

李红英 ■ 主编

JINSHU SUXING JIAGONG
MUJU SHEJI YU ZHIZAO

金属塑性加工 模具设计与制造

内容丰富 ◎ 讲解简明 ◎ 易懂易学

全面介绍 模具材料及其强韧化处理、挤压模具设计、锻造模具设计、拉伸模具设计、冲压模具设计、模具制造等内容

内容涵盖 应用于塑性成形的几种主要模具的选材及设计制造



化学工业出版社

李红英 ■ 主编

金属塑性加工 模具设计与制造



化学工业出版社

· 北京 ·

本书全面介绍了模具材料及其强韧化处理、挤压模具设计、锻造模具设计、拉伸模具设计、冲压模具设计、模具制造等内容,涵盖了应用于塑性成形的几种主要模具的选材及设计制造。

本书是作者多年教学与科研工作的总结,内容丰富,讲解简明,易懂易学,可作为模具设计和制造技术人员的参考书,也可作为材料科学与工程、材料成形及控制、模具设计与制造、机械设计制造等专业的本科教材。

图书在版编目(CIP)数据

金属塑性加工模具设计与制造/李红英主编. —北京:
化学工业出版社, 2009. 7
ISBN 978-7-122-05734-1

I. 金… II. 李… III. ①金属压力加工-模具-设计
②金属压力加工-塑性变形-模具-制造 IV. TG3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 081074 号

责任编辑: 丁尚林
责任校对: 凌亚男

装帧设计: 关 飞

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: 三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 19 字数 512 千字 2009 年 8 月北京第 1 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: 39.00 元

版权所有 违者必究

前言

模具广泛应用于航空航天、汽车、火车、电机、电器、仪表、机械、家电等产业领域。随着科学技术和工业生产的大发展,模具对大批量生产的产品质量和效益起决定性作用,影响制造业的国际竞争力。与切削加工相比,塑性成形具有材料利用率高、能耗低、产品性能好、生产效率高和成本低等特点,采用模具生产毛坯或成品零件是材料成形的重要方式之一。为了使所设计的产品易于制造,收到高效率、低成本的效果,模具设计人员必须熟悉材料的成形原理和过程,了解模具的制造和应用。

我国模具工业已经有了相当的规模,可以利用现代制造技术生产一些大型、精密、复杂、长寿命的模具,利用模具进行高质量、高效率、低成本、大规模的工业生产。为了适应工业生产对模具的需求,在模具制造过程中采用了许多新工艺和先进加工设备,不仅改善了模具的加工质量,也提高了模具制造的机械化、自动化程度。从整体情况来看,我国已经步入模具工业大国之列,但是距模具强国还有相当差距。当前,国内模具企业大多集中在中低档领域,技术水平和附加值偏低,每年还要从境外进口 20 多亿美元的模具,主要是国内尚不能生产的中高档模具。中高档模具的自配率只占 50% 左右,模具标准件使用覆盖率只有 50% 左右,模具商品化率也只有 50% 多。对于模具行业来讲,提升技术含量是未来的必然选择,模具设计与制造的整体水平必须大幅提高。

本书共分 6 章,包括模具材料及其强韧化处理、挤压模具设计、锻造模具设计、拉伸模具设计、冲压模具设计、模具制造,涵盖了应用于塑性成形的几种主要模具的选材及设计制造。第 1 章主要介绍了模具材料的性能及选用原则、冷作模具材料、热作模具材料、热处理及表面强化处理。第 2 章主要介绍了挤压模具的设计原则以及棒材、管材、型材挤压模具设计。第 3 章主要介绍了锤上锻模设计、螺旋压力机用锻模设计、热模锻曲柄压力机用锻模设计、平锻机用锻模设计。第 4 章主要介绍了拉伸工艺及管材、棒材、线材、型材拉伸模具的设计。第 5 章主要介绍了冲裁模具设计、弯曲模具设计、拉深模具设计、成形模具设计、复合模具设计、级进模具设计。第 6 章主要介绍了模具的机械加工和特种加工、挤压模制造、锻模制造、拉伸模制造、冲模制造、模具的修理、先进制造技术。

本书可作为模具设计和制造技术人员的参考书,也可作为材料科学与工程、材料成形及控制、模具设计与制造、机械设计制造及自动化等专业学生的参考书。

李红英编写了第 1 章和第 2 章,刘洋编写了第 3 章的第 1、2 节和第 5 章的第 2、4 节,赵延阔编写了第 3 章的第 3 节,王法云编写了第 3 章的第 4、5 节和第 4 章以及第 5 章的第 1、3、5、6、7 节,孙远编写了第 6 章。此外,唐宜、王晓峰、邓云喆、康巍、曾翠婷、宾杰、魏冬冬、张尚青、欧玲、曾再得、张浩伟也参与了部分工作。全书由李红英主编。

由于模具种类繁多,发展日新月异,编者水平有限,在章节安排和内容取舍以及文字编排中难免有不妥之处,敬请专家和读者不吝赐教。

编者
于中南大学

目 录

第 1 章 模具材料及其强韧化处理/1

1.1 模具材料概述	1
1.2 模具材料的性能	13
1.3 模具材料的选择原则	16
1.4 冷作模具材料	18
1.5 热作模具材料	28
1.6 热处理	34
1.7 表面强化处理	45
参考文献	52

第 2 章 挤压模具设计/53

2.1 概述	53
2.2 挤压模具的设计原则	56
2.3 棒材挤压模具设计	63
2.4 管材挤压模具设计	65
2.5 实心型材挤压模具设计	66
2.6 空心型材挤压模具设计	75
2.7 挤压模具的发展	80
参考文献	81

第 3 章 锻造模具设计/82

3.1 概述	82
3.2 锤上模锻的设计	83
3.3 螺旋压力机用模锻设计	110
3.4 热模锻曲柄压力机用锻模设计	114
3.5 平锻机用锻模设计	120
参考文献	133

第 4 章 拉伸模具设计/134

4.1 概述	134
4.2 拉伸工艺	141
4.3 管材拉伸模具的设计	146
4.4 棒、线材拉伸模具的设计	154
4.5 型材拉伸模具的设计	157
参考文献	159

