

机车车辆 紧固件的使用现状 及用钢发展



文 / 上海申通轨道交通研究咨询有限公司 张九高

螺纹连接在机车车辆中应用十分广泛。简述了机车车辆紧固件的使用现状和技术研发,紧固件的使用类别和材料,紧固件用钢的发展。分析了机车车辆紧固件的加工难点,根据紧固件断裂失效而影响车辆安全运行的问题,对紧固件性能提出了更高的要求,展望了紧固件用钢发展的研究前景。

螺纹连接在机车车辆中应用十分广泛,螺纹紧固件起到联接、定位以及密封等作用,是最常用的可拆卸连接,其中螺栓的用量最大。随着各类机车车辆的大容量、大型化,以及功率转速的不断提高,机车车辆紧固件(螺栓、螺钉、螺柱)的工况条件更加苛刻,纵观各类行车失效案例,螺栓的断裂失效是影响机车车辆安全运行的巨大隐患。因此,对紧固件的性能提出了更高的要求。

1、紧固件的使用现状和技术研发

1.1 紧固件的使用现状

目前,机车车辆用紧固件(螺栓、螺钉和螺柱)普遍为8.8级及以上高强度紧固件。据统计,以碳素结构钢、合金结构钢连接螺栓为例,8.8级及以上的螺栓用量约为92%,其中10.9级及以上连接螺栓约为27%,部分零部件采用12.9级螺栓连接。

机车紧固件在技术上有一系列特点:高强度、高精度等级;服务条件严苛,它将随主机一起常年经受酷暑严寒和极端温差的考验,承受高温、低温的侵蚀;功率高,最高时速达到350km/h;速差大、震动、腐蚀和重载等特质;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而在环境介质的作用下,轴向拉伸载荷会引起螺栓的延迟断裂,以及极端低温条件下冷脆性或高温条件下引起螺栓的蠕变等。

近年来,对影响机车车辆安全运营的紧固件断裂失效案例分析,涵盖了高强度螺栓的疲劳断裂、塑性断裂、脆性断裂三大类型。从人、机、料、法和环五大因素分析,造成螺栓断裂失效的因素主要有以下几种原因。① 螺栓材质不良,钢材非金属夹杂物严重,成为疲劳裂纹源;② 螺栓制造工艺不合理,造成螺栓机械性能不符合标准要求、或螺栓制品具有原始裂纹,使用时扩展断裂;③ 设计选择的螺栓满足国标要求,但疲劳强度难以满足实际工况需求。螺栓连接设计不科学,无法达到紧固扭矩。

1.2 紧固件的技术研发

机车车辆每组车厢使用大量的紧固件,数量不少于25000个。当今技术研发的重点是高强度化和提高质量。紧固件的高强度化可减轻紧固件重量和相应部件的重量,这将是今后紧固件长期的研发课题,在提高质量方面最需要解决的问题是防止廉价高强度钢材紧固件的延迟断裂。

① 紧固件高强度化

提高紧固件的强度,可以使紧固件减少使用数量,缩小直径、减轻重量,但需要解决抗拉强度达到1100Mpa、屈强比大于90%的螺栓发生延迟断裂和疲劳断裂的问题。因此,高强度螺栓用钢的开发非常重要,高强度螺栓制造技术也要同时进行。

② 紧固件的小型轻量化

在不损失紧固性能的前提下,对小型轻量化的紧固件进行开发。为此,对紧固件用新材料和紧固件形状进行研究,同时也对难加工材料的加工方法进行开发。

③ 紧固和防松弛技术

为使紧固件牢固地紧固在部件上,防止因松弛发生事故,对紧固技术和防松弛技术进行研究。由于不认真安装紧固件,导致紧固性下降引发大事故的情况不断发生,所以不能掉以轻心。紧固件的容易安装和安全使用是两个完全不同的概念,发挥紧固件紧固作用的关键在于正确的安装作业,因此必须不断对紧固设计优化和强化紧固作业的施工方法开发。

④ 新材料利用

对重要连接部位如悬挂部位、齿轮传动箱与牵引电机连接高强度螺栓,采用微合金化Cr-Mo-V、Cr-Mo-V-Nb高强度冷镦钢等新材料,在大气环境下使用的紧固件采用耐热、耐腐蚀的马氏体不锈钢、奥氏体-铁素体双相不锈钢。

2、紧固件的使用类别和材料

按机车车辆及其零部件设计准则,螺栓连接的分类划分,螺栓连接失效时可能发生的危险定义为三个风险等级。风险等级不同,对螺栓连接的尺寸、安装和文件记录以及安装时所用的工具提出的要求也不相同。三个风险等级依次为:风险等级H(高),螺栓连接发生故障失效时,可能导致机车车辆运行危险或危及人身安全。风险等级M(中),螺栓连接发生故障失效时,可能导致机车车辆发生功能性故障。风险等级L(低),螺栓连接发生故障失效时,最多导致乘客或乘务员感觉不舒适。为此,对连接各部位各类紧固件的选材十分重要。

