

[苏] А.П.阿特罗申科、В.И.费多罗夫 著

薛永春 王惠泉 译

难变形材料 热模锻

国防工业出版社

难变形材料热模锻

〔苏〕 A. II. 阿特罗申科 著
B. И. 费多罗夫

薛永春 王惠泉 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书介绍了机械制造部门中广泛应用的合金钢、热稳定钢和耐酸不锈钢、热强钢和热强合金、钛合金、铝合金及其它难变形材料锻件的热模锻工艺；论述了各种模锻设备上新工艺的制定；开式模锻和闭式模锻用模具装置的计算和设计；形变热处理模锻方法的展望。在总结苏联和其它国家先进生产经验的基础上，对进一步发展热模锻精密工艺提出了建议，并叙述了模锻新工艺用于生产中所获得的技术和经济效果。

本书对锻压专业有较大的参考价值，可供从事锻压工作的科研和设计人员、工程技术人员以及高等院校有关专业的师生参考。

ГОРЯЧАЯ ШТАМПОВКА
ТРУДНОДЕФОРМИРУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ
А. П. Атрошенко В. И. Федоров
МАШИНОСТРОЕНИЕ, ЛЕНИНГРАДСКОЕ
ОТДЕЛЕНИЕ 1979

*

难 变 形 材 料 热 模 锻

〔苏〕А. П. Атрошенко В. И. Федоров 著
薛永春 王惠泉 译

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张10 219千字

1986年8月第一版 1986年8月第一次印刷 印数：0,001—2,300册

统一书号：15034·2990 定价：2.05元

译 者 的 话

本书介绍了合金钢、热稳定钢和耐酸不锈钢、热强钢和热强合金、钛合金、铝合金等难变形材料的热模锻工艺，这些材料在许多机械制造部门（特别是航空工业和汽轮机制造业）中使用日益广泛。

本书共分十章，分别论述了各种模锻工艺过程的制定、模具和模具装置的计算和设计、锻件缺陷的成因和修复等问题。同时对苏联和其它国家应用新技术、新工艺及由此而获得的经济效果也作了介绍。

本书由郝应其、薛永春校，最后由李成功作了技术审核。

由于译者水平不高，书中难免有错误和缺点，希望读者批评指正。

前 言

在现代的机械制造业中，特别在动力、化工、航空及造船工业中，用热稳定和耐酸不锈钢、热强和抗氧化钢、钛合金和铝合金以及具有特殊机械和物理性能的其他难变形材料，生产各种形状和尺寸的关键性零部件的情况日益增多。

这些材料的有效加工方法是热模锻。应用热模锻方法能够显著地改进这些材料制件的组织、性能和使用特性，从而大大地提高了生产的技术-经济指标。

用热模锻方法制造难变形钢和合金高质量精密锻件是很困难的，因为这些材料的工艺塑性低、变形抗力高、导热性低、模锻温度范围窄，所以比普通结构钢的塑性变形要难得多。对某些材料来说，在加热时还需要防止与其周围介质发生作用。由于不少的难变形材料具有强化的倾向以及其他许多原因，所以模锻需以较低的变形程度来进行。模锻这些材料所用的模具，就其形状和尺寸而言，都与模锻普通碳素钢锻件用的模具有所不同。

在选择热模锻方法及其温度、变形、速度和力的规范以及制定工艺过程和设计模具装置方面都遇到不少困难，由于这些困难在很大程度上推延了难变形钢和合金锻件热模锻方法的掌握和在机械制造业中广泛的应用。

这些材料昂贵、稀缺，并且用切削工具难以加工。因此，要根据它们的特殊要求来制定热模锻工艺过程，才能保证得到形状和尺寸接近成品零件的精密锻件。

近十年来发表了两部重要著作^[90,31]。这两部著作讨论了有色金属和合金的锻造、热模锻和挤压工艺问题。本书阐述了这两部著作所没有包括进去的一些问题。本书是在作者研究的成果和国内外学者研究的成果及先进生产经验的总结的基础上,论述了新工艺研制和在不同模锻设备上用各种不同模锻方法制造难变形材料锻件时所用的模具设计问题。

