

汽车转向横拉杆用钢的研究及应用进展

王利军^{1,2} 董庆^{1,2} 阮士朋^{1,2} 王宁涛^{1,2} 张鹏^{1,2} 王冬晨^{1,2}

(1 邢台钢铁有限责任公司, 邢台 054027; 2 河北省线材工程技术创新中心, 邢台 054027)

摘要 叙述了国内外常用冷挤压成型工艺的转向横拉杆用钢的应用现状及加工工艺, 介绍了横拉杆用普通调质钢、预调质钢及非调质冷锻钢产品的主要技术指标和对应生产的零件性能。生产实践表明, 相比普通调质钢 ML40Cr 和预调质钢 ESW90, 非调质冷锻钢 30MnVS6 生产的汽车转向横拉杆强度和塑性可达同等水平, 但冲击韧性明显偏低; 从化学成分、显微组织、非金属夹杂物及偏析四方面探讨了提升非调质冷锻钢强韧性的研究进展情况, 通过正火处理 30MnVS6 钢的 K_{V2} 冲击功由热轧态 62 ~ 67 J 提高至 108 ~ 115 J。

关键词 转向横拉杆 调质钢 非调质冷锻钢 强韧性 进展

Research and Application Progress of Steel for Automobile Steering Tie Rod

Wang Lijun^{1,2}, Dong Qing^{1,2}, Ruan Shipeng^{1,2}, Wang Ningtao^{1,2}, Zhang Peng^{1,2} and Wang Dongchen^{1,2}
(1 Xingtai Iron and Steel Co Ltd, Xingtai 054027;

2 Hebei Engineering Technology Innovation Center for Wire Rod, Xingtai 054027)

Abstract The application status and processing technology of cold extrusion forming steel for steering tie rod at home and abroad are described. The main technical indicators and the performance of the corresponding parts of ordinary quenched and tempered steel, pre-quenched and tempered steel and non-quenched and tempered cold heading steel for steering tie rod are introduced. Production practice shows that compared with ordinary quenched and tempered steel ML40Cr and pre-quenched and tempered steel ESW90, the strength and plasticity of automobile steering tie rods produced by non-quenched and tempered cold heading steel 30MnVS6 can reach the same level, but the impact toughness is significantly lower. The research progress of improving the strength and toughness of non-quenched and tempered cold heading steel is discussed from the four aspects of chemical composition, microstructure, non-metallic inclusion and segregation. By normalizing treatment the impact energy K_{V2} of steel 30MnVS6 increases from hot-rolled status 62 ~ 67 J to 108 ~ 115 J.

Material Index Steering Tie Rod, Quenched and Tempered Steel, Non Quenched and Tempered Cold Heading Steel, Strength and Toughness, Progress

汽车转向横拉杆是汽车转向机构中的重要零件, 它的质量直接影响到汽车操纵稳定性、运行的安全性及轮胎的寿命等。汽车转向横拉杆是联系左右梯形臂并使其协调工作的连杆件, 它在汽车行驶过程中反复承受拉应力或压应力, 如持久承受拉力、径向力和摩擦力, 再加上潜在的冲击载荷作用, 拉杆会出现磨损严重、弯曲变形, 甚至断裂。因此, 转向横拉杆一般都要求有一定的强度和高的抗冲击断裂性能。

最早的汽车转向拉杆是由无缝钢管焊接而成, 应力集中严重, 性能较差^[1]。随着制造业的发展, 车铣加工、温锻挤压成型、冷锻挤压成型等工艺先后应用到汽车转向横拉杆的生产中。车铣加工是将金属多余材料切除而得到所需尺寸精度的零件, 破坏了金属流线的完整性, 造成流线裸露或切段, 使零件耐磨性及耐腐蚀性降低; 原料棒材多采用温挤压成型工艺, 该工艺避免了车铣加工的不利影响, 且

