

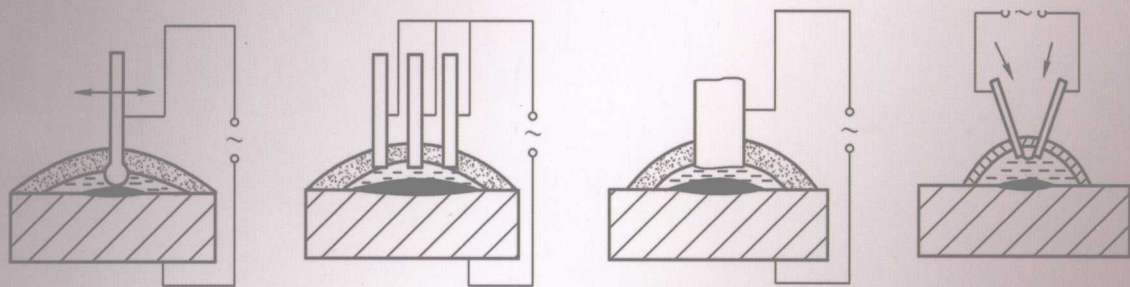


钣金职业技能培训系列教程

钣金表面技术

BAN JIN BIAO MIAN JI SHU

王爱珍◎编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

钣金职业技能培训系列教程

钣金表面技术

王爱珍 编著

【内容】 目录 第一章 绪论

1.1 钣金表面技术概述 1.1.1 钣金表面技术的定义 1.1.2 钣金表面技术的分类 1.1.3 钣金表面技术的作用

1.2 钣金表面技术的发展现状 1.2.1 国外发展现状 1.2.2 国内发展现状

1.3 钣金表面技术的未来展望 1.3.1 新材料的应用 1.3.2 新工艺的应用

1.4 钣金表面技术的职业要求 1.4.1 职业道德 1.4.2 专业知识 1.4.3 操作技能

1.5 钣金表面技术的就业前景 1.5.1 行业需求 1.5.2 就业方向

1.6 钣金表面技术的职业资格 1.6.1 职业资格等级 1.6.2 职业资格认定

1.7 钣金表面技术的职业守则 1.7.1 遵守法律法规 1.7.2 遵守企业规章制度

1.8 钣金表面技术的职业礼仪 1.8.1 仪容仪表 1.8.2 言谈举止

1.9 钣金表面技术的职业安全 1.9.1 安全意识 1.9.2 安全防护



机械工业出版社

本书是依据劳动和社会保障部新颁布的《国家职业标准》及职业技能鉴定规范的要求,所编写的厚知识、宽口径的“钣金职业技能培训系列教程”之一。主要内容有表面强化层的处理、表面熔覆层的处理、表面防腐层层的处理、表面镀膜层的处理和表面涂膜层的处理五个方面的内容。本书还配有电子教案,同时章前设有导读、章后设有思考练习题。

本书既可作为机械、化工、汽车、航天、电气仪表等行业钣金技术人员的中、高级技能培训教材,又可作为机械类工程技术人员再修及大、中专院校的专业教材。

图书在版编目(CIP)数据

钣金表面技术/王爱珍主编. —北京:机械工业出版社, 2008. 8

(钣金职业技能培训系列教程)

ISBN 978-7-111-24853-8

I. 钣… II. 王… III. 钣金工—金属表面处理—技术培训—教材
IV. TG38

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第122253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:徐彤 责任编辑:徐彤 侯宪国 版式设计:张世琴

责任校对:李秋荣 封面设计:王伟光 责任印制:杨曦

北京机工印刷厂印刷(兴文装订厂装订)

2008年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15.5印张·381千字

0 001—4 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-24853-8

定价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379083

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着经济与科技的快速发展,各行业对高技能人才提出了数量、质量和结构的要求,快速培养掌握钣金技术的高级技工和技师已成为当务之急。针对这一需求,配合“国家高技能人才培养工程”,依据劳动和社会保障部新颁布的《国家职业标准》及职业技能鉴定规范的要求,特编写了该套厚知识、宽口径、高技能的钣金职业技能培训系列教程。

本系列教程按钣金成形顺序编排,分为《钣金放样技术》、《钣金加工技术》、《钣金连接技术》和《钣金表面技术》四本。各本书均系统地论述了钣金传统技术和新技术,又介绍了相关设备的工作原理和操作方法,涵盖了全部钣金技术和技能鉴定要点。同时还贯穿“绘图、展开、放样、备料、成形、拼装、装饰”这条主线,使各本书之间紧密衔接,前呼后应,保持套书的整体性。

本系列教程的培训模式是使读者通过对每本书中应用实例的学习,学会多种典型钣金结构件的放样号料、加工成形、装配连接和表面处理的各种方法所应遵循的工艺原理和步骤,同时还可学会各种工艺的拟定及工装设计方法和各种设备的操作方法,为以后的职业等级资格取证和专业技术职务任职资格奠定良好的基础。

本系列教程不仅汇集了钣金成形过程所需的全部技术及设备,考虑到教学方便,还提供了生产实践中的案例,同时章前设有导读、章后设有思考练习题,并配有完整的多媒体课件。

本系列教程由郑州轻工业学院王爱珍教授编著,在编写过程中参考了许多相关教材、同类培训读本和手册,由李烁、王世军、郑冰岩、郭霄、王世杰、李维海、符绍先、荆利杰、余显芳等帮助整理资料、绘集图表等。同时得到了有关企业技术和人力资源部门的建议,并采用了他们提供的各种典型实例,在此一并致以衷心的感谢。

本系列教程既可作为机械、化工、汽车、航天、电器仪表等行业钣金技术人员的中、高级技能培训教材,又可作为机械类工程技术人员再修及大、中专院校的专业课教材。

《钣金表面技术》是本系列教材之四,主要内容为表面强化层处理、表面熔覆层处理、表面防腐蚀处理、表面镀膜层处理和表面涂膜层处理等,从金属表面强化喷覆、清理到表面镀膜和涂膜处理,均由生产中的典型实例逐步说明,既有传统工艺方法,又有新工艺和新技术。

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中难免有不妥之处,敬请广大读者和专家批评指教,不胜感激。

