可以把这个振幅称为临界振幅。

微动磨损常常从黏着磨损开始,凡能抵抗黏着磨损的材料均有利于防止微动磨损。提高硬度和选择适当的匹配材料都可以减小微动磨损。在钢中加入 Cr、Mo、V、P、RE 等元素也能够改善抗微动磨损的能力。几种摩擦副抗微动磨损能力的比较见表 1.2。

(2) 影响金属磨损的因素

金属表面磨损的形式有多种,影响因素很多,包括工作条件、润滑状态、环境因素、材质成分与性能、零件表面状态等,多因素的交互作用还可能使磨损形式发生变化。在腐蚀性介质和较为恶劣的工作环境下,将会加剧金属表面的磨损。减小金属表面的磨损应全面考虑上述因素和零部件本身的运行状况,选用合适的堆焊合金或耐磨、耐蚀喷涂合金。

1) 材质的成分和性能

表 1.2 几种摩擦副抗微动磨损能力的比较

抗微动磨损好	抗微动磨损中等	抗微动磨损差
塑料层压板对镀金属板 工具钢对工具钢 冷轧钢对冷轧钢 铸铁对涂硫化钨铸铁 铸铁对涂润滑剂铸铁 铸铁对涂润滑剂不锈钢 铸铁与铸铁间放橡胶垫片	铸铁对铸铁 铜对铸铁 黄铜对铸铁 铸铁对镀银层 铸铁对镀铜层 铸铁对粗面铸铁 镁对镀铜层	铝对铸铁 铝对不锈钢 铸铁对镀铬层 塑料层压板对铸铁 酚醛树脂对不锈钢 工具钢对不锈钢 镀铬层对镀铬层 铸铁对镀锡层

① 化学成分 金属材料的化学成分和热处理状态决定了它们的组织性能。以铁基合金为例，其耐磨性与化学成分、显微组织有关。对一定成分的材料，它的耐磨性和碳含量、硬度在一定范围内呈线性关系。珠光体钢的耐磨性随着碳含量增加而增强，但碳含量对过共析钢的耐磨性影响较小。相同硬度的马氏体钢的耐磨性随着碳含量增加而增强。形成碳化物的合金元素，一般会使钢的耐磨性有所提高。强化铁素体基体的合金元素，一般对磨料磨损的影响并不显著。

② 显微组织和晶体的互溶性 对于钢来说，基体显微组织对耐磨性的影响顺序是：铁素体、珠光体、贝氏体和马氏体逐次递增。密排六方晶体结构的金属比面心立方的金属抗黏着和摩擦磨损性好。晶格类型、电子密度和电化学性能相近的金属，互溶性较大，材料易形成强固的接触点，黏着磨损倾向增大。冶金上互溶性较差的一对金属摩擦副具有较低的摩擦系数和磨损率，表面耐磨性较好。多相金属比单相金属黏着可能性小，金属化合物比单相固溶体的黏着可能性小，金属与非金属材料组成的摩擦副比金属与金属组成的摩擦副黏着可能性小。滚珠轴承钢的马氏体组织状态及其渗碳体含量、残余碳化物的颗粒大小、残余奥氏体含量等均对钢的抗磨损性能有重要影响。

③ 强度、塑性和脆性 材料的抗拉强度与耐磨性和磨损率之间的关系见图 1.1。脆性材料比塑性材料的抗黏着能力高。塑性材料的断裂常发生在离表面较深处，磨损下来的颗粒较粗大；而脆性材料破坏处离表面较浅，磨屑呈薄片状。