提高了零件生产效率, 但仍存在毛坯尺寸精度低、材料利用率相对偏低问题; 目前汽车转向横拉杆普遍采用冷挤压成型, 其加工效率、材料利用率与冷挤压毛坯尺寸精度大幅度提高, 属于近净成型加工^[2]。随着冷锻工艺装备提升及钢材质量提升, 近年来, 非调质冷锻钢应用到汽车转向横拉杆的生产中; 采用微合金化控轧控冷生产的非调质冷锻钢在生产汽车转向横拉杆时, 进一步简化了横拉杆的生产工序, 省略了冷锻前的球化退火工序和冷锻后的调质处理工序, 实现节能降耗目的, 同时避免了调质冷锻钢热处理时的脱碳风险和淬火时的变形, 省去矫直工序。但采用非调质冷锻钢冷挤压成型时, 存在挤压力过高, 模具寿命短的缺点。目前, 关于汽车转向横拉杆的研究主要集中于其成型工艺、断裂失效分析及不同尺寸拉杆的屈曲性能等^[3-5]; Glisovi 等^[6]研究了路面不平度(路面类型)、方向盘扭矩、方向盘位移和车速等因素对转向系统横拉杆震动载荷的影响;

Hyunsoo, Shin 等^[7]研究了横拉杆操纵线控转向系统车辆稳定性及操纵性改善,分析了影响中心操纵性能的控制因素,为了提高车辆的稳定性,提出了变动比和主动转向控制算法。然而关于汽车转向横拉杆用钢的文献介绍较少,缺乏对原料钢材成分、组织及性能的系统梳理总结,基于此,笔者对目前普遍采用的冷挤压成型汽车转向横拉杆用钢进行对比分析,介绍了转向横拉杆用钢的代表牌号和生产工艺、材料主要技术指标对比情况以及提升非调质冷锻钢生产转向横拉杆的强韧性技术的研究进展情况,为国内汽车转向横拉杆用非调质冷锻钢的研发、生产及深加工工艺设计提供有益参考。

1 常用汽车转向横拉杆用钢

冷挤压用钢要求材料具有良好的塑性,较低的变形抗力和低的加工硬化敏感性。常用冷挤压成型工艺的转向横拉杆用钢按照其加工工艺不同,可以分为三大类:第一类为普通调质钢,也是目前应用最普遍的产品,代表牌号有 ML40Cr,也有少数在用 SCM435、SCM440、SWRCH45K;第二类为非调质冷锻钢,代表牌号为 30MnVS6 或 30MnVS6MOD,非调质冷锻钢 30MnVS6 或 30MnVS6MOD 来源于热锻用易切削非调质钢,通过成分微调并配合合适控轧控冷工艺,获得所需求的性能;第三类为预调质钢,即热轧盘条在冷锻前的改制过程中进行了调质处理,该产品主要为韩国生产,代表牌号为 ESW90。根据车型不同,横拉杆用钢常用规格范围为 $\Phi 15 \sim 25$ mm。

汽车转向横拉杆一般 HRC 硬度值要求 ≥ 25 ,较 8.8 级螺栓 HRC 硬度值下限 23 稍高,一般采用中碳或中碳合金冷锻钢制造。ML40Cr 作为中碳合金冷锻钢,其淬透性能满足现有尺寸转向横拉杆的要求,且回火后具有良好的综合性能,因此是目前应用最普遍的钢种。作为 ML40Cr 的替代产品,非调质冷锻钢 30MnVS6 通过 V 微合金化并配合控轧控冷工艺,获得良好的析出强化和细晶强化效果;另外,进一步降低了 C 含量和提高了 Mn 含量,从而保证热轧盘条在获得良好强韧性的同时具有良好的冷锻变形能力;为提升冷锻毛坯件的切削加工性能,通过控制 30MnVS6 钢中硫含量,形成的硫化锰夹杂物在钢切削加工时作为内部应力集中源,切屑易断,并在刀具与加工件之间形成润滑作用,降低了刀具的磨损,从而提高了钢的切削性能^[8]。ESW90 C 含量仅 0.18%~0.24%,通过硼微合金

化,显著提高了该钢的淬透性,较低的 C 含量不仅能保证硼提高淬透性的最大效果,满足转向横拉杆强度要求,同时也进一步提升了产品冷锻变形时所需的韧性。按照上述分类情况,可对上述三类钢生产转向横拉杆的工艺流程总结如下:

