

热处理节能钢铁材料及在汽车制造业的应用

□ 哈尔滨汇隆汽车箱桥有限公司/金荣植

热处理是汽车零件制造中耗能高的工序，在大中型汽车企业中，热处理电耗占企业用电总量的1/4以上，约占热处理生产成本的30%~40%。为了降低热处理生产成本，除了通过改进热处理工艺缩短生产周期外，积极采用热处理节能钢铁材料，也可以获得明显的经济效益。

目前，节能钢铁材料的应用得到了快速的发展，其特点是可以完全省掉某项热处理工序（如调质、淬火、退火、正火、回火等）或加速热处理工艺过程的进行（如快速渗碳、渗氮等），前者的节能效果最大，可以说是热处理节能技术的一项重大成果，具有广阔的发展前景。

非调质钢及其应用

调质是淬火和高温回火的复合热处理，是耗能最多的热处理工序之一。利用非调质钢省去调质工

序，使材料在热锻或热轧后空冷或进行简单的控冷即能达到调质钢经调质处理后所具有的性能，从而取代调质钢，获得显著的节能效果，并具有良好的切削性能。它是伴随国际上能源短缺而发展起来的一种高效节能钢，其性价比远优于传统合金结构钢。

国际上先进国家研制开发了大量的V-Nb复合微合金化的非调质钢，在汽车零件的使用率已达到60%以上。国内已经开发出以V微合金化为主的20余个非调质钢种（如F45MnV、F35MnVN、YF45MnV、YF45V、35VS、45VS、35MnVS、40MnVS、40MnTi、10MnSiTi、15MnNb、38MnVTi、49MnVS3等），用非调质钢可以制造汽车曲轴、连杆、半轴、转向节和滑动叉等零件。

非调质钢的应用，因节省调质等工序，可使生产此类零件的热处理能耗降低70%~80%。德国用

49MnVS钢代替调质钢制造连杆可节约总成本的38%；日本爱知公司分析，非调质钢因省略调质工序，可使热锻件产品的成本降低18%。

1. 分类与用途

非调质钢按用途分为热轧与热锻非调质钢（如25MnSiV、45V、30Mn2V、35MnV、32Mn2SiV、40MnV、45MnV等）、易切削非调质钢（如35VS、35MnVS、40VS、45VS、40SiMnVS等）、冷作硬化非调质钢（如10MnSiTi、15MnNb、16Mn2V、10Mn2VTiB等）。按获得的组织分为铁素体+珠光体非调质钢（如45MnV、45MnNbV、35MnVS、49MnVS3等）、贝氏体非调质钢（如12Mn2VB、12Mn2VBS等）、马氏体非调质钢等。

一般用途分类见表1，按显微组织分类见表2。

我国汽车工业广泛用于生产制造汽车发动机曲轴、连杆、转

向节等零件，主要是铁素体+珠光体非调质钢。其主要有：标准钢号的F45MnVS、F38MnVS，以及非标准钢号的48MnV、C38N2、30Mn2VS、S43CVS1等。而贝氏体非调质钢主要用于生产汽车前梁、转向节臂等保安类零件，其主要有：标准钢号的F12Mn2VBS，以及非标准钢号的12Mn2B、12MnBS、20Mn2VB等。

在GB/T 15712—2008《非调质机械结构钢》中列举了10种常用、成熟钢种：F35VS、F40VS、F45VS、F30MnVS、F35MnVS、F38MnVS、F40MnVS、

F45MnVS、F49MnVS、F12Mn2VBS。

2.在汽车制造上的应用及效果

目前，非调质钢主要用于汽车零部件的生产。日本三菱汽车公司的转向系统及传动系统所采用的热锻调质件几乎全部采用了非调质钢，日产汽车公司90%的曲轴采用非调质钢制造；国内东风汽车公司采用非调质钢制造连杆、曲轴、花键轴和前梁等，一汽采用非调质钢制造中重型载货汽车的前梁、曲轴等，均取得明显的效果。表3为非调质钢在国内外汽车的应用情况。

表1 非调质钢按用途分类

类别	典型零件	制造工艺	基本化学成分
热锻用	轴类、杆类、销类等结构件等	轧制→热锻（控制锻造、控制冷却）→机加工控制	中碳钢或中碳锰钢+V、N等
冷锻用	螺栓类	轧制、控制冷却→拉拔→机加工	低碳钢+V、Nb、Ti、B等

