

周大隼 主编

金属 体积冷成形 技术与 实例



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



金属体积冷成形

技术与实例

周大隽 主编



机械工业出版社

全书共分十三章，第一章简介了金属冷塑性变形基础知识，第二至第七章集中介绍了金属体积冷成形过程的基本技术要素，第八至十三章分别介绍了冷挤压、冷模锻、压印、冷摆辗、冷旋锻以及复合冷成形工艺，并列举了若干应用实例。

本书图文清晰，内容比较全面，可供从事金属体积塑性成形工艺的科技人员使用，也可作为大专院校相关专业师生的教学参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

金属体积冷成形技术与实例/周大隼主编. —北京: 机械工业出版社, 2009. 1

ISBN 978-7-111-25560-4

I. 金… II. 周… III. 金属压力加工—冷冲压—塑性变形—基本知识 IV. TG386.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 177280 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: 刘彩英 责任编辑: 刘彩英 郑 铨

版式设计: 霍永明 责任校对: 陈延翔

封面设计: 姚 毅 责任印制: 杨 曦

三河市国英印务有限公司印刷

2009 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

140mm × 203mm · 14.75 印张 · 2 插页 · 396 千字

0001—4000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-25560-4

定价: 35.00 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) 68351729

封面无防伪标均为盗版

前言

金属体积冷成形技术实际上是一种精密塑性成形工艺。它具有一系列的优点，其中除去彻底摆脱了又脏又烤的劳动环境外，更表现在它的制品尺寸精度高、力学性能好、生产率高、材料利用率高、适合于大批量生产、有利于降低其成本。所以，许多年以来，欧洲和美、日等国一直将其用于大量生产形状较简单、尺寸精度较高的低碳钢、低合金钢和软金属零件，收益巨大。特别是近30多年来，金属体积冷成形技术在上述国家中又有了新的发展，不仅在成形理论方面取得了一些突破，而且冷成形零件的材料品种越来越广泛，而形状也越来越趋于复杂，已成功地采用冷成形方法生产出诸如汽车离合器接合齿圈、变速器同步齿圈、锥齿轮、差速器齿轮、方向节内行星轮、十字轴、压缩器涡盘等零件。

除了汽车制造领域外，国外冷成形零件在轴承、机床、电机、家电、军工等诸多行业中，甚至在农机和建筑机械上，都有应用。但就数量而言，仍以汽车上的应用为最多。据相关信息报道，美国的钢制冷成形件中约有80%用于汽车工业。

采用冷成形工艺时，需要提供经过预处理的原材料和优质耐用的模具，虽然这对于产量不大的零件其成形成本不具优势，但是生产经验表明，对于形状复杂、需大量切削以致于材料利用率极低而成本极高的零件，采用冷成形方法生产，则可大幅度降低其生产成本。所以，就冷成形工艺成本而言，除了成形具有一定产量规模的零件而优势显著以外，成形具有高附加值的零件其优势也同样是明显的。正是基于后一理由，目前冷成形工艺也正向切削、粉末冶金、铸造、热锻、板料冲压等工艺领域渗透，凭着自身的成本优势，在广泛的工艺竞争中求发展，以获取更多的工

艺可替代产品。因此,完全有理由相信,在今后相当长的一段时间内,冷成形工艺的发展空间是巨大的。

我国的现代冷成形技术,起步虽不算太晚,但发展速度和成效与发达国家相比仍有很大的差距。日本资深冷锻专家工藤英明先生曾在他 1998 年撰写的“非凡的锻造世界”一文中提到:“当时的一辆日产轿车上除了紧固件之外,冷成形件的使用量已达 50kg 以上”。而我国,在 2003 年,一辆国产轿车上的冷成形件尚不足 20kg^[5]。由此可见,在国产汽车产量突飞猛进的今天,也应同时着力于提高其质量和生产效率。这其中,加速扩大汽车零件冷成形技术的开发和推广应用,应该是国产汽车提高质量、优化品牌、提高国际竞争力的一个重要方面。同时,通过这样的努力也必然会构建起一个交流和传播冷成形生产经验的平台,向国内其他相关行业辐射开来,从而推动冷成形技术在国内的全面开展。