目 录

第一章 难变形材料的热力规范和热模锻特点	1
1.1 合金钢、热稳定钢、耐酸钢和不锈钢	1
1.2 热强钢和热强合金	5
1.3 钛合金	10
1.4 铝合金	17
1.5 根据材料塑性而制定的热模锻方法分类	21
第二章 模锻前坯料的准备和加热	26
2.1 将原材料切割成模锻用定尺坯料	26
2.2 坯料表面的准备	29
2.3 模锻前坯料的加热	33
2.4 热模锻用工艺润滑剂	40
第三章 锤上模锻	44
3.1 开式和闭式模锻	44
3.2 锤上模锻难变形钢和合金的特点	46
3.3 热模锻件的设计	50
3.4 锤用锻模和模锻用的模腔	65
3.5 原始坯料的体积、重量和尺寸的计算	72
3.6 耐酸不锈钢及合金锻件的模锻	76
3.7 热强合金锻件的模锻	79
3.8 钛合金锻件的模锻	84
3.9 模锻锤落下部分重量的确定	95
第四章 曲柄压力机和水压机模锻	97
4.1 曲柄压力机模锻难变形钢和合金的特点	97
4.2 热模锻曲柄压力机模锻工艺的制定与锻模结构	100

4.3	热模锻曲柄压力机模锻钢和合金锻件的工艺	107
4.4	水压机上大型轻合金锻件的模锻	111
4.5	生产精密模锻件用锻模的设计特点	117
4.6	压力机压力的确定	130
4.7	切毛边和切边模的结构	134
4.8	平锻机上模锻	143
第五章	压力机挤压模锻	151
5.1	挤压模锻工艺的优点	151
5.2	压力机挤锻件和模具的设计特点	152
5.3	锻件的正挤锻	167
5.4	锻件的反挤锻	176
5.5	用可分凹模挤锻锻件	181
5.6	挤压模锻的力参数	197
5.7	挤锻时金属流动的特征和变形的不均匀性	207
5.8	挤锻件的质量、精度、组织和机械性能	212
第六章	高速锤模锻	216
6.1	高速模锻工艺的应用范围和工艺可能性	216
6.2	高速锤锻件的分类	221
6.3	高速模锻工艺的制定	227
6.4	模具的设计和制造特点	233
6.5	锻件在开式和闭式模内的模锻	242
6.6	锻件的质量、精度、组织和机械性能	246
第七章	锻件的模锻与形变热处理	249
7.1	钢和合金的形变热处理方法	249
7.2	锻件形变热处理的温度和变形规范	252
7.3	形变热处理模锻的力学和速度参数	258
7.4	锻件形变热处理的新工艺	261
第八章	模具的制造和使用	264
8.1	模具材料	264

VIII

8.2	模具的制造	272
8.3	模具的使用和寿命	280
8.4	模具的磨损和修理	287
第九章	锻件的主要缺陷及其排除方法	291
9.1	原始坯料带来的锻件缺陷	291
9.2	有毛边模锻件的主要缺陷	295
9.3	挤锻件的主要缺陷	296
9.4	高速模锻件的主要缺陷	301
第十章	应用先进模锻方法的经济效果	303
10.1	应用热挤锻的经济效果	303
10.2	应用高速模锻的经济效果	305
10.3	应用形变热处理的经济效果	305
参考文献		308

第一章 难变形材料的热力 规范和热模锻特点

1.1 合金钢、热稳定钢、耐酸钢和不锈钢

随着国民经济各部门(尤其是化工、航空和国防等部门)的发展,具有特殊物理-化学性能的难变形高强度钢和合金的应用愈来愈多。用这样的钢和合金制造高质量锻件是很困难的,因为这些材料比起普通碳素结构钢来说,其塑性变形要困难得多。这是由这些材料的低塑性、高变形抗力、低导热性和较狭窄的模锻温度范围所决定的。因此,模锻难变形材料锻件时最重要的是正确规定相应的模锻温度范围,即始锻温度和终锻温度。确定模锻温度范围的主要因素是钢的化学成分和性能。难变形的合金钢、热稳定钢、耐酸钢和不锈钢按照模锻加热规范可分为两组:Ⅰ组是合金结构钢;Ⅱ组是热稳定钢、耐酸钢和不锈钢。所研究的两组钢的模锻温度范围均列入表 1-1 中。钢的最宽锻造温度范围随着合金化程度的增加而变窄,如碳素钢的温度范围为 600°C ,Ⅰ组钢的为 330°C ,而Ⅱ组钢的为 260°C 。

为了减少金属的氧化和脱碳,有时需把模锻温度范围的上限降低。在采用快速加热规范时,可以提高模锻温度范围的上限,但是在所有情况下都应以不产生裂纹的变形程度来模锻金属。有时由于所用设备的功率不足需要提高模锻温度,但必须注意,偏离最佳加热规范只有在不影响锻件质量的前提下才被允许。钢的变形不宜在低于表 1-1 中所规定的终锻