作 者

目 录

前言	104
第1章 表面强化层处理	1
1.1 表面形变强化	1
1.1.1 形变强化原理	1
1.1.2 滚压形变强化	5
1.1.3 喷丸形变强化	9
1.1.4 喷丸强化设备	14
1.2 表面相变强化	20
1.2.1 表面淬火强化	20
1.2.2 表面超细强化	26
1.2.3 表面高能束强化	27
1.3 表面扩渗强化	33
1.3.1 扩渗强化原理	33
1.3.2 单元扩渗强化	37
1.3.3 多元共渗强化	46
思考练习题	51
第2章 表面熔覆层处理	52
2.1 火焰喷涂处理	52
2.1.1 火焰喷涂工艺	52
2.1.2 线材火焰喷涂	56
2.1.3 粉末火焰喷涂	59
2.2 电热喷涂处理	63
2.2.1 电弧喷涂	63
2.2.2 等离子弧喷涂	66
2.2.3 激光束喷涂	70
2.3 堆焊熔覆处理	74
2.3.1 火焰堆焊熔覆	74
2.3.2 电热堆焊熔覆	76
2.3.3 气保护堆焊熔覆	81
2.3.4 高能束堆焊熔覆	85
思考练习题	89
第3章 表面防腐蚀处理	91
3.1 防腐蚀原理	91
3.1.1 金属腐蚀概述	91
3.1.2 钢铁表面腐蚀	96
3.1.3 防腐处理方法	99
3.2 化学法防腐蚀	104
3.2.1 浸渍法除油污	104
3.2.2 酸洗法除油锈	109
3.2.3 电解法除锈污	115
3.3 机械法防腐蚀	120
3.3.1 机械喷砂清理	120
3.3.2 机械喷射清理	124
3.3.3 机械加工清理	130
思考练习题	133
第4章 表面镀膜层处理	134
4.1 防渗电镀膜	134
4.1.1 电镀基本知识	134
4.1.2 电镀工艺规程	138
4.1.3 耐蚀及装饰电镀	143
4.1.4 耐磨及装饰电镀	147
4.2 刷镀与化学镀膜	153
4.2.1 电刷镀镀膜	153
4.2.2 化学镀镀镍	157
4.2.3 化学镀镀铜	160
4.2.4 化学复合镀	162
4.3 化学转化镀膜	164
4.3.1 化学氧化镀膜	164
4.3.2 化学磷化镀膜	175
4.3.3 化学热浸镀膜	183
4.3.4 真空沉积镀膜	185
4.3.5 碰撞沉积镀膜	192
思考练习题	195
第5章 表面涂膜层处理	196
5.1 涂料涂膜	196
5.1.1 涂料组成及性能	196
5.1.2 涂料类型及应用	200
5.1.3 涂膜系统及质量	208
5.1.4 涂料涂膜工艺方法	213
5.2 塑料涂膜	219
5.2.1 塑料组成及性能	219
5.2.2 粉末涂料及种类	223

5.2.3 塑料涂膜工艺方法	226	5.3.3 化工装备的涂膜	235
5.3 涂膜举例	233	5.3.4 机械设备的涂膜	237
5.3.1 制冷设备的涂膜	233	思考练习题	239
5.3.2 车辆箱体的涂膜	234	参考文献	241

第 1 章 表面强化层处理

导读 本章主要介绍钣金件表面形变强化、表面相变强化和表面扩渗强化的各种强化工艺方法和强化性能，以及各种方法的强化原理及其影响因素。

本章重点是喷丸形变强化、表面淬火强化、高能束强化以及渗碳氮和渗金属强化等工艺方法与参数，难点是形变强化、相变强化及扩渗强化等方法的基本原理和影响因素，要点是钣金件强化工艺方法及工艺参数的拟定。

1.1 表面形变强化

表面形变强化是利用机械方法使表面产生塑性变形而引起高密度位错、亚晶碎化等不平衡组织强化层的工艺方法。常用的机械方法是指利用各种喷丸机、滚压机和模具等将金属表面进行冲击形变、滚压形变和挤压形变等强化处理。

1.1.1 形变强化原理

表面形变强化是指将钣金件在冷态或热态下借助机械冲击力或压力，引起表层加工硬化（或冷作硬化）现象，使其表面层硬度和强度提高的过程。各种钢件和大多数有色金属件均具有不同程度的塑性，均可经压力加工进行形变强化。

1.1.1.1 表面强化方法分类

表面强化层形成的主要方法有喷丸强化、滚压强化、内孔挤压强化、振动冲击强化、金刚石辗压强化等，其中喷丸强化和滚压强化应用最广，内孔挤压强化与表面滚压强化统称为滚压强化，如图 1-1 所示。

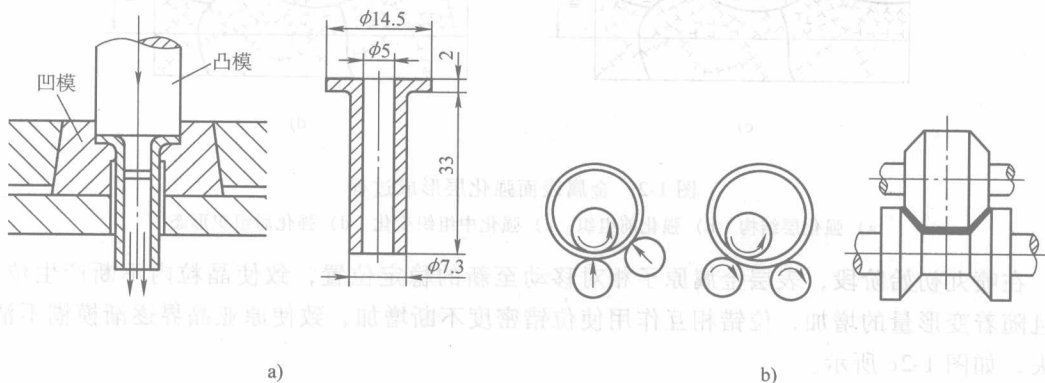


图 1-1 金属滚压强化的各种方式

a) 气喷嘴内孔挤压强化 b) 活塞环内表面滚压强化

表面强化层形成工艺按零部件强化层位置，可分为孔形变强化工艺和表面形变强化工艺

两大类。孔形变强化工艺又可分为孔挤压工艺和孔喷丸工艺，而表面形变强化工艺又可分为压缩空气喷丸工艺和旋转抛丸工艺等。

对承受循环交变载荷的零部件进行表面喷丸强化，不仅可以提高表面层强度、硬度和疲劳极限，还可以改善腐蚀疲劳抗力与应力腐蚀性能。例如常规喷丸强化处理后，零部件的疲劳极限提高35%，而预应力应变喷丸可提高50%~100%。

