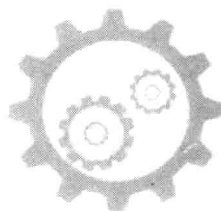


国家科学技术学术著作出版基金资助出版



机械制造传统工艺绿色化

主 编	单忠德	胡世辉		
参 编	袁松梅	毛祖国	战 丽	刘 丰
	吕晓春	马顺龙	周永松	何 鹏
	徐先宜	李汉锟	范广宏	张昌义
	姜 超	史建卫	李永兵	丁运虎
	王成刚	杜 兵	尹绍奎	田 媛



机械工业出版社

本书共6章,采用总分结构,第1章对机械装备工业节能减排技术及设备进行概述,第2~6章分别从典型绿色化铸、锻工艺及设备、典型绿色化钎焊工艺及材料、表面改性清洁生产、典型高效绿色切削加工技术五个方面展开论述。

本书适合机械、材料加工专业工程技术人员及高校相关专业师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

机械制造传统工艺绿色化/单忠德,胡世辉主编. —北京:机械工业出版社,2013.1

ISBN 978 - 7 - 111 - 40776 - 8

I. ①机… II. ①单…②胡… III. ①机械制造工艺 - 无污染工艺
IV. ①TH16

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第302004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:周国萍 责任编辑:周国萍 吕德齐

版式设计:霍永明 责任校对:张永利

封面设计:姚毅 责任印制:张楠

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2013年3月第1版第1次印刷

169mm×239mm·15.5印张·2插页·244千字

0001—2000册

标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 40776 - 8

定价:59.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

策划编辑:(010) 88379733

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



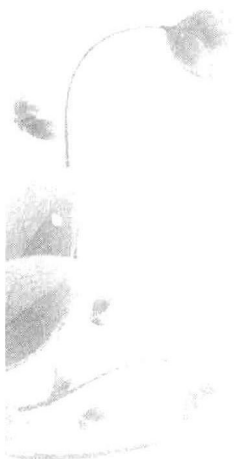
序 言

装备制造业是一个国家发展的重要基石，没有装备制造业的发展，就没有国家的进步和民族的振兴。机械装备制造在制造业中占有重要地位，传统机械制造工艺包括铸造、锻压、焊接、切削、表面处理、热处理等工艺，普遍存在资源能源消耗高、制造工艺差、废弃物排放量大等突出共性问题，急需开展绿色化节能减排技术与推广，为制造业的可持续发展提供技术及设备支撑。在《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》中，绿色制造是制造业未来发展的重要趋势之一，提高产品质量，节约材料及能源消耗，更加节能环保，实现清洁生产和可持续制造成为制造业发展的必然。

该书以“机械制造传统工艺绿色化”为题目，以承担完成的“十一五”国家科技支撑计划“绿色制造关键技术与装备”重大项目中“面向机械工业的机械制造传统工艺绿色化研究”课题的研究成果为主要内容，从机械装备工业节能减排技术现状、绿色铸锻焊工艺、绿色切削加工技术等方面，总结了机械制造传统工业绿色化的最新科研成果及典型应用案例。

该书章节结构合理，论述条理清晰，案例翔实，理论和实践紧密结合，可成为从事绿色制造研究开发及推广应用的高等院校、科研院所和企业相关人员重要的学习和参考教材。对于推动机械工业绿色制造技术研发及推广，促进我国制造业可持续发展具有重要意义。

中国工程院院士、西安交通大学教授 卢秉恒



前言



机械装备工业是国民经济的物质基础和产业主体，是经济高速增长的发动机和国家安全的重要保障，也是科学技术的基本载体。据统计，全世界75%的钢材经塑性加工成形，45%的金属结构用焊接得以成形。汽车重量的65%以上仍由钢材、铝合金、铸铁等材料通过铸造、锻压、焊接等加工方法而成形。然而，在机械装备制造、运行、使用以及回收过程中，消耗了大量的资源，产生了大量的工业废液、废气、固体废弃物等污染。存在产品制造精度低，原材料及能源消耗大；制造技术水平差，生产效率低；废弃物排放量大，环境污染严重；控制水平差，设备效率低等问题。绿色制造是《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》制造业发展的重要趋势以及科技开发优先支持的主题，节能减排、清洁生产、可持续制造、循环经济等成为制造技术发展的重要方向。作为提供基础制造技术及设备的机械装备行业，急需开展节能减排技术的研究与推广，为制造业的可持续发展提供技术及设备支撑。