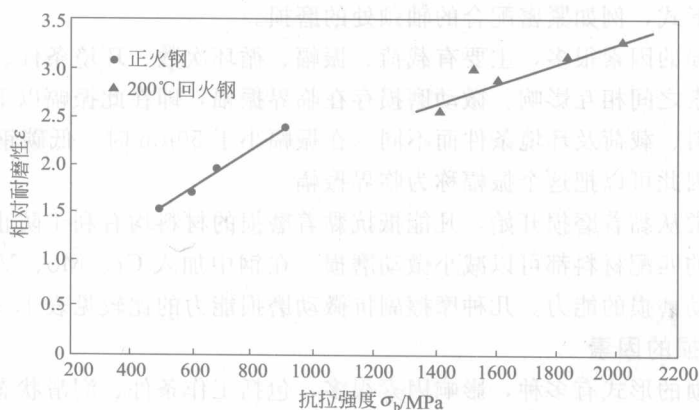


图 1.1 抗拉强度与耐磨性和磨损率之间的关系

2) 材质表面的硬度

材料表面的硬度反映了材料表面抵抗磨损的性能。导致材料硬度提高的显微组织一般也

能提高材料的耐磨性。由于材料的化学成分和组织有很大差别，硬度相同的材料也可能不适应某种特定的磨损条件。不同硬度材料的耐磨性比较见表 1.3。

表 1.3 不同硬度材料的耐磨性比较

材 料	硬度(HV)	相对耐磨性
碳钢和低合金钢	500	1 ^①
	350	0.87
	600	1.30
	500	1.02
	820	1.90
	650	1.30
合金钢	500	1.15
	200	1.30
	600	1.91
表面覆盖耐磨合金	700	1.74
	700	3.95

① 参考材料的相对耐磨性为 1。

材料表面的硬度对耐磨性的影响较大，如图 1.2 所示。材料的相对耐磨料磨损性与硬度成正比。但是加工硬化虽然能增加钢的硬度，但不能提高耐磨性。在表面硬度相近的情况下，等温转变的下贝氏体组织耐磨性优于回火马氏体组织。

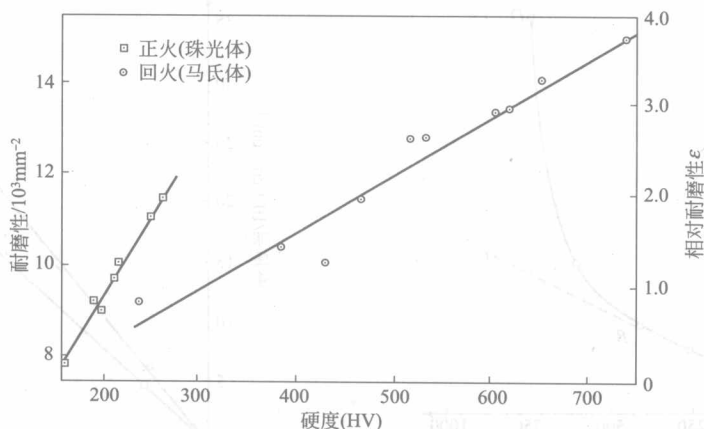


图 1.2 材料耐磨性与硬度的关系

碳化物的硬度对材料耐磨性有重要影响。磨料条件不变时，若碳化物比磨料软，材料的耐磨性有随碳化物硬度的提高而提高的趋向。当磨料比碳化物软时，耐磨性随碳化物的尺寸增加而增强。碳化物体积大以及碳化物与基体之间的界面能低都有利于提高材料的耐磨性。硬度高的金属比硬度低的金属不容易黏着磨损，当工件之间的接触应力很大时，很多金属将由轻微磨损转变为严重磨损。

材料的耐磨性除了决定于材料的硬度 H_m ，更主要的是决定于材料硬度 H_m 和磨料硬度 H_a 的比值。当 $H_m/H_a \leq 0.5 \sim 0.8$ 时为硬磨料磨损，增加材料的硬度对耐磨性影响不大。当 $H_m/H_a > 0.5 \sim 0.8$ 时为软磨料磨损，增加材料的硬度 H_m 会明显提高耐磨性。钢材经过不同温度的回火热处理后可以得到不同的硬度。淬火+回火钢在硬度为 2800HV 的碳化硅