表2 非调质钢按显微组织分类

类别	显微组织	主要性能与用途
铁素体-珠光体型	先共析铁素体+珠光体+细小弥散的微合金碳（氮）化物	具备高强度与较好的韧性，适于制造重要的轴类、杆类等结构件，如发动机曲轴、连杆
贝氏体型	贝氏体（低碳）+细小弥散的微合金碳（氮）化物	具备900MPa以上的高强度及良好的韧性
马氏体型	马氏体（低碳）+细小弥散的微合金碳（氮）化物	具备1100MPa以上的高强度及良好的韧性

表3 非调质钢在国内外汽车上的应用

	厂家	牌号	应用部件
国外	日本丰田	SVd15BX	下摇臂
	德国大众	27MnSiVS6	连杆
	德国奔驰	26MnSiVS7	曲轴、连杆
	意大利菲亚特	HVD80SL	曲轴
国内	天津夏利	S43CVS1	连杆
	南京汽车	35MnVN	连杆
	江铃汽车	12Mn2VBS	前桥
	长春一汽	35MnVS	连杆
	上海桑塔纳	49MnVS3	曲轴
	富康	30MnVS6	轮毂

3.非调质钢的应用实例

例如，某汽车前轴，原采用45钢制造，要求调质处理，现采用非调质钢12Mn2VBS作对比试验。具体工艺如下：

（1）两钢材锻造工艺流程。

下料→中频加热→辊锻→顶锻→终锻→切边→热校正→控冷→喷丸→检测→机加工。表4为两种钢的锻造工艺对比试验。

（2）切削加工对比。

12Mn2VBS钢前轴锻件未经调质处理，室温组织为粒状贝氏体和少量铁素体，其硬度均匀，且钢中含硫量较高，可提高切削性能20%~30%。

（3）力学性能。两种钢前轴的力学性能检测结果见表5。两种钢的抗拉强度、屈服强度基本相当。调质钢的韧性比较好，非调质钢晶粒粗大，贝氏体为粒状，因而韧性较差。

（4）台架疲劳试验及路试。

非调质钢前轴试件三个方向（横向弯曲30万次，纵向弯曲50万次，垂直弯曲100万次）疲劳寿命均满足日本五十铃前轴总成试验规范要求。用12Mn2VBS钢前轴总成装车2台进行3万km路试，达到了45钢前轴的技术要求，完全能满足汽车前桥总成对前轴的技术要求。

结果显示，采用非调质钢后每根前轴锻造成本降低了64元。以年产1.7万台套计算，可节约采购成本110万元。由于12Mn2VBS钢的切削性能大大改善，生产效率和刀具使用寿命得以提高，降低了加工制造成本，经预测每年节约制造成本30多万元。

表4 两种钢的锻造工艺对比试验 (单位: ℃)

材质	加热温度	始锻温度	终锻温度	控冷方式	锻造方式	锻后处理设备
45钢	1 200 ± 20	1 150 ± 20	950 ± 30	锻后调质	模锻	调质生产线
12Mn2VBS	1 200 ± 20	1 150 ± 20	1 030 ± 30	风→控制冷却	模锻	控冷生产线

表5 两种前轴材料力学性能对比试验结果

材料	热处理状态	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	α_k / (J·cm ⁻²)
45钢	调质	780~800	655~695	16~20	55~60	90~110
12Mn2VBS	锻后处理	790~812	660~700	15~19	55~58	75~90

Mn系贝氏体/马氏体复相钢及其应用

清华大学等研发出多种Mn系贝氏体/马氏体复相钢, 如Mn-B系、Mn-Cr系、Mn-Si-Cr系、Mn-Cr-W系等贝氏体/马氏体复相钢。该钢空冷即可强化, 其强韧性优于单一马氏体, 比回火马氏体具有更高的强韧性, 可以省略淬火工序, 从而减轻畸变、开裂、氧化与脱碳等缺陷造成的损失, 同时还可使工艺流程缩短, 生产成本与能源消耗降低, 近年来在汽车、矿业、建筑、石油、铁路等多个领域得到广泛的应用。