第 5 章 冲压模具设计/160

5.1 概述	160
--------------	-----

5.2 冲裁模具设计..... 161

5.3 弯曲模具设计..... 181

5.4 拉深模具设计..... 193

5.5 成形模具设计..... 209

5.6 复合模具设计..... 224

5.7 级进模具设计..... 230

参考文献 243

第 6 章 模具制造/244

6.1 概述 244

6.2 模具的机械加工..... 248

6.3 模具的特种加工..... 252

6.4 挤压模制造..... 265

6.5 锻模制造..... 267

6.6 拉伸模制造..... 269

6.7 冲模制造..... 274

6.8 模具的修理..... 281

6.9 先进制造技术..... 288

参考文献 298

第 1 章

模具材料及其强韧化处理

续表

类型	钢号(代号)	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	其他	A_{c1}	A_{c3} ($A_{c_{cm}}$)	M_s
										A_{r1}	A_{r3} ($A_{r_{cm}}$)	M_f
优质碳素工具钢	T10A	0.95~ 1.04	≤ 0.35	≤ 0.40						730	(800)	210
										700		-60
	T12A	1.15~ 1.24	≤ 0.35	≤ 0.40						730	(820)	170
										700		-60
高碳合金钢	GCr15	0.95~ 1.05	0.15~ 0.35	0.20~ 0.40	1.30~ 1.65					745	(900)	240
										700		-25
	Cr2(L3)	0.95~ 1.10	≤ 0.40	≤ 0.40	1.30~ 1.65					745	(900)	240
										700		-25
	CrWMn(O7)	0.90~ 1.05	≤ 0.40	0.80~ 1.10	0.90~ 1.20	1.20~ 1.60				750	(940)	260
										710		-50
	9CrWMn(O1)	0.85~ 0.95	≤ 0.40	0.90~ 1.20	0.50~ 0.80	0.50~ 0.80				750	(900)	205
										700		
	9SiCr	0.85~ 0.95	1.20~ 1.60	0.30~ 0.60	0.95~ 1.25					770	(870)	160
										730		-30
	9Mn2V (O2)	0.85~ 0.95	≤ 0.40	1.70~ 2.00				0.10~ 0.25		730	(760)	125
										655	690	
	6CrNiMnSiMoV (GD)	0.64~ 0.74	0.50~ 0.90	0.70~ 1.00	1.00~ 1.30		0.30~ 0.60	0.10~ 0.25	0.70~ 1.00Ni	704~740		172
										580~610		
	7CrSiMnMoV (CH-1)	0.65~ 0.75	0.85~ 1.15	0.65~ 1.05	0.90~ 1.20		0.20~ 0.50	0.15~ 0.30		776	(834)	211
										694	(732)	
	4CrW2Si	0.35~ 0.45	0.80~ 1.10	≤ 0.40	1.00~ 1.30	2.00~ 2.50				780	840	315~ 355
	5CrW2Si	0.45~ 0.55	0.50~ 0.80	≤ 0.40	1.00~ 1.30	2.00~ 2.50				775	860	295
	6CrW2Si	0.55~ 0.65	0.50~ 0.80	≤ 0.40	1.00~ 1.30	2.20~ 2.70				775	810	280
	60Si2Mn	0.56~ 0.64	1.60~ 2.00	0.60~ 0.90						755	(810)	250
										700		
高碳高合金钢	Cr12 (D3)	2.00~ 2.30	≤ 0.40	≤ 0.40	11.5~ 13.0					810	(835)	180
										755	770	-55
	Cr12MoV	1.45~ 1.70	≤ 0.40	≤ 0.35	11.0~ 12.50		0.40~ 0.60	0.15~ 0.30		830	(855)	230
										760	785	0
	Cr12Mo1V1 (D2)	1.40~ 1.60	0.10~ 0.60	0.20~ 0.60	11.0~ 13.0		0.70~ 1.20	≤ 1.10	≤ 1.00 Co	810	(875)	190
										695	(750)	
	Cr6WV	1.00~ 1.15	≤ 0.40	≤ 0.40	5.50~ 7.00	1.10~ 1.50		0.50~ 0.70		815	(845)	150
										625	(775)	-100
	Cr5Mo1V (A2)	0.95~ 1.05	≤ 0.50	≤ 1.00	4.75~ 5.50		0.90~ 1.40	0.15~ 0.50		795		168
	Cr4W2MoV (120)	1.12~ 1.25	0.40~ 0.70	≤ 0.40	3.50~ 4.00	1.90~ 2.60	0.80~ 1.20	0.80~ 1.10		795	(900)	142
										760		
	8Cr2MnWMoVS (8Cr2S)	0.75~ 0.85	≤ 0.40	1.30~ 1.70	2.30~ 2.60	0.70~ 1.10	0.50~ 0.80	0.10~ 0.25	0.08~ 0.15S	770	(820)	220
										660	(710)	
	Cr2Mn2SiWMoV	0.95~ 1.05	0.60~ 0.90	1.80~ 2.30	2.30~ 2.60	0.70~ 1.10	0.50~ 0.80	0.10~ 0.25		770		190
										640		

续表

类型	钢号(代号)	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	其他	A_{c_1}	A_{c_3} ($A_{c_{cm}}$)	M_s
										A_{r_1}	A_{r_3} ($A_{r_{cm}}$)	M_f
高速工具钢	6W6Mo5Cr4V (6W6)	0.55~ 0.65	≤0.40	≤0.60	3.70~ 4.30	6.00~ 7.00	4.50~ 5.50	0.70~ 1.10		820 730		240
	W6Mo5Cr4V2 (M2)	0.80~ 0.90	0.20~ 0.45	0.15~ 0.40	3.80~ 4.40	5.50~ 6.75	4.50~ 5.50	1.75~ 2.20		850~885 770		140
	W12Mo3Cr4V3N	1.15~ 1.25	≤0.40	≤0.40	3.50~ 4.10	11.0~ 12.50	2.70~ 3.70	2.50~ 3.10	0.04~ 0.10N	876~915		
	W18Cr4V (W18)	0.70~ 0.80			3.80~ 4.40	17.5~ 19.0	≤0.30	1.00~ 1.40		870 760	(1330)	200
	W9Mo3Cr4V (W9)	0.78~ 0.85	0.20~ 0.40	0.20~ 0.40	3.80~ 4.40	8.50~ 9.50	2.70~ 3.30	1.30~ 1.70				165
其他	9Cr6W3Mo2V2 (GM)	0.86~ 0.94			5.60~ 6.40	2.80~ 3.20	2.00~ 2.50	1.70~ 2.20		795	(820)	220
	Cr8MoWV3Si (ER5)	0.95~ 1.10	0.70~ 1.20	0.30~ 0.60	7.0~ 8.0	0.80~ 1.20	1.40~ 1.80	2.20~ 2.70		858	907	215
	7Cr7Mo2V2Si (LD)	0.70~ 0.80	0.70~ 1.20	≤0.50	6.50~ 7.00		2.00~ 2.50	1.70~ 2.20		859 720	910 806	105