有鉴于此,编者编写了这本书。它汇集了多种冷成形工艺,以适应市场的需要。

全书共十三章,其中第一至第四章由孙焱编写,第八至第十一章由周为编写,绪论及其他章节由周大隽编写,最后由周大隽统编。

虽然编者尽力追求完美,但终因水平和信息资源有限,书中一定能仍有缺失和疏漏。恳请读者予以指正,愿本书能对读者的科研和生产提供一些帮助,并起到抛砖引玉的作用。

编 者

目 录

前言

绪论	1
一、名词释义	1
二、体积冷成形（冷锻）工艺的起源	3
三、技术现状与趋势	7
四、技术优势与劣势	9
第一章 金属冷塑性变形基础知识简介	12
第一节 多晶体冷变形的特点和特点	12
一、多晶体结构特点	12
二、多晶体变形的特点	13
三、多晶体变形的特点	13
第二节 冷变形加工硬化	15
一、加工硬化现象及产生原因	15
二、加工硬化特征	15
第三节 硬化金属的软化过程	18
一、回复阶段	19
二、再结晶阶段	20
三、晶粒长大阶段	21
第四节 影响金属冷变形塑性的主要因素	22
一、金属组织的影响	22
二、化学成分的影响	23
三、力的影响	26
第五节 冷变形极限	31
一、碳钢冷锻破裂准则	31
二、合金钢冷锻破裂准则	39
第二章 对原材料的要求	45
第一节 原材料加工与性能	45

一、基本供料形式与加工过程	45
二、冷成形性能参数及其试验方法	47
第二节 原材料的质量控制	50
一、技术环节的控制	51
二、管理环节的控制	54
第三节 冷锻用原材料	55
一、常用冷锻钢铁金属	55
二、常用冷锻有色金属	64
第三章 毛坯的制备	68
第一节 毛坯的切取	68
一、切取毛坯的质量要求	68
二、精密下料方法简介	69
第二节 毛坯的预成形	80
一、预成形的目的	80
二、常见预成形坯实例	97
第三节 毛坯的软化处理	97
一、软化处理的目的	97
二、软化处理方法	98
三、常用冷成形材料的软化处理规范	100
第四章 表面处理与润滑	106
第一节 目的与方法	106
一、毛坯表面处理与润滑的目的	106
二、化学薄膜润滑法	107
第二节 润滑材料及其使用	111
一、液体润滑材料	111
二、固体润滑材料	114
第三节 实用润滑剂及其清除法	116
一、常用冷锻润滑剂	116
二、有色金属冷挤压润滑剂	117
三、温锻实用润滑剂	119
四、润滑剂的清除方法	120
第五章 成形设备	122
第一节 基本要求与吨位选择	122

一、对设备的基本要求	122
二、设备吨位的选择	124
第二节 常用冷锻设备及其特点	140
一、高速自动冷成形机	140
二、各式压力机	144
第三节 通用压力机冷锻的缺失与对策	158
一、通用压力机冷锻的缺失	158
二、通用压力机冷锻的对策	161
第六章 模具承载能力	165
第一节 承载条件及设计要求	165
一、冷锻模承载条件	165
二、冷锻模设计要求	166
第二节 模具结构及设计要点	168
一、典型结构介绍	168
二、构件特征及设计要点	178
第三节 预应力环组合结构参数设计	194
一、结构特征及设计程序	194
二、力参数的实用图算法	196
第四节 冷锻模具材料的选用	213
一、模具材料应具备的性能	213
二、常用材料及其选用	215
第七章 冷锻件的质量状态及后续处理	226
第一节 冷锻件的质量状态	226
一、冷锻件的常见缺陷	226
二、冷锻件的性能质量	226
三、冷锻件的尺寸精度	247
第二节 后续处理	254
一、常规热处理	254
二、切削处理	260
三、表面硬化处理	262
第八章 冷挤压工艺及其应用	267
第一节 冷挤压形式及特点	267
一、基本形式及材料流动特点	267