(1) 调质钢 ML40Cr: 热轧盘条→酸洗磷化→粗拉→球化退火→酸洗磷化→精拉→横拉杆冷锻成型→调质处理→(矫直)→机加工→表面处理。

(2) 非调质冷锻钢 30MnVS6 (或 30MnVS6MOD): 热轧盘条→酸洗磷化→拉拔→横拉杆冷锻成型→机加工→表面处理。

(3) 预调质钢 ESW90: 热轧盘条→除鳞→磷皂化处理→拉拔→调质处理→除鳞→磷皂化处理→拉拔→横拉杆冷锻成型→机加工→表面处理。

从三类钢种的深加工工艺流程可以看出,普通调质钢 ML40Cr 深加工工艺最为耗能耗时,且因热处理带来脱碳风险和淬火变形问题;非调质冷锻钢 30MnVS6 避免了上述调质钢存在的问题,但存在因冷锻原料强度高造成模具寿命降低问题;ESW90 则需要专门线材改制生产线,冷锻原料生产成本较高,且同样存在冷锻原料强度高造成模具损耗高问题。

2 汽车转向横拉杆钢的组织与性能

2.1 试验材料

试验用 30MnVS6 盘条生产工艺为:80 t 转炉冶炼→LF→RH→280 mm×325 mm 方坯连铸→开坯 160 mm×160 mm→抛丸、探伤、修磨→加热→高压水除鳞→控制轧制→控制冷却→精整→检验→打包。试验用 ESW90 钢生产工艺:转炉→LF→RH→连铸→方坯连铸→开坯 160 mm×160 mm→超声探伤、磁粉探伤→加热→控制轧制→控制冷却→卷取。

30MnVS6 精线及所生产的横拉杆、ESW90 精线及横拉杆、ML40Cr 生产的横拉杆样品均取自客户工业生产,三类钢试样化学成分实测结果见表 1 所示。

2.2 机械性能

规格为 $\Phi 19$ mm 非调质冷锻钢 30MnVS6 热轧盘条经拉拔改制成为 $\Phi 17.8$ mm 精线,其机械性能见表 2 所示。

从表 2 可以看出,非调质钢 30MnVS6 精线与预

表 1 典型汽车转向横拉杆钢种的化学成分 /%

Table 1 Chemical composition of typical steel grade for auto steering tie-rod /%

钢种	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	B	Ti	N
ML40Cr	0.40	0.19	0.75	0.008	0.007	1.00	-	-	-	-
30MnVS6	0.28	0.55	1.39	0.018	0.019	0.02	0.011	-	-	0.017
ESW90	0.19	0.21	0.87	0.018	0.004	0.03	-	0.001 8	0.031	-

表2 30MnVS6与ESW90钢精线机械性能

Table 2 Mechanical Properties of 30MnVS6 and ESW90 steel fine wire

钢种	规格/ mm	HV 硬度值	R_m / MPa	$R_{p0.2}$ / MPa	A/ %	室温 K_{V2}/J
30MnVS6	Φ17.8	279	933	815	12.5	47,50,52
ESW90	Φ17.8	284	919	834	13.5	160,166,164

表3 30MnVS6与ML40Cr钢生产的转向横拉杆机械性能

Table 3 Mechanical Properties of Steering Tie Rod produced by 30MnVS6 and ML40Cr steel

钢种	拉断力/ kN	屈服力/ kN	横拉杆不同部位 HRC 硬度值		
			Φ16.8 mm	Φ14.2 mm	Φ12.9 mm
30MnVS6	77.8,78.3	81.3,80.5	28.2	30.5	32.4
ML40Cr	80.4,80.0	82.4,78.3	28.9	29.8	29.4

调质钢 ESW90 精线在强度、硬度及断后伸长率基本相当的情况下,预调质钢 ESW90 具有非常高的冲击功,这有利于汽车转向横拉杆在汽车行驶时能承受更大的冲击而不发生断裂;且预调质钢具有更高的屈强比,较高的屈服强度能避免零件在受力时过早变形。因此,预调质钢 ESW90 具有更好的综合性能。

规格为 Φ18 mm 非调质冷锻钢 30MnVS6 热轧盘条经拉拔改制成为 Φ16.5 mm 精线,然后采用冷锻工艺生产汽车转向横拉杆;ML40Cr 生产转向横拉杆,通过调质处理得到所要求力学性能,调质处理工艺为:860 °C 保温 90 min,油淬火,560 °C 保温 90 min 回火。其生产的转向横拉杆机械性能见表 3 所示。