表6为Mn系贝氏体/马氏体复相钢的性能及应用。

Mn系贝氏体/马氏体复相钢的应用与效果如下:

(1) 汽车用Mn-B系贝氏体钢。该钢锻轧热加工后空冷再回火, 用该钢制造的前轴和连杆的力学性能见表7, 相当于调质处理后的性能; 其疲劳性能见表7和表8。通过表7和表8可以看出, 其性能优于调质处理后的中碳钢(45钢)或中碳合金钢(如40Mn、40MnB)。东风汽车的前轴和连杆采用该钢制造, 以回火代替调质, 不但降低生产成本, 且装车运行情

况良好。
(2) 贝氏体弹簧钢。中碳Mn系贝氏体钢具有空冷自硬化和空冷淬透性高的特点, 中温回火表现出较高的强韧性, 可用于制造各种车辆、机车、农机等机械用各类弹簧, 用含质量分数0.4%~0.5%C的Mn系贝氏体钢通过空冷+中温回火处理制造的20~40mm板簧, 其性能可达: $R_m \geq 1\,900\text{MPa}$, $R_{eL} \geq 1\,600\text{MPa}$, $A \geq 8\%$, $Z \geq 40\%$ 和 $\alpha_k \geq 40\text{J/cm}^2$, 均显著超过常用淬火+中温回火处理的60Si2Mn弹簧钢的相应性能。

渗碳钢、渗氮钢及其应用

汽车齿轮等零件, 采用化学热处理(如渗碳、渗氮), 可获得高的硬度、耐磨性、疲劳性能等, 从而提高齿轮等零件的使用寿命。但其工艺周期长(数小时至数十小时), 成本高。

(1) 高温渗碳钢。高温渗碳钢的应用, 可使渗碳温度由目前广泛采用的930℃提高到980℃, 可使获得相同渗碳层深度的渗碳时间缩短1/2, 而渗碳温度提高到1050℃, 可使渗碳时间再缩短40%; 快速渗

表6 Mn系贝氏体/马氏体复相钢的性能及应用

应用	R_{eL} /MPa	R_m /MPa	A (%)	Z (%)	α_k /J·cm ⁻²
汽车等弹簧	1 600	1 900	8	40	40
超高强度大螺栓	1 250	1 500	8	40	80
汽车前轴、连杆	490	690	17	45	70
无缝钢管	950	1 500	12	—	—

表7 前轴垂直弯曲疲劳寿命

材料与热处理工艺	试验载荷 (max/min) /kN	疲劳寿命 (× 10 ⁶)
Mn-B系贝氏体钢锻后回火	82.32/7.84	1.3
45钢调质		0.443

表8 连杆拉压疲劳寿命

材料与热处理工艺	试验载荷/kN	疲劳寿命 (× 10 ⁶)
Mn-B系贝氏体钢锻后回火	± 68.6	0.734
40Mn钢调质		0.274
40MnB		0.367

碳钢的使用，可使常规渗碳时间缩短20%；快速渗氮钢的应用，可显著缩短传统渗氮工艺周期。这些钢材在化学热处理中的应用均达到节能降耗的效果。

为了克服钢件在1000℃以上高温渗碳时的晶粒过分长大，并可实施渗碳降温的直接淬火过程，要求开发出更多的本质细晶粒的渗碳结构钢。在钢中添加Ti、V、Zr和Nb等细晶粒元素，可以满足高温渗碳要求。

我国钢铁研究总院与宝钢和抚顺特钢研发含Nb的渗碳钢新钢种，980℃渗碳温度下可保持ASTM9级左右的晶粒度。国产含Nb的齿轮用钢如20CrMoNb和20Cr2Ni2MoNb钢，它们可以应用于高温渗碳。

表9为国外高温渗碳齿轮钢的主要化学成分。

(2) 快速渗碳钢的化学成分及渗碳效果。日本所采用的快速渗碳钢的化学成分及渗碳效果列于表10、表11中。其中SCM420H、SCM822H、SCr420H钢分别相当于我国20CrMoH、22CrMoH钢、20CrH钢。可以看出，在获得相同的有效硬化层深时，这些钢种在常规渗碳时，可以缩短时间20%~40%。因此，可以相应节省电能和渗剂的消耗，从而降低齿轮等零件的制造成本。