本书的内容主要来源于作者所承担完成的国家“十一五”科技支撑计划项目“面向机械工业的机械制造传统工艺绿色化研究”的部分研究成果。本书作者及其研发团队结合多年来从事机械制造传统工艺绿色化技术研究和推广应用实践，将近年来取得的一系列处于国际先进水平的技术成果编撰成册，供相关技术领域科研人员参考，以推动机械装备制造过程实现资源最小化、环境友好化、成本最低化，降低生产成本、节约材料、减少能源消耗和废弃物制造，对促进装备制造业的可持续发展具有重要作用，也是落实装备制造业振兴规划的重要举措，具有很大的应用价值。本



书将填补我国相关技术领域著作的空白。

本书在分析国内外机械装备工业绿色化技术现状的基础上,针对能源和物料消耗大、污染严重的机械制造传统工艺生产过程,解决机械工业生产过程中传统工艺的环境污染和资源消耗等问题,介绍了生产工艺(如铸造、锻压、焊接、表面处理、切削加工等)、工艺材料、生产方法等绿色制造工艺技术,以及推广应用案例。

本书共6章,采用总分结构,第1章对机械装备工业节能减排技术及设备进行概述,第2章至第6章分别从典型绿色化铸、锻工艺及设备、典型绿色化钎焊工艺及材料、表面改性清洁生产、典型高效绿色切削加工技术五个方面展开论述。

第1章 机械装备行业节能减排制造技术及设备。本章总体概括了机械装备行业节能减排面临的严峻形势,介绍了机械装备行业可持续发展的新技术及设备发展现状,提出了机械装备行业发展建议。

第2章 典型绿色化铸造工艺及设备。本章主要介绍了无模化铸型数字化加工技术及设备、无污染的硅磷复合改性水玻璃及铸造应用、铸铁件在线孕育及喂丝球化工艺研究。

第3章 典型绿色化锻压工艺及设备。本章主要介绍了超高强度钢热冲压成形技术、绿色化锻造润滑工艺等典型锻造工艺的最新研究应用成果,并分析了绿色化锻造工艺及设备未来的发展趋势。

第4章 典型绿色化钎焊工艺及材料。本章主要介绍了无铅钎焊工艺及设备研究现状、最新应用研究成果及其未来发展趋势等。

第5章 表面改性清洁生产。本章主要介绍了高效节能热处理工艺及设备绿色化电镀工艺及设备等的最新技术发展和应用。

第6章 典型高效绿色切削加工技术。本章主要介绍了微量润滑切削加工技术、低温微量润滑(冷风)切削加工技术等典型绿色切削加工技术的发展现状及应用。

本书由单忠德、胡世辉主编。第1章由单忠德、胡世辉、战丽等编写,第2章由单忠德、刘丰、马顺龙、李汉铨等编写,第3章由单忠德、



姜超、周永松、范广宏等编写，第4章由杜兵、吕晓春、何鹏、史建卫等编写，第5章由毛祖国、李永兵、丁运虎等编写，第6章由袁松梅、张昌义、严鲁涛等编写。本书适合机械、材料加工专业工程技术人员及高校相关专业学生使用。

本书在编写过程中，得到了“十一五”科技支撑计划项目相关参加人员的支持，在这里表示衷心感谢！

本书为国家科学技术学术著作出版基金资助项目。

在此特别感谢国家“十一五”科技部科技支撑计划课题“面向机械工业的机械制造传统工艺绿色化研究”的大力支持，以及本课题研发团队的每一位成员，对本书的贡献，同时感谢为本书的整理和校对付出辛苦的田媛、严鲁涛等同志。由于水平有限，加之本书所涉及的理论与实际问题非常广泛，书中难免有不妥和错误之处，恳请读者批评指正。