表 1-1 中所列的高碳高合金钢、高速工具钢均为高耐磨冷作模具钢, 9Cr6W3Mo2V2、Cr8MoWV3Si、7Cr7Mo2V2Si 为高强韧高耐磨钢。Cr2、CrWMn、9CrWMn、9SiCr、9Mn2V 为油淬冷作模具钢, 8Cr2MnWMoVS、Cr6WV、Cr5Mo1V、Cr4W2MoV 为空淬冷作模具钢, 7CrSiMnMoV 为火焰淬火冷作模具钢。

1.1.1.2 常用热作模具钢

常用热作模具材料为添加 Cr、W、Mo、V 等合金元素的合金模具钢, 碳含量一般在 0.30%~0.60% (质量, 下同) 范围内, 个别钢种碳含量为 0.6%~0.7%, 低碳含量可保证足够的韧性, 合金元素的作用是强化铁素体和增加淬透性、防止回火脆性等。加入相当数量的铬、钨、硅, 可提高热作模具钢的相变温度, 使模具在交替受热与冷却过程中不致发生相变而产生较大的体积变化, 从而提高其抗热疲劳性。钨、钼、钒等在回火时以碳化物形式析出而产生二次硬化, 使热作模具钢在较高温度下仍保持相当高的硬度。表 1-2 所示为常用热作模具钢的化学成分及临界点。

表 1-2 常用热作模具钢的化学成分 (% , 质量) 及临界点 (°C)

类型	钢号(代号)	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	其他	A_{c_1}	A_{c_3} ($A_{c_{cm}}$)	M_s
										A_{r_1}	A_{r_3} ($A_{r_{cm}}$)	M_f
优质碳素工具钢	T7A	0.65~	≤0.35	≤0.40						730	770	240
		0.74								700		-40
	T8A	0.75~	≤0.35	≤0.40						730	(740)	230
		0.84								700		-55
	T10A	0.95~	≤0.35	≤0.40						730	(800)	210
		1.04								700		-60
	T12A	1.15~	≤0.35	≤0.40						730	(820)	170
		1.24								700		-60

续表

类型	钢号(代号)	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	其他	A_{c1}	A_{c3} ($A_{c_{cm}}$)	M_s
										A_{r1}	A_{r3} ($A_{r_{cm}}$)	M_f
高碳合金钢	GCr15	0.95~1.05	0.15~0.35	0.20~0.40	1.30~1.65					745 700	(900)	240 -25
	Cr2(L3)	0.95~1.10	≤0.40	≤0.40	1.30~1.65					745 700	(900)	240 -25
	CrWMn(O7)	0.90~1.05	≤0.40	0.80~1.10	0.90~1.20	1.20~1.60				750 710	(940)	260 -50
	9CrWMn(01)	0.85~0.95	≤0.40	0.90~1.20	0.50~0.80	0.50~0.80				750 700	(900)	205
	9SiCr	0.85~0.95	1.20~1.60	0.30~0.60	0.95~1.25					770 730	(870)	160 -30
	9Mn2V(02)	0.85~0.95	≤0.40	1.70~2.00				0.10~0.25		730 655	(760) 690	125
	6CrNiMnSiMoV(GD)	0.64~0.74	0.50~0.90	0.70~1.00	1.00~1.30		0.30~0.60	0.10~0.25	0.70~1.0Ni	704~740 580~610		172
	7CrSiMnMoV(CH-1)	0.65~0.75	0.85~1.15	0.65~1.05	0.90~1.20		0.20~0.50	0.15~0.30		776 694	(834) (732)	211
	4CrW2Si	0.35~0.45	0.80~1.10	≤0.40	1.00~1.30	2.00~2.50				780	840	315~355
	5CrW2Si	0.45~0.55	0.50~0.80	≤0.40	1.00~1.30	2.00~2.50				775	860	295
	6CrW2Si	0.55~0.65	0.50~0.80	≤0.40	1.00~1.30	2.20~2.70				775	810	280
	60Si2Mn	0.56~0.64	1.60~2.00	0.60~0.90						755 700	(810)	250
	Cr12(D3)	2.00~2.30	≤0.40	≤0.40	11.5~13.0					810 755	(835) 770	180 -55
	Cr12MoV	1.45~1.70	≤0.40	≤0.35	11.0~12.50		0.40~0.60	0.15~0.30		830 760	(855) 785	230 0
	Cr12Mo1V1(D2)	1.40~1.60	0.10~0.60	0.20~0.60	11.0~13.0		0.70~1.20	≤1.10	≤1.0Co	810 695	(875) (750)	190
高碳高合金钢	Cr6WV	1.00~1.15	≤0.40	≤0.40	5.50~7.00	1.10~1.50		0.50~0.70		815 625	(845) (775)	150 -100
	Cr5Mo1V(A2)	0.95~1.05	≤0.50	≤1.00	4.75~5.50		0.90~1.40	0.15~0.50		795		168
	Cr4W2MoV(120)	1.12~1.25	0.40~0.70	≤0.40	3.50~4.00	1.90~2.60	0.80~1.20	0.80~1.10		795 760	(900)	142
	8Cr2MnWMoVS(8Cr2S)	0.75~0.85	≤0.40	1.30~1.70	2.30~2.60	0.70~1.10	0.50~0.80	0.10~0.25	0.08~0.15S	770 660	(820) (710)	220
	Cr2Mn2SiWMoV	0.95~1.05	0.60~0.90	1.80~2.30	2.30~2.60	0.70~1.10	0.50~0.80	0.10~0.25		770 640		190
	6W6Mo5Cr4V(6W6)	0.55~0.65	≤0.40	≤0.60	3.70~4.30	6.00~7.00	4.50~5.50	0.70~1.10		820 730		240
	W6Mo5Cr4V2(M2)	0.80~0.90	0.20~0.45	0.15~0.40	3.80~4.40	5.50~6.75	4.50~5.50	1.75~2.20		850~885 770		140
高速工具钢	W12Mo3Cr4V3N	1.15~1.25	≤0.40	≤0.40	3.50~4.10	11.0~12.50	2.70~3.70	2.50~3.10	0.04~0.10N	876~915		