各类机车车辆使用的标准螺栓为8.8级,多数为ML35、45、ML35B、ML35MnB、10B28、10B33等碳素钢、碳硼钢。由于碳硼钢价格较低,原因是B的含量很少,可以使钢的碳当量很低,可省略加工前的球化退火;为了加固螺栓连接,标准中现在原则上仅使用高强度螺栓(螺钉)材料,这样还可以减少所用螺栓的种类的数量。正是上述原因,国内外标准中不再含有强度低于8或8.8的材料替代。对于重要连接部位或齿轮传动箱与牵引电机连接的8.8级螺栓,采用42CrMoE、18Cr2Ni4WE、25Cr2MoVA等合金钢。高性能级紧固件10.9、12.9级螺栓必须是合金钢制品,与8.8级螺栓不同之处是在钢中添加适量的Cr、Mn、Mo、Ni、B等合金元素可明显提高钢的淬透性和强度,还可改善钢材的固溶强化、弥散强化和细晶强化等冶金特性。

钢材通过加入少量的V、Nb等微量元素形成弥散细小的氮化物、碳化物或氮、碳化物或氮碳混合物,可起到弥散强化和晶粒细化效果,而这些弥散物通过增加晶界密度和位错可改善高强度螺栓的冲击韧度;且降低了P、S等导致延迟断裂的有害元素含量,并且在拉拔过程中使用无渗磷润滑涂层。12.9级螺栓钢中必须添加V等碳化物析出元素俘获钢中氢,提高抗延迟断裂性,使之无害化,螺栓的紧固能力进一步提高。

钢中合金元素含量越高,其淬透性以及强度也就越高,但相应的生产成本也明显增加;碳硼钢由于合金成本方面的优势具有重要的发展潜力。此外,热处理淬火介质的冷却能力越大,淬硬层越深;而为了保证高强度螺栓在调质淬火处理时,不产生明显的热处理变形,又要求钢中的合金元素含量应控制在合理的范围内,且淬火介质能力也受到一定的限制。严格控制碳含量及合金元素含量的波动范围,可以实现均匀的淬透性,并明显降低热处理变形。

高性能级紧固件调质处理能大大提高材料的抗拉强度、规定非比例延伸应力、提高屈服比和冲击韧度,使材料具有强度和塑韧性的良好的配合。由于疲劳强度、冲击韧度的提高,在螺栓设计时就可以采用更小的材料截面,从而减少整车的整体重量,节省零部件占用空间和能量消耗。

常用的碳素结构钢、低合金结构钢,在GB/T6478-2015《冷镦和冷挤压用钢》和GB/T3077-2015《合金结构钢》中的ML35B、ML35MnB、18Cr2Ni4WE、40Cr、35CrMoA、42CrMoE、40CrNiMoA、35CrMoVE等钢只有通过调质处理才能充分发挥合金元素的作用,不调质就等于浪费了宝贵的合金资源。

3、机车车辆紧固件用钢的发展

随着机车车辆的轻量化,要求紧固件用钢具有更高的强度。冷镦碳素钢的强度级别较常用的700~900MPa级,低合金钢已提高到1000~1300MPa级,甚至要求提高到1400MPa级以上。除强度外,对紧固件用钢的其他性能也提出了较高的要求,如抗延迟破坏性能、耐蚀性、加工性能等。

目前低合金钢仍是主要的高强度螺栓用钢。低合金钢一般在中碳范围,从合金元素来看,有Cr系、Cr-Mo系、Cr-Mo-V系、Ni-Cr-Mo系等。从标准可看出低合金钢的应用范围是很广泛的,强度级别从700~1200MPa都可选用。当强度超过1200MPa时,低合金钢制造的螺栓延迟断裂现象十分突出。

从提高螺栓钢的冷镦性,改善钢质方面来讲,需要尽可能降低钢中杂质元素含量。降低S含量可提高钢的变形能力,降低P含量可降低钢的变形抗力,同时可减少P、S在晶界的偏聚而减轻晶界脆化。降低S含量还可以减少钢中的非金属夹杂物,改善钢的韧塑性。

降低钢中的P、S含量不仅可以改善钢的冷镦性能,还可以改善钢的耐延迟断裂性能。实践表明,S含量对45钢出现裂纹的倾向(出现裂纹的临界变形量)有很大的影响,降低S含量可使这种倾向大大减少,特别是当S含量降低到0.004%时,效果更明显。为此,GB/T3098.1-2010标准中,将8.8级及以上螺栓用钢P、S含量更改为0.025%max。