磨料中的耐磨性如图 1.3 中的曲线 ABC 所示,但在 1000HV 的石英砂磨料中磨损时其耐磨性曲线如图 1.3 中的曲线 ABD 所示,即 H_m/H_a 达到 0.5 后耐磨性迅速提高。

3) 环境温度

环境温度主要是通过对金属的硬度、显微组织、互溶性以及增加氧化速率的影响来改变其耐磨性。金属的硬度通常随温度的上升而下降,所以环境温度升高,磨损率增加。有些摩擦零件(如高温轴承)要求采用热硬性高的材料,材料中应含有 Co、Cr、W 和 Mo 等合金元素。摩擦副的互溶性可看作是温度的函数,温度上升,材料易于互溶,影响材料的磨损率。环境温度的升高对增加氧化速率起促进作用,对生成氧化物的种类有显著的影响,所以对摩擦和金属的磨损性能也有重要作用。

零部件在工作过程中,摩擦表面温度升高时,轻者破坏油膜,重者使材料表面回火软化,甚至于退火。温度还会引起相变、再结晶等,使磨损率发生很大的变化。摩擦表面的温度通过以下三方面对磨损过程产生影响。

① 金属的硬度通常和温度有关,温度越高,硬度越低,微凸体发生黏着磨损的可能性与磨损率随硬度的降低而增加。

② 大多数金属在大气中会在其表面形成一层氧化膜,氧化膜的厚度取决于形成时的温度;在低温下磨损率高,表面黏着较多;在高温下磨损率大大降低,表面光洁发亮。

③ 用油润滑的零件,温度升高后,油可能变质、氧化和分解,超过一定温度后油的氧化和分解会使其润滑性能发生不可逆的变化,不能起到减轻磨损的作用。

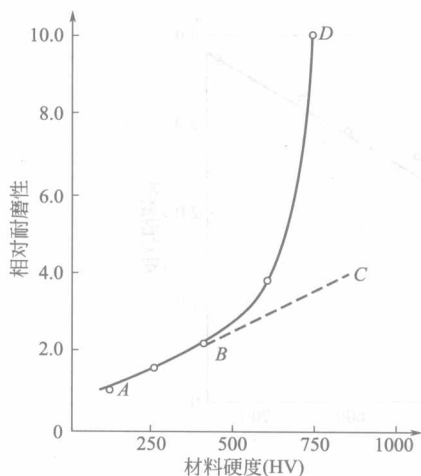


图 1.3 淬火+回火钢在两种不同硬度

磨料磨损下的耐磨性比较

ABC—用碳化硅为磨料; ABD—用石英砂为磨料

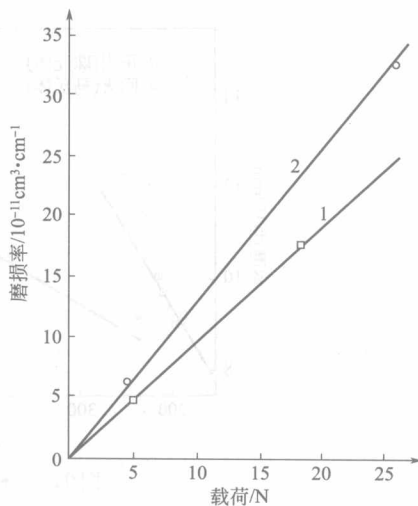


图 1.4 黏着磨损率与载荷之间

的关系(钢对钢)

1—0.079cm 直径圆柱; 2—120°圆锥

4) 载荷

随着接触界面间载荷的增加,材料的体积磨损量逐渐增大。钢材的黏着磨损率在一定范围内与载荷成正比,见图 1.4。但是当载荷超过一定的临界值后,接触界面之间的磨损会转化为严重磨损。对于脆性材料,因存在一临界压入深度,超过此深度后,裂纹容易形成与扩展,使磨损量增大,因此载荷在某些条件下和磨料磨损量不一定成线性关系。