二、影响可挤性的因素	271
第二节 技术要点及应用实例	277
一、杯形件反挤技术要点	278
二、温挤压技术要点	281
三、有色金属挤压技术要点	286
四、冷挤模的失效形式及增寿途径	290
五、冷挤压工艺应用实例	293
第九章 冷模锻工艺及其应用	310
第一节 冷模锻及其金属流动特点	310
一、冷模锻工艺的意义	310
二、冷模锻金属流动特点	311
第二节 精密冷模锻及其金属流动	316
一、传统工艺的遗憾和新工艺的启示	316
二、分流减压精密闭式模锻	318
第三节 技术要点及应用实例	322
一、锻件模内镦挤成形过程的设计	322
二、直齿圆柱齿轮分流成形的应用	325
三、冷精锻技术在汽车零件生产中的应用	328
第十章 压印工艺及其应用	333
第一节 压印工艺过程及特点	333
一、工艺目的、过程和特点	333
二、材料的变形及可压印性	335
第二节 技术要点及应用实例	338
一、压印力与常用设备	338
二、模具典型结构	339
三、模具选材	343
四、应用实例	346
第十一章 冷摆辗工艺及其应用	351
第一节 摆辗过程及特点	351
一、摆辗过程及金属流动特点	351
二、工艺优缺点及适应性	355
第二节 技术要点及应用实例	359
一、摆辗机类型及冷、温摆辗机	359

二、摆辗工艺因素	363
三、常见工件缺陷	368
四、摆辗模具及其设计	368
五、摆辗工艺应用实例	373
第十二章 冷旋锻工艺及其应用	392
第一节 旋锻过程及特点	392
一、旋锻过程	392
二、旋锻过程中的材料流动	393
三、旋锻的工艺优势和劣势	394
四、影响材料可旋锻性能的因素	398
第二节 旋锻技术要点及应用	401
一、旋锻设备的分类及特征	401
二、设备容量估算	407
三、产品项目	409
四、旋锻模的结构要素	411
五、管形件的旋锻	415
六、在汽车工业中的应用实例	424
第十三章 复合冷成形工艺及其应用	432
第一节 复合冷成形的形成与形式	432
一、复合冷成形的形成	432
二、复合冷成形的基本形式	433
第二节 复合冷成形的应用实例	435
一、圆柱直齿轮精密锻造	435
二、汽车活塞销温-冷挤压成形	441
三、汽车发电机磁极热锻-冷精整成形	446
四、轴承环的冷冲-冷锻成形	448
附录	454
参考文献	458

绪 论

一、名词释意

“金属体积冷成形”是一个现代技术名词。它所指的是实体型金属制品的一类塑性成形工艺。有别于多见的金属体积热成形工艺，它是该金属材料在冷状态下成形为制品的一类工艺技术；涵概了多种多样的冷成形工艺，例如冷模锻、冷挤压、冷镦、压印、冷旋锻、冷摆辗……等，是此类工艺的一种总称。由于上世纪中期以来，业内人士在工作中（特别是在生产现场使用中）已习惯于将冷模锻、冷镦、冷挤压等采用往复动作的工具使体积金属变形的工艺泛称为“冷锻”，到今天，“冷锻”这个词已比较多见。而对于那些以回转成形（不论是工具旋转或是材料旋转）为特征的冷旋锻、冷摆辗、冷轧、冷打等工艺，则多采用工艺本身的名称。图 0-1 所示是“金属体积冷成形”一词所涵概的内容及术语。

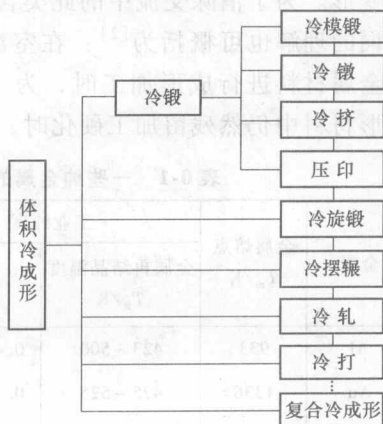


图 0-1 “金属体积冷成形”一词
所涵概的内容及术语

另外，由于在人类社会的历史进程中，新事物（当然也包括新工艺技术）

的出现与人们对其正确的认识和理解，必然会存在一些时间上的差异，因而也可能对技术定名作出前、后期不同的解读。“金属体积冷成形”一词中所表明的“冷状态成形”，在前期的理解只