1.1.1.2 强化层形成过程

金属构件在一定直径大小的弹丸力冲击或轱轮力滚压作用下，使其表面产生宏观凹坑或凹面，并使其周围区域产生塑性变形，从而引起表层加工硬化及0.5~1.5mm深的塑性变形层，如图1-2a所示。

(1) 表层形成及组织变化 金属材料内部原来晶界与亚晶界比较清晰，晶粒与亚晶粒尺寸比较大，如图1-2b所示，但经冲击或滚压塑性变形后，由于位错间的互相作用，使位错密度大大增加，因此表面塑性变形是通过位错运动而实现。

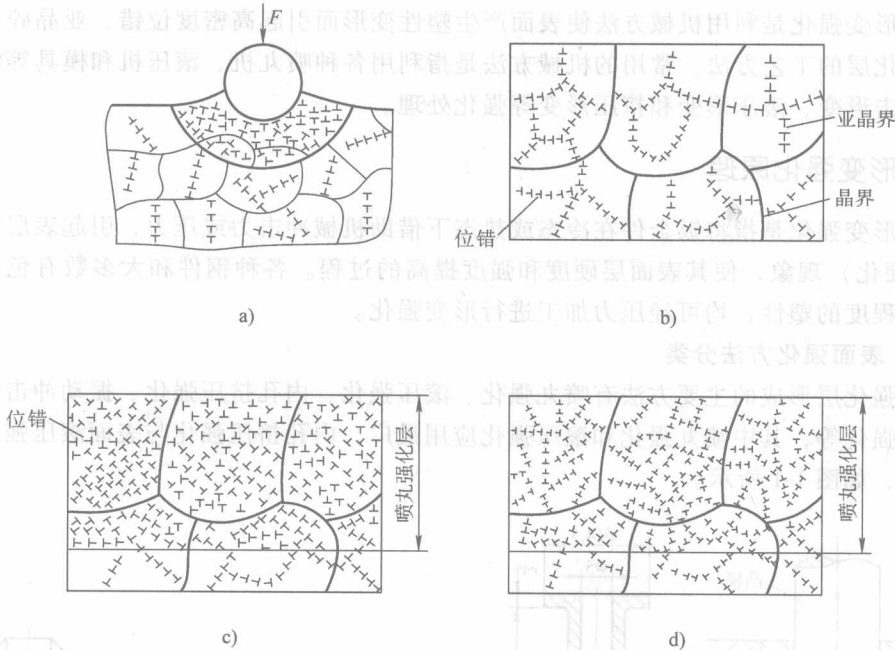


图 1-2 金属表面强化层形成过程

a) 强化层结构 b) 强化前组织 c) 强化中组织变化 d) 强化后组织形态

在喷丸初始阶段，表层金属原子相对移动至新的稳定位置，致使晶粒内不断产生位错，并且随着变形量的增加，位错相互作用使位错密度不断增加，致使原亚晶界逐渐模糊不清并消失，如图1-2c所示。

随着弹丸覆盖面的逐渐增加，弹丸力反复冲击金属表面，使其晶内造成大量位错堆积，并重新排列成新的亚晶界，使原亚晶界细化（见图1-2d）。随着喷丸时间延长，塑性变形继续进行，位错密度进而增加并组成新晶界，使晶粒破碎和细化。

(2) 表层晶粒位向及变化 在金属表面强化过程中，由于原来金属材料内部各个晶粒

和亚晶界的趋向均不相同(见图1-3a),不仅使其塑性变形很不均匀,还会相互受到阻碍而增加内应力。

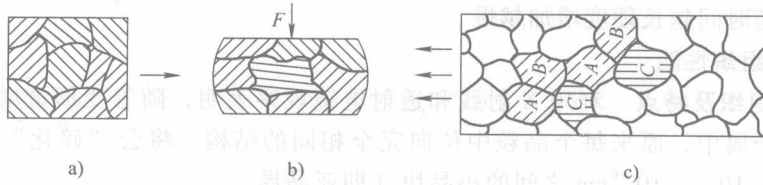


图1-3 强化过程中晶粒的错动

a) 原晶粒状态 b) 不同位向晶粒受力 c) 晶粒受力依次塑性变形

当各个晶粒和亚晶界受力超过金属材料本身强度时,各个晶粒间将在原子密度最大的晶面上产生滑移而导致位错,但仍保持各晶粒间结构连续性,并且形变受到的阻力及形变量很小,如图1-3b所示。

然后,随着塑性变形程度的继续增加,不仅金属内部的晶粒被破碎拉长,产生晶粒细化、位错密度增加等组织结构变化,而且各晶粒位向也会沿着变形方向同时发生转动,如图1-3c所示。

同时在常温和一定外力作用下,当总的塑性变形量一定时,晶粒越细小,晶内产生的位错密度越大,越会使塑性变形更均匀,越不容易产生应力集中,不但能提高强度和硬度,同时还可改善金属表层的韧性。

(3) 表层应力及性能变化 在弹丸冲击或辊轮滚压工件表面强化过程中,表面塑性变形带来的表面凹坑或凹面尺寸变化,将在其周围区域同时引起表面残留压应力的变化,如图1-4a所示为表面和齿根凹坑应力分布状态。

当弹丸冲击或辊轮滚压次数越多时,工件表面残留压应力越大,表面层硬度和强度越高,并且喷丸冲击源距离工件表面越近,表面硬度和强度增加越快,如图1-4b所示。

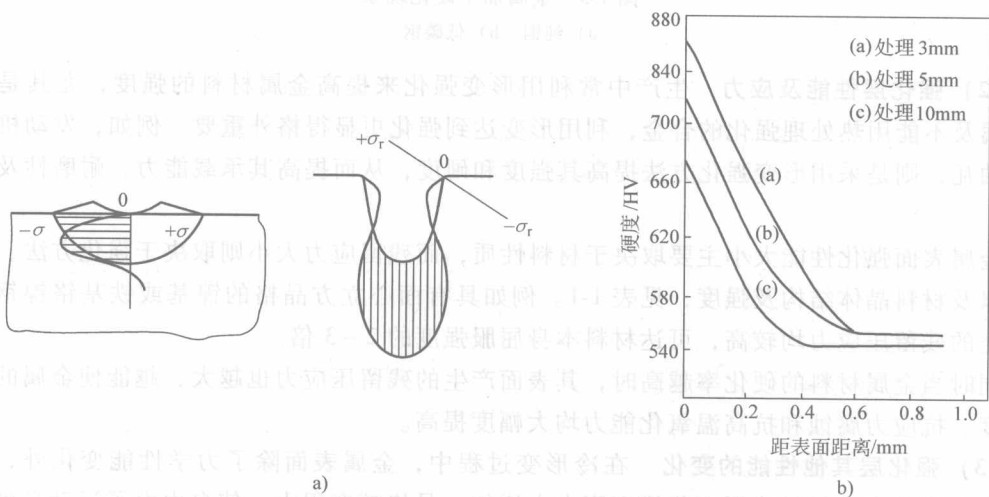


图1-4 金属表面强化层应力及硬度

a) 强化层凹坑及应力 b) 强化层硬度变化

然而在反复多次冲击或滚压工件表面的开始阶段，并且当处理时间刚刚 3min 时，硬度迅速增加而达 880HV，但随着处理时间延长而在冲击源距离工件表面相同距离时，则硬度增加较缓慢，且随时间越长硬度增加越慢。

