

马氏体型耐热钢螺栓

文 / 张先鸣

之热处理

马氏体型耐热钢 42Cr9Si2 (4Cr9Si2) 和 40Cr10Si2Mo (4Cr10Si2Mo) 制的汽车、摩托车发动机螺栓经过试验, 预先热处理采用低温球化退火, 较低的加热温度 880℃, 保温时间 1.5h 左右, 随炉冷却至 650℃ 出炉空冷, 以期获得理想的球状珠光体组织; 硬度可达 94~99HRB, 较适合冷镦加工; 螺栓调质热处理的硬度要求是 25~32HRC, 不同淬火温度下 42Cr9Si2 和 40Cr10Si2Mo 钢的组织不同。经不同加热温度淬火后的硬度随着淬火温度的提高, 淬火硬度先逐步提高后渐下降, 在 1,050℃ 时达到最大值。随着回火温度提高, 硬度下降, 淬火温度为 1,020℃ 时, 680℃ 回火较合适。经此工艺调质后, 螺栓为硬度 28~31HRC, 组织为细小的回火索氏体上分布细小碳化物颗粒。

概述

马氏体型耐热钢是指具有较好热稳定性和热强性的钢, 如 42Cr9Si2 和 40Cr10Si2Mo 钢在高温下具有较高的强度, 又称马氏体型不锈钢。

GB/T1221-2007《耐热钢棒》中的 42Cr9Si2 (4Cr9Si2) 和 40Cr10Si2Mo (4Cr10Si2Mo) 钢是发动机上重要紧固件材料, 工作时承受较高的机械负荷和热负荷。

汽车、摩托车发动机上的 M6~M12 连接螺栓, 要求有足够的高温强度和耐磨性能、良好的抗氧化性和抗燃气腐蚀性、较高的热传导率和较低的膨胀系数, 以及优良的冷热加工和焊接性能。发动机上的螺栓材料应按照螺栓的工作温度、工作环境及耐久性要求来选择, 目前多数选择马氏体型耐热钢 Cr-Si 钢、Cr-Si-Mo 钢, 材料牌号及化学成分见表 1。

表 1 马氏体型耐热钢材料牌号化学成分 (质量分数 W%)

材料牌号	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo
42Cr9Si2 (4Cr9Si2)	0.35-0.50	2.00-3.00	≤ 0.70	≤ 0.030	≤ 0.035	≤ 0.60	8.00-10.00	--
40Cr10Si2Mo (4Cr10Si2Mo)	0.35-0.45	1.90-2.60	≤ 0.70	≤ 0.030	≤ 0.035	≤ 0.60	9.00-10.50	0.70-0.90

注: 括号内是旧标准牌号

42Cr9Si2 和 40Cr10Si2Mo 钢中 Cr、Si 适量配合, 以获得高的热稳定性, 同时 Si 也显著地提高钢 Ac1 临界点 (42Cr9Si2 钢的 Ac1 约为 900℃、Ac3 约为 970℃; 40Cr10Si2Mo 钢的 Ac1 约为 880℃、Ac3 约为 940℃), 从而提高使用温度, 在 42Cr9Si2 钢的基础上加 Mo 元素, 不仅提高热强度, 同时也可消除回火脆性。本文将马氏体型耐热钢螺栓的热处理试验过程、试验结果分述如下:

螺栓的预先热处理

以摩托车发动机 M12 六角螺栓为例, 其生产工艺流程: 电弧炉冶炼→热轧方坯→热轧 φ12mm 盘条→退火→拉拔 φ11.5mm 成品丝→冷镦→770±10℃ ×2h 去应力退火→切六角边→搓丝→调质→成品。

退火工艺

42Cr9Si2 和 40Cr10Si2Mo 钢退火试样均取自 φ12mm 热轧盘条, 采用 4 种预先热处理工艺, 其工艺及所获得显微组织及力学性能列于表 2。

表 2 退火热处理工艺及结果

序号	热处理工艺	显微组织	抗拉强度 Rm / MPa	断后伸长率 A / %	断面收缩率 Z / %
1	热轧, 空冷至 700℃, 缓冷	马氏体基体 + 碳化物网	1615~1650	0	0
2	加热至 1050±10℃ 保温 1h, 空冷	马氏体 + 颗粒状碳化物	/	/	/
3	加热至 1050±10℃ 保温 1h, 炉冷至 650℃ 空冷	层片状珠光体	695~720	20~21.5	44~45
4	加热至 880±10℃ 保温 1.5h, 炉冷至 650℃ 空冷	颗粒球状珠光体	715~730	26.5~28	53~55