是指原材料金属在成形之前不加热,所以也可以理解成“在室温状态下的成形工艺”。这种理解,特别是在生产现场中,也一直在习惯地延续着。然而,在金属塑性变形过程中伴生再结晶的现象被揭示,并对其实质和对成形过程与成形金属性能的影响有了科学的理论解释之后,“金属体积塑性冷成形”一词,才有了理论上的严格定义,即:金属在低于其再结晶温度以下变形的同时,有加工硬化现象伴生,而无回复及再结晶过程出现的成形工艺(反之,即为金属体积塑性热成形)。所以,此种成形过程的主要工艺特点就是变形抗力大,塑性差,往往需要增加中间退火工序。

表 0-1 列出了一些纯金属的再结晶温度数据。从表可见,习惯上视为冷变形的 Pb、Zn 室温变形,理论上应归结为热变形;习惯上视为热变形的 W 在 1000℃ 时的变形,理论上则应归结为冷变形。为了消除交流中的此类含混,对于“金属体积冷成形”一词的理解也可概括为^[2]:在室温下对可能残留加工硬化的实体金属材料进行成形加工时,为“狭义冷成形”;提高温度后,成形材料中仍然残留加工硬化时,为“广义冷成形”。

表 0-1 一些纯金属的再结晶温度数据

金属	金属熔点 T_m/K	工业纯度		高纯度	
		金属再结晶温度 T_R/K	T_R/T_m	T_R/K	T_R/T_m
Al	933	423 ~ 500	0.45 ~ 0.55	220 ~ 275	0.24 ~ 0.29
Au	1336	475 ~ 525	0.35 ~ 0.40	—	—
Ag	1234	475	0.38	—	—
Be	1553	950	0.60	—	—
Bi	554	—	—	245 ~ 265	0.51 ~ 0.52
Co	1765	800 ~ 855	0.40 ~ 0.46	—	—
Cu	1357	475 ~ 505	0.35 ~ 0.37	235	0.20
Cr	2148	1065	0.50	1010	0.46

(续)

金属	金属熔点 T_m/K	工业纯度		高纯度	
		金属再结晶温度 T_R/K	T_R/T_m	T_R/K	T_R/T_m
Fe	1808	678 ~ 725	0.38 ~ 0.40	575	0.31
Ni	1729	775 ~ 935	0.45 ~ 0.54	575	0.30
Mo	2898	1075 ~ 1175	0.37 ~ 0.41	—	—
Mg	924	375	0.40	250	0.27
Nb	2688	1325 ~ 1375	0.49 ~ 0.51	—	—
V	1973	1050	0.53	925 ~ 975	0.45 ~ 0.49
W	3653	1325 ~ 1375	0.36 ~ 0.38	—	—
Ti	1933	775	0.36 ~ 0.40	723	0.37
Ta	3123	1375	0.36 ~ 0.44	1175	0.37
Pb	600	260	0.42	165	0.28
Pt	2042	725	0.25	—	—
Sn	505	275 ~ 300	0.35 ~ 0.38	—	—
Zn	692	300 ~ 320	0.43 ~ 0.46	—	—
Zr	2133	725	0.34	445	0.21
U	1403	625 ~ 705	0.44 ~ 0.50	545	0.38

对于材料在室温以上、再结晶温度以下变形时恢复与加工硬化同时出现的情况,理论上称作“不完全冷变形”,而习惯上则称作“温成形”。与“完全冷变形”相比,其变形过程中的附加应力减少,从而降低了变形抗力,改善了塑性。与热变形相比,则避免了严重的氧化,有利于成形精度的提高。这种温成形工艺也可以理解为广义的冷成形工艺,在生产中有一定的应用,如温锻、温挤压、温摆辗……等,所以,本书内容中将有所涉及。另外,日常生产中对于某些结构钢锻件所采取的 600 ~ 800℃ 的成形加工,虽然在再结晶温度之上,也习惯地称作温成形。

二、体积冷成形(冷锻)工艺的起源

伴随人类文明生活的渐次发展,在数千年以前,古人就开创了冶金术,从此告别了石器时代,并随之相继出现了多种的铜加

工方法，生产出人们日常生活所必需的劳动工具、抗敌武器、日常用品和实用艺术装饰品等。约在公元前 3000 ~ 4000 年间，东方古国开始步入初期的金属铜器时代。到了公元前 2000 ~ 1000 年间，由于人类对从矿石中熔铁方法的逐步掌握，铁制器具和武器等的相继出现，进而步入铁器时代。所以，冶金术的形成与发展，在客观上也加快了人类社会的进步。

