

形变热处理及其 在汽车生产中的应用

1976

重庆重型汽车研究所

形变热处理及其在汽车 生产中的应用

说 明

形变热处理是近二十年来才发展起来的一种新工艺，采用这种新工艺之后，大大提高了零件的强度和寿命。另一面近年来国内外对于汽车零部件的成形工艺，也有了很大的发展。例如用轧制（冷轧、温轧、热轧）、挤压、精锻、高速锻、拉拔等以制造齿轮、半轴、活塞销、球头销、前梁、板簧等等，从而为汽车零部件采用形变热处理工艺提供了广阔的前景。

本文综合报导了有关形变热处理的种类，强化的效果、影响因素，强化机理，及国内外在汽车零部件制造上采用的情况，以供有关方面参考。错误之处请予指正。

目 录

一、概 述.....	(1)
二、形变热处理的分类.....	(2)
三、形变热处理的强化效果.....	(11)
四、影响形变热处理强化效果的因素.....	(25)
五、形变热处理的强化机理.....	(57)
六、形变热处理时的变形加工方法.....	(58)
七、形变热处理在汽车制造等工业中的应用.....	(60)
八、我国关于汽车板簧采用形变热处理工艺的实验 研究.....	(65)
九、结语——我国汽车工业应用形变热处理工艺的 展望.....	(73)
主要参考文献.....	

一、概 述

形变热处理是最近十几年才发展起来的提高金属合金强度的新工艺。它原指将钢在奥氏体稳定区或亚稳区给奥氏体变形，然后由变形奥氏体淬火得到马氏体，给钢以附加强化；这种形变和热处理相结合的工艺方法叫形变热处理，或称奥氏体形变法。而最近十年来，用形变和热处理给以各种适当的组合，从而使钢或金属合金得以附加强化的方法，已发展了十数种工艺，如奥氏体形变法、马氏体形变法、等温形变法等等。目前，形变热处理已成为这许多种复合处理方法的泛称。

形变热处理工艺我国劳动人民在生产斗争的实践中早已发明并加以应用，其中典型的工艺方法就是锻造后的迅速淬火法。但这一工艺目前在我国的研究和应用尚还不足。

1954年，荷兰人 Lips 才正式提出：奥氏体经形变后淬火可以使铁基合金显著强化，同时改善范性。近年来，这种处理方法已经成为一种行之有效的提高金属强度的新工艺。

结构钢经高温形变热处理后，可以提高强度、塑性和韧性，改善回火脆性，降低冷脆转化温度，减少裂纹敏感性，提高断裂抗力。结构钢经中、低温形变热处理后，可以获得更高的强化效果，但使塑性略有下降。

形变热处理可以提高高速钢的红硬性和切削性能；可以提高耐热钢的断裂抗力和持久强度；用形变热处理和化学热处理相结合，可以提高低碳钢的耐热性；用中低温形变热处理的方法可以获得超高强度钢丝。

形变热处理不仅是使最终产品获得超高强度和材料疲劳强度的重要手段，而且应用形变热处理可以在很大范围内同时提

高成品或半成品的延性和韧性。因此，目前形变热处理已经成为提高延性和韧性（所用方法或者使奥氏体晶粒细化，或者使铁素体晶粒产生亚结构）和更有效地利用合金元素进行沉淀强化的手段。

近年来，形变热处理在生产上尤其在汽车工业上的应用日渐增多，如：美国福特汽车公司用形变热处理工艺生产了汽车和内燃机车板簧；日本用锻造淬火法生产了多种汽车零件——连杆、阀门启闭摇杆等；用碳素钢成功地代替了合金结构钢；英国用中温形变热处理生产了汽车齿轮；苏联用高温形变热处理生产了40钢型材，并对弹簧钢用高温形变热处理工艺进行了汽车板簧和卷簧的试制。

可以料测：随着机器制造业的发展，形变热处理在机器制造，尤其在汽车工业上的应用，将更加广泛。

二、形变热处理的分类

迄今为止形变热处理工艺已发展到十多种，对其分类亦各有不同，本文根据工艺实现的特点，将形变热处理分为以下几类（此处只拟讨论在处理温度范围内有固态相变发生的金属和合金的强化方法）：