(3) 快速渗氮钢。渗氮周期长（渗氮周期长于渗碳），提高温度可以缩短渗氮时间，但普通渗氮钢的表面硬度会显著降低。在钢中加Ti可以保证在650℃以上渗氮时获得高的表面硬度，复合加Ni，可获得Ni3Ti的析出硬化，并提高心部强度。经650℃、5h渗氮后可

获得0.5mm渗层（600HV处）。提高V含量，减少Al含量以及多元合金化，也可以缩短渗氮工艺过程。

普通渗氮钢采用气体渗氮时，

获得0.5mm氮化层深需要50h以上。日本矢岛博士发明的一种N6型快速渗氮钢，与普通渗氮钢SACM1钢相比，渗氮工艺时间从48h缩短到6h。两钢种的化学成分见表12。

表9 国外高温渗碳齿轮钢的化学成分（质量分数，%）

国家	钢种	主要化学成分						
		C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	其他
美国	SAE 8620Nb	0.20	0.20	0.80	0.50	0.20	0.10	
日本	SCr420Nb	0.21	0.25	0.80	1.04	—	0.02	Al、N
	SCM418Nb	0.17	0.20	0.81	0.11	0.16	0.04	
巴西	AISI 5115Nb	0.18	0.25	0.95	0.83	0.03	0.04	Ti
德国	VW4521 + Nb	0.11~0.16	0.80	0.78	0.28	1.5%	适量	0.029Ni

表10 快速渗碳钢的化学成分（质量分数，%）

钢号	C	Si	Mn	Cr	Mo
SCr420JS	0.23~0.26	0.05~0.15	0.30~0.90	1.10~1.30	—
SCM420JS	0.23~0.26	0.05~0.15	0.30~0.90	1.10~1.30	0.15~0.25
SCM822JS	0.23~0.26	0.05~0.15	0.30~0.90	1.10~1.30	0.35~0.45
ES1	0.27	0.25	0.6	0.7	0.15
ES2	0.27	0.25	0.6	0.7	0.25
SCr420H	0.17~0.23	0.15~0.35	0.55~0.90	0.85~1.25	—
SCM420H	0.17~0.23	0.15~0.35	0.55~0.90	0.85~1.25	0.15~0.35
SCM822H	0.19~0.25	0.15~0.35	0.55~0.90	0.85~1.25	0.35~0.45

表11 快速渗碳钢渗碳效果

原来钢种	原来钢的渗碳时间/h	快速渗碳钢的渗碳时间/h	
		0.23%C	0.26%C
SCr420H (0.20%C)	10	7.8	5.7
	5	3.9	2.9
SCM420H (0.20%C)	10	7.8	5.7
	5	3.9	2.9
SCM822H (0.22%C)	10	8.3	6.0
	5	4.2	3.0

表12 N6钢和SACM1钢的化学成分（质量分数，%）

钢号	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Ti	Al
N6	0.20~0.30	0.20~0.50	0.50~1.00	3.20~3.80	1.00~1.40	0.20~0.30	2.50~3.00	0.10~0.20
SACM1	0.40~0.50	0.15~0.50	—	—	1.30~1.70	0.15~0.30	—	0.7~1.20

奥贝球墨铸铁 (ADI) 及其应用

等温淬火球墨铸铁是近40年来发展起来的一种新型球墨铸铁材料。经贝氏体等温淬火后获得贝氏体-残留奥氏体组织,故称为奥贝球墨铸铁(简称ADI),其具有更高的抗拉强度、疲劳强度、断裂韧度和更好的耐磨性,堪与中碳钢的性能相比。较好的铸造性和生产的灵活性使ADI更易设计成最优的零件,较之锻件更易于生产接近无余量零件。

ADI虽然需要奥氏体等温热处理,但其价格仍比钢件(铸钢、锻钢)低20%左右,可100%回用,相对于其他材料,ADI的性价比最高,而且生产过程简单,制造成本低,节能节材效果明显。因此,有人认为ADI是材料中的高科技产品。目前,国内外已经在许多汽车零件(如齿轮、凸轮轴与曲轴等)上推广应用,在汽车轻量化方面具有显著节能降耗效果。