1.1.1.3 强化层组织性能

(1) 强化层组织及特点 利用 X 射线和透射电镜观察表明，随着变形量增大，产生塑性变形后的表层金属中，原来每个晶粒中位向完全相同的结构，将会“碎化”成许多小于 1° 位向差、尺寸在 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ cm 之间的小晶块（即亚晶界）。

在小晶块及小晶块的交界处分布有大量位错，同时伴随着塑性变形中发生的晶粒破碎、位错密度增加过程，原有的亚结构会发生进一步地细化，小晶块的尺寸可能要减小 1 个数量级以上而仅为 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ cm。

同时随着变形量的增加，位错堆积缠结现象趋于严重，位错密度增大，晶格畸变严重而且内能增加，致使淬硬层位错密度大大增加，亚晶粒细化至 $0.02\mu\text{m}$ ，且淬硬层亚晶粒越细，表面硬度和强度越高，如图 1-5 所示。

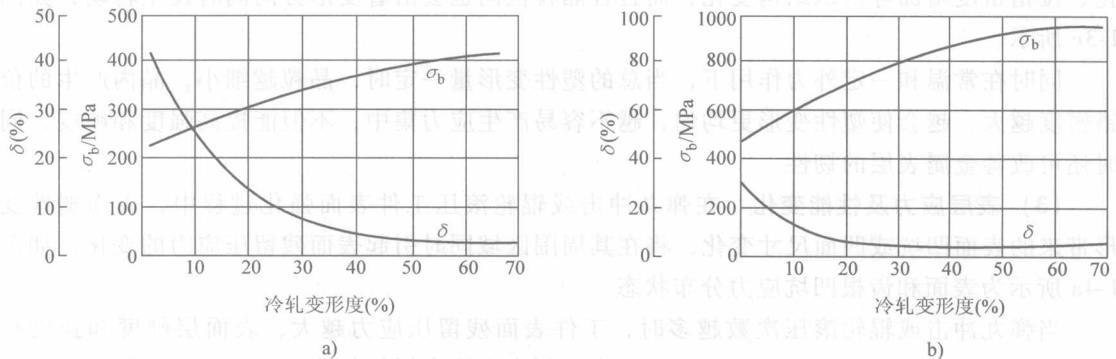


图 1-5 金属加工硬化现象

a) 纯铜 b) 低碳钢

(2) 强化层性能及应力 生产中常利用形变强化来提高金属材料的强度，尤其是对于纯金属及不能用热处理强化的合金，利用形变达到强化更显得格外重要。例如，发动机上的青铜轴瓦，则是采用形变强化方法提高其强度和硬度，从而提高其承载能力、耐磨性及残留应力。

金属表面强化性能大小主要取决于材料性质，而残留应力大小则取决于强化方法、工艺参数以及材料晶体结构及强度，见表 1-1。例如具有面心立方晶格的镍基或铁基铬镍钢，表面产生的残留压应力均较高，可达材料本身屈服强度的 2~3 倍。

同时当金属材料的硬化率越高时，其表面产生的残留压应力也越大，越能使金属的抗疲劳强度、抗应力腐蚀和抗高温氧化能力均大幅度提高。

(3) 强化层其他性能的变化 在冷形变过程中，金属表面除了力学性能变化外，其他性能也有所改变。例如冷形变位错密度大大增加，晶格畸变很大，使自由电子运动受到干扰而电阻有所增大，并且由于晶粒处于高能量状态，金属易与周围介质发生化学反应，从而使其耐蚀性降低。

表 1-1 金属材料经喷丸强化后的表面残留应力

材料种类	牌 号	力学性能/MPa		表面残留应力	比值
		抗拉强度/ σ_b	屈服强度 σ_s	σ_r /MPa	σ_r/σ_s
碳钢与高强度钢	45	900 ~ 1000	750 ~ 850	400 ~ 500	0.54 ~ 0.59
	18CrNiWA	1200	1100	600 ~ 700	0.55 ~ 0.64
	40CrNiMoA	1100	970	800 ~ 900	0.83 ~ 0.93
	30CrMnSiA	1100	850	550 ~ 650	0.39 ~ 0.47
	GCr06	1880	1650	1100 ~ 1300	0.67 ~ 0.79
钛合金	高温钛合金	1100 ~ 1200	900 ~ 1000	860	0.86 ~ 0.95
	Ti-6Al-4V	950	800	560 ~ 700	0.70 ~ 0.87
铝合金	2A02	440	280	250 ~ 350	0.90 ~ 1.25
	2A11	360 ~ 380	200	250 ~ 300	1.25 ~ 1.50
	2A50	380 ~ 400	280 ~ 300	300 ~ 340	1.10 ~ 1.13
高温合金	GH2036	850	600	800	1.33
	GH2132	950	700	800	1.15
	GH2135	800	600	950	1.58
	GH3030	780	275	1000 ~ 1100	3.70 ~ 4.10
	GH4049	1000 ~ 1200	750 ~ 800	1100 ~ 1400	1.47 ~ 1.76
	GH4033	1020	660	1100 ~ 1200	1.67 ~ 1.82

冷形变不仅能大幅度提高金属强度，而且冷挤压、冷冲压、冷轧制等加工工艺还使产品具有尺寸精度高及表面质量好的优点。但由于冷形变硬化使金属耐蚀性下降，应将强化后的表面层及时进行防蚀处理。

1.1.1.4 强化层缺陷及处理

(1) 强化层存在的问题 在金属强化层形成过程中，若表层形变硬化较重时，内部残留应力相应较大，致使其平衡状态受到的破坏较严重，然而工件在外力作用下，应力状态必定要重新分布，而引起工件形状尺寸发生改变。

