浅谈低碳马氏体钢在石油机械行业中的应用

胜利石油管理局动力机械厂 （山东东营 257032） 次建格

在机械零件设计时，传统的机械设计人员普遍认为：中碳钢的性能优于低碳钢，因此在零件设计选材时常用中碳调质钢，对一般零件采用45钢，性能要求较高者采用40Cr、35CrMo等。其实低碳马氏体结构钢的性能在许多方面要远超过中碳调质钢，尤其是随着新型低碳马氏体结构钢钢种的不断开发，低碳马氏体钢因其优良的综合力学性能，其使用价值越来越显现出来，应用前景广阔。

1. 低碳马氏体钢的性能

一般中碳（合金）结构钢经通常的热处理后，其强度与塑性、韧性是一对互为消长的矛盾。为了追求高的塑性和韧性，采用调质处理，但势必牺牲强度；若想保持高强度水平，采用淬火+低温回火，又显得塑性、韧性不足。然而低碳马氏体结构钢若淬成位错板条马氏体+板条相界残余奥氏体薄膜+板条内部自回火或低温回火析出的细小分散碳化物，则可实现强、韧、塑性的最佳配合。

（1）力学性能　现有的低碳（合金）钢，经过不同的淬火介质淬火，获得低碳马氏体后，可以满足机械制造工业中不少零件的服役要求。表1列出了常用钢种在低碳马氏体状态下的常规力学性能。

表1　典型低碳马氏体型结构钢的常规力学性能

钢号	状态	硬度 HRC	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ_5 (%)	ψ (%)	a_K /J·cm^{-2}
15	940℃淬 10%盐水, 200℃回火	36	940	1140	9.3	39	59
20	910℃淬 10%盐水, 200℃回火	44	1310	1530	11.1	45	41
16Mn	900℃淬 10%盐水, 200℃回火	45	1220	1440	11.4	40.1	49.8
20Mn	880℃淬 10%盐水, 200℃回火	44	1260	1500	10.8	42.5	95
20MnV	880℃淬 10%盐水, 200℃回火	45	1245	1435	12.5	43.3	89～126
20Cr	880℃淬 10%盐水, 200℃回火	45	1200	1450	10.5	49	≥70
20CrMnTi	940℃淬 10%盐水, 200℃回火	45	1310	1510	12.2	57	80～100
20CrMnMo	880℃淬油, 200℃回火	45	1315	1575	13	57	93～107
15MnB	880℃淬 10%盐水, 200℃回火	43	1169	1390	14.8	63.9	112
15MnVB	880℃淬 10%盐水, 200℃回火	43	1133	1353	12.6	51	95
20MnVB	870℃淬 10%盐水, 200℃回火	45	1245	1435	12.5	43	80
25MnTiB	850℃淬油, 200℃回火	45	1330	1535	12.5	54	96
20SiMn2MoVA	900℃淬油, 250℃回火	45	1238	1511	13.4	58.5	160
25SiMn2MoVA	880℃淬油, 250℃回火	45	1378	1676	11.3	51	68
20Cr2Ni4A	880℃淬油, 250℃回火	44.5	1192	1437	13.8	59.6	80

数据充分表明低碳马氏体钢静载下具有良好的强度、塑性和韧性的配合，即使含碳量提高到0.25%，这种优良性能仍然存在。

（2）低温冲击性能　低碳马氏体与中碳调质钢钢相比，其冷脆性倾向较小，低碳马氏体的冷脆转化温度 $T_c \leqslant -60 \sim -70$℃，而40Cr钢调质态为 $T_c = -50$℃，表2为低碳马氏体钢与中碳钢正火和调质态室温及低温冲击值的对比，突出显示了低碳马氏体比中碳钢正火态及调质态具有高得多的 a_K 值。因此，对在严寒地带室外工作的机件及低温下要求高强度和韧性的机件，采用低碳马氏体强化是很合适的。

（3）缺口敏感性　低碳马氏体钢不但在静载荷

表 2　低碳马氏体钢与中碳钢正火和调质态室温及低温冲击值的对比

钢　种	状　态	硬度 HRC	室温时 a_K 值/J·cm^{-2}	-50℃时 a_K 值/J·cm^{-2}
15MnVB	低碳马氏体	38～41	90	70～80
40Cr	调质态	33～38	70	≤40
20SiMn2MoV	低碳马氏体	46	140	90