温度下进行，因为钢在此种情况下具有较高的变形抗力，模锻过程很难进行，而且对Ⅱ组钢的某些牌号来说，在较低的温度下模锻会产生裂纹。

坯料加热时间要根据加热坯料的直径（厚度）来确定。在炉内的保温时间从坯料金属达到模锻温度时算起，对Ⅰ组钢来说，坯料直径（厚度）的每4毫米为1分钟，而对Ⅱ组钢来说，材料直径的每3毫米为1分钟。直径或正方形每边长在250毫米以下的坯料在炉内于模锻温度下保温的最长时间应不超过1~2.5小时。

表1-1 合金钢的模锻温度范围^{〔84,85,88〕}

钢 组	钢 牌 号	模 锻 温 度 (°C)		模 锻 后 冷 却
		始 锻	终 锻	
I	20X, 40X, 50X, 38XA, 18XГГ, 12X2H4A, 18X2H2BA, 12XH3A, 40XH2MA, 20XH3A, 30X3BA, 38XMЮA, 30XГCA, 40XΦA, 50XΦA, 40XH2CBA, 25XГT, 12X2HBΦA, 40XH, 15XMA, 40XC, 45XH, 40XГM, 20XГHM等	1180	850	在空气中
II	14X17H2 (ЭИ268), 13X11H2B2 МФ (ЭИ961), 20X3MBΦ (ЭИ415), 12X21H5T (ЭИ811), 12X17Г9АН4 (ЭИ878), 12X18H9T, 07X16H6, 45X14H14B2M (ЭИ69), 12X13, 20X13, 30X13, 40X13, 12X17, 95X18, 12X25H16Г7AP (ЭИ835), 08X18H12Б (ЭИ402), ЭИ962, ЭИ684, ЭИ736等	1160	900	在空气中, 但对14X17H2, 12X13, 20X13, 30X13, 40X13, 12X17, 95X18牌号钢则在包装箱、保温箱、热砂子和其它容器里(缓冷)

注：括号里是钢牌号的旧代表符号。

除了变形温度范围外，获得优质锻件的其它重要的模锻参数是变形程度和应变速率。锻件的模锻是在工作工具具有各种不同直线运动速度的锻压设备上进行的。模锻时钢的变形速度 $v_{\text{неф}}$ (米/秒) 如下：

蒸汽空气模锻锤	6 ~ 8
对击锤	3 ~ 4
高速锤	20 ~ 30
螺旋压力机	0.6 ~ 2
热模锻曲柄压力机	0.5 ~ 0.8
摩擦压力机	3 ~ 4
模锻水压机	0.002 ~ 0.04
平锻机	0.5 ~ 0.8

容许变形程度是根据工艺塑性储量而定的。在表 1-1 中规定的模锻温度下，所有牌号钢，其塑性虽不及碳素结构钢的塑性高（碳素钢在锻压设备上锻造时，一次行程就可使其

表1-2 各种钢的容许变形程度 (%) [88, 88]

钢组	模 锻 设 备 $v_{\text{неф}} < 9$ 米/秒	高 速 锤 $v_{\text{неф}} = 20 \sim 30$ 米/秒	热模锻曲柄压力机， 摩擦压力机，螺旋压力机
	微 粗		挤 锻
I	80	90	90
II	60	90	90

变形程度 ε 达 90%)，但就本身来说，它们却有足够高的工艺塑性储量。用各种不同变形速度 $v_{\text{деф}}$ (即材料在这些变形速度下不会遭到破坏) 在各种模锻设备上锻粗和挤锻上述两组钢所得的容许变形程度列入表 1-2 中。

表 1-2 所示的各种钢的容许变形程度是按最不利的体积应力应变状态图确定的，即两向是主拉应力和主拉变形，而第三向是主压应力和主压变形。当钢处在其它体积应力应变状态图下，其塑性将增加，在更大的容许变形程度下使材料变形而不产生破坏。