若金属表层形变硬化太严重时，在不受外力而自然长期放置下，也会因应力状态的重新分布而使工件尺寸形状逐渐变化，以至丧失其精度。

(2) 改善强化层的方法 工业生产中经过塑性变形的金属，通常均要去应力处理，以降低金属内的残留应力，保留金属的形变硬化性能，改善某些理化性能。例如冷卷弹簧卷制后均要进行 250 ~ 300℃ 去应力处理，以降低内应力使其定型。

钢结构件去应力时，随炉缓慢加热（100 ~ 150℃/h）至 450 ~ 550℃，保温一定时间后，随炉缓慢冷却（50 ~ 100℃/h）至 300 ~ 200℃ 以下出炉空冷。黄铜构件去应力时，加热温度为 270 ~ 300℃，纯铝及硬铝合金的加热温度约 100℃。

1.1.2 滚压形变强化

滚压形变强化是指利用相对旋转的辊轮或特定的衬套或模具等，在零件表面、内壁或周边连续缓慢、均匀地滚压或挤压材料，并形成一定的塑性变形层，从而提高零件的疲劳强度和抗应力腐蚀能力，通常分为内孔挤压和表面滚压两种方法。

1.1.2.1 内孔挤压强化

(1) 内孔挤压强化原理 内孔挤压强化是指利用棒、衬套、模具及辊轮等，在零件孔的内壁或周边连续缓慢均匀挤压材料，并产生大塑性变形、加工硬化和残留压应力，从而能有效提高孔内表面强度、疲劳强度和耐应力腐蚀性能的工艺方法。

内孔挤压强化后，在孔周围将形成一定厚度的挤压变形层，不仅可使孔壁的粗糙度 R_a 值降低、精度提高，还可使其组织结构发生变化，如图 1-6a 所示，同时形成很高的残留压应力及加工硬化，从而大幅度提高内孔的疲劳强度。

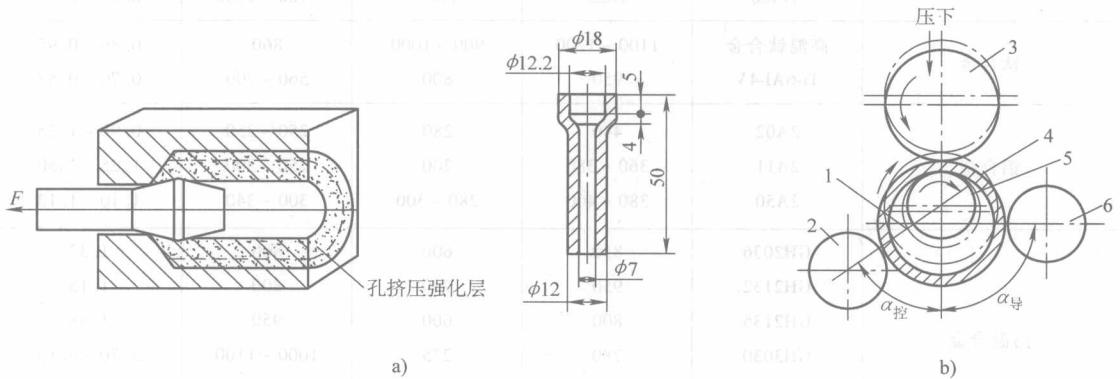


图 1-6 孔挤压强化及工艺过程

a) 孔挤压强化层 b) 水冷接头及挤压

1—原毛坯件 2—控制辊 3—主动辊 4—工件 5—从动支撑辊 6—导向辊

孔挤压强化材料性质及种类、挤压孔直径大小和挤压应力循环次数不同，被挤压后的强化效果则不同，多数金属材料未挤压前的疲劳强度是其抗拉强度的 40%~50%，但经挤压后均可提高 1 倍以上，见表 1-2。

表 1-2 挤压对常见金属材料疲劳强度的影响

材料	孔直径 /mm	应力循环 次数/次	疲劳强度/MPa		材料	孔直径 /mm	应力循环 次数/次	疲劳强度/MPa	
			未挤压	挤压				未挤压	挤压
30CrMnSiNiA	6	1×10^6	523	680	1Cr18Ni9Ti	12	1×10^6	380	436
40CrNiMoA	6	1×10^6	320	470	Ti-6Al4V	20	1×10^6	157	206
30CrNiMoV	6	1×10^6	260	300	7A09	6	1×10^7	60	110
AISI304	12	1×10^6	437	529	7A04	6	1×10^7	75	121

例如，1Cr18Ni9Ti 不锈钢双水内冷汽轮机发电机的水冷接头，如图 1-6b 所示，其内孔经冷挤压强化后，不仅可使孔壁表面疲劳强度提高，还使其表面粗糙度减小，一般尺寸精度可达 IT6~IT7、表面粗糙度 R_a 值小于 $0.8 \mu\text{m}$ 。

(2) 棒套挤压孔壁强化 如图 1-7a 所示为挤压棒挤压孔壁装置的主要结构。挤压时将孔壁涂上一层干膜润滑剂，选用略粗于孔径的挤压棒，并采用拉压或推挤的方式垂直施加外力，从而使孔径内壁获得挤压强化，适宜于大型零部件的装配及维修。

衬套挤压孔壁强化是先在零件内装置一合适的衬套，如图 1-7b 所示，并在挤压时采用挤压棒拉挤或推挤挤压孔内的衬套，从而使衬套内孔得以形变强化的方法。这种方法适用于各类零部件的装备和修理。

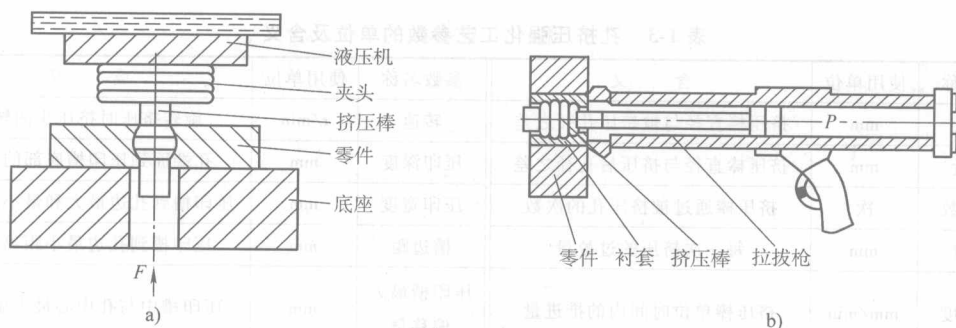


图 1-7 挤压棒和衬套挤压孔壁强化

a) 挤压棒挤压孔壁强化 b) 衬套挤压孔壁强化

(3) 工模具挤压孔壁强化 如图 1-8a 所示为挤压棒旋转挤压强化, 是利用装有一定过盈量、径向镶有圆柱体挤压头的挤压棒, 采用旋转挤压方式通过被挤压强化孔, 使孔壁获得强化的方法, 主要适用于飞机起落件或管件孔壁的强化。