I、在奥氏体转变之前进行变形的处理方法

（一）低温形变热处理（奥氏体过冷形变）*

1. 工艺进行示意图列于图1

将钢奥氏体化——→过冷至亚稳奥氏体区内进行形变（形变量

*在美国这种处理用于强化结构钢的称为“ausforming”用于强化高速钢的处理称为“marworking”即统指为“奥氏体过冷形变”。苏联将这种处理简称为“HTMO”即“低温形变热处理”。

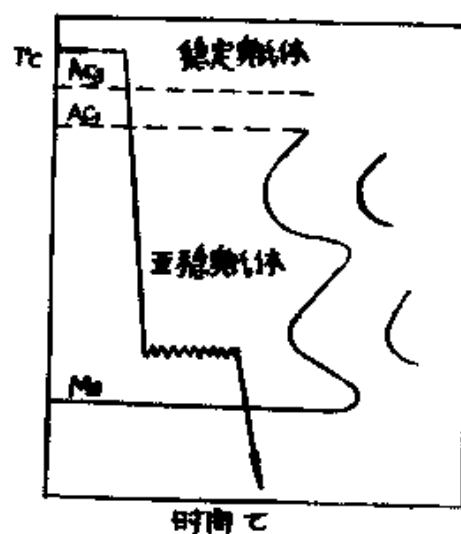


图1. 低温形变热处理示意图

一般较大达50%—90%*, 形变量可一次完成, 也可以分几次进行, 如分几次进行变形时, 可以允许中间保温或高温加热) → 形变奥氏体淬火 → 低温回火。

2. 强化特点: 使强度有大幅度增加, 一般可提高20—30%, 个别达50—60%; 某些钢种的强度极限可达350—400公斤/毫米²; 塑性保持不变或稍微下降, 强化效果不稳定, 主要是因为形变在低温下进行, 多边形化过程不易发生, 使构成亚晶界的位错处于不稳定状态, 一般400°C左右强化即消失。但个别如高速钢则强化效果可以保留至600°C或更高。

3. 应用范围: 奥氏体在中低温区有较大稳定性的钢种; 由于在低温下实现变形, 故变形抗力较大, 设备磨损和承荷能力均较大, 适用于小截面和处理后不加工和少加工的零件如钢丝以及各种合金工具钢等。

* 形变量的计算方法有两种: 一种按式 $\ln \frac{l_2}{l_1} \times 100\%$; 一种按式 $\frac{l_1 - l_2}{l_1} \times 100\%$; 式中 l_1 —— 形变前的厚度, l_2 —— 形变后的最终厚度, $\ln$ —— 为自然对数。

经过这种处理的铬钢（含铬13%）的显微组织和普通处理的显微组织的比较列于附图照片1和照片2。

（二）高温形变热处理*

1. 工艺进行示意图列于图2

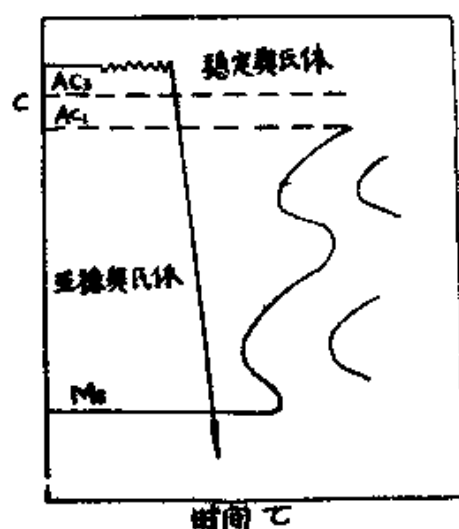


图2 高温形变热处理示意图

首先将钢奥氏体化——在尽可能避免发生再结晶的条件下进行变形15—50%（有工作实验指出：即使发生了再结晶的初始阶段，只要不发生集合再结晶，也不使强化效果恶化）——淬火（可在变形后立即淬火，亦可停留一定时间进行淬火）——在可逆或不可逆回火脆性发展的温度范围内进行回火。

最近英国钢铁公司正在研究钢材采用更为简单的形变热处理。这种方法叫作“控制轧制”，为高温形变热处理的一种，即钢材在1000°C—800°C降温过程中进行变形，随后控制冷却。

“控制轧制”的应用，构成了研制和生产高强度结构件、板材、钢带的新的基础。

2. 强化特点：可以使强度极限 σ_b 提高10—15%，个别可达40—50%；同时提高塑性和韧性，改善回火脆性。由于高温变形

* 俄文中这种处理简称为“BTMO”。

以扩散方式进行，此时“多边形化”过程可以进行，致使亚结构呈较稳定状态存在，故强化效果稳定，可以保持到较高的回火温度。最近的研究还指出：经过这种处理可以更加有效地提高钢的断裂韧性，从而使这种方法的应用更有前途。