目 录

前言

第 1 章 机械装备行业节能减排制造技术及设备	1
1.1 机械装备行业发展现状	1
1.1.1 机械装备行业简况	1
1.1.2 机械行业传统制造绿色化需求分析	2
1.2 机械装备行业可持续发展的新技术及设备	4
1.2.1 数字化制造融入装备设计及制造过程	4
1.2.2 新材料开发促进机械装备减量化	6
1.2.3 装备零部件毛坯制造趋向近净成形	8
1.2.4 在装备零部件制造过程中推进清洁生产	9
1.2.5 短流程化生产减少资源消耗	11
1.2.6 机械装备关键部件引入节能化技术	13
1.2.7 无废弃物制造促进资源循环利用	14
1.2.8 产品制造与装备规格相匹配	16
1.2.9 自动化控制提高装备使用效率	17
1.2.10 机械装备再制造、再使用获得推广应用	19
1.3 机械装备行业发展建议	20
1.3.1 积极开展机械装备零部件基础制造技术研究	21
1.3.2 积极开展短流程制造及资源循环利用技术研究	21
1.3.3 积极开展零部件制造过程清洁化技术研究	22
1.3.4 积极开展关键部件节能设计技术研究	22
1.3.5 积极开展装备控制自动化节能技术研究	23
第 2 章 典型绿色化铸造工艺及设备	24



2.1 无模化铸型数字化加工技术及设备	24
2.1.1 无模化铸型数控加工制造技术原理及特点	25
2.1.2 无模化铸型数控加工关键技术	26
2.1.3 铸型无模化加工技术及装备应用示范	33
2.2 无污染的硅磷复合改性水玻璃及铸造应用	36
2.2.1 水玻璃砂国内外现状	36
2.2.2 非晶态磷酸盐的制备	38
2.2.3 非晶态磷酸盐改性水玻璃	41
2.2.4 活性离子改性水玻璃	43
2.2.5 有机酯硬化硅磷复合改性水玻璃砂工艺性能	45
2.2.6 有机酯硬化硅磷复合改性水玻璃砂工艺应用	47
2.3 铸铁件在线孕育及喂丝球化工艺研究	48
2.3.1 铸铁件在线孕育工艺及应用	49
2.3.2 喂丝球化工艺	54
第3章 典型绿色化锻压工艺及设备	58
3.1 超高强度钢热冲压成形技术	58
3.1.1 超高强度钢热冲压技术背景及概况	58
3.1.2 超高强度钢热冲压技术原理及特点	61
3.1.3 超高强度钢热冲压核心技术及模具	63
3.1.4 超高强度钢热冲压成套技术及装备	70
3.1.5 超高强度钢热冲压技术应用及发展	75
3.2 绿色化锻造润滑工艺	77
3.2.1 绿色化锻造润滑工艺的技术要求	78
3.2.2 绿色化锻造润滑技术发展状况	79
3.2.3 绿色化冷锻润滑技术	81
3.2.4 绿色化热锻润滑技术	85
3.2.5 绿色化冲压拉深润滑技术	91
3.2.6 绿色化超高强度钢板热冲压成形表面防护润滑技术	93
第4章 典型绿色化钎焊工艺及材料	98
4.1 无铅钎焊技术的特点	98
4.2 无铅波峰钎焊抗氧化技术	99

4.2.1 无铅波峰钎焊设备简介	99
4.2.2 氮气保护技术	103
4.2.3 钎料抗氧化技术	104
4.3 氮气保护无铅再流钎焊技术	113
4.3.1 氮气保护与钎料润湿性	114
4.3.2 氮气保护与焊点外观质量	115
4.3.3 氮气保护与钎剂氧化	116
4.3.4 氮气保护与焊点强度	117
4.3.5 氮气保护对焊点内部组织的影响	117
4.3.6 推荐的氮气保护措施	118
第5章 表面改性清洁生产	124
5.1 高效节能热处理工艺与设备	124
5.1.1 概述	124
5.1.2 热处理生产的能源消耗与污染危害	126
5.1.3 可控气氛热处理	128
5.1.4 真空热处理	132
5.1.5 感应热处理	137
5.1.6 激光热处理	142
5.1.7 淬火介质与冷却技术	146
5.1.8 大型铸、锻、焊件的热处理	149
5.2 电镀绿色化工艺及设备	152
5.2.1 电镀清洁生产工艺	152
5.2.2 电镀清洁生产设备系统	163
第6章 典型高效绿色切削加工技术	165
6.1 微量润滑切削加工技术	166
6.1.1 微量润滑切削加工技术简介	166
6.1.2 微量润滑系统设计	171
6.1.3 微量润滑技术切削试验	173
6.1.4 微量润滑技术在一些企业中的应用	185
6.1.5 低温微量润滑切削技术	185
6.2 低温微量润滑（冷风）切削加工技术	191