然而，一个无可辩驳的逻辑和事实是，在冶金术的发展进程中，也伴随着各式各样金属加工方法的诞生。通过研究者对许多出土文物的分析考证，完全可以证明热锻是人类社会最早出现和最重要的金属加工方法，是人类最原始用来加工天然铜的工艺方法。等到人类掌握从矿石中熔化铜的技术后，在不断的劳动实践中也渐渐认识到，锻制不仅仅是一种金属成形方法，而且是当时增加铜件耐用硬度惟一可靠的工艺手段。

另外，在人类社会的发展进程中，人们之间的经济交往是以交换的形式出现的。最初，以自己的劳动产品进行交换。随着社会发展与交流程度的扩展，逐渐形成了按物质价值进行的交换，即以等价的商品实现交换，例如兽皮、果实、牲口等曾被用作此类商品。随后，由于社会商业的发展和普及，进一步反映出建立通用等值商品的必要性，要求此类商品既要具有固定的价值，又要便于流通和转移，当时出现的金属，特别是金、银及其合金做成的锭，开始成为此类等值商品。由于此类商品的物资稀少、比重大，即在一定质量条件下的体积小，因而特别显现出它们作为流通工具的优越性。

硬币的出现，是在一定大小的金属锭坯上作出某些印记之后的事。它被设计成具有上、下表面和边缘的圆饼形状，在上、下表面上作出某些印记之外，还应赋予它以坚硬的外壳，整个外表被硬层所覆盖，以防止表层金属剥落，保持表层印记长久清晰可读。如此看来，要制造这种硬币，成批锻制（压印也是锻制的一种）就成为一种必然的结果。虽然并未找到更直接、更专门的考证资料，但不少国内、外学者也都认同古代硬币的出现与当

时金属压印作业的存在与辉煌是相关联的。并根据公元前一世纪凯尔特 (Kelt) 人用的硬币^[2], 推断出压印作业在公元前就是人类的一种工作。

虽然, 锻造工艺的起源很早, 但直到 13 世纪, 大多数的金属成形加工都还是手工操作^[3]。图 0-2 所示是公元 12 世纪画家在法国诺曼底一处教堂先头马塑雕上所描绘出的造币压印工形象。随着时间的推移, 人类压印造币技术也有了相应的发展。图 0-3 所示是 19 世纪初德国柏林造币厂, 用手动螺旋压



图 0-2 公元 12 世纪造币压印工形象

力机压印造币的情况。图 0-4 所示是 19 世纪中叶俄国彼德堡造币厂, 用杠杆式机械压力机压印造币的情况。

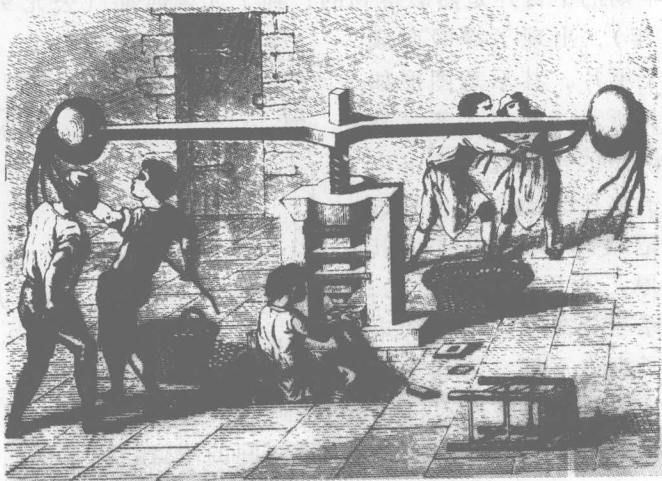


图 0-3 19 世纪初压印造币情况 (德)