通过控制热轧盘条强度和设计合理拉拔工艺以控制强度增量,可以实现非调质冷锻钢生产的转向横拉杆强度与调质钢件强度一致,转向横拉杆各部位由于冷锻变形量不一致,存在硬度不一现象,但因此导致的硬度不一现象对零件最终使用无影响。

2.3 显微组织

非调质冷锻钢 30MnVS6 生产的转向横拉杆件最终显微组织为变形的细晶铁素体+珠光体组织,细晶铁素体+珠光体组织兼具有高强度和良好冷变形能力,能满足非调质冷锻钢生产转向横拉杆时所需的高强度和冷锻性能;调质钢 ML40Cr 和预调质钢 ESW90 生产的转向横拉杆最终显微组织均为回火索氏体,回火索氏体具有良好的综合机械性能。

除易切削钢外,钢中非金属夹杂物的存在,通常被认为是有害的。非金属夹杂物对钢的力学性能的影响,主要表现在对钢的强度、塑性、韧性、疲劳等诸多性能的影响。这些影响不仅取决于夹杂物的类型,还取决于夹杂物的形态、尺寸、数量以及分布规律。因此,冶炼过程中应采取各种技术措施尽可能

降低其含量,并合理控制夹杂物的类型、形态、尺寸及分布等,以使其有害影响降到最低。通过对比分析了预调质钢 ESW90 和非调质冷锻钢 30MnVS6 的非金属夹杂物,由于 ESW90 为铝脱氧含硼冷锻钢,为保证有效硼提高淬透性的作用,钢中加入了钛,该产品非金属夹杂物以不变形的 D 类和 D_s 类为主,大颗粒非金属夹杂物不利于冷锻变形,容易在大颗粒夹杂物与钢基体界面处萌生裂纹,能谱分析结果表明,该非金属夹杂物主要成分(质量分数)为 60.5% Al-35.3% O-2.8% Ti。

非调质冷锻钢 30MnVS6 采用低铝含量控制,并控制钢中氧含量处于较低水平,减少了大颗粒非金属夹杂物尺寸及数量,一般规定氧化物类非金属夹杂物累计特性值 $KO_3 \leq 25$ 。通过对市场上 30MnVS6 钢非金属夹杂物进行分析,结果见表 4 所示。

表4 非调质钢 30MnVS6 非金属夹杂物控制情况

Table 4 Non-metallic inclusions control in non-quenched and tempered steel 30MnVS6

扫描面 积/mm ²	夹杂物 总数	夹杂物面积 百分比/%	尺寸 >13μm 数量/个	最大尺 寸/μm	夹杂物主要类型

3 非调质冷锻钢的强韧性控制

非调质冷锻钢由于省略了冷锻前的球化退火处理和冷锻后的调质处理,避免热处理时脱碳风险和淬火变形问题,具有显著的经济效益,是汽车零部件用钢发展方向。与调质钢相比,非调质冷锻钢应用最大的难题在于材料变形抗力高及材料韧性低问题,因此,研究并提升非调质冷锻钢的韧性对非调质冷锻钢的应用推广工作具有重要意义。影响非调质冷锻钢韧性的材料本身因素有:化学成分、晶粒大小、显微组织等^[9]。

3.1 化学成分

目前转向横拉杆用 30MnVS6 为铁素体-珠光体型非调质冷锻钢,钢中间隙固溶原子 C、N 含量与分布对铁素体-珠光体型非调质冷锻钢具有重要影响。间隙原子的存在,将引起基体点阵发生强烈的畸变,致使钢中裂纹的形成和扩展至断裂所需的能量降低,使冲击韧性和断裂韧性大幅下降。增加钢中 C 含量,使铁素体量减少,珠光体量增多,钢的冲击值随珠光体量的增多呈指数下降。

对 Mn、Cr、Si 在钢中对组织结构的影响可以得出如下结论^[10]:Mn、Cr 元素含量增加,利于珠光体

数量增加,同时减小珠光体片间距,使渗碳体变薄,而珠光体片间距越小,裂纹产生的能量越大,因此有利于提高裂纹产生能量,减小裂纹扩展能量,并最终提高冲击韧性;Si 在一定含量范围内有利于铁素体形成和均匀分布,从而提高裂纹扩展能量,提高材料的韧性。