3. 应用范围：变形在高温下容易进行，所需设备负荷和设备磨损均比较小；综合性能好；不受钢种限制，从低碳钢、一般结构钢、弹簧钢、合金工具钢都可以应用。对于在中温下使用的弹性元件尤为适用。

经过这种处理的弹簧钢 60Si2Mn 的显微组织和普通处理的显微组织对比列于附图照片 3 和照片 4 [9]。

（三）中温形变热处理*

变形在高温形变热处理和低温形变热处理的变形温度之间的处理方法叫中温形变热处理。这种处理方法类同于低温形变热处理，但变形温度较高，强化效果一般低于低温形变热处理，但强化效果较稳定。随着温度的升高，奥氏体在中温区的稳定性降低，因此需以更大的变形速度实现变形，以防奥氏体出现中温转

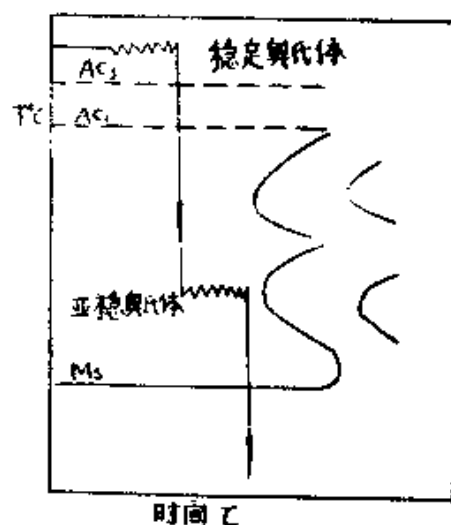


图 3 综合形变热处理工艺示意图

* 该类处理俄文文献中简称为“TMO”

变产物。在一些研究工作中指出：中温区奥氏体的变形加速了珠光体的形成，中温转变产物的出现，使形变强化效果降低，但仍高于未经形变处理的产品或试样的性能。

(四) 综合形变热处理*

1. 工艺进行示意图列于图 3

将钢奥氏体化——在高于再结晶的温度下进行变形，其变形量占总变形量的 $2/3$ 左右——过冷至奥氏体亚稳区变形，变形量占总变形量的 $1/3$ 左右；总的变形量为 $70-90\%$ 。——淬火——中低温度下进行回火。

2. 强化特点：和高温、低温形变热处理相比较，综合形变热处理可以保证得到更高的强度和塑性相结合。强化效果也较低温形变热处理稳定。

3. 应用范围：兼有高温和低温形变热处理的特点；但变形比低温形变更易于进行，简化了工艺设备。

(五) 予形变热处理**

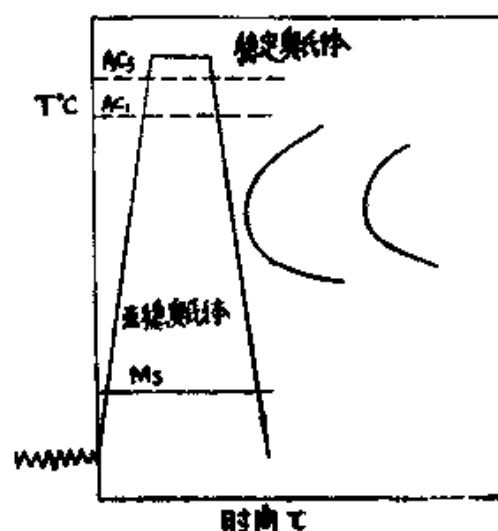


图 4 预形变热处理工艺示意图

*该类处理俄文文献中简称为“CTMO”

**该类处理俄文文献中简称“IIMTO”

1. 工艺进行示意图列于图4

将钢在室温（或略高于室温）下变形50—80%→盐浴（或其它快速加热方法）加热奥氏体化→淬火→中低温回火。

2. 强化特点：这种强化方法是利用加工硬化的遗传效应。在100—400°C回火时，一般可使抗拉强度提高20—50公斤/毫米²，使屈服强度极限 σ_s 提高20—35公斤/毫米²；一般在高于400°C回火时强化效果即迅速消失。这类强化方法对于低碳钢强化效果较小。