6.2.1 金属切削加工业面临的重要课题	191
6.2.2 切削液的作用和问题	194
6.2.3 少、无切削液加工的新方法	200
6.2.4 低温冷风切削技术的实施	205
6.2.5 低温冷风切削技术的研究、发展及应用现状	211
参考文献	225



第 1 章

机械装备行业节能减排制造技术及设备

本章在分析机械装备行业发展现状的基础上，从数字化制造、新材料应用、毛坯近净成形、无废弃物制造、自动化控制以及再制造等十个方面详细阐述了机械装备业可持续发展的制造技术与设备，同时指出我国要成为制造强国，必须从资源环境可持续发展方面解决制约机械装备行业发展的技术及设备，为建设资源节约型、环境友好型社会提供技术支撑。

1.1 机械装备行业发展现状

1.1.1 机械装备行业简况

装备工业是国民经济的物质基础和产业主体，是经济高速增长的发动机和国家安全的重要保障，也是科学技术的基本载体。同时，在装备的制造、运行、使用以及回收过程中，消耗了大量的资源和能源。装备制造业是我国规模最大的产业门类之一。

机械制造传统加工业是制造业的重要组成部分，铸造、锻造、焊接、表面工程、切削等材料加工技术是国民经济可持续发展的主体技术。据统计，全世界 75% 的钢材经塑性加工，45% 的金属结构用焊接得以成形。汽车重量的 65% 以上仍由钢材、铝合金、铸铁等材料通过铸造、锻压、焊接等加工方法而成形。目前全国规模以上装备制造企业 8 万多家，我国是



世界铸造、塑性成形和焊接的第一大国：铸件年产量已超过 2800 万 t，锻造、冲压等成形超过 2000 万 t，材料热处理和改性已达 1350 万 t/年。

然而，机械制造传统加工业在生产机器设备的同时，存在能源消耗大、产品制造精度低、加工余量大、废品率高、生产效率低、废弃物排放量等问题。据统计，造成环境污染的排放物有 70% 以上来自制造业，每年约产生出 55 亿 t 无害废物和 7 亿 t 有害废物。铸造、热处理、锻造等热加工工艺消耗能源和产生污染物最多，其能耗和产生的污染物占机械工业的 60% ~ 80%。

1.1.2 机械行业传统制造绿色化需求分析

目前美国在“精确成形工艺”的基础上进一步提出“无废弃物成形加工”，以减少生产制造中的废料、污染和能量消耗，并对环境有利。日本铸造工厂提出了 3R 的环境保护新概念，即：减少废弃物、重用及回用。美国提出通过推广先进技术，到 2020 年铸造行业的能耗降低 20% 的目标。

我国与发达国家的差距表现为能耗大、污染严重。制造业产品能耗和产值能耗约占全国一次能耗的 63%。单位产品能耗平均高出国际先进水平 20% ~ 30%。单位产值产生的污染远远高出发达国家。与发达国家先进制造技术相比的差距主要表现在以下几个方面。

(1) 产品零件制造精度低，毛坯加工余量大 全世界每年约有 1 亿 t 金属材料在机械加工过程中被切削掉，价值约 2500 亿美元。减少加工余量将使得能源消耗和材料消耗大幅度降低。在铸造行业中，目前大部分企业生产的铸件尺寸精度低于国际标准 1 ~ 2 个等级，废品率高出 5% ~ 10%，加工余量高出 1 ~ 3 个等级。造成我国铸造、锻造行业能耗高、污染严重的重要原因就是落后的生产工艺，一些先进的绿色制造工艺在整个行业中应用比例还很低。例如在全国 22000 多家铸造企业中，采用消失模铸造技术的铸造企业仅仅有 100 多家，而且在这些企业中，还有很多企业凭借经验进行生产，缺乏系统的工艺技术以及生产准则。