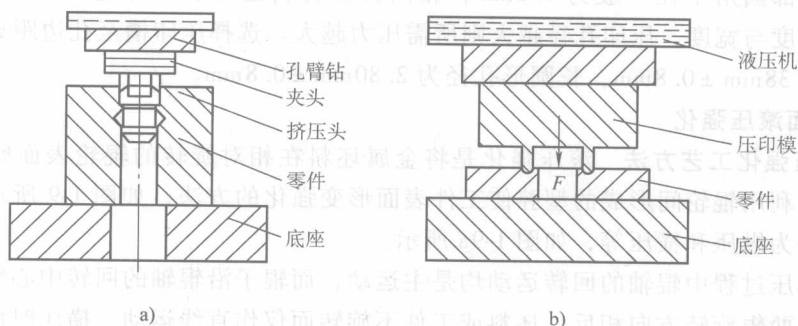


图 1-8 旋转棒挤压和压印模挤压

a) 旋转棒挤压 b) 压印模挤压

图 1-8b 所示为压印模挤压强化装置, 采用该模具可在零部件的圆孔或长圆孔周围挤压出同心沟槽, 并且获得的同心沟槽比切削加工的沟槽表面强度更高, 主要适用于大型零部件及飞机蒙皮关键受力部位的孔壁压印。

(4) 孔挤压强化工艺参数 孔挤压强化工艺参数有过盈量、塑变量、挤压次数、进给量、挤压速度、挤压力、压印深度、压印宽度、槽边距、压印槽最大偏移量和压印模半径等, 各个工艺参数的使用单位及含义见表 1-3。

(5) 工艺参数确定原则 在孔挤压强化过程中, 各种工艺参数均会对孔内壁的强化效果、孔内壁尺寸精度及孔表面粗糙度等产生重要影响, 因此必须根据被强化孔的材料性质以及所需循环挤压次数等条件进行合理选择。

实际生产中飞机和车辆等构件上, 凡是承受交变载荷与应力腐蚀的机械连接孔、螺纹孔和铆钉孔等均需挤压强化。当其材料为铝合金、铬镍不锈钢、高温合金且过盈量为孔直径的 4%~5% 时, 其疲劳强度最高。当构件为超高强度钢、低合金结构钢、钛合金等材料且过盈量为孔直径的 3%~4%、塑变量是过盈量的 60%~70% 时, 其疲劳强度也最高。

表 1-3 孔挤压强化工艺参数的单位及含义

参数名称	使用单位	含 义	参数名称	使用单位	含 义
过盈量	mm	挤压棒直径与被挤压孔径之差	转速	r/min	旋转挤压时挤压头的转速
塑变量	mm	挤压棒直径与挤压后孔径之差	压印深度	mm	孔端面到压印槽底部的尺寸
挤压次数	次	挤压棒通过被挤压孔的次数	压印宽度	mm	压印槽到孔边最大和最小距离差
进给量	mm	每一次挤压的过盈量	槽边距	mm	压印槽到孔边最小距离之差
挤压速度	mm/min	挤压棒单位时间内的推进量	压印槽最大偏移量	mm	压印槽中与孔中心最大偏移量
挤压力	N	孔挤压时施加于挤压棒的载荷	压印模半径	mm	压印模端部的圆弧半径

挤压过程中应尽量减少挤压次数，最好一次完成并最多不要超过 4 次。通常一次完成挤压的进给量即是过盈量，而多次挤压的第一次挤压进给量最大，以后依次减小。挤压速度一般不超过 75mm/min，且需均匀、缓慢连续进行，不允许有冲击和暂停现象，并使旋转速度定以 25~50r/min 为最佳。

压印模端部圆角半径一般为 1.0mm，相同孔径材料越厚、压力越大则压印深度越大，相同的压印深度与宽度，压印孔径越大则所需压力越大。选择压印槽至孔边距离时，一般圆形孔孔径为 $2.38\text{mm} \pm 0.8\text{mm}$ ，长圆形孔径为 $2.80\text{mm} \pm 0.8\text{mm}$ 。

1.1.2.2 表面滚压强化

(1) 滚压强化工艺方法 滚压强化是将金属坯料在相对旋转的辊轮表面摩擦力作用下引入辊轮，并利用辊轮间形成的型腔使工件表面形变强化的方法，如图 1-9 所示，并按滚压方向及要求分为纵压和横压等，如图 1-9a 所示。

纵压或横压过程中辊轴的回转运动均是主运动，而辊子沿辊轴的回转中心线转动是辅助运动。纵压时两辊旋转方向相反，坯料或工件不旋转而仅作直线运动。横压时两辊旋转方向相同，坯料或工件在两辊摩擦力带动下作旋转运动。

滚压强化主要适用于圆周类工件表面的强化，通常多采用横压方式，且强化装置有单辊、双辊、三辊或四辊等多种形式，并且主要针对圆周类工件的圆角、齿根、沟槽等部位表面层的形变强化，如图 1-9b 所示。

这些部位的表面经过滚压强化后，可使表层产生细晶粒层和局部较大的塑性变形，从而提高表层的硬度和抗疲劳强度，并能在滚压表面产生较大的（约 5mm 深）残留压应力，如图 1-9c 所示。

(2) 滚压强化工艺参数 目前滚压强化用的辊轮、滚压力大小等尚无标准，但其滚压强化效果均与辊轴表面线速度、辊子纵向进给量、滚压次数、辊子压力及所用润滑油等参数有关。为了保证滚压强化层达到一定的粗糙度、硬化深度及硬化宽度，应选择一定压力的钢辊滚压。

钢辊表面形状及压力取决于滚压零件的外形及强化层要求，一般适用于轴类和螺纹联接件等外形较简单的零件。滚压时为提高强化表面的疲劳强度，并使其具有一定深度的淬硬层，通常采取滚压工序间穿插淬火和回火工艺。