续表

类型	钢号(代号)	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	其他	A_{c_1}	A_{c_3} ($A_{c_{cm}}$)	M_s
										A_{r_1}	A_{r_3} ($A_{r_{cm}}$)	M_f
高速 工具 钢	W18Cr4V (W18)	0.70~ 0.80			3.80~ 4.40	17.5~ 19.0	≤0.30	1.00~ 1.40		870 760	(1330)	200
	W9Mo3Cr4V (W9)	0.78~ 0.85	0.20~ 0.40	0.20~ 0.40	3.80~ 4.40	8.50~ 9.50	2.70~ 3.30	1.30~ 1.70				165
	9Cr6W3Mo2V2 (GM)	0.86~ 0.94			5.60~ 6.40	2.80~ 3.20	2.00~ 2.50	1.70~ 2.20		795	(820)	220
	Cr8MoWV3Si (ER5)	0.95~ 1.10	0.70~ 1.20	0.30~ 0.60	7.0~ 8.0	0.80~ 1.20	1.40~ 1.80	2.20~ 2.70		858	907	215
其他	7Cr7Mo2V2Si (LD)	0.70~ 0.80	0.70~ 1.20	≤0.50	6.50~ 7.00		2.00~ 2.50	1.70~ 2.20		859 720	910 806	105

对有特殊要求的热作模具，常采用高合金奥氏体耐热模具钢（如 7Mn15Cr2Al3V2WMo、7Mn10Cr8Ni10Mo3V2、5Mn15Cr8Ni5Mo3V2）、高温合金和难熔合金制造。

1.1.1.3 基体钢

基体钢是冷热兼用的模具钢。高速钢具有较高的强度、硬度、红硬性和耐磨性，但韧性不足；低合金模具钢虽有较高的韧性和塑性，但强度、红硬性和耐磨性均不及高速钢。基体钢在高速钢淬火组织基体化学成分的基础上，添加少量其他元素，适当增减碳含量，去除了大量的过剩碳化物，其共晶碳化物的形态、数量、粒度和分布相对于高速钢有明显改善，其韧性和抗疲劳强度得到了大幅度的提高。因此，基体钢既有高速钢的高强度、高硬度和较好的红硬性、耐磨性（但比 Cr12 系列高碳高铬模具钢稍差），又具有低合金钢韧性好的特点，能延缓裂纹的萌发，具有较小的裂纹扩展速率，既可以用于制造热作模具，也可以用于制造冷作模具。

W6Mo5Cr4V2(M2) 高速钢是使用较多、组织性能较好的钢种，基体钢多以其为母体，承袭其性能，加钒能产生二次硬化效果，加铬能提高钢的淬透性和硬度，在回火过程中还能促进钢的二次硬化。表 1-3 列出了常用基体钢的化学成分和临界点，合金元素含量在 10%~12% 范围内，经热处理后，可得到碳含量为 0.6% 左右的 α 过饱和固溶体。

表 1-3 常用基体钢的化学成分（%，质量）及临界点（℃）

类型	钢号(代号)	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	其他	A_{c_1}	A_{c_3} ($A_{c_{cm}}$)	M_s
										A_{r_1}	A_{r_3} ($A_{r_{cm}}$)	M_f
低合 金 钢	5CrMnMo	0.50~ 0.60	0.25~ 0.60	1.20~ 1.60	0.60~ 0.90		0.15~ 0.30			710 650	760	220
	5CrNiMo	0.50~ 0.60	≤0.40	0.50~ 0.80	0.50~ 0.80		0.15~ 0.30		1.40~ 1.80Ni	730 610	780 640	230
	4CrMnSiMoV	0.35~ 0.45	0.80~ 1.10	0.80~ 1.10	1.30~ 1.50		0.40~ 0.60	0.20~ 0.35		792 660	855 770	325 165
	5Cr2NiMoVSi	0.46~ 0.53	0.60~ 0.90	0.40~ 0.60	1.54~ 2.00		0.80~ 1.20	0.30~ 0.50	0.80~ 1.20Ni	750 623	874 751	243
	7Cr3	0.60~ 0.75	≤0.40	≤0.40	3.2~ 3.8					770	(950)	220
	8Cr3	0.75~ 0.85	≤0.40	≤0.40	3.2~ 3.8					785 750	830 770	370 110

续表

类型	钢号(代号)	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	其他	A_{c_1}	A_{c_3} ($A_{c_{cm}}$)	M_s
										A_{r_1}	A_{r_3} ($A_{r_{cm}}$)	M_f
中合金钢	4Cr3Mo3SiV (H10)	0.35~ 0.45	0.80~ 1.20	0.25~ 0.70	3.00~ 3.75		2.00~ 3.00	0.25~ 0.75				
	4Cr5MoSiV (H11)	0.33~ 0.43	0.80~ 1.20	0.20~ 0.50	4.75~ 5.50		1.10~ 1.60	0.30~ 0.60		853 720	912 773	310 130
	4Cr5W2SiV (H12)	0.32~ 0.42	0.80~ 1.20	≤0.40	4.50~ 5.50	1.60~ 2.40		0.60~ 1.00		800 730	875 840	275 90
	4Cr5MoSiV1 (H13)	0.32~ 0.45	0.80~ 1.20	0.20~ 0.50	4.75~ 5.50		1.10~ 1.70	0.80~ 1.20		860 775	915 815	340 215
	3Cr3Mo3W2V (HM1)	0.32~ 0.42	0.60~ 0.90	≤0.65	2.80~ 3.30	1.20~ 1.80	2.50~ 3.00	0.80~ 1.20		850 735	930 825	400
	4Cr3Mo2NiVNB (HD)	0.35~ 0.45	≤0.35	≤0.40	2.50~ 3.00	0.80~ 1.20Ni	1.80~ 2.20	1.00~ 1.40	0.10~ 0.25Nb	770		320
	3Cr2W8V (H21)	0.30~ 0.40	≤0.40	≤0.40	2.20~ 2.70	7.50~ 9.00		0.20~ 0.50		800 690	(850) 750	380
	3Cr3Mo3VNB (HM3)	0.20~ 0.30	≤0.60	≤0.35	2.60~ 3.20		2.70~ 3.20	0.60~ 1.20	0.08~ 0.12Nb			
	5Cr4W5Mo2V	0.40~ 0.50	≤0.40	≤0.40	3.40~ 4.40	4.50~ 5.30	1.50~ 2.10	0.70~ 1.10		836 744	893 816	250
	5Cr4Mo2W2VSi	0.45~ 0.55	0.80~ 1.10	≤0.50	3.70~ 4.30	1.80~ 2.20	1.80~ 2.20	1.00~ 1.30		810 700	885 785	290 175
其他	5Mn15Cr8Ni5Mo3V2	0.45~ 0.55		14.5~ 16.00	7.50~ 8.50		2.50~ 3.00	1.50~ 2.00	4.50~ 5.50Ni			
	7Mn10Cr8Ni10Mo3V2	0.65~ 0.75		9.00~ 11.00	7.50~ 8.50		2.50~ 3.00	1.50~ 2.00	9.00~ 11.00Ni			