5) 接触面状态

提高金属的表面光洁度会提高抗黏着磨损,但过分提高表面光洁度可能使润滑油在表面上的储存能力下降,反而易造成黏着磨损。生产中金属与金属接触的零件,常采用润滑剂来减少摩擦与磨损。提高表面光洁度可以有效地提高抗疲劳磨损能力。接触应力的不同,对表面光洁度的要求也不一样,一般是接触应力较大时,对表面光洁度要求高。另外表面硬度较高的轴承和齿轮对表面光洁度要求也较高。

金属接触表面的表面膜在一定程度上能够防止摩擦副的直接接触,减少摩擦。金属接触表面的表面膜有如下几种。

① 氧化膜 大多数金属表面都覆有一层氧化膜,经切削加工后表面洁净的金属,暴露在空气中后也会覆盖上一层氧化膜。氧化膜的性质对金属表面的磨损有重要的影响。脆而硬的氧化膜不能防止磨损,反而造成磨损量的增大;坚韧并能牢固黏附在基体上的氧化膜,有利于减少摩擦和磨损。在轻载荷下,氧化膜能减轻摩擦与磨损。当载荷增大后,氧化膜的阻碍作用减弱,磨屑中有较粗的金属粒出现,磨损表面粗糙,造成严重磨损。

② 固体润滑膜 将固体润滑剂(石墨、二硫化钼等)黏在摩擦表面,或将它们制成粉末放在承受轻载的两表面之间,这时它们能黏附在金属表面上,形成一层黏附很牢的覆盖层。固体润滑剂还可制成粉末渗入液体润滑剂中,使摩擦面获得固体润滑膜,减少金属接触面之间的黏着磨损,特别是在高真空中或高温中效果更显著。

③ 其他表面膜或表面涂层 在硬度较高的金属表面涂上一层软金属,可减少磨损。如利用堆焊、喷涂、表面热处理、表面化学处理等方法,使金属表面涂上一层比基体金属耐磨性更好的涂层,能显著提高耐磨性。

6) 磨料

磨料是影响磨料磨损的重要因素,包括磨料的形状、大小、硬度、状态、强度等。尖锐的磨料易造成金属表面的微观切削能力,增加磨损量。圆钝的磨料大多产生犁沟和塑性变形,在自由状态时还容易滚动,产生一次切屑的可能性很小。材料的磨损率一般是随着磨料直径的增大而增大,直到达到某一临界尺寸时不再增大,见图 1.5。若载荷增大,磨料粒径超过临界尺寸后,磨粒大小对磨损仍有影响,如图 1.6 所示。

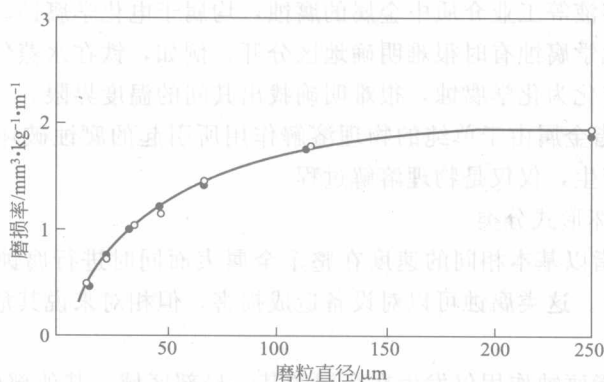


图 1.5 磨料尺寸与磨损率之间的关系

磨料的其他性能(如韧性、压碎强度)也影响磨损率。磨料受压缩力后,先是边缘尖锐处受力发生少量塑性流动,接着发生断裂,塑性变形和断裂都使磨料变质。磨料压碎后形成较小的切削刃面,能增加磨料磨损性。磨粒断裂比边缘尖角处塑性变形剥落对磨料的磨损性影响更大。