工艺评价

① 热轧，空冷至 700℃，缓冷

生产中，42Cr9Si2 和 40Cr10Si2Mo 钢材料终轧温度高于 850℃ 后，热盘卷，此时盘条往往已冷至 700℃ 左右，获得的显微组织为马氏体基本上分布着数量不等的碳化物网。抗拉强度可达到 1615~1650 MPa，硬度 ≥ 48HRC。实际生产中，表现为冷拔过程中拉断或者表面出现严重裂纹。

② 加热至 1050±10℃ 保温 1h，空冷

42Cr9Si2 和 40Cr10Si2Mo 钢含有较多的 Cr、Mo、Si 元素，可以使钢的共析温度升高；Cr、Mo 元素都是较强的碳化物形成元素，加热至 1,050℃ 保温 1h 后，仍有许多未溶碳化物，这些碳化物是以颗粒状存在（基体仍为空冷马氏体），极易成为复杂碳化物形核的质点。盘条空冷转变成马氏体，碳化物呈网状分布，进一步恶化了热轧材的力学性能。

③ 高温完全退火

为了改善 42Cr9Si2 和 40Cr10Si2Mo 钢的强韧性，必须从改善其组织形态入手，将热轧材加热至 1,050±10℃ 保温 1h，炉冷至 650℃ 出炉空冷。1,050±10℃ 加热远高于 42Cr9Si2 和 40Cr10Si2Mo 钢的 Ac3 临界点，在 1,050℃ 保温，材料已完全奥氏体化，在炉冷过程中，材料内部获得了片层状珠光体组织，空冷马氏体及碳化物网被完全消除，材料力学性能大大改善，抗拉强度 Rm 降至 695~720MPa，断面收缩率为 44~45%。但这种工艺存在不足，如表面氧化皮和脱碳层厚，金属损耗大及内部晶粒粗大等，加上用于大盘条退火的电炉很难达到高温，因此，**高温完全退火不是最佳工艺**。

④ 低温球化退火

将热轧试样加热至 880±10℃ 保温 1.5h，炉冷至 650℃ 出炉空冷，获得组织为颗粒球状珠光体。低温球化退火的加热温度选在近似 Ac1 点，并且要有足够的保温时间，其目的是要在温度区间内，使碳化物充分扩散，马氏体转变为奥氏体，同时也使网状碳化物溶解。为此，低温球化退火保温时间不应太短，且退火保温后降温速度越小越好，即退火炉要有较好的保温性能。

42Cr9Si2 和 40Cr10Si2Mo 钢球化退火获得铁素体基本上均匀分布粒状渗碳体，这些碳化物可以是多种类型，如 M23C6、M7C3，或者简单型 MC。它们有些稳定、有些非稳定。但总的来说，粒状形态的珠光体对材料的综合力学性能是有利的。具体

表现为抗拉强度较高 715~735MPa，塑性亦好，硬度可达 89~94HRB，由于 42Cr9Si2 和 40Cr10Si2Mo 钢合金元素的含量比较多，冷镦时产品容易产生裂纹，但冷镦加工还是可以的，只是难度大一些而已，要在冷镦模具方面加以关注；反之，具有片层状珠光体的材料强度低，韧性差。

试验小结

马氏体型耐热钢螺栓的制造过程中，首先要改善 42Cr9Si2 和 40Cr10Si2Mo 钢冷拔材的冷加工性能，提高成材率及产品品质，应着重关注以下环节：

- ① 控制终轧温度，防止终轧温度过高，对 $\phi 12\text{mm}$ 钢材应坚持低温轧制（小于 1,100℃），避免终轧温度过高而析出网状碳化物。
- ② 热轧后材料必须缓慢冷却，并及时退火（最好在 48h 内），防止热轧材在存放和运输过程中，因内应力过大形成表面裂纹或脆断。
- ③ 可采用低温球化退火工艺，较低的加热温度 880℃，钢中的珠光体转变成奥氏体。在后续冷却过程中，当温度降到 Ar1 点以下时，奥氏体以大量未溶碳化物为质点，形成球化体，并转变为球状珠光体，同时由于发生碳化物再结晶使晶粒细化。保温时间不要过长，大约 1.5h 左右，随炉冷却至 650℃ 出炉空冷，以期获得理想的球状珠光体组织。

螺栓的调质热处理

汽车、摩托车发动机上用 M6~M12 螺栓有六角头螺栓、双头螺柱，技术要求：按 GB/T3098.1 标准中的 8.8 级，硬度 25~32HRC、抗拉强度 (Rm) 800~980MPa、规定非比例延伸强度 (Rp_{0.2}) 640~790MPa、断后伸长率 ≥ 12%、断面收缩率 ≥ 52%。调质热处理工艺的制定是满足马氏体型耐热钢螺栓，在稳定的索氏体组织状态下使用。调质工艺见表 3。