为改善钢的切削性能,在钢中加入一定量 S,在加热阶段增加 S 的含量可降低奥氏体晶粒,在冷却阶段由于在珠光体形成前,奥氏体内大量的先共析铁素体在 MnS 夹杂处形核长大,会增加晶内铁素体数量,细化晶粒,其原因是在冷却阶段,VC 在 MnS 质点旁的 VN 上析出,VN 起着 VC 析出核心的作用,VC 成为晶内铁素体形核的核心。另外,研究还发现在足够的吹氩时间保证下,提高非调质钢的 S 含量能增加 MnS 的颗粒数,但对 MnS 的尺寸没有明显的影响^[11]。杂质 P 含量对钢的韧性也有影响,一般来说,P 元素含量过高会降低钢的韧性,这主要与 P 易偏聚于晶界,降低晶界表面能,产生沿晶断裂,同时降低脆断应力有关。

微合金化元素可通过对奥氏体晶粒尺寸和固溶 C、N 含量的影响而对韧性起作用,Nb、V 微合金化配合控轧控冷工艺,可以显著细化铁素体-珠光体组织,从而可明显提升钢的冲击韧性。固溶 Al 对强度和韧性几乎没影响,但以 AlN 形式存在可细化晶粒,改善钢的韧性。

3.2 显微组织

对于铁素体-珠光体型非调质冷锻钢,在钢的化学成分一定条件下,影响钢种强韧性的因素有铁素体、珠光体相对百分含量、尺寸大小、珠光体片层间距、铁素体形态、显微组织的形变情况等。裂纹扩展能量主要受控于铁素体百分数和铁素体本身的韧性,铁素体含量越高,裂纹扩展能量就越高,因此铁素体百分含量增加有利于提高材料的韧性。珠光体相变是按扩散机制进行的。过冷奥氏体在冷却过程中分解时,珠光体的形成是在一个温度范围内进行的,在高温形成的珠光体比较粗,低温形成的珠光体比较细。非调质冷锻钢热轧盘条实际生产时,一般采用相对偏低的吐丝温度,并在后续冷却时采用先快冷后缓冷的冷却方式,以获得良好的强韧性和

冷锻性能。

钢的晶粒尺寸,包括钢的奥氏体及其转变产物的晶粒尺寸、亚晶粒、位错胞状结构等,都对钢的韧性产生较大影响^[12]。根据 Hall-Petch 理论可知,晶粒越细小,韧脆转变温度越低,材料的韧性越好。晶粒细化提高材料韧性的主要原因有两点,(1)晶粒细化使单位体积内晶粒数目增多,塑性变形可分散在更多的晶粒内进行,塑性变形越均匀,内应力集中越小;(2)晶粒细化使晶界总面积增加,致使裂纹扩展的阻力增加,推迟了裂纹萌生,晶界总面积的增加还可使晶界上的杂质浓度降低,减轻沿晶脆断的倾向^[13]。

本研究对 30MnVS6 钢热轧盘条进行正火处理,正火处理工艺为:由室温经 70 min 加热至 860 °C 并在此温度下保温 75 min,保温结束后取出试样进行空冷。原热轧态试样和正火处理后试样的显微组织见图 1 所示。由图 1 可知,正火处理后试样显微组织仍以铁素体和珠光体为主,正火试样铁素体、珠光体晶粒明显细化,铁素体晶粒度达到 9.5 级以上;采用图像处理软件,统计了两种状态试样显微组织中铁素体含量,正火态试样铁素体百分含量约为 55%,而热轧态试样仅约 51%。

对热轧态试样和正火态试样进行硬度和冲击功测试,结果见表 5 所示。正火态试样硬度较热轧态试样 HRC 硬度值平均低约 1.8,但正火处理明显提升了冲击功,正火态试样室温冲击功较热轧态试样平均高 47 J,冲击功的提高主要与正火试样铁素体含量升高和铁素体、珠光体晶粒细化有关。

表 5 热轧态和正火态 30MnVS6 钢的硬度和冲击功
Table 5 Hardness and impact energy of hot-rolled and normalized steel 30MnVS6