(2) 制造工艺材料、能源消耗高 铸造行业的能耗约占机械工业能耗的 23% ~ 62%，消耗的能源主要是焦炭、煤、电、氧气、水等，目前我国铸造行业的能源利用率仅为 17%，综合能耗是发达国家的 2 倍。每生产 1t 合格铸铁件，需耗新砂 1 ~ 1.5t，能耗为 550 ~ 700kg 标准煤，国外为 300 ~ 400kg 标准煤；生产 1t 合格铸钢件的能耗为 800 ~ 1000kg 标准煤，国外为 500 ~ 800kg 标准煤。锻造行业的生产资源消耗大（能源、金属材料和水），同时对环境的污染很严重（如噪声、振动和固体废弃物），我国每吨锻件平均能耗约为 1.4t 标准煤，而日本每吨锻件平均能耗仅 0.515t 标准煤。生产的零件精度较低，材料资源的利用率太低，浪费严重，模锻、大型锻件的能耗要比国外高出 1 倍左右。

(3) 工艺水平差，生产效率低 以汽车制造为例，我国生产效率相当于日本的 1/10、美国的 1/5、德国的 1/4，车、磨、铣削速度分别比国外低 2 ~ 3 倍。绿色切削加工工艺应用研究少，目前美国、日本、德国等国采用干车削、干磨削、干镗削等都取得一定的成果，但在我国还刚开始研究。虽然干式加工工艺本身还尚需全面论证，不过作为一种新型的加工工艺已经得到了世界各国的广泛注意和研究。

(4) 环境污染大，排放的废弃物量大 在我国每生产 1t 合格铸件，大约要排放废渣 300kg，粉尘 50kg，废气 1000 ~ 2000m³，废砂 1.3 ~ 1.5t。目前我国铸件的年产量为 4000 多万 t，整个铸造业每年排放废渣 420 万 t、粉尘 70 万 t、废气 140 亿 ~ 279 亿 m³、废砂 1810 万 ~ 2090 万 t。我国每吨合格铸件的三废排放量为国外发达国家的 10 倍，并且国外工业发达国家的旧砂基本上是再生回用的。目前电镀与精饰行业面临的最大问题是六价铬污染。我国汽车涂装单车耗能远远高于国外水平，有机溶剂挥发量至少在 75.1 万 t 以上；传统化学电镀行业每年排放 4 亿 t 含重金属废水、5 万 t 固体废物和 3000 万 m³ 酸性气体等大量污染物。

同时，机械装备制造业又是为各行各业提供技术及装备的主要行业，其所生产的产品是否先进、高效、节能和环保，直接影响电力、冶金、石化等各个行业节能减排目标的实现。据统计：电动机、风机、水泵、变压



器、电焊机、电炉等 21 类量大、面广机电产品的用电量就占全国用电量的 70%；发电锅炉和工业锅炉分别占全国年耗煤量的 1/3 左右；内燃机则消耗着我国石油资源的 60% 左右。这些耗能严重的行业同样存在生产粗放的问题。目前，我国电动机及被拖动装置，如泵、风机等，平均效率比国外先进产品低 2% ~ 5%，电机系统运行效率比国外先进水平低 10% ~ 20%。

作为提供基础制造技术及设备的机械装备行业急需开展节能减排、绿色制造技术研究及推广，为制造业的可持续发展提供技术及设备支撑，使制造过程对环境的影响最小、资源消耗最低，并使企业经济效益和社会效益协调发展。

1.2 机械装备行业可持续发展的新技术及设备

近年来，伴随着机电一体化技术、计算机技术、信息和控制技术等的快速发展，制造技术在发展的过程中不断吸收了高新技术的优秀成果并且相互渗透、融合和衍生，趋向数字化、精密化、柔性化、智能化和绿色化，大量优质、高效、清洁的新型制造技术不断出现并逐渐在装备制造业中获得应用，有力促进了工业领域节能减排的发展。