1. ADI的性能特点

利用ADI代替锻钢制造零件可获得如下效果:减少材料冶炼及零件制造过程中的能耗;可减轻构件质量而节约能源;具有良好的铸造工艺性,大大降低了材料成本;具有良好的切削性能,提高了切削效率和刀具寿命,降低了加工成本;减振性好,可以减轻噪声;具有良好的强韧性;节省重要资源(如Cr、Ni、Mo等)消耗。

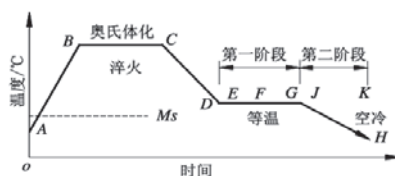
2. ADI热处理工艺及其应用效果

热处理工艺是确保ADI性能的关键,应根据产品性能要求和

工件大小确定合适的ADI热处理工艺。一般奥氏体化加热温度880~910℃,保温时间1~2h,等温淬火温度230~400℃,保温时间1.5~3h,等温淬火温度波动范围控制在±10℃。对要求高强度、高耐磨而不要求韧性的ADI件,可采用较低的等温淬火,以获得下贝氏体及小于10%残留奥氏体(体积分数);对于要求韧性为主的ADI件,采用偏高的等温淬火温度,以获得上贝氏体及大于10%残留奥氏体(体积分数)。

对要求进行粗、精加工的ADI件,应在粗加工后进行热处理,然后进行精加工。热处理后的硬度小于430HBW,以便于精加工。由于ADI本身高强度、高硬度组织及其自硬化作用,其耐磨性超过了表面淬火(58~64HRC)的锻钢件。

典型的ADI等温淬火过程如下图所示。



ADI等温淬火工艺过程示意

ADI在汽车制造上的应用有以下几个方面。

(1) 汽车齿轮。ADI用于环形齿轮的制造,其弹性模量比钢材低20%,对于相同的输入扭矩可降低5%的接触应力。同时,由于存在10%的石墨基体,ADI环形齿轮比传统的钢制齿轮噪声低。美国通用汽车公司应用ADI取代锻钢制造汽车后桥弧齿锥齿轮,建成年产110万套ADI弧齿锥齿轮,并成功用于客车和载货汽车上。美国康明斯公

司用ADI代替渗碳钢制造汽车发动机传动齿轮,降低了成本。东风汽车公司引进的康明斯B系列柴油机发动机正时齿轮采用ADI制造,等温淬火工艺为900℃ × 2h、(235 ± 5)℃油淬等温2h。

(2) 汽车曲轴。某些原为普通球墨铸铁的曲轴,由于不能满足使用要求而采用ADI材料。美国通用、福特和日本马自达等汽车公司已将ADI用于制造汽车发动机曲轴。在我国,南京理工大学与山西淮海机器厂联合试验高韧性ADI代替低合金锻钢生产轿车发动机进口的368Q三拐曲轴,通过一系列证明,主轴颈和连杆轴颈磨损量远低于机械部标准,其力学性能为 $R_m=940\text{MPa}$ 、 $A=115\%$ 、 $\alpha_k=126\text{J/cm}^2$ 。一汽铸造研究所同大连柴油机厂合作进行CA498增压发动机曲轴的ADI材料试验。用ADI代替锻钢制造汽车曲轴,可胜任大功率增压柴油机的服役条件,其成本具有显著优势。

(3) 其他汽车零件。欧洲Jot公司开发了载货汽车用ADI差速器十字轴,取代渗碳钢,制造工序从10道减到2道,与钢-钢相比,ADI提高了十字轴的滑动性能,磨损明显减少,并降低成本。

ADI在汽车底盘轻量化的应用:如用于一汽解放载货汽车、北奔载货汽车底盘零部件,控制臂改用ADI后质量由54kg减少到41kg,减重率为24%;载货汽车平衡悬架改用ADI,经等温淬火处理后的力学性能要求: $R_m \geq 1050\text{MPa}$, $R_{eL} \geq 750\text{MPa}$, $A \geq 7\%$, 硬度302~375HBW, 冲击吸收能量为80J。改用ADI后平衡悬架质量由89kg减轻为53kg,减重率40.4%,按年产5万

辆汽车计算，可节约铸铁1.8万吨，节约标煤1.26wt。

因ADI的密度是铝的2.5倍，刚度是铝的2.3倍，而单位质量的铝平均成本大约是ADI的2~3倍以上，轻型载货汽车拖车上使用的轮毂采用ADI制造，比相应的铝制轮毂轻2%，成本降低约30%。