表3 马氏体型耐热钢调质工艺

() 钢	淬火加热 /°C	加热介质	保温时间 /min	冷却介质	显微组织
	1,020~1,030	高温井式炉 (或盐炉)	20~40	油冷	马氏体 + 碳化物
	回火温度 /°C	加热介质	保温时间 /min	冷却介质	显微组织
	660±20	高温空气炉	60~80	水冷	回火索氏体 + 碳化物
() 钢	淬火加热 /°C	加热介质	保温时间 /min	冷却介质	显微组织
	1,010~1,020	高温井式炉 (或盐炉)	25~45	油冷	马氏体 + 碳化物
	回火温度 /°C	加热介质	保温时间 /min	冷却介质	显微组织
	690±20	高温空气炉	60~80	水冷或空冷	回火索氏体 + 碳化物

保温时间可按以下公式计算： $\tau = \alpha KH$ 。T- 保温时间， α - 系数；一般 0.35~0.45，min/mm；K- 装炉系数，高温井式炉（或盐浴炉）一般取值 3~4，网带炉加热时取 7~8；H- 工件有效厚度或直径，mm。具体系数取值可根据实际经验调整确定。需要指出的是，螺栓调质处理的淬火是在高温井式炉（通常在通氨分解气或氮气等保护气氛炉或盐浴炉）和高温回火炉中进行的，若批量较少，可考虑用网带炉加热，但由于网带的抗高温能力弱，易损坏、盐浴炉淬火清除残盐麻烦，尽量选择高温井式炉。

淬火后的钢晶粒度是一项重要的检查内容，一般要求 ≥ 6 级。不同淬火温度下 42Cr9Si2 和 40Cr10Si2Mo 钢的组织不同，当温度为 1,050°C 时，已有 < 6 级的晶粒，所以淬火温度不宜超过 1,050°C。经不同加热温度淬火后之硬度随着淬火温度的提高，淬火硬度先逐渐提高后逐步下降，在 1,050°C 时达到最大值。600°C 回火后组织中仍保留明显的马氏体位向，而在 700°C 回火后已呈等轴状，但碳化物有所长大。螺栓的硬度要求是 25~32HRC，企业标准规定为 28~32HRC，随着回火温度提高，硬度下降，淬火温度为 1,020°C 时，680°C 回火较合适。经此工艺调质后，螺栓为硬度 28~31HRC，组织为细小的回火索氏体上分布细小的碳化物颗粒。

根据 GB/T 3098.1-2010 标准中对 8.8 级以上螺栓、螺钉和螺柱的技术要求，检测冲击吸收能量 $K_{v2} \geq 27J$ 。对于 M12 螺栓采用 55×5×5mm 小冲击试样检测，但实际生产中 42Cr9Si2 钢材料的性能，冲击性能很不稳定，经常导致零件返修甚至报废。从冲击试样断口形貌观察，试样断口以韧性断裂为主，但局部亦存在沿晶断裂，回火水冷可以改善 42Cr9Si2 钢的冲击性能。

一般认为，引起第二类回火脆性的元素有 P、S、Sn、B 等；而促进第二类回火脆性的元素有 Ni、Cr、Mn、Si、C 等；抑制第二类回火脆性的元素有 Mo、W、V、Ti 及稀土元素。实践证明，

随着回火冷却速度减缓，产生第二类回火脆性的原因，造成 42Cr9Si2 钢试样的冲击性能明显下降；而 40Cr10Si2Mo 由于钢中增加了 Mo 元素，试样的冲击性能下降不明显，但这两种钢回火后较快冷却或油冷时，其冲击性能均较好，这是因为水冷或油冷过程中，试样温度很快降低到脆性转变温度以下，最大限度地避免了第二类回火脆性出现。

42Cr9Si2 和 40Cr10Si2Mo 钢在 450~650°C 回火时出现第二类回火脆性，高温回火后要快冷（水冷或油冷），冷却水温低于 80°C 为佳。42Cr9Si2 及 40Cr10Si2Mo 钢的螺栓使用温度分别可达 $\leq 700^\circ\text{C}$ 和 750°C 。

後语

马氏体型耐热钢螺栓的热处理所涉及到的面很广，尤其是对热轧盘条进行低温球化退火必须重点控制，否则后续加工会增加困难。不同的热处理工艺所得到的显微组织对 42Cr9Si2 和 40Cr10Si2Mo 钢的力学性能起着重要作用。由于全球资源和能源紧缺，轻量化、节能化、安全环保是未来汽车、摩托车发展方向。因此，在组装不可获缺的螺纹连接上，也提出了轻量化的要求，势必追求更高设计应力与更加合理的紧固技术。为了减少高强度紧固件氢脆断裂的危险，而采用耐热钢制造发动机螺栓，是使用最有效的措施之一。以上总结了多年的实际经验，以期能促进和指导汽车、摩托车发动机耐热钢螺栓的实际生产和发展。 □