工艺	HRC 硬度值	冲击功 KV ₂ /J
热轧态	21.1, 19.9, 20.5	62, 67
正火态	18.4, 18.7, 19.1	108, 115

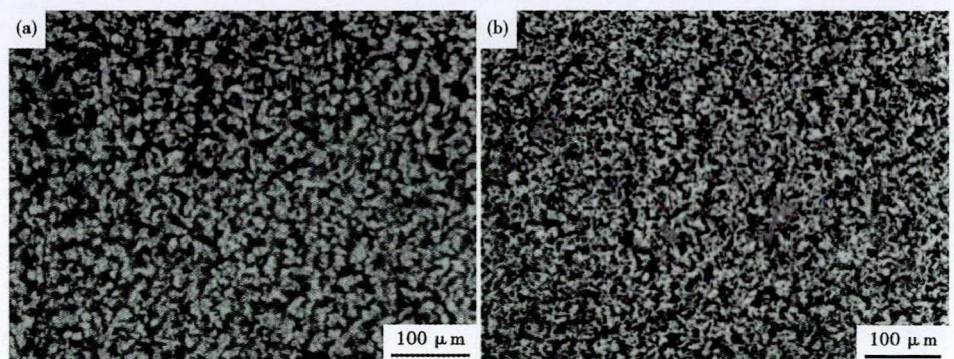


图 1 30MnVS6 钢热轧态(a)和正火处理(b)的显微组织
Fig. 1 Hot-rolled (a) and normalizing (b) microstructures of steel 30MnVS6

从强韧化的观点出发,细化晶粒是最重要的。因为细化晶粒是唯一能够同时提高钢的强度和韧性的方法。对于铁素体-珠光体型非调质冷锻钢热轧盘条,其实现晶粒细化的经济方式是采用微合金化技术加控轧控冷工艺控制。继在低碳钢中发现低温大变形量轧制可以形变诱导铁素体的超量析出后,研究学者发现通过控轧控冷工艺控制,在中碳钢中同样可以获得形变诱导铁素体^[14-16],且该相变是细化铁素体晶粒的重要因素。奥氏体(γ)形变会显著促进铁素体(α)相变,这是因为:形变导入许多缺陷,使系统的自由能提高,提高了 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变的驱动力;另外,在形变试样中,晶粒边界、奥氏体形变带等都是有效形核地点,且形变奥氏体晶粒边界上产生的大量凸阶也会导致 α 形核速率明显加快,从而获得超量析出的细晶铁素体。

非调质冷锻钢一般在冷形变组织下使用,冷拉拔后,铁素体、珠光体沿拉拔方向伸长,变形的显微组织中存在大量的位错,且随冷变形量增加,位错密度增加,这些位错相互缠结或聚集,形成位错墙或位错胞,在力学性能上表现为强度、硬度提升,断后伸长率降低。毛向阳等^[17]研究了冷作形变强化非调质钢紧固件的低温韧性,热轧盘条分别经减面率为28%和37%拉拔后,进行夏比V型缺口冲击试验,根据冲击吸收能量与温度之间的关系($K_{v2}-T$)和断口形貌分析方法确定韧脆转变温度,拉拔材的韧脆转变温度从减面率28%的 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高至减面率为37%的 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$,且随拉拔减面率的增加,韧脆转变温度逐渐升高。笔者对规格为 $\Phi 19\text{ mm}$ 非调质冷锻钢30MnVS6热轧盘条进行拉拔至 $\Phi 17.8\text{ mm}$ 试验,拉拔后进行夏比U型缺口冲击试验,试验结果见表6所示。经冷拔加工后,材料的韧脆转变温度升高、冲击性能降低一般与以下因素有关:(1)由于铁素体晶粒内非稳定态亚结构形成,螺位错发生交滑移,形成胞状结构的能力下降,从而应变硬化指数 n 值下降^[18-19];(2)随着变形量的增加,相邻晶粒的取向差减小,取向差较小的晶界($<15\text{ }^{\circ}\text{C}$)阻碍解理裂纹扩展的作用减小^[20]。

3.3 非金属夹杂物

表6 热轧态和冷拔态30MnVS6钢冲击性能

Table 6 Impact properties of hot rolled and cold drawn specimens of steel 30MnVS6

状态	室温 KU_2/J	$-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ KU_2/J
热轧态	132	78
冷拔态	98	33