65Nb 钢的碳含量为 0.65% 左右, 使其具有一定数量的一次碳化物, 改善其耐磨性, 钼含量比 W6Mo5Cr4V2 低, 除了高速钢的通用元素 Cr、W、V 外, 还加入 0.2%~0.35% 的 Nb, 在钢中形成稳定的 NbC, 增加了碳化物的稳定性, 起到细化晶粒的作用, 提高钢的韧性和改善工艺性能。该钢既具有高速钢的强度、硬度和耐磨性, 又因无过剩的碳化物而比高速钢有更高韧性和抗疲劳强度。加铌的基体钢容易软化退火, 使其具有良好的冷成形性能, 为模具本身的冷挤压成形提供有利条件, 适用于制作形状复杂、受力较大的冷挤模、冷镦模、冷冲模, 模具寿命比用 GCr15 钢提高 5 倍。

CG2 钢的合金元素基本都能在奥氏体化时溶于基体, 过剩碳化物的体积分数不超过 5%。以钼代替部分钨, 可以抑制碳化物的不均匀分布, 细化碳化物, 所形成的 (Mo, Fe)₆C 型碳化物在奥氏体化时大部分能溶于基体中, 经淬火-回火能析出 Mo₂C 型碳化物, 与同时析出的 VC 一起, 促进二次硬化效果, 以提高红硬性。但高含钼量有促进脱碳的倾向, 过热敏感性也较大。镍改善钢的韧性、增加钢材导热性、提高抗热疲劳性能, 但使钢材冷热加工性能变坏。CG2 有较好的断裂韧性和冲击韧性, 塑韧性比 W6Mo5Cr4V2 高, 但强度稍低。承受压力较小、形状复杂、要求有较高韧性的冷挤模具, 多选择 CG2。采用 CG2 钢制造形状简单、受力较大的较长的冷挤压凸模, 其寿命比用 Cr12MoV 钢提高 8 倍以上。

012Al 钢碳的质量分数为 0.5% 左右, 相当于母体高速钢 M2 淬火基体的溶碳量, 加入适量的锰和硅, 可以提高固溶强化效果, 因此提高基体强度、添加微量的铝使钢材韧性有明

显提高。该钢有高的冲击韧性和较好的工艺性能，退火后能冷挤压成形，用来制造形状较复杂、受力较大的冷挤压凸模和凹模，模具平均寿命比 Cr12MoV 模具提高 8~10 倍。012Al 钢具有较高的红硬性，其热稳定性高于 3Cr2W8V 钢，抗热疲劳性能比 3Cr2W8V 好得多，应用于制造热挤压模具，其寿命普遍提高 2~3 倍以上。但是，012Al 钢的耐磨性不如莱氏体钢，最好进行表面化学热处理，采用渗氮或氮碳共渗处理可以有效提高模具的耐磨性。

基体钢的碳化物偏析一般都在 3 级以下，其锻造性能比常用的高速钢和合金工具钢要好得多。但是，由于基体钢的导热性差，应该缓慢加热，锻打操作同高速钢一样，可参照 W6Mo5Cr4V2 高速钢的锻（轧）工艺执行（除 CG2），锻后应加强缓冷。

基体钢还具有较宽的加热温度范围和较好的回火稳定性，所以其热处理工艺性能好。但是，基体钢特别是含钼较多的钢，其脱碳敏感性较强，应尽可能采用真空炉、可控气氛炉或盐浴炉加热，采取措施防止工件脱碳。

1.1.1.4 特殊用途钢

特殊用途钢主要有耐蚀模具钢和无磁模具钢两类。耐蚀模具钢一般含有高碳、高铬，既具有很高的硬度和耐磨性，又具有良好的耐蚀性能，主要用作耐蚀模具。无磁性模具钢铬锰含量较高，具有较高的强度、硬度、耐磨性，在使用状态下呈稳定的奥氏体组织，具有非常低的导磁系数，主要用于制造生产磁性材料用的无磁模具。表 1-4 列出了部分特殊用途钢的化学成分。

表 1-4 部分特殊用途钢的化学成分

钢号(代号)	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	其他	A_{c1}	A_{c3} (A_{cm})	M_s
									A_{r1}	A_{r3} (A_{rcm})	M_f
6Cr4W3Mo2VNb (65Nb)	0.60~	≤0.40	≤0.40	3.80~	2.50~	1.80~	0.80~	0.20~	810~830		220
	0.70			4.40	3.50	2.50	1.20	0.35Nb	740~760		
5Cr2NiMoVSi	0.46~	0.60~	0.40~	1.50~		0.80~	0.30~	0.80~	750	874	243
	0.53	0.90	0.60	2.00		1.20	0.50	1.20Ni	623	751	
5Cr4Mo2W2VSi	0.45~	0.80~	≤0.50	3.70~	1.80~	1.80~	1.00~		810	885	290
	0.55	1.10		4.30	2.20	2.20	1.30		700	785	175
5Cr4Mo3SiMnVAl (012Al)	0.47~	0.80~	0.80~	3.80~		2.80~	0.80~	0.30~	837	902	277
	0.57	1.10	1.10	4.30		3.40	1.20	0.70Al			
5Cr4W5Mo2V (RM2)	0.40~	≤0.40	≤0.40	3.40~	4.50~	1.50~	0.70~		836	893	250
	0.50			4.40	5.30	2.10	1.10		744	816	
6Cr4Mo3Ni2WV (CG-2)	0.55~	≤0.40	≤0.40	3.80~	0.90~	2.80~	0.90~	1.80~	737	822	180
	0.64			4.40	1.30	3.30	1.30	2.20Ni	650		
65Cr5Mo3W2VSiTi (LM2)	0.60~	0.90~	≤0.40	4.50~	1.60~	3.40~	1.00~	0.20~	860	905	225
	0.70	1.40		5.20	2.30	2.80	1.40	0.50Ti	745	800	
7W7Cr4MoV	0.60~	≤0.40	≤0.40	4.50~	6.50~	0.20~	0.40~		785		184
	0.70			5.00	7.50	0.35	0.70				
65W8Cr4VTi (LM1)	0.60~	≤0.40	≤0.40	4.20~	7.50~		0.80~	0.10~	860	920	255
	0.70			4.80	8.50		1.20	0.30Ti	698	780	