同时若工件材料强度增高、滚压力增大和滚压次数增多时，均会增加表层残留压应力。由于表层残留压应力是提高疲劳强度的效应，且随滚压压力加大，淬硬层加深，从而使强化

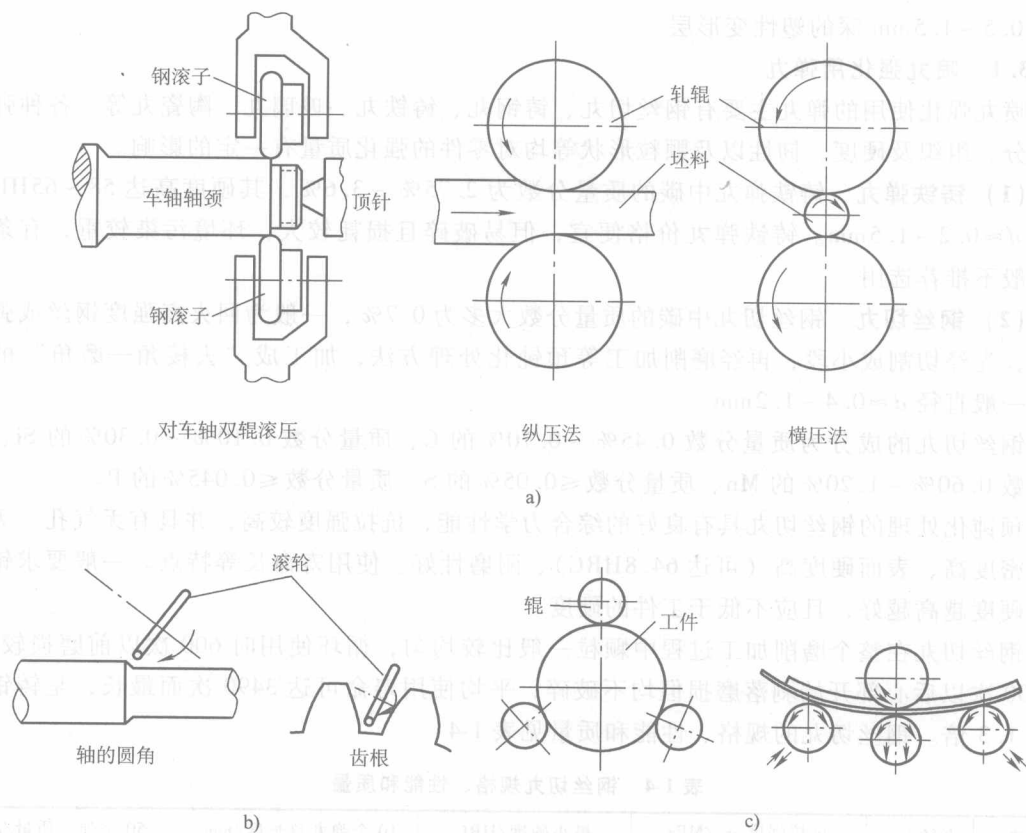


图 1-9 滚压强化方法及强化部位

a) 滚压强化方法 b) 单辊轴径圆角及齿根滚压 c) 三辊和四辊滚压沟槽

效果加大。

(3) 复合强化工艺及效果 热处理与滚压相结合复合强化处理, 对提高疲劳极限的效果更加显著, 生产中经常采用感应加热淬火加滚压、扩散渗氮加滚压、扩散碳氮共渗或氮碳共渗加滚压等工艺, 均会使工件表面具有良好的强化效果。

例如, 对于 15SiMn3 钢辊轴工件, 若采用单工艺经两道滚压强化后, 表面硬度为 645HV (13.6HV \approx 1HRC)、淬硬层深度为 0.21mm、疲劳极限由 380MPa 提高到 680MPa。

然而生产中常采用复合强化工艺, 在滚压前先将辊轴件经淬火和 220℃ 回火后, 再进行两道滚压工序, 这样可使辊轴淬硬层的硬度为 705 HV、淬硬层深度为 0.63mm, 且疲劳极限由 440MPa 可提高到 800MPa。

再如 45 调质钢曲轴, 若先经整体热处理后, 再经滚压强化轴径与曲柄臂过渡圆角, 则可使该处表面形成 0.5mm 深的形变淬硬层, 并产生残余压应力, 以提高曲轴的疲劳强度, 从而延长其使用寿命。

1.1.3 喷丸形变强化

喷丸强化是利用一定直径大小的钢球或其他材质的弹丸, 以一定的速度强烈地冲击工件表面, 使工件表面产生塑性变形, 从而引起表层的加工硬化并产生残留应力, 一般能在表层

产生 0.5 ~ 1.5mm 深的塑性变形层。

1.1.3.1 喷丸强化用弹丸

喷丸强化使用的弹丸主要有钢丝切丸、铸钢丸、铸铁丸、玻璃丸、陶瓷丸等。各种弹丸的成分、组织及硬度、韧性以及颗粒形状等均对零件的强化质量有一定的影响。

(1) 铸铁弹丸 铸铁弹丸中碳的质量分数为 2.75% ~ 3.6%，其硬度高达 58 ~ 65HRC，直径 $d \approx 0.2 \sim 1.5\text{mm}$ 。铸铁弹丸价格便宜，但易破碎且损耗较大，环境污染较重，有条件者一般不推荐选用。

(2) 钢丝切丸 钢丝切丸中碳的质量分数大多为 0.7%，一般为回火高强度钢丝或弹簧钢丝，先经切割成小段，再经磨削加工等预钝化处理方法，加工成“去棱角—磨角”的颗粒，一般直径 $d \approx 0.4 \sim 1.2\text{mm}$ 。

钢丝切丸的成分为质量分数 0.45% ~ 0.70% 的 C、质量分数 0.10% ~ 0.30% 的 Si、质量分数 0.60% ~ 1.20% 的 Mn、质量分数 $\leq 0.05\%$ 的 S、质量分数 $\leq 0.045\%$ 的 P。

预钝化处理的钢丝切丸具有良好的综合力学性能，抗拉强度较高，并具有无气孔、无疏松、密度高、表面硬度高（可达 64.8HRC）、耐磨性好、使用寿命长等特点。一般要求钢丝丸的硬度越高越好，且应不低于工件的硬度。

钢丝切丸在整个磨削加工过程中颗粒一般比较均匀，循环使用时 600 次以前磨损较慢，而 800 次以后心部开始剥落磨损但均不破碎，平均使用寿命可达 3490 次而最长，是铸钢弹丸的 1.3 倍。钢丝切丸的规格、性能和质量见表 1-4。