3. 应用范围：适用于冷拔的管材，线材和铅浴淬火的钢丝等等。

I、在奥氏体转变过程中进行变形

（一）在奥氏体→马氏体转变过程中进行变形*。其工艺示意图列于图5，由于该种工艺变形一般是在较低温度下进行，而且承受变形的组织马氏体硬度较一般的为高，故这一方法一般只用于特殊钢和合金，如马氏体不锈钢的强化等。

（二）在奥氏体→珠光体转变过程中进行变形**，工艺进

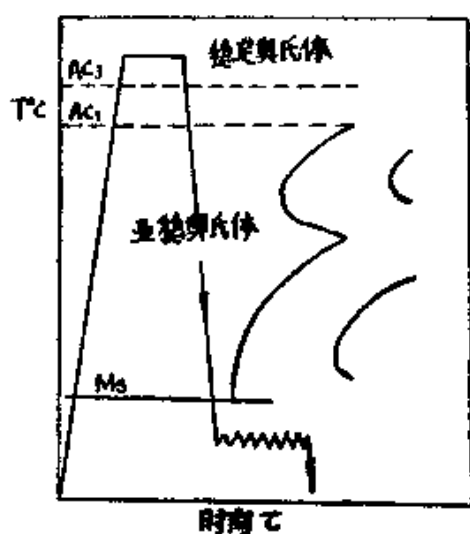


图5 马氏体形变热处理工艺示意图

* 该类处理法文文献中称为“Marformage”即马氏体形变。

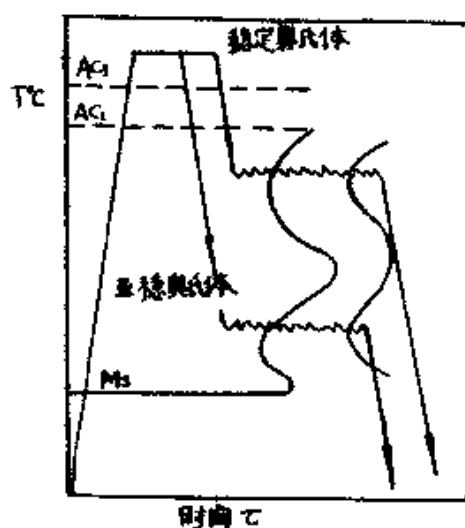


图6 等温形变热处理工艺示意图

行示意图列于图6。该种工艺的变形过程一般在中高温区内进行，变形较易于实现；可以不受钢种限制，对于各种炭素钢，合金结构钢都可以应用。一般强化效果不如奥氏体形变，但却可以大大提高韧性，并降低冲击韧性转变温度。为了得到满意的组织，形变量一般应大于60%。形变温度一般应在600—700°C下进行，以使形变后的多边形化过程可以进行。

这类形变热处理可以改善渗碳体的形态和分布，避免生成片状珠光体；经过这种处理后的1%Cr钢的电子显微镜照片列于附图照片5和照片6；经过这种处理的XC60钢的光学显微镜照片列于附图照片和7照片8。

Ⅱ、奥氏体转变之后的产物进行变形

(一) 奥氏体转变珠光体后变形***

该类处理方法又可分为二种：即“动态应变时效”和“温加工”。

** 该类工艺英文文献中称为“Isoforming”即“等温形变”，也有在贝氏体等温形成过程中进行变形的，此时可以并着提高强度指标，但延性和韧性略有下降。

*** 该类工艺法文文献中称为“Perlitofomage”即“珠光体形变”

“动态应变时效”是指在 $150-300^{\circ}\text{C}$ 之间将钢变形2%，并在此温度下进行时效；经过这种处理的钢虽然强度有些提高，但断裂韧性有所下降，所以一般结构钢应用不多。

“温加工”对于结构钢应用较多，其工艺进行示意图列于图7，这种处理一般均予先将珠光体进行球化处理，然后于 $600-700^{\circ}\text{C}$ 下变形25—70%，变形后空冷，然后于 700°C 回火，经过