1Cr18Ni9Ti 属奥氏体型不锈钢，平均碳含量为 0.1%，较低的碳含量满足耐腐蚀性能的要求。铬是使不锈钢具有高耐蚀性的基本元素，较高的铬含量使其在氧化性介质中有高的纯化能力。钼可以扩大钢在还原性介质的纯化范围，铬-钼的配合对提高耐蚀钢抗局部腐蚀性能起决定性作用。镍要与铬配合才能发挥其作用，镍使高铬钢由铁素体组

织变成奥氏体组织（或部分奥氏体），从而提高其耐蚀性能、力学性能和工艺性能。铬-镍奥氏体不锈钢在多数情况下有良好的抗全面腐蚀性能，但抗应力腐蚀、点腐蚀、缝隙腐蚀、磨损腐蚀等局部腐蚀性能较差，强度也较低。钛是稳定化元素，钛比铬更易于与碳结合而生成稳定的碳化物，从而减小碳的有害作用，保证了钢中有效的铬含量，当钢的钛/碳比值达到一定数值，通过适当的热处理，可提高钢的抗晶间腐蚀能力。奥氏体不锈钢是最重要的一类耐蚀钢，具有良好的耐腐蚀性能的同时还具有较好的力学性能和工艺性能，在室温无磁性，屈服比低，塑性好，焊接性能良好，易于冷热成形。经过冷加工、焊接、热处理的耐蚀模具要在使用前进行消除内应力退火。奥氏体不锈钢焊后要进行固溶处理，以使沉淀析出的碳化物重新固溶，避免产生晶间腐蚀。对于以 Ti、Nb 等元素稳定化的奥氏体不锈钢，其稳定化处理是在固溶处理后再进行 850~950℃ 加热保温，然后水冷（油冷、空冷）。1Cr18Ni9Ti 钢经过 1050~1100℃ 水淬或空淬后，呈单相奥氏体组织，在强磁场中不产生磁感应，适宜制作无磁模具和要求耐腐蚀性能的模具。对于 1Cr18Ni9Ti 钢，其稳定化处理在 860~880℃ 进行，保温 2~6h 后空冷，消除应力退火可与稳定化处理一并进行。

7Mn15Cr2Al3V2WMo 是一种高锰钨系奥氏体高耐热无磁模具钢，可制作冷作模具，也可制作热作模具。该钢在各种状态都能保持稳定的奥氏体，具有非常低的导磁系数，经固溶时效处理后，碳化物在奥氏体基体上弥散析出，高温回火时自奥氏体中析出钨、钼、钒的碳化物，产生沉淀强化效应，使钢具有高的强度、硬度和较好的耐磨性，也有高热强性。采用气体软氮化工艺可进一步提高 7Mn15Cr2Al3V2WMo 的表面硬度，增加耐磨性，从而显著提高模具的使用寿命。7Mn15Cr2Al3V2WMo 钢坯锻造加热温度为 1140~1160℃，始锻温度 1090~1110℃，终锻温度不小于 900℃，锻后可直接在空气中冷却。由于其导热性差和热膨胀系数较大，加热时必须缓慢升温，加热温度过高、过低或保温时间过短，都容易在锻造时产生裂纹，终锻温度过低也易锻裂。高锰钢具有很高的加工硬化敏感性，而且切削加工困难，为此，7Mn15Cr2Al3V2WMo 钢锻后应进行高温退火，通过高温退火来改变碳化物颗粒形态与分布状态才能改善切削加工性能。高温退火温度为 890~910℃，保温 6~8h，炉冷到 600℃ 以下出炉空冷。淬火温度为 1180~1200℃，在盐浴炉中加热保温，保温时间为 1~2h，然后在水中快速冷却，要注意防止冷却过程中沿奥氏体晶界析出碳化物。在淬火前最好分别在 600℃ 和 850℃ 进行 2 次预热。如果在箱式电阻炉内进行第二次预热或加热保温，须采取措施防止氧化脱碳。回火处理为 700℃ 左右保温 4h 空冷。

1.1.2 硬质合金

硬质合金是以硬质难熔金属碳化物和氮化物（WC、TiC、TaC、NbC、VC、Cr₃C₂、TiN 等）为硬质相，铁族元素 Co、Ni、Mo 等作黏结剂制成的高性能结构材料。大量高硬度的硬质相以极细的颗粒弥散分布于黏结相中，使硬质合金的硬度比模具钢高，常温下的硬度一般为 86~93HRA，而且比模具钢有更好的高温硬度和强度，耐磨性好，可比高速钢高 15~20 倍，抗疲劳性比钢好得多，使用寿命长。由于硬质合金采用粉末冶金方法制造，克服了钢材普遍存在的偏析与各向异性现象，硬度稳定，即使硬度与一般高速钢相当的高钴硬质合金，也可获得比钢高得多的耐磨性。硬质合金的抗压强度是钢的 2~3 倍，特别适合于制作承受压应力状态的模具，其使用寿命可比模具钢提高几十倍，甚至上百倍，其中以钨钴类合金的抗压强度最高，钨钛钴合金的抗压强度较低，而且随着钛含量的增加而降低。硬质合金弹性模量为钢的 2.5~3.5 倍，热膨胀系数仅为钢的 0.5 倍。