在高强度螺栓的实际生产及使用过程中,非金属夹杂物的类别及形态对高强度螺栓的疲劳性能有着较大影响。非金属夹杂物在钢中主要以氧化物和硫化物的形式存在。根据实际生产经验及相关试验规程,高强度螺栓材料的非金属夹杂物允许范围,根据GB/T10561-2005标准,A类硫化物类 ≤ 1.5 级、B类氧化铝类 ≤ 2 级、C类矽酸盐类 ≤ 1.5 级、D类球状氧化物类 ≤ 2 级、DS类单颗粒球状类 ≤ 0.5 级。

高强度螺栓属于带缺口零件,具有很高的缺口敏感性,容易在缺口集中部位处、杆与头部的过渡处或螺纹根部产生延迟断裂。耐延迟断裂的具体措施之一是细化晶粒。为此,近年来,国内外都在进行广泛的研究开发超细晶粒紧固件钢。如:日本住友金属的ADS系列,神户制铁的KNDS系列,中国钢铁研究总院的ADF系列钢等。

研究表明,当亚共析钢的原奥氏体晶粒因共析铁素体的超量析出而超细化至亚微米尺度时,随后发生的共析相变产物不论具有什么样的形态(包括片状)钢材均可直接承受冷镦成形。1300MPa级的高强度螺栓钢42CrMoVNB(ADF1),在42CrMo钢的基础上,通过降低S、P、Si、Mn的含量,添加微合金元素V、Nb,并增加Mo的含量,其综合力学性能有较大幅度提高,使用在机车牵引、传动上1300MPa级高强度螺栓,突破了最高设计只有12.9级螺栓的限制。而国外采用KNDS2、SNCM439钢(代替SCM440钢)制造1400MPa级螺栓,延迟断裂有明显改善。

4、机车车辆紧固件的加工难点

高速机车动力(牵引、传动等)系统高性能级紧固件选择10.9级,少量为12.9级。10.9级高强度螺栓,其硬度值34~38HRC,抗拉强度 R_m 1070~1170MPa,屈服强度 R_{eL} 940~1050MPa,断后伸长率 $A \geq 9\%$,断面收缩率 $Z \geq 48\%$,低温冲击吸收能量(-45℃)KV₂ $\geq 27J$ 。疲劳寿命 ≥ 450 万次,摩擦系数0.12~0.14,螺纹精度 $\leq 5g$ 。高性能级紧固件采用的钢是碳含量为0.30%~0.55%的低合金结构钢,在正常温度淬火后进行500~600℃间的高温回火,称为调质处理,获得的组织是回火索氏体,其中渗碳体呈颗粒状均匀分布。

高性能级紧固件较小规格冷镦螺栓生产工艺流程为:球化退火→冷拔→冷镦成型→淬火和回火→加工螺纹→表面处理;而较大规格温锻螺栓生产工艺流程为:冷拔→下料→温锻成型→六角整形→淬火和回火→加工螺纹→表面处理。高性能级紧固件需要经过球化退火和调质两道热处理,螺纹在热处理后滚牙或搓牙加工,使其强度级别达到10.9级及以上级。

对高性能级紧固件高强度螺栓而言,淬火组织的均匀性尤为重要。为确保高强度螺栓淬火时奥氏体化充分,淬火组织均匀且无未溶铁素体及非马氏体组织外,必须金相检测淬火马氏体组织的达到率约90%。

在紧固件标准方面,有关铁道工务用紧固连接的标准约有30余项,而有关机车车辆用紧固连接的标准则相对较少。TB/T3246—2010《机车车辆及其零部件设计准则螺栓连接》标准,从设计、安装、连接等系统的角度对螺栓连接做了规定。但是,针对机车车辆用紧固件的产品标准还很缺乏,目前主要只有6项,而针对高速机车车辆、动车组、大功率机车等用紧固件的铁道行业标准还是空白。

机车车辆紧固件材料基础技术研究十分薄弱,非标准紧固件无专用钢材牌号,小批量产量难以达到经济规模,且材料技术标准混乱,基础技术数据与行业统计数据贫乏。只有随之不断积累着技术和经验,期待机车车辆的未来发展。

如果是机车车辆牵引、传动高性能级紧固件,品质的可靠性参差不齐,对以自动化装配为主的机车车辆却是重大缺失。机车车辆紧固件必须具备“零缺陷”的要求,不良品率控制在60PPm以下,这个指标非常高,按照目前生产工艺,全过程全自动涡流检测筛选机或各类传感器的研发,对缺陷和裂纹增加探伤功能自动甄别,逐步达到“零缺陷”的终及目标管理,可能在今后2~3年内会得到实现。但投入代价较高,普及化尚需时日。

