

汽车紧固件热处理技术的新发展

张先鸣

一、热处理工艺对提高螺栓疲劳强度的影响

一直以来，汽车紧固件就以品种繁多、形式多样、规格不一的基本特征为主，其选择和使用涉及到结构分析、联接设计、失效与疲劳分析、腐蚀要求和装配方法，以及相关的产品质量控制与试验等，这些因素在很大程度上决定了汽车产品的最终质量与可靠性。

汽车高强度螺栓的疲劳寿命一直是受到重视的问题，数据表明螺栓的失效绝大多数是由于疲劳破坏引起的，且疲劳破坏时螺栓几乎无征兆，因此，重大事故很容易在产生疲劳破坏时发生。热处理能够优化紧固件材料性能，使其疲劳强度提高，针对高强度螺栓越来越高的使用要求，通过热处理提高螺栓材料的疲劳强度更显十分重要。

1. 材料疲劳裂纹的萌生

疲劳裂纹最先开始的地方称为疲劳源，其对螺栓微观结构组织很敏感，能在很小的尺度下萌生疲劳裂纹，一般在3～5个晶粒尺寸内，螺栓表面质量问题是主要的疲劳源，大部分的疲劳始于螺栓表面或者亚表面。螺栓材料晶体内部存在的大量位错和一些合金元素或杂质，晶界强度差异，这些因素都有可能导致疲劳裂纹萌生。研究表明，疲劳裂纹易发位置有：晶界、表面夹杂物或第二相颗粒、空洞，这些位置都与材料复杂多变的微观组织有关。如果热处理后能够改善微观组织，那么就能在一定程度上提高螺栓材料的疲劳强度。

2. 脱碳对疲劳强度的影响

螺栓表面脱碳会降低淬火后螺栓的表面硬度、耐磨性，并显著降低螺栓疲劳强度。GB/T3098.1标准中就有针对螺栓性能的脱碳试验，并规定最大脱碳层深度。在分析35CrMo轮毂螺栓断裂失效原因时，发现在螺纹与杆部交接处是因为存在脱碳层。Fe_3C在高温下能与O_2、H_2O、H_2发生反应导致螺栓材料内部Fe_3C的减少，从而增加了螺栓材料的铁素体相，降低螺栓材料强度，容易引发微裂纹。在热

按上述复合工艺处理的ϕ22mm×86mm锯齿形接链环破断负荷最低590kN，最高745kN，平均663kN。高于德国DIN 22258标准≥550kN的要求，故产品疲劳寿命倍增。

由于取消了接链锻件毛坯正火和淬火回火两道工序，采取了高温快速淬火，故生产效率提高了3倍，节省电耗60%，降低热处理生产成本50%。

作者简介：金荣植，高级工程师，哈尔滨汇隆汽车箱桥有限公司副总工程师，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100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9部热处理著作（如《热处理节能减排技术》、《实用热处理节能降耗技术300种》），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。

联系电话：13945141081，E-mail：RTK2006@163.com

MW 20170409

处理过程中控制好加热温度，同时必须采用可控气氛保护加热，才能够很好地解决这一问题。

3. 热处理对疲劳强度的影响

螺栓表面的应力集中会降低其表面强度，在受到交变的动载荷时，在缺口应力集中部位不断发生微变形和恢复的过程，且其受到的应力远大于无应力集中的部位，从而容易导致疲劳裂纹的产生。

紧固件通过调质改善显微组织，并具有优良的综合力学性能，可以提高螺栓材料的疲劳强度，合理控制晶粒尺寸以保证低温冲击吸收能量，也能获得较高的冲击韧度。合理的热处理细化晶粒，缩短晶界距离能阻止疲劳裂纹的产生，在材料内部如果存在一定量的晶须或第二相颗粒，这些加入的相便可以在一定程度上阻止驻留滑移带的滑移，从而阻止了微裂纹的萌生和扩展。