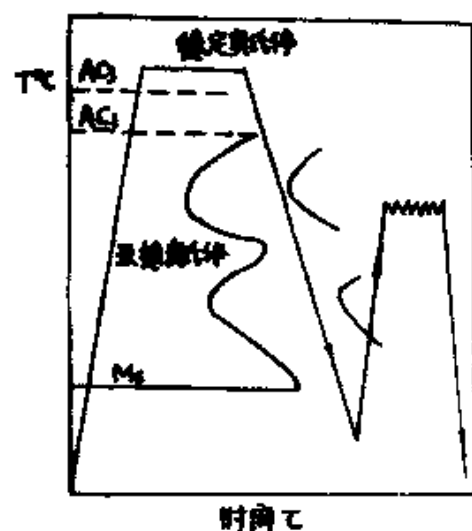


图7 珠光体形变热处理（或称温加工）工艺示意图

700°C 下变形25—70%，变形后空冷，然后于 700°C 回火，经过这种处理的钢能得到一种类似于“等温形变”后所得到的组织，并且具有相似的性能。这种处理后的铬钢（1%Cr）的电子显微镜照片列于附图照片9。

这一工艺适合于各种结构钢经退火后进行冷挤、冷轧、温轧、精锻、高速锻等加工方法成型的零件。但这一方法变形时变形抗力比较高，设备负荷能力也需较大，强化效果也不如奥氏体形变的高。

（二）奥氏体连续冷却转变产物—马氏体变形

该类处理方法根据其用途、处理方法等又可以分为以下几种，一种为动态应变时效（其工艺见Ⅲ（一）节所述）；对于一般结构钢其淬火马氏体性质是硬而脆，故可以先将淬火马氏体进

行高温回火，然后进行这种处理。由于在低温下钢的变形抗力较大，而且这种处理对钢的韧性改善甚小，所以应用不多。

第二种为马氏体变形时效，其工艺进行示意图列于图8。即先将钢奥氏体化（或称奥氏体时效），有时为了加速奥氏体的时效过程，提高钢的 M_s 点，在室温给奥氏体以一定的变形量；在奥氏体时效以后，空冷至 M_s 点以下，在室温变形15—40%，将形变马氏体加热至 $400—600^{\circ}\text{C}$ 进行时效处理。这种处理方法主要用于特殊钢及合金，如含18—25% Ni 的低碳铁镍合金，沉淀硬化不锈钢的强化处理即可以用这种处理方法。

第三种为温加工，其工艺进行示意图列于图9，其工艺为：

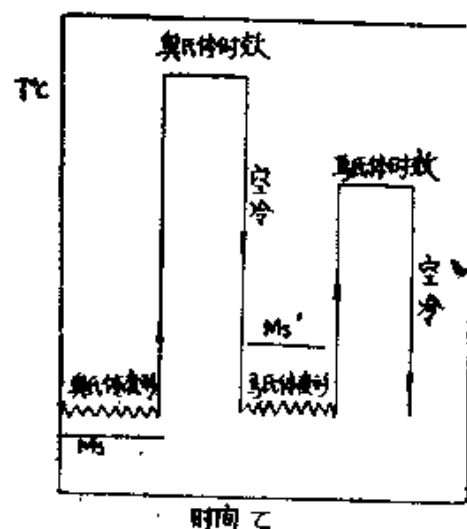


图8 马氏体变形时效工艺示意图

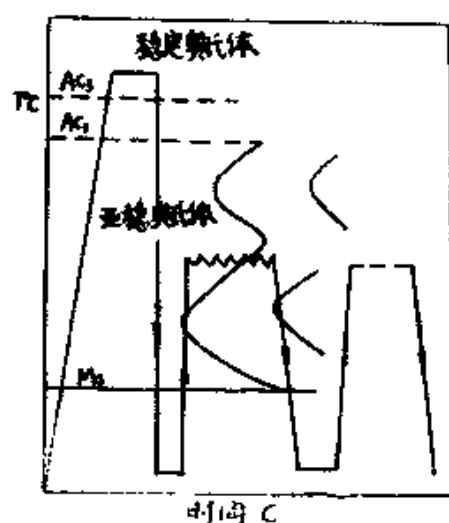


图9 马氏体形变处理（或称马氏体温加工）工艺示意图

将钢奥氏体化→淬火成马氏体→ $600—700^{\circ}\text{C}$ 高温回火→于 600°C 左右变形50—70%→变形后空冷→ $600^{\circ}\text{C}—700^{\circ}\text{C}$ 高温回火。经过这种处理和同类钢经等温形变处理后所获得的组织和性能极为相似；所以它可以当某种变形方法对使用等温形变热处理不适合时，用温加工方法给以补充。对于所有结构钢，基本上都可以用这种方法给以强化。用这种处理方法处理后所获得显微组织的电子显微镜照片列于附图照片10。