虽然硬质合金的价格比钢材高，制造模具的成本也较高，如果工件批量大，模具的高寿

命使单件成本反而降低，大批量生产高质量制品时宜选用硬质合金模具材料。随着硬质合金性能和使用技术的不断发展，硬质合金材料在模具行业的应用逐步扩大，先后应用于冲裁模、冷镦模、冷挤模、半热作模（温加工）和热作模等都已取得较好效果。但是，硬质合金韧性较差、性脆，不适宜制作承受较大冲击载荷的模具。使用硬质合金模具时，要避免张应力过大引起碎裂，要通过模具设计改变受力方式（尽量使其承受压应力），或在模具型腔外镶钢套，利用其过盈压应力增加模具型腔承受张应力的能力。

根据硬质相和黏结相的不同，可将硬质合金分为 8 种类型。一是由 WC 和 Co 组成的钨钴类（YG），有些牌号还加入少量 TaC 或 NbC、Cr₃C₂、VC；二是由 WC、TiC 和 Co 组成的钨钛钴类（YT），有些牌号还加入少量 TaC 或 NbC、Cr₃C₂；三是由 WC、TiC、TaC（NbC）和 Co 组成的钨钛钽（铌）钴类（YW）；四是由 TiC、WC、Ni 和 Mo 组成的碳化钛基类（YN）；五是由 WC、Ni 和 Cr 组成的钨镍类；六是由 WC、Co、Ni 和 Cr 组成的钨钴镍类；七是由 Cr₃C₂ 和 Ni 组成的碳化铬基类；八是钢结硬质合金。

表 1-5 示出了模具常用硬质合金的成分和主要性能指标（钢结硬质合金另列于表 1-7）。

表 1-5 模具常用的硬质合金成分及其性能

类别	合金牌号	成分/%(质量)	主要性能			
			密度 /(g·cm ⁻³)	硬度 /HRA	抗弯强度 /MPa	冲击韧度/(J·cm ⁻²) (热膨胀系数 /×10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹)
钨 钴 类	YG3	97WC+3Co	15.0~15.3	91.0	1200	2.6
	YG3X	96.5WC+3Co+0.5TaC	15.0~15.3	91.5	1100	
	YG4C	96WC+4Co	14.9~15.2	89.5	1450	
	YG6	94WC+6Co	14.6~15.0	89.5	1450	
	YG6X	93.5WC+6Co+0.5TaC	14.6~15.0	91.0	1400	
	YG8	92WC+8Co	14.7~14.9	89.0	1500	2.5
	YG8C	92WC+8Co	14.7~14.9	88.0	1750	3.0
	YG10	90WC+10Co	14.4~14.6	88.5	1700	3.8
	YG10C	90WC+10Co	14.3~14.6	86.0	2300	
	YG11C	89WC+11Co	14.0~14.4	86.5	2100	
	YG15	85WC+15Co	13.9~14.1	87.0	2000	4.0
	YG18C	82WC+18Co	13.8~13.9	87.0	2300	4.8
	YG20	80WC+20Co	13.4~13.7	85.5	2600	
	YG20C	80WC+20Co	13.4~13.6	82.0	2200	5.5
	YG25	75WC+25Co	12.9~13.2	84.5	2700	
钨 钛 钴 类	YT5	85WC+5TiC+10Co	12.5~13.2	89.5	1400	0.7
	YT14	78WC+14TiC+8Co	11.2~12.0	90.5	1200	
	YT15	79WC+15TiC+6Co	11.0~12.7	91	1150	
	YT30	66WC+30TiC+4Co	9.35~9.7	92.5	900	0.3
钨 钛 钽 钴 类	YW1	(84~85)WC+6TiC+(3~4)TaC+6Co	12.6~13.5	91.5	1200	
	YW2	(82~83)WC+6TiC+(3~4)TaC+8Co	12.4~13.5	90.5	1350	
	YW3	(14~16)(TiC+TaC)+(6~8)Co+(余量)WC	12.7~13.3	92	1400	
	YW4	(7.2~8.4)TiC+(6~7)Co+(6.2~7.2)TaC+(余量)WC	12.1~12.5	92	1300	
	YH1	(89~91)WC+(1~2)TiC+(3~4)TaC+(6~7)Co	14.2~14.4	93	1800	
	YH2	(86~88)WC+(3~4)TiC+(3~4)TaC+(6~7)Co	13.9~14.1	93.3	1700	

续表

类别	合金牌号	成分/(%质量)	主要性能			
			密度 /(g·cm ⁻³)	硬度 /HRA	抗弯强度 /MPa	冲击韧度/(J·cm ⁻²) (热膨胀系数 /×10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹)
碳化 铬 基 类	YLN15(P)	85(Cr ₃ C ₂ +P)+15Ni	6.20	86.1	1140	
	YLWN15	85(Cr ₃ C ₂ +WC)+15Ni	7.6~7.8	87.8	740	
	YLWN15(P)	85(Cr ₃ C ₂ +WC+P)+15Ni	7.6~7.8	87.5	1170	(11.37)(20~800℃)
	YLWN25(P)	75(Cr ₃ C ₂ +WC+P)+25Ni	8.0~8.2	83.5	1160	(11.93)(20~800℃)
	YLWN40(P)	60(Cr ₃ C ₂ +WC+P)+40Ni	8.3~8.5	75.5	1280	(12.85)(20~800℃)
其 他	YN05	79TiC+14Mo+7Ni	5.56	93.3	950	
	YN10	62TiC+15WC+1TaC+10Mo+12Ni	6.3	92	1100	
	YNW10	90WC+10Ni	14.65	89~90	2070	
	YNWL15	85.7WC+1.5Cr+12.8Ni	14.2~14.3	87~88	1700	

注：钨钴类硬质合金牌号 YG 后的数字表示钴含量，C 表粗颗粒，X 表细颗粒。

钨钴类硬质合金的耐磨性好，在给定的硬度值下强度高，是应用最多的模具材料，钨镍类和 Cr₃C₂ 基类也用于制作模具，钢结硬质合金是较有发展前景的模具材料。

1.1.2.1 钨钴类硬质合金

钨钴类硬质合金的力学性能主要取决于钴含量和 WC 颗粒尺寸，钴含量越低和 WC 颗粒越细，合金的抗压强度越高、硬度越高、耐磨性越好。当钴含量不足 30%（质量）时，随着钴含量和 WC 尺寸的增大，其抗弯强度和冲击韧性增大，当钴含量超过 30%（质量）后，其抗弯强度和冲击韧性呈相反趋势。应用于模具的硬质合金钴含量较高，越是工作负荷重、冲击量大的模具工作零件，钴含量要越高，但高钴含量使硬度和耐磨性降低。在合金中加入少量 TaC(<1.5%，质量)可细化晶粒，提高硬度，改善合金的抗擦伤能力、耐腐蚀性和高温性能，但 TaC 的硬度不如 WC，大量加入 TaC 会降低合金的耐磨性。