二、热处理用淬火冷却介质与加工介质

汽车高强度紧固件在技术上有一系列特点：高精度等级；服务环境严酷，它将随主机一起常年经受严寒和极端温差的影响，承受高温、低温的侵蚀；静载、动载、超载、重载和环境介质的腐蚀，除受到轴向预紧拉伸载荷的作用外，还会在工作中受到附加的拉伸交变载荷、横向剪切交变载荷或由此复合而成的弯曲载荷的作用，有时还受到冲击载荷；附加的横向交变载荷会引起螺栓的松动，轴向交变载荷会引起螺栓的疲劳断裂，轴向拉伸载荷会引起螺栓的延迟断裂，以及高温条件下引起螺栓的蠕变等。

大量的失效螺栓表明，服役中为沿螺栓头部与杆部的过渡处断裂；沿螺栓杆部螺纹与杆部交接处被拉断；还有沿螺纹部分滑扣。金相分析：螺栓表面与心部有较多未溶铁素体，当淬火奥氏体化不充分，基体强度不够和应力集中是失效的重要原因。为此，保证螺栓截面淬透和组织均匀性是非常重要的环节。

淬火油的功能是将赤热的金属螺栓的热量迅速带走，使之降至马氏体转变温度以下获得高硬度的马氏体组织和硬化层深度，同时也要兼顾减少螺栓的变形和防止开裂。因此，淬火油的基本特性就是“冷却特性”，其特点就是高温阶段的冷速较快，而低温阶段冷速较慢，这一特性很适合合金结构钢≥10.9级以上高强度螺栓的淬火要求。

快速淬火油在使用中因产生热分解、氧化和聚合反应，从而导致冷却特性的变化，油中含有微量水分将严重影响油的冷却性能，造成淬火后紧固件光亮度下降，硬度不均，产生软点甚至开裂倾向。研究表明，油淬产生的变形问题部分是因油中含水造成的。此外，油中含水还加速了油的乳化变质和促进油中添加剂的失效。当油中含水量≥0.1%时，油受到加热时有可能使聚集在油槽底部的水达到沸点后，体积突然膨胀，易造成油溢出淬火油槽而引发火灾。

对于连续式网带炉使用的快速淬火油，根据3个月间隔试验所积累的淬火特性数据，有可能建立油的稳定性及淬火特性图，确定淬火油的合适使用寿命，预测与淬火油性能变化有关的问题，从而减少因淬火油性能变化造成的返工或废品损失，使其成为生产的一种常规控制方法。而淬透深度直接影响着热处理后螺栓的质量，当材料的淬透性较差，冷却介质的冷速较慢而螺栓尺寸又较大时，淬火时螺栓心部不可能全部淬成马氏体组织，降低了心部区域的强度水平，尤其是屈服强度。这对于沿整个截面承受均匀分布拉伸应力的螺栓而言，显然是非常不利的。淬透性不足降低了强度，金相检验发现，心部存在先共析铁素体和网状铁素体组织，说明需要增加螺栓的淬透性。众所周知，增加淬透性的两种方式，提高淬火温度，增加淬火冷却介质的冷却能力，都能有效增加螺栓的淬透深度。

好富顿公司在原中等冷速淬火油Houghto-Quench G的基础上特别开发快速淬火油Houghto-Quench K2000，进一步提高了其淬硬能力，尤其适合使用在紧固件的淬火冷却上，能获得满意的淬透深度。

快速淬火油的蒸汽膜阶段短，也就是油的高温阶段冷却得快，这一特点有利于10B33、45钢制造的≤M20螺栓、M42螺母获得较深的淬硬层，而对于SWRCH35K、10B28钢则减薄为≤M12螺栓、M30螺母才能保证心部硬度与表面硬度有较小的差异。从冷却速度分布上分析，除中、高温阶段要求冷却得快以外，油的低温冷却速度高低对获得淬硬层深浅作用更大，低温冷