下具有低的缺口敏感性，而且还具有低的疲劳缺口敏感度。表 3 列出了试验结果并与中碳调质钢进行比较。

表 3　低碳马氏体钢与中碳调质钢疲劳缺口敏感系数比较

钢号	热处理工艺	疲劳极限/MPa		$K_f=\sigma_{-1}/\sigma_{-1n}$
		（光滑）σ_{-1}	（缺口）σ_{-1n}	
15	940℃淬火 200℃回火	505	405	1.25
20Cr	880℃淬火 200℃回火	575	463	1.24
40Cr	840℃淬火 600℃回火	496	340	1.46

从表 3 可看出，低碳马氏体钢与中碳调质钢相比，疲劳强度高，缺口应力集中系数和疲劳缺口敏感度低。

2. 低碳马氏体钢的热处理

低碳钢在截面很小并在剧烈冷却介质（如 10% NaOH 或 NaCl 水溶液）中淬火，可以获得完全的低碳马氏体组织。试样截面尺寸加大，心部硬度急剧下降，加入合金元素以后，可以显著改善低碳钢的淬透性，很多低碳合金钢在油中淬火可以获得很大临界直径。

低碳马氏体钢的淬火加热温度，通常可按 Ac_3 + 50℃左右选用，加热入炉温度一定要高，炉内停留时间不宜过长，保温时间可按（35～40s/mm）计算，从提高淬火强化效果考虑，适当提高加热温度（Ac_3 + 100℃）有利于奥氏体的均匀化。加热到两相区（铁素体 + 奥氏体区）淬火，由于未溶铁素体的存在，不仅强化效果差，而且低碳马氏体 + 铁素体两相组织的塑性、韧性也不好，因此低碳马氏体强化应避免在两相区低温加热淬火。

为获得最佳效果，低碳马氏体强化时，应尽可能采用冷却能力强的淬火介质，以提高零件心部马氏体的百分率。常用的淬火介质为 10% ～ 15% NaCl 水溶液（液温低于 35℃），这样低碳钢零件整个截面就能淬透。淬火后若有非马氏体产物出现，性能就会有所下降。

淬火后低温回火（200℃）以获得马氏体组织，低碳马氏体具有最好的强韧性。

3. 新型低碳马氏体钢的应用

由表 1 和表 2 可以看出，采用常用的低碳合金钢淬火获得低碳马氏体后，可以满足机械制造工业中大量常用零件的淬透性和使用性能要求，然而对于一些特定零件，在保证力学性能的同时，还要满足工艺性能的要求。下面简要介绍两种适应我国资源条件的低碳马氏体型高强度螺栓用钢 15MnVB（15MnB）和石油机械用钢 20SiMn2MoVA（25SiMn2MoVA）。

（1）15MnVB　此钢具有一般低碳钢所固有的优良的冷成形性与焊接性，热处理时脱碳倾向及淬火变形均较小，在油中淬透直径达 12～18mm（> 95% 马氏体）；在静负荷、疲劳及多次冲击载荷下，其缺口敏感性和过载敏感性都较低。此钢作为低碳马氏体淬火用钢，在淬火 + 低温回火后，不但具有高强度与良好的塑性、韧性相结合的特点，同时还具有低的冷脆转化温度。它采用了 Mn－V－B 的合金化措施，可保证全马氏体组织，其淬火 + 200℃回火状态的精细组织为典型的位错板条马氏体 + 板条相界残余奥氏体薄膜以及自回火和回火析出的弥散碳化物，既具有较高的强度，又具有良好的韧性（参见表 1），综合力学性能优良。因此它可用来取代 40Cr 钢调质处理，制造要求高强度的重要螺栓，这种螺栓的静强度比 40Cr 螺栓提高三分之一以上，从而使螺栓承载能力提高了 45% ～ 70%，而螺栓的缺口偏斜敏感性并未显著提高，可满足大功率柴油机和天然气机设计的要求。

在此基础上，为了节约成本，选用 15MnB，其过热敏感性小，晶粒度和低温韧性也都表现良好，用于标准件行业，可代替 35CrMo 制造高强度螺栓。由此可见，着眼于低碳钢工艺性能的优越性，利用低碳马氏体强化来开发高强度螺栓用钢是很成功的。

（2）20SiMnMoVA 和 25SiMn2MoVA　这是一种高强度、高韧性的低碳马氏体钢，这种钢具有较高的淬透性，在油中完全淬透直径达 60～80mm（> 95% 马氏体），在水中完全淬透直径达 110～120mm。此钢热处理工艺性能良好，在油中淬火变形及开裂倾向小，脱碳倾向低，这种钢通常在淬火及低温回火状态下使用。与 35CrMo 调质钢相比，其韧性、塑性大体相同，但强度显著提高，其中强度极限提高 50%；与 40Cr 调质钢相比，低温