1.2.1 数字化制造融入装备设计及制造过程

随着 IT 行业的快速发展，数字化设计与制造成为提升装备制造业的一种重要途径，同时也是提高企业核心竞争力的一种重要手段。通过产品设计、制造及管理过程数字化，提高产品开发与制造能力，通过减少零件数量、减轻零件重量、采用优化设计等方法使原材料的利用率达到最高，有效地促进了生产的节能减排。例如，波音公司采用现代产品开发系统，将新产品研制周期从 8 年缩短到 5 年，工程返工量减少了 50%。日本丰田汽车公司在研制 2002 年嘉美新车型时缩短了研发周期 10 个月，减少了 65% 的试验样车数量。在铸造行业，通过可视化铸造技术可以改变传统的浇口、冒口设计原则，使浇注系统、冒口系统的尺寸和浇注过程最佳化。



为了更好地从源头上实现装备零部件制造的节能节材,绿色设计逐渐融入数字制造。绿色集成制造系统(GIMS)中的绿色设计系统,除包括一般现代集成制造系统(CIMS)中的工程设计自动化系统的有关内容(如CAD、CAPP、CAM等)外,还特别强调绿色设计。广泛采用建模与仿真技术实现产品设计、工艺设计、加工生产、使用和回收等全过程模拟,将环境因素和防止污染的措施应用于产品设计中,优化各有关设计因素,使产品及其制造过程对环境的总体影响减到最小。

例如,在装备开发中引入虚拟现实技术。虚拟现实技术是一种集成多种模拟仿真的技术。在装备设计初期,广泛采用建模与仿真技术实现产品设计、工艺设计、加工生产、使用和回收等全过程模拟,包括多物理场的数值建模、加工和成形过程仿真、高速高精度加工设备模拟及数字化协同产品开发等,同时将环境因素和防止污染的措施应用于产品设计中,优化各有关设计因素,使产品及其制造过程对环境的总体影响减到最小。图1-1所示为超高强度钢生产线虚拟现实场景,图1-2所示为筒子纱数字化自动染色生产线。采用计算机建模与仿真技术,通过可视化的人机交互进行装备的结构设计分析、关键零部件加工规划、装配过程模拟以及对开发完成的装备进行虚拟运行试验,能够有效提高装备的研发进度,降低制造成本,减少资源消耗。

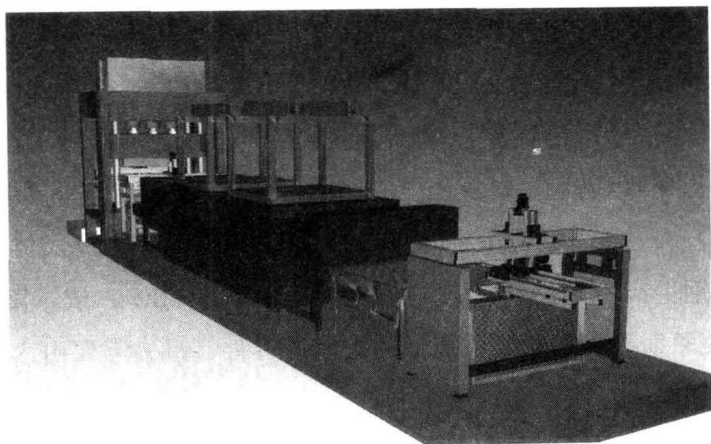


图1-1 超高强度钢生产线虚拟现实场景

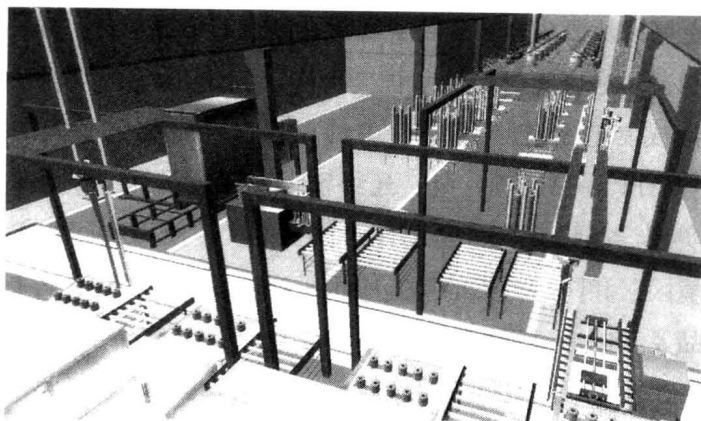


图 1-2 筒子纱数字化自动染色生产线

1.2.2 新材料开发促进机械装备减量化

高技术新材料是高新技术推动下发展起来的一类新材料，具有比强度高、比刚度高、耐高温、耐腐蚀、耐磨损的性能。目前复合材料、轻金属、高温合金等新型材料应用和研究重点开始从宇航和兵工等领域扩展到民用高附加值产业（如汽车、计算机、通信和家电等），特别是汽车业。