却速度越高，淬硬层往往越深。这对于高强度紧固件整个截面均匀承受载荷，要求在淬硬状态下，回火前获得约90%的马氏体组织，十分有利。考核的指标有闪点、黏度、酸值、抗氧化性、残碳、灰分、油泥、淬火冷却速度、淬火光亮性等近20多个指标。

对于较大规格螺栓还是以PAG淬火冷却介质为主，满足大部分产品的淬火要求， PAG淬火冷却介质在马氏体转变区处于沸腾阶段，冷却速度大且有较大风险，但可以通过浓度调整后，确定关键指标300℃左右的冷速。在这个温度点的冷速越低，防止淬裂的能力就越强，适用的钢种就多。在使用过程中的对流冷速稳定性，是保证淬火质量最重要的因素。

在早期失效螺栓的试样上，还可见在断裂螺栓靠近断口的螺纹上均存在着裂纹缺陷，主要是螺栓的滚压工艺不当，在辗制螺纹的冷成形过程中金属塑性流变汇合后而折叠所致；在螺纹牙底也可见存在深浅不一的微裂纹，加工积屑瘤的形成产生了应力集中区。GB/T5770.3—2000《紧固件表面缺陷螺栓、螺钉和螺柱特殊要求》标准规定，对于承受应力的螺栓螺纹中径以上深度不大于螺纹牙形高度的1/4折叠是允许的；螺纹牙底的折叠和积屑瘤是不允许存在的缺陷，而折叠是螺栓断裂的主要原因之一。使用好富顿公司极压润滑剂进行螺栓螺纹加工，能够有效防止积屑瘤，减少应力集中，从而有助于提高螺栓的疲劳寿命。

三、汽车紧固件的表面防护及技术发展

汽车上的紧固件，尤其是紧固螺栓、管箍、弹性夹等在使用过程中处于及其恶劣的环境下，通常腐蚀比较严重，甚至由于锈蚀导致拆卸困难。因此，要求紧固件必须具有良好的耐蚀性。目前采用的比较普遍的方法是对其表面进行电镀锌、锌镍合金、磷化、发黑及达克罗等处理。由于对汽车紧固件表面涂镀层中的六价铬含量的限制，不符合环保指令标准，含有害物质的产品均不允许进入市场，这对汽车紧固件表面处理的创新能力提出了空前高标准的环保要求。

1. 水性锌铝涂层久美特

环保型新涂层技术——片状锌铝涂层久美特，恩欧富集团公司在30多年达克罗（DACROMET）表面防锈技术经验的基础上，经过多年的研究开发，研制出了完全无铬的表面处理新技术——久美特（GEOMET）。

防锈机理，久美特处理的皮膜结构也与达克罗处理的皮膜相同，金属片呈层状重叠，形成了利用硅系粘合剂结合起来的皮膜，从而使基材被覆盖起来。

久美特的优点：①导电性。高强度的金属薄片使得久美特的螺栓具有导电性。②油漆适应性。久美特可作为包括电镀在内的大多数油漆的底涂。③环保。水性溶液，不含铬，且无废水产生，无有害物质排放至空气。④优良的耐蚀性、只需6～8μm膜厚，就可以达到盐雾试验1000h以上。⑤耐热性。无机皮膜，并且皮膜不含有水分。⑥无氢脆工艺。无酸和电解的涂覆工艺过程，避免同普通电镀工艺一样产生氢脆。

摩擦因数的稳定对汽车紧固件装配至关重要。水性片状锌铝涂层针对摩擦因数的解决方案，在锌铝涂层的基础上，涂覆具有润滑功能的水性无机面涂层——PLUS，PLUS种类及摩擦因数范围见表1。

2. 电泳涂装技术

近年来，一些汽车公司的部分紧固件采用电泳涂装替代电镀后的钝化处理。电泳涂装的原理简单地来说，就是“异性相吸”，也就像磁铁一样。阳极电泳被涂螺栓在阳极，涂料带负电；而阴极电泳涂螺栓在阴极，涂料带正电。众所周知，电泳涂装机械化程度高、环保、漆膜具有优异的耐蚀性。水资源回收再利用，减少排放量；加强重金属回收减少排放；减少VOC（挥发性有机物）的排放；减少能源消耗（水、电、燃料等），符合环保要求前提下，降低成本并提高品质。