3.ADI热处理设备

生产ADI件的关键技术是大批量生产的等温淬火工艺和连续式生产线。目前国内外已有专业热处理设备厂家生产推送式、立式、网带式、箱式等温淬火球墨铸铁专用机组（生产线），从而进一步提高了ADI产品质量和生产效率，降低了制造成本。如德国Ipsen公司TQA型盐浴等温、分级淬火生产线，可用于大批量ADI件的贝氏体等温淬火生产。

低淬透性钢及其应用

低淬透性钢零件采用深层感应淬火方法，代替低合金钢的渗碳淬火，可以大大缩短工艺周期，节电约60%，降低处理成本约50%，节约Ni、Cr等合金元素，从而可取得较大的节材效果。同时，通过对钢材淬透性能的控制，以实现感应加热时获得均匀的表面硬化层。对某些零件采用低淬透性钢和限制淬透性钢进行感应淬火能使零件获得优良的使用性能。

表13为东风汽车集团公司60Ti钢传动十字轴感应加热性能试验结果。与20MnVB钢渗碳淬火十字轴性能比较，60Ti钢传动十字轴感应淬火的弯曲疲劳寿命、扭转疲劳寿命、静扭强度均有显著提高。

用低淬透性钢55Ti、60Ti、65Ti及70Ti制作齿轮，经高频加热淬火后获得良好的力学性能，可部分代替汽车承受较重负荷的渗碳淬火齿轮。

（1）低淬透性钢齿轮的感应淬火工艺参数。低淬透性钢齿轮感应加热频率的选择可参考表14；淬火温度一般控制在830~850℃，功率密度一般采用0.3~0.5kW/cm²；淬火

冷却介质压力一般选择0.7MPa，单位面积流量<0.12L/cm²。

（2）在汽车制造上的应用与效果。俄罗斯生产的载货汽车最终传动齿轮、转向节等零件（见表15），原采用渗碳与调质工艺处理，不仅生产周期长、能耗大，而且淬火畸变大。采用低淬透性钢进行感应淬火处理，不仅可以缩短周期，降低能耗，而且

表13 60Ti钢传动十字轴感应加热的性能试验

材料	弯曲疲劳寿命 (×10 ⁶)	扭转疲劳寿命 (×10 ⁴)	静扭强度 /N·m	磨损量/ (×10 ⁻³ mm ²)
20MnVB渗碳	1.855	8.9	9741	30
60Ti感应淬火	5.0	60.4	11321	29.9

表14 低淬透性钢齿轮感应加热频率的选择

齿轮模数/mm	适合钢种	推荐频率/kHz
3~4	55Ti	30~40
5~6	60Ti	8
7~8	60Ti	4
9~12	70Ti	2.5

表15 低淬透性钢齿轮、转向节在载重汽车上的应用

零件类型	钢号与工艺	
	原工艺	新工艺
后桥圆柱及圆锥齿轮	30 X Γ T (30CrMnTi)、 20 X H M (20CrNiMo)、 25 X H M (25CrNiMo) 等钢，渗碳	58 (55ΠΠ) 或ΠΠX4钢，感应淬火
模数>5mm的传动箱及变速器常用啮合圆柱齿轮	30 X Γ T、20 X H M、 25 X H M、15 X Γ H T A (15CrMnNiTiA) 等钢，渗碳	58 (55ΠΠ) 或ΠΠX4钢，感应淬火
转向节	40X (40Cr) 等钢，调质	47 Γ T 钢，感应淬火

提高使用寿命。

采用低淬透性钢带来的经济效益：代替渗碳或调质工序，大大缩短生产周期，从2~20h缩短至

0.5~3min，节省能源；节省贵重的合金元素Cr、Ni、Mo等，降低材料成本；提高零件使用寿命，减少备件。 **AUTO1950**

金荣植

高级工程师，副总工程师，黑龙江省热处理学会理事，中国热处理协会理事，已在专业杂志上发表论文90余篇，其中有5篇被美国工程索引(Ei)收录，1篇获中国热处理行业协会优秀论文奖，已出版7部热处理著作，获省、市科技成果各一项，获4项发明专利和2项实用新型专利。