冲击值高 5 倍，过载敏感性也比 35CrMo 及 40Cr 低。此钢作为新型的高强度、高韧性的结构钢，用于制作截面较大、负荷较重、应力状态复杂或低温下长期运转的机件，用于制造某些石油机械产品的重要零件，可大大提高石油钻机和大马力柴油机及天然气发电机在寒冷地区的使用寿命，并为有效截面 ϕ100mm 的机器零件提供了合适的低碳马氏体型钢种。

4. 在我厂的典型应用

我厂 190 系列柴油机及天然气机已广泛应用于石油勘探、动力船舶、燃气发电等部门。柴油机的使用环境决定了其零件用材相当优良，而低碳马氏体钢的优良性能使其在柴油机上得到了应用，其典型应用是连杆螺栓。

连杆螺栓是典型的尺寸小、重量轻而性能要求又很高的柴油机零件，其作用是把连杆盖紧固在连杆上，并承受着很大的往复运动质量惯性，连杆螺栓的断裂会引起极其严重的事故，不但连杆本身受到破坏，曲轴也可能弯曲，有时甚至会断裂。

我厂连杆螺栓选材为 20CrMnMo，是低碳马氏体钢种，兼顾高韧性、高强度，它淬透性好，热处理时过热敏感性小，在高温下仍能保持细小晶粒，无回火脆性，在油中临界淬透直径达 40～110mm。与 35CrMo 调质钢相比，其塑性、韧性大体相同，但强度显著提高，静载疲劳敏感性低，低温冲击值高，热处理淬火＋低温回火状态下，其强度指标和冲击值指标，远远超出我厂连杆螺栓使用要求，在中温回火状态下也能满足连杆螺栓的要求：$\sigma_b \geqslant 1030MPa$、$\sigma_s \geqslant 883MPa$、$\delta_5 \geqslant 10\%$、$\alpha_K \geqslant 78.5J \cdot cm^{-2}$。

5. 结语

低碳马氏体型结构钢当被用于代替中碳调质钢时，可大幅度减轻产品重量，延长使用寿命，改善工艺性能和提高产品质量，它的优良性能（尤其是低温冲击性能）在石油机械制造中显得越来越重要。对我厂来说，柴油机及天然气机的使用环境决定了零件选材的重要性，我们相信通过不断探索和实践，低碳马氏体钢将发挥越来越大的作用。

（20020918）

（上接第 11 页）

成形的压射压力和压射速度，改变模具的浇注系统及结构，增加浆料的充填速度，可利用浆料的流变和触变特性，降低其表观粘度，改善浆料的流动性。半固态浆料压铸成形时，增压、持压效果不明显。

镁合金半固态压铸对压铸模的模温要求严格控制。模温过低，易产生充填不足，出现流痕等缺陷；模温过高，将加剧表面的氧化，降低表面质量，甚至使半固态组织中的初晶发生畸变。实践中的模温控制器采用高温导热油在分布于压铸模模体中的若干流道内循环输送，通过高温导热油与压铸模之间发生的热交换，实现对压铸模温度的快速控制。该模温控制器具有加热和散热双重特性，便于模温保持在设定的温度点。

如图 3 所示，在 DCC280 卧式冷室压铸机上压铸成形的、壁厚仅为 11mm 的镁合金半固态压铸件。半固态浆料的温度控制在 575～595℃、固相率在 10%～45%，模温控制在 200～220℃，该铸件具有良好的成形性，可获得清晰的图案。采用半固态流变成形的压铸件强度比液态压铸件的强度增加 20% 左右。镁合金半固态流变压铸充形平稳，金属液氧化损失少，铸件尺寸精度高，孔洞类缺陷少，可进行热处理。但镁合金半固态流变压铸比液态压铸工艺要求严格。

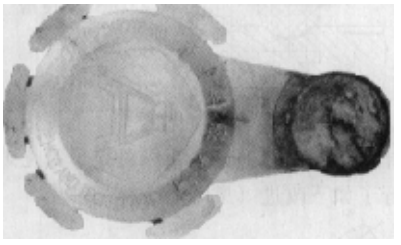

图 3　镁合金半固态流变压铸件毛坯

三、结语

随着我国经济的快速发展，市场对镁合金制品的需求越来越大。目前国内对镁合金及其成形技术的研究还很缺乏，我们应当把握住机遇，加大对镁合金及其成形基础技术的研究，加速我国镁合金成形装备及工艺技术的完善、配套，重视对镁合金后续加工处理技术工艺的研究，提升镁合金产品的档次，增强我国的竞争能力，把我国的镁资源优势发展成为镁合金的产品优势。半固态成形作为一种新型、先进的工艺方法，有其独特的优势，能有效的提高镁合金产品的质量，促进镁合金的发展，值得深入研究。

（20021230）