从表 1-2 中可以看出，高速模锻时的容许变形程度要高于变形速度为 9 米/秒以下的设备上模锻时的容许变形程度。高速锤上模锻能提高塑性的原因是：改进了模锻温度的规范 (变形时间很短，仅为千分之几秒)；减少了氧化程度和变形金属传给锻模的热量；在坯料变形时由于内摩擦散发出的热量而提高了坯料的温度。I 组钢和 II 组钢的临界变形程度为 5~15%。为了防止某些牌号钢 (见表 1-1) 锻件经模锻后在冷却时产生裂纹，必须规定缓慢的冷却。冷却可在炉内或在有砌衬的盒式保温器、金属箱或其他装置中进行。

为了计算和正确选定锻压设备的功率，不仅要知道模锻锻件的主要参数和设备的情况，而且还要了解模锻温度时屈服强度 σ_s 的值。在实际计算力时可取模锻温度下屈服强度 σ_s 的值等于抗拉强度 σ_b [72, 78, 88]，不同温度时各种牌号钢的抗拉强度列入表 1-3 中。I 组钢终锻温度的抗拉强度 $\sigma_b = 3 \sim 7$ 公斤力/毫米²●，II 组钢终锻温度的抗拉强度 $\sigma_b = 10 \sim 20$ 公斤力/毫米²●。

● 压力单位换算：1 公斤力/毫米² = 9.80665 牛/毫米²。下同。

表1-3 不同温度时各种牌号钢的抗拉强度 σ 。
(公斤力/毫米²) [84, 85, 88]

钢组	钢 牌 号	20°C	800°C	9	1000°C
I	38XA	67.5	7.9	4.8	3.2
	12XH3A	64.0	8.1	5.2	4.0
	12X2H4A	50.0	7.5	3.6	2.4
	30X3BA	—	8.0	6.0	4.2
	40XH2MA	—	7.5	3~4	2.0
	30XГСА	70.0	7.9	4~5	3.6
	18X2H4BA	122.0	11.3	5~7	4.5
	38XMЮА	—	8.0	6.6	4.6
	60C2A	102.1	8.1	5.7	3.4
	18XГТ	—	8.0	6~7	4.8
II	14X17H2 (ЭИ268)	80.0	14.0	8.0	6.7
	12X18H9T (X18H9T)	55.4	18.0	10~14	7~10
	12X13 (1×13)	45.8	7.5	6~7	5.2
	20X13 (2×13)	50.0	7.6	7.0	6.0
	12X21H5T (ЭИ811)	75.0	14.5	7.7	6.2
	12X17Г9АН4 (ЭИ878)	78.0	25~28	23.8	11.7
	12X25H16Г7AP (ЭИ835)	80~87	29~36	21.8	10.6
	95X18 (9×18, ЭИ229)	77.0	11.8	10.2	8.5
	08X18H12Б (ЭИ102)	61.2	23~25	18.0	8.2
	07X16H6 (X16H6, ЭП288)	90~110	18.5	10.2	6.0
	13X11H2B2MΦ (ЭИ961)	82.0	20.6	14.0	6.8
	45X14H14B2M (ЭИ69)	72.0	23.0	14.6	7.2

注：1. 所列钢的机械性能为材料供应状态下的；

2. 括弧里是材料牌号的旧代表符号；

3. 机械性能试样是从棒材纵向上切取的。

1.2 热强钢和热强合金

制造现代机器受力最大的零件（涡轮盘、压气机和涡轮叶片、紧固件、承力环和涡轮泵等零件）的热强钢和热强合

金的特点是：其变形规范条件根本不同于合金钢，更不同于普通碳素结构钢。这些材料的特点是变形抗力高、热加工温度下工艺塑性低、变形温度范围窄、导热性低，要求特殊的加热条件。

热强钢以及镍基和铁基热强合金都属于复杂合金化材料，这些材料的合金化程度决定着材料的热强性和压力加工的工艺塑性。热强钢和合金的加工规范对组织、晶粒度和机械性能均有很大的影响。因此在选择热强钢和合金锻件的模锻规范时，不仅要考虑锻件能否制成所要求的形状和尺寸，还要考虑所制零件能否得到所需的性能。由于热强钢和合金的导热性低，把它们加热到 $800\sim 900^{\circ}\text{C}$ 比起加热普通结构钢要缓慢得多。从 800°C 开始，加热可以加快。加热热强钢和合金坯料的总时间要比加热同一截面结构钢的总时间多 $1\sim 2$ 倍。加热到模锻温度的坯料在炉内的保温总时间应不超过2小时。由于热强合金和大多数热强钢的导热性低和模锻温度范围窄，不允许对它们进行快速感应加热，因为再结晶的开始温度和结束温度随着加热速度的增加而升高。热强钢和合金的模锻温度范围列入表1-4中。