表 1-4 钢丝切丸规格、性能和质量

规格	直径/mm	抗拉强度 σ_b /MPa	最小硬度/HRC	10 个弹丸总长度/mm	50 个弹丸质量/g
CW-62	1.59	1600 ~ 1900	36	15.9 ± 1.02	1.09 ~ 1.33
CW-54	1.37	1700 ~ 1950	39	13.7 ± 1.02	0.72 ~ 0.88
CW-47	1.19	1730 ~ 2000	41	11.9 ± 1.02	0.48 ~ 0.58
CW-41	1.04	1780 ~ 2050	42	10.4 ± 1.02	0.31 ~ 0.39
CW-35	0.89	1830 ~ 2110	44	8.9 ± 0.76	0.20 ~ 0.24
CW-32	0.81	1860 ~ 2140	45	8.1 ± 0.76	0.14 ~ 0.18
CW-28	0.71	1900 ~ 2180	46	7.1 ± 0.76	0.10 ~ 0.12
CW-23	0.58	1930 ~ 2200	48	5.8 ± 0.51	0.05 ~ 0.07
CW-20	0.51	1980 ~ 2240	48	5.1 ± 0.51	0.04 ~ 0.05

(3) 铸钢弹丸 铸钢弹丸是将金属熔化后的钢液经雾化成丸、烘干、选圆、二次淬火、回火并筛分后制成，其直径为 0.075 ~ 2.8mm，硬度可根据回火温度不同而确定，一般在 40 ~ 45HRC、48 ~ 52HRC、53 ~ 57HRC 三种硬度范围内或者 $\geq 64.5\text{HRC}$ 以上。

铸钢弹丸经过回火后的组织最好为回火马氏体或回火托氏体，化学成分是质量分数为 0.75% ~ 1.20% 的 C、质量分数为 0.40% ~ 1.20% 的 Si、质量分数为 0.60% ~ 1.50% 的 Mn 和质量分数均 $\leq 0.05\%$ 的 S 和 P。

铸钢弹丸通常使用的规格为 S780、S660、S550、S460、S390、S330、S280、S230、S170 等，一般选择几种合适规格混合配制在一起使用。

铸钢弹丸在循环使用中 200 次以前磨损较慢，而 400 次以后心部开始剥落并加速磨损、严重破碎。同时其硬度越大，抛丸速度越高，破裂越严重。为此国内喷丸设备使用铸钢丸

时,常需带有选圆装置而将破碎颗粒去掉。

同时为了避免弹丸破碎,应选用硬度为48~52HRC的铸钢弹丸,一般适宜于喷丸强度要求较低和喷丸速度较低的设备,若喷丸强度要求较高时,则应选用硬度高的预钝化处理弹簧钢丝切丸,切忌使用铸钢弹丸。

(4) 玻璃弹丸 玻璃弹丸是由高质量、不含铁杂质的碱玻璃制成,其外观为实心球形,一般直径为0.05~3.35mm,主要化学成分为 $\text{SiO}_2 \geq 62\%$ (质量分数),硬度相当于46~50HRC,使用规格为280、235、200、170、140、120、100、85、70等。

由于玻璃弹丸可获得均匀光滑的表面粗糙度,且无铁污染而备受青睐,但使用中易破碎而使用成本较高。为此玻璃弹丸仅限于对表面粗糙度有特殊要求的关键结构件,例如钛合金及稀有金属材料结构件。

(5) 陶瓷弹丸 陶瓷弹丸也是经熔化、雾化、烘干、选圆并筛分后制成,其化学成分大致是以质量分数为67%的 ZrO_2 、质量分数为31%的 SiO_2 以及质量分数为2%的 Al_2O_3 为主的夹杂物,硬度相当于57~63HRC,相比玻璃弹丸密度大且强度与硬度高、使用寿命长但价格较低。

陶瓷弹丸常用规格为Z100、Z150、Z210、Z300、Z425、Z600、Z850,其直径分别相应为0.10~0.15mm、0.15~0.21mm、0.21~0.30mm、0.30~0.425mm、0.425~0.60mm、0.60~0.85mm、0.85~1.18mm。

陶瓷弹丸组织为氧化锆玻璃相,颗粒圆整度较好,无明显缺陷,且磨损或脆性破碎后仍为圆形碎颗粒,但整体使用寿命很短。

1.1.3.2 弹丸性能及选用

弹丸的选用应根据强化零件的尺寸、形状、力学性能、弹丸强度及速度、覆盖度及表面粗糙度等要求选择。黑色金属构件通常选用钢丝切丸、铸钢丸、铸铁弹丸和玻璃弹丸,而有色金属构件则常用玻璃弹丸和不锈钢弹丸。

(1) 弹丸须具备的特性 喷丸强化使用的弹丸必须具备的特殊性能为:

- 1) 强化硬度强度较高的零件时,弹丸须具有较高的硬度和强度。
- 2) 按喷丸强度即弧高度要求,喷丸时冲击功应为 $1/2mv^2$ (其中 m 为弹丸质量、 v 为抛丸速度)并考虑弹丸质量、密度及规格大小间的关系。
- 3) 要求弹丸不破碎、耐磨损、使用寿命长。

(2) 弹丸需具备的形状 弹丸的外形要求轮廓呈球形或椭圆形,且表面光滑,装入机器时不应粘有污垢、油脂,不应混入其他易堵塞管路的杂物。

弹丸尺寸不仅应小于喷丸区最小圆角半径的1/2和键槽宽度的1/4,还必须小于间隙缝宽度的1/4,以便能通过间隙强化下方的表面。用于强化弹簧时,弹丸直径还必须小于弹簧钢丝直径的20%和弹簧间距的25%,以便能有效喷射到弹簧内圈表面。

由于弹丸在使用过程中逐渐磨损变小,故应随时向机器内补充新弹丸,但不应超过机内总量的5%~10%,且一直保持机内弹丸总量基本不变。

(3) 弹丸须具备的规格 根据弹丸磨损的特点,应将弹丸规格选用范围拓宽,尤其是新设备首次使用的弹丸规格,应是各种规格按一定比例的混合使用,并在添加某种单一规格时,应充分混匀或空抛一段时间,使弹丸粒度分布基本保持不变方可使用。

例如,采用1.18mm钢丝切丸抛丸强化时,应组成各种直径混合的弹丸,即1.18mm为