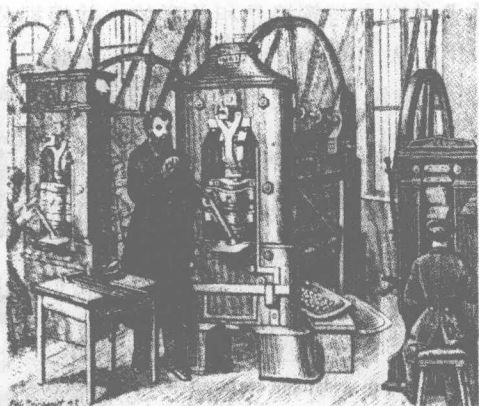


图 0-4 19 世纪中叶压印造币情况（俄）

考察我国古代的金属冷成形足迹，相关文献报道，殷墟出土的厚 0.01mm 的金箔、河北藁城商代遗址出土的金丝、河北怀来北辛堡出土的战国红铜槌胎薄铜缶都是冷成形（锻或拉）的产品，其历史比凯尔特人用的硬币更加久远。

我国古代士兵及将领所穿的甲冑是由低碳钢甲冑片拼组而成。早期的甲冑片是热锻得到的，到了北宋时期（公元 960 ~ 1127 年），出现了冷锻而成的瘰子甲片，其示意图形如图 0-5 所示。北宋名著《梦溪笔谈》的作者沈括在书中对瘰子甲片的锻制工艺有过一段记载：“凡锻甲之法其始甚厚，不用火，冷锻之，比元厚三分减二乃成。其末留筷子头许不锻，隐然如瘰子，欲以验未锻时厚薄，如浚河留土笋也，谓之瘰子甲”。由此，我国在公元 10 世纪至 11 世纪之间的冷锻技术水平已表达无遗。

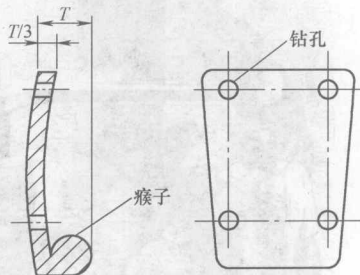


图 0-5 瘰子甲片示意图

三、技术现状与趋势

在金属体积冷成形技术的发展中,冷锻、冷拉、压印、冷镦是出现较早的几种。到了18世纪末,冷挤压工艺成了队伍中的新成员。随着设备、工艺润滑等配套技术的进步,冷挤压方法的完善和更新,使得它在以后的两次世界大战中都发挥了重要作用。

第二次世界大战结束后,日本在战争的废墟中开始工业化重建,上世纪50年代初从国外引进冷成形技术,并首先应用于自行车零件的冷锻。但当时的日本汽车工业与美、德相比有较大的差距。为了高质量、低成本赶超美、德,他们大力开发汽车零件的冷成形技术及其配套技术,如冷锻材料及其磷化皂化技术等。由于当时正处在工业化初期,行业间的相互配合良好,因而技术开发成绩突出,并在大批量生产中显示出强大的低成本竞争力,促使日本汽车工业在进入20世纪60年代后就取得了蓬勃的发展,而作为技术支撑的冷锻技术也得到了快速提高。一直到目前为止,日本的冷锻技术,无论在普及面或技术水平方面都可谓首屈一指。比较典型的零件如离合器接合齿圈、变速器同步齿圈、斜齿轮、差速器齿轮、万向节内星轮、十字轴、压缩器涡盘等都可以顺利冷锻成形。1998年时,一辆日产轿车上,除紧固件外,冷锻件的使用量已达50kg以上^[7]。

冷成形的零件,在汽车、轴承、机床、电机、家电、军工等诸多行业中都有应用,国外甚至在农机和建筑机械上也有应用。但就数量而言,仍以汽车上的应用为最多,据相关文献报道,美国的钢制冷成形件中约有80%用于汽车行业。

到目前为止,冷成形零件的品种和尺寸规格数量已难于统计。到20世纪80年代后期,国外最小的冷成形件重约2g,最大的已达35kg。冷成形材料的品种已由Al、Cu及其合金、低碳钢,逐步扩展到了中碳钢、低-中碳合金钢、不锈钢、高速钢等。冷成形件的表面粗糙度 R_a 为 $6 \sim 8 \mu\text{m}$ 。在现代工业的今天,展现在世人面前的已不乏全自动的高速冷成形生产线,最典型的如