各国使用的钨钴类硬质合金牌号对照如表 1-6 所示，模具材料常用 K 类和 G 类硬质合金。

表 1-6 模具用钨钴类硬质合金牌号近似对照表

类别	国际标准化组织 ISO	中国 YB	俄罗斯 ГОСТ	日本 JIS	德国 DIN	美国 JIC	英国 BHMA
K 类 硬 质 合 金	K01	YG3X	BK3M	K01	H3	C4	930
	K10	YG6A, YD10	BK6M	K10	H1	C3	741
	K20	YG6	BK6	K20	G1	C2	560
	K30	YG8	BK8, BK10	K30	—	C1	280
	K40	YG15	BK15	K40	G2	C1	290
G 类 硬 质 合 金	G05	YG6X, YD10	BK6	—	—	—	—
	G10	YG6, YD10	BK6B	E1	G1	—	—
	G15	YG8C	BK8B	—	—	—	—
	G20	YG11C	BK10	E2	G2	—	—
	G30	YG15	BK15	E3	G3	—	—
	G40	YG20, YG20C	BK20	E4	G4	—	—
	G50	YG25	BK25	E5	G5	—	—
	G60	YG30	BK30	—	G6	—	—

1.1.2.2 Cr₃C₂-Ni 类硬质合金

WC 硬质合金在高温下的强度、硬度、耐蚀性、抗氧化性都将大大下降，难以满足须在高温工作模具的要求，而且由于 WC 硬质合金和镶套的热膨胀不一致，高温下镶套的过盈压应力降低，当模具承受较大张应力时极易开裂，因此 WC 基硬质合金只能用于冷作模具。Cr₃C₂ 硬质合金硬度与一般钨钴类硬质合金相当，热膨胀系数与钢接近，无磁性，耐蚀性和

耐磨蚀性好，抗高温氧化性好，WC 基硬质合金在 800℃就急剧氧化，而 Cr₃C₂ 基硬质合金在空气中加热至 1100℃以上，仅表面变色。与钴结硬质合金相比，以镍作黏结剂的镍结硬质合金具有更高的高温强度，还可以提供一些特殊性能，如无磁性、耐腐蚀和抗高温氧化性能。对于工作温度高达 900~1000℃的热作模具，应选用 Cr₃C₂-Ni 类硬质合金。

1.1.2.3 钢结硬质合金

钢结硬质合金以钢为黏结相，钢基体提供足够的强度、韧性及耐高温、耐腐蚀等其他特殊性能；硬质相则提供较高的硬度和耐磨性，既具有类似于钢的韧性和可加工性、可热处理性、可焊接性，又具有接近硬质合金的硬度和耐磨性，是一种优良的模具材料。

根据不同的使用要求，钢结硬质合金分别选用铬钼镍钢、高速钢、不锈钢、高锰钢、马氏体时效钢等作黏结相，在金属成形模具中应用较多的是铬钼镍钢基体和不锈钢基体。硬质相大多为 TiC 或 WC，其耐磨性主要取决于碳化物的相对含量，但过量的碳化物会降低合金的韧性。WC 比 TiC 对铁族元素的亲和力大，润湿角要小，高温溶解度要大，因此，WC 基的钢结硬质合金比 TiC 基的强度高、韧性好，锻造性更优。但是，TiC 比 WC 硬度高，TiC 基钢结硬质合金的耐磨性更好。目前，钢结硬质合金的硬质相除 TiC、WC 两种外，还有 TiN、TiCN、TiB₂ 等多种，其黏结相钢种也在不断扩大。表 1-7 列出了常用钢结硬质合金成分和主要性能指标。

表 1-7 常用钢结硬质合金

合金牌号	黏 结 相	成分/%(质量)							主 要 性 能				
		Wc	TiC	C	Cr	Mo	Ni	其他	密度 /(g·cm ⁻³)	硬度/HRC		抗弯 强度 /MPa	冲击初度 /(J·cm ⁻²)
										退火态	使用态		
GJW50	铬 钼 镍 钢	50		0.25~ 0.5	0.50~ 1.0	0.25~ 0.5			10.2~ 10.3	34~40	65~68	≥2100	≥6
GW50		50		<0.60	0.55	0.15			10.2~ 10.4	38~42	66~69	1800~ 2300	8~12
TLMW50		50		0.45	0.60~ 1.25	0.60~ 1.25			10.2~ 10.37	35~40	66~68	≥2000	8~12
WC50CrMo		50		0.40~ 0.45	0.625	0.625			≥10.3	34~41	67~70	≥2200	≥18
M14		45		0.30~ 0.50	0.50	0.50	0.50		10.0~ 10.1	28~30	65~68	2300~ 2700	15~19
M15		30		0.30~ 0.50	0.50	0.50	0.50		9.0~ 9.1	26~27	63~65	2200~ 2500	20~25
GW30		30		0.40	1.0	1.0	2.0		≥9.0	32~36	61~64	2500~ 3000	15~20
GW40R		40		0.30	3.0	4.0	1.0		≥9.6	37~41	58~62	1800~ 2200	8~12
GT35			35	0.5	2.0	2.0			6.4~ 6.6	39~46	68~71	1400~ 1800	5~8
TM12			35	0.50~ 0.80	1.0~ 1.50	1.0~ 1.50	0.30~ 0.50	0.08~ 0.12Re	6.45~ 6.55	43~45	71~72	2100~ 2500	
R8	不 锈 钢		30~ 40	<0.15	12.0~ 20.0	0~4.0		1.0Ti	6.15~ 6.35	≤45	62~66	1000~ 1200	≥1.5
R5			30~ 40	0.5~ 0.8	6.0~ 13.0	0.5~ 3.0		0.15~ 0.5V	6.35~ 6.45	44~48	70~73	1200~ 1400	≥3
ST60			50~ 70		5.0~ 9.0		3.0~ 7.0		5.7~ 5.9		70	1400~ 1600	≥3
BR40			38	2	热 模 钢					9.50~ 9.70	38~43	60~66	1700~ 1780