现在世界上一些著名的大型紧固件生产企业,都有自己的专用材料、专用技术。专用材料是根据产品所需的成分和要求,与钢厂联合共同开发研制,如日本神户钢厂就有针对连杆螺栓的专门冶炼SCM435钢。但是针对机车车辆紧固件,尤其是高速机车车辆牵引、传动高性能级紧固件材料至今仍然是空白。目前高速机车车辆用高性能级紧固件最高强度为12.9级,依据国外钢材标准,借鉴欧盟DIN EN10263-2:2002《冷镦和冷挤压钢线材、棒材和线材》,可以采用34CrMo4、42CrMo4、34CrNiMo6等牌号。目前1300 MPa、1400 MPa级螺栓短期内很难在高速机车车辆中应用,但材料设计思路在提高现有高性能级紧固件抗疲劳性能或抗延迟断裂性能方面可以提供借鉴。

机车车辆牵引、传动高性能级紧固件,使用的螺纹连接结构设计上应能保证维持所施加的预紧力。轴向预紧力过大或过小都会对螺纹连接产生不利影响。轴向预紧力过小,螺纹连接承载能力、防松性能均达不到设计要求;轴向预紧力过大,螺纹接触面应力值较大,容易引起螺纹变形、滑扣等机械损伤,降低螺纹连接可靠性。因此,为保证螺纹连接满足连接实际工作需要,必须确定合理的轴向预紧力范围。

机车车辆用高性能级紧固件的摩擦系数,主要取决于螺栓制造工艺和实际应用时装配工艺。我们在经过长期工作实践,10000次台架试验验证,确认摩擦系数与下列因素密切相关。

① 螺纹精度。由螺纹公差带和旋合长度组成,螺纹精度是螺纹加工质量的综合体现,同等条件下螺纹精度越高,摩擦系数越小。

② 紧固件表面粗糙度。包括螺纹表面粗糙度和支承面表面粗糙度,与紧固件生产中的冷镦作业工艺参数、螺纹制造工艺有直接关系。

③ 紧固件表面处理工艺。包括磷化、电镀和锌铝涂层。受表面处理层材料类型、局部厚度、转化工艺等因素影响,不同表面处理工艺得到的紧固件摩擦系数相差较大。

目前我国还无机车车辆螺纹紧固件紧固扭矩的国家标准,只有汽车行业标准和欧盟标准,缺乏自主知识产权和基础理论层面的技术支撑。

5、紧固件的发展与用钢的研究前景

机车车辆几乎不采用其他紧固方法(例如焊接、粘结)代替螺纹连接。原因是螺纹紧固的可靠性很高,并且已经紧固的螺纹也比较容易拆卸,即便于更换和维修。因此,提高紧固件的性能和性价比,比试图减少或取代紧固件的探索更有意义。

螺栓紧固后不松弛和容易拆卸是两个相反的特性。为了提高这两个特性,应不使螺栓锈蚀和黏结,为此,多年来我们在提高螺纹精度、采用涂装和表面处理技术以及改进紧固方法等方面开展了大量的工作。

为了提高紧固件的疲劳性能主要进行结构优化,如在车辆的牵引部位及动力总成部位的连接螺栓,由于螺栓承受振动冲击载荷,不仅要具有高的强度,且要具有良好的疲劳性能。在结构上需最大限度地改善螺栓连接结构中螺纹牙角的载荷分布和应力状态,主要从以下三方面入手,降低螺栓所承受的应力幅;减小螺纹牙底的应力集中水平;改善螺纹牙角上的载荷分布。

在紧固件成本方面,材料费占的比例最大,其次是加工费和热处理费。因此,为实现更高的性价比,需提高紧固件用料的成材率。在小规格螺栓制造中实现了螺栓头部的无飞边模锻成型和螺纹的滚轧成型,期待将这些技术扩大应用到大规模螺栓的制造上。

在紧固件用钢方面,机车车辆高强度螺栓,因一直存在的延迟断裂和淬透性问题,成为影响使用的瓶颈。目前,应改变部分关键紧固件依赖进口,受制于人的被动局面,随着机车车辆的快速发展,开发高精度、高强度、高可靠性的紧固件是现阶段的工作任务。从钢的淬透性方面入手,开发新型钢种或进行成分设计,用价格低廉B、Ti替代高价合金元素,加热后也可以进行充分冷却的热处理技术和非调质钢高强度螺栓。在抗延迟断裂性方面开发出的超高强度螺栓用钢,在技术上是可行的,但是价格仍然较高。对于机车车辆用高性能级紧固件12.9级螺栓来说,提高紧固件用钢的高纯净化、高均匀化以及高精细化的控制,以减少杂质元素,由此会降低延迟断裂的危险性,所以期待着开发出低成本、高可靠性的新型超高强度紧固件用钢。

□