三、形变热处理的强化效果

一些有关弹簧钢形变热处理后的强度性能试验结果列于表1, 9, 10高温形变热处理对硅锰弹簧钢断裂韧性和强度的影响的实验结果列于表3。

形变热处理可以显著提高弹簧钢的疲劳强度; 对于 55XГP 一些资料的实验指出: 经950°C 变形15%和25%后淬火, 于250°C 回火1小时, 其疲劳极限可较正常淬火、回火(950°C 淬油, 520°C 回火1小时)提高9—11公斤/毫米²; 即疲劳极限 σ_{-1} 由52公斤/毫米²提高到61—63公斤/毫米²。钢 50CrMo 经中温形变热处理可以使有限疲劳次数提高10—20倍。可以使疲劳极限提高20%, 即 σ_{-1} 由80公斤/毫米²提高到100公斤/毫米²。在应力为60公斤/毫米²下, 高温形变热处理可以使55XГP 钢的有限疲劳次数较普通处理后提高9倍。

形变热处理对结构钢机械性能影响的一些实验结果分别列于表2、表4、表5。

形变热处理对高速钢 M-2 硬度影响的实验结果列于表6。

对 JKH-9 钼高速钢的研究指出: 形变热处理可以使该钢的弯曲应力上升100公斤/毫米², 断裂强度较普通处理提高2倍; 弯曲试验的变形量较普通处理提高2.5倍。

将 ЭИ612K 钢制件经1100°C 加热, 以0.5—1%/秒的变形速度变形25%水冷, 于600°C 下、拉伸应力为44公斤/毫米²进行持久试验, 其断裂时间由普通热处理的500—700小时提高到3000—5000小时, 平均增长了六倍多。

对 Vasco MA 钢以变形量为91%进行形变热处理后, 在594°C 进行高温拉伸, 抗拉强度为182公斤/毫米², 屈服强度为

弹簧钢形变热处理强

钢 号	化 学 成 份 %					形变温度	形变量
	C	Si	Mn	Cr	其 它	℃	%
60Si2	0.65	1.80	0.80	.09	Ni:0.13, Cu:0.12	1020	0
							10
							20
							25
						1020	0
							10
							20
							25
						1020	0
							10
							20
							25
55CrMnB	0.58	0.27	1.06	1.13	Ni:0.16, Ti:0.057, B:0.0023	930—950	70—80
							70—80
							70—80
							0
55CrMnB	0.56	0.27	1.09	0.91	B:0.005, Ti:0.03	920	40
							40
							40

化的一些试验结果²⁻⁸³

表 1

淬 火 工 艺	回火工艺 t℃×小时	机 械 性 能				备 注
		σ_b 公斤/毫米 ²	$\sigma_{0.2}$ 公斤/毫米 ²	δ %	ψ %	
很快淬水	220×1	试 样 断 头 部				感应加热 圆截面辊 轧变形。
"	"	试 样 断 头 部				
"	"	263	233	5	36	
"	"	266	237	5	32	
"	315×1	236	227	3	22	
"	"	253	211	6	36	
"	"	257	223	5	40	
"	"	255	233	5	38	
"	395×1	212	195	5	44	
"	"	233	217	10	42	
"	"	233	209	5	42	
"	"	232	208	6	45	
很快淬油	240×1	258	235	7	18.5	热轧变形
很快淬水	"	235	218	6.5	21.5	
压缩空气吹冷	"	240	218	7	18	
很快淬油	"	脆 断				
很快淬油	250×1	226	184	8	33	热轧变形
停2分淬油	"	220	180	6.8	29	
停5分淬油	"	218	178	6.8	28	

彈簧鋼形變熱處理強

鋼 號	化 學 成 份 %					形變溫度	形變量
	C	Si	Mn	Cr	其 它	℃	%
55CrMnB	0.56	0.27	1.09	0.91	B:0.005, Ti:0.03	920	40
						920	40
						1000	40
						1050	40
						1100	40
55CrMnBZr	0.55	0.33	1.09	1.00	B:0.005, Zr:0.12 Ti:0.04;	920	40
							40
							40
							40
						920	40
						1000	40
						1050	40
						1100	40
60Si2MnWA	0.64	1.79	0.79		W:1.05	900	0
						520	40
50CrVA	0.48	0.28	0.67	1.00	V:0.13	900	0
						520	40
ЭИ142	0.66	1.67	0.50	0.33	Ni:0.10	300~350	32