在汽车零部件及紧固件上已应用数年，电泳涂装工艺比较成熟，是取代电镀的产品，PPGElect ropolyseal紧固件专用电泳涂装料，EPll/SST 120～200h阳极电泳、EPlll/SST 200～300h阴极电泳、EPlV/SST 500～1000h阴极电泳、EP V/SST 1000～1500h阴极电泳；还有ZiNC Rich coating 富锌有机涂层（可导电）。

影响高碳铬轴承钢轴承热处理质量的因素

邹磊，侯奎，孙清汝，王锡樵

摘要：轴承是三大基础件之一，优秀的热处理质量是提高机械构件寿命的重要手段。影响轴承热处理质量的主要因素有：原材料的冶金质量、锻造工艺和预备热处理水平，以及最终热处理的设备、工艺和淬火冷却介质的选择等。对于中小型实体轴承而言，其热处理质量已经得到了充分的重视，但是要把轴承钢的潜力能够充分发挥出来，我们还要做很多认真的深入细致的工作。

关键词：高碳铬轴承钢；轴承；可控气氛；淬火冷却介质

一、轴承钢的冶金质量

近年来随着冶金技术的提高，在重要炼钢厂轴承钢的冶炼设备及工艺上已经完全达到了国际先进水平，从化学成分、非金属夹杂物等的控制方面都已达到了技术要求。现在供应的优质、高级优质、特级优质轴承钢都已满足了市场需求。对于一些特种供应的轴承钢来说已经完全达到国际先进水平范围，其轴承钢制产品已经应用于航空航天、

随着技术的发展，除具有优异的耐蚀性的阴极电泳涂装外，具有一定耐候性的阳极电泳涂装、边缘耐蚀性阴极电泳涂装等也在生产线上得到了实际应用。目前PPG的电泳涂料系列已得到多家汽车制造公司认可，将一系列规范采用统一标准，S424改为S451，如福特公司WSS-M21P41-A2，S451；通用公司GM6047 code G；克莱斯勒公司PS-7902 Mcthod C。

表1　PLUS种类及摩擦因数范围

PLUS种类	摩擦因数范围（ISO16047）
PLUS XL	0.06～0.09
PLUS L	0.08～0.14
PLUS VL	0.09～0.14
PLUS ML	0.10～0.16
PLUS M	0.12～0.18

采用电泳涂装的好处，有利于环保。电泳涂装采用水性涂料，钝化采用三价铬；提高产品的耐蚀性，卓越的附着力；无塞孔、不塞螺牙、膜厚均匀、一致的扭矩值；传统的电镀+钝化工艺，盐雾试验达到144h左右。采用锌系磷化+富锌底漆+阴极电泳涂装工艺后，盐雾试验可达到1000h以上，若采用电镀+阴极电泳涂装工艺，盐雾试验可达到500h以上（见表2）。

表2　几种膜层盐雾试验结果比较

工艺	Zn磷化+阳极电泳	Zn磷化+阴极电泳	Zn磷化+富锌底漆+阴极电泳	电镀+阴极电泳+面漆
盐雾试验/h	120	200～300	1000～1500	500～1000

四、结语

未来汽车紧固件发展将更加个性化，热处理工艺更加凸显服务特色，智能化、绿色化、轻量化技术都将扮演着重要角色。技术和装备的发展是先进制造业赖以发展的基础，发展空间还很大，要缩小与国外先进水平的差距，任务还很艰巨，任重道远。

作者简介：张先鸣，高级工程师，湖南冷水江天宝实业有限公司主任工程师，主要从事金属材料热处理工艺、检测和研究工作。

联系地址：上海宝山三门路750弄14号403室（200439）

联系电话：13564247440

MW 20170318