从所列的表中可以看到，热强钢和合金的模锻温度范围比合金钢的要窄（见表1-1）。热强钢的模锻温度范围大致为 200°C ，而热强合金的约为 150°C 。热强钢和合金的始锻温度比其淬火温度要高出 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ 。在这种情况下，合金为单相状态，能改善锻件的质量。

终锻温度时热强钢和合金的抗拉强度比碳素钢、合金不锈钢和耐酸钢的抗拉强度高出 $1\sim 4$ 倍（见表1-3和表1-7）。低于 1000°C 时热强合金的抗拉强度急剧增加。这是因为在降低温度时再结晶的速度低于应变速率，并伴随着压力加工而

表1-4 热强钢和合金的模锻温度范围^[88]

材 料	材 料 牌 号	模锻温度 (°C)	
		始 锻	终 锻
热强钢	15X18H12C4TЮ (ЭИ654)	1160	950
	37X12H8Г8МФБ (ЭИ481)	1160	980
	10X11H20T3P (ЭИ696)	1110	900
	10X11H23T3MP (ЭП33)	1110	900
	40X15H7Г7Ф2МС (ЭИ388)	1130	980
	ХН35ВТЮ (ЭИ787)	1100	900
	ЭП105 (ЭП203)	1100	900
	ЭИ395	1100	960
	X15H30BMT (ЭП437)	1120	900
热强合金	ХН78Т (ЭИ435)	1180	900
	ХН77ТЮР (ЭИ437Б)	1150	980
	ХН60ВТ (ЭИ868)	1180	1050
	ХН70МВТЮБ (ЭИ598)	1180	1050
	ХН77ТЮ (ЭИ437А)	1150	980
	ХН77ТЮРУ (ЭИ437БУ)	1150	980
	ХН70МВТЮ (ЭИ617)	1190	1060
	ХН70ВМТЮФ (ЭИ826)	1170	1060
	ХН62МВКЮ (ЭИ867)	1190	1060
	ХН56ВМКЮ (ЭП109)	1190	1070
	ХН56ВМТЮ (ЭП199)	1180	1000
	ХН55ВМТФКЮ (ЭИ929)	1180	1060
	ЖС6-КП	1120	1050
	ХН70ВМЮТ (ЭИ765)	1180	1050
	ХН65ВМТЮ (ЭИ893)	1180	1050

注：模锻后热强钢和合金在空气中冷却。

冷作硬化。低于 950°C 时模锻热强合金所产生的强烈硬化促使生成粗大的不均匀晶粒，因此在下一步热处理加热时会发生区域再结晶而生成大晶粒，这种再结晶能降低塑性、热强性和疲劳强度。

使用冷模或预热不足的模具、过多和不均匀的润滑以及用水冷却锻模表面都会引起局部冷作硬化、局部的高应力和锻件在随后的热处理中产生不均匀晶粒。这一切都要求在模锻开始之前正确制定工艺、准备好工具装置和工作位置。

为了防止热坯料在模锻过程中冷却，必须把坯料从炉内迅速移到模锻设备上，而坯料的变形必须在预热的锻模内进行。如果锻件在锤上模锻，则不宜使变形区的金属过热，为此，必须以轻的锤击来变形。如果在制造锻件时，其容许变形程度太小，用一次加热和锻压设备一次行程不能使坯料成形，则允许用中间预热或加热到始锻温度和锻压设备二至三次行程把坯料补锻成锻件。用慢速变形法模锻难变形热强钢和合金时，扩散过程进行得最充分，并能保证再结晶的完成和金属的软化。用较大的变形速度（20~30米/秒）进行模锻时，热强钢的塑性（容许变形程度）有所增加，而热强合金的塑性则停留在原来的水平上（见表1-5）。在高速设备上模锻钢之所以能提高塑性的原因，是坯料在变形过程中提高了温度。

表1-5 热强钢和合金的容许变形程度（%）^(38,88)

材 料	模 锻 设 备 $v_{\text{псф}} < 9 \text{ 米/秒}$	高 速 锤 $v_{\text{псф}} = 20 \sim 30 \text{ 米/秒}$	热模锻曲柄压力机、 摩擦压力机、 螺旋压力机
	微	粗	挤 锻
热强钢	60	80~85	90
热强合金	40~50	40~50	80~90

为了提高金属塑性、锻件质量和制造效率，建议用热挤锻法或带反压力的闭式模锻热强钢和合金锻件。在这种情