轻量化将是未来装备零部件，特别是汽车零部件制造的重要发展方向，而轻量化基本依赖于新材料的应用。美国 Freedom CAR 及新一代汽车发展计划（PNGV）中关于汽车轻量化材料的研究表明，通过汽车车身及底盘零件的轻量化，可降低零部件 50% 的重量，达到汽车总重降低 40% 的研究目标。有关研究表明，汽车所用燃料的 60% 是消耗于汽车自重，汽车自重每降低 100kg，每百公里油耗可减少 0.7L 左右，每节约 1L 燃料可减少 CO_2 排放 2.5g。例如通用汽车公司采用奥氏体 + 贝氏体球墨铸铁代替淬火钢生产汽车后桥螺旋伞齿轮，节约能耗 50%，成本降低 40%。戴姆勒-克莱斯勒车的悬架系统下的控制臂零件，过去需要由 3 个模锻件和 1 个铸件焊接组装而成，现在由 1 个奥氏体 + 贝氏体球墨铸铁件制成，单件重量减轻 2.27kg。美国 Smith 铸造厂生产的 ADI 驱动轮铸件，原先需要由 84 个钢零件装配而成，目前设计为 1 件整体铸造而成，重量减轻



15%，成本降低 55%。图 1-3 为奥氏体 + 贝氏体球墨铸铁件。

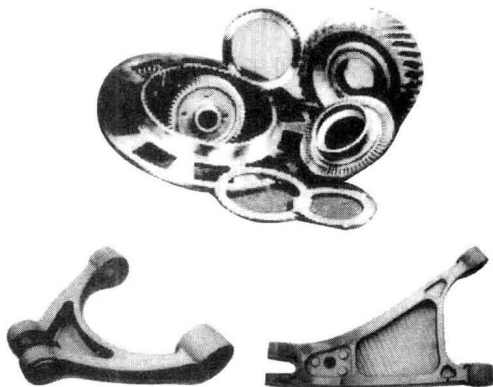


图 1-3 奥氏体 + 贝氏体球墨铸铁件

对于汽车零部件，铝合金替代钢、铸铁减重为 40% ~ 60%，而镁合金替代钢、铸铁可减重 60% ~ 75%。世界各大汽车公司都已把采用镁合金零部件的多少作为衡量其汽车产品技术是否领先的标志。BMW 公司将其 Z22 车型的水冷发动机曲轴箱设计为内层以铸铝材料来接触曲轴轴承，外层是镁合金材料。如此设计，使曲轴箱箱体重量比原设计减轻 10kg 左右，且较同尺寸铝制品减轻 25%。大众公司曾采用耐热镁合金 AM-SC1 试制 Lupo 的 3 缸发动机缸体，重量仅为 14kg，比现有的铝缸体轻了 25%。图 1-4 为德国 BMW 公司开发的镁合金六缸发动机。目前，汽车上有 60 多种零件可采用镁合金制造，如离合器外壳、变速器外壳、方向盘、座椅支架、仪表盘框架等。

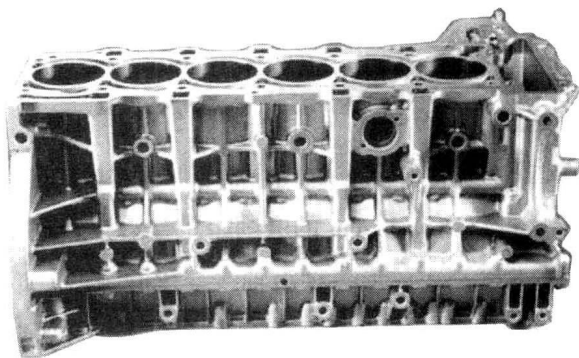


图 1-4 镁合金直列六缸发动机