一般认为,非金属夹杂物以连续的网状或以串联状存在于钢中,降低了钢的塑性和强度,使金属在锻、轧或其它加工过程中易在夹杂物与基体界面处形成裂纹,降低钢的韧性。非金属夹杂物的类型、形态、级别、数量、尺寸等对钢的韧性都有影响。当钢中硫化物类夹杂以单个状态弥散分布时,对钢的韧性不会产生有害影响;而当钢中硫化物类夹杂彼此相连、割裂,隔离基体,则会对钢的韧性产生不良影响^[21-22]。钢中夹杂物间距和含量对钢的断裂韧性有着重要的影响,减小夹杂物体积分数、增大夹杂物平均间距有利于提高钢的韧性^[23]。袁婷等研究了Ca-Si处理对易切削非调质钢30MnVS中硫化物形态和成分的影响^[24],随着Ca含量(0.0012%、0.0021%、0.0035%、0.0046%)的增加,团簇状硫化物逐渐转变为均匀分散的球状硫化物,且大多数球形硫化物中含有复合氧化物核心,显著改善了产品的切削性能。从提高材料韧性角度考虑,所形成的复合球形非金属夹杂物一般尺寸较大,对材料韧性不利。为提高非调质冷锻钢30MnVS6的韧性,一般采用低铝含量控制,不进行钙处理,可避免大颗粒夹杂物生成,同时减少MnS生成核心。此外,钢中存在Ti(C,N)等夹杂物也会降低冲击吸收能量,一般以尺寸在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上的夹杂物影响明显^[25]。

3.4 偏析

成分偏析容易在钢中形成明显的带状组织,甚至在合金元素含量高的偏析带上形成淬火组织。由于带状组织相邻带的显微组织不同而造成性能不同,在外力作用下,强弱带之间会产生应力集中,故而造成总体力学性能降低,冲击韧性降低。周民等^[26]对X100管线钢中的异常偏析带进行分析,偏析带处显微组织与基体明显不同,基体为板条贝氏体和粒状贝氏体,而偏析带处为多边形铁素体,且在一个大的铁素体晶粒周围聚集分布着尺寸较小的铁素体晶粒,尺寸大小不一的铁素体与贝氏体基体组织之间的线膨胀系数及力学性能的各向异性,使钢的韧性下降;另外,在成分偏下处,容易分布有夹杂物带,这些夹杂物不仅促进裂纹萌生,还促进裂纹沿条带组织扩展,严重恶化钢的冲击韧性。电磁搅拌技术作为提高铸坯等轴晶比率、改善铸坯内部质量的重要手段之一,对改善连铸坯凝固组织具有显著作用。周兴海等研究了电磁搅拌电流对30MnVS连铸坯显微组织的影响^[27],结果表明:当电磁搅拌电流由50A增大到250A时,中心疏松程度减小,同时等轴晶比率得到明显提高,增大达到50%以上。

4 结语

(1) 目前汽车转向横拉杆主要采用调质钢(包括预调质钢)和非调质钢并采用冷挤压成型,非调质冷锻钢由于节能降耗及降低热处理脱碳、淬火变形风险,逐渐被下游客户认可,汽车转向横拉杆由于较长的尺寸,采用非调质冷锻钢生产具有更明显的经济效益。

(2) 目前用于生产汽车转向横拉杆的非调质冷锻钢为含 S 非调质钢,为铁素体-珠光体型非调质钢,来源于热锻易切削非调质钢,由于含有一定量 S,具有良好的切削加工性能;非调质冷锻钢 30MnVS6 生产的汽车转向横拉杆,其成品组织为冷变形的铁素体和珠光体,而调质钢 ML40Gr、ESW90 成品件为回火索氏体,两类钢种生产的汽车转向横拉杆具有相当的强度和塑性,但非调质冷锻钢件的冲击韧性相对较差。

(3) 为提高非调质冷锻钢的韧性,一般采用降低 C 含量、提高 Mn 含量并采用微合金化成分设计思路,根据需要可向钢中添加适量 Cr、Mo 元素;对于铁素体-珠光体型非调质冷锻钢,应尽可能细化钢的显微组织,铁素体晶粒度级别应大于 9.0 级,所获得的细晶强化效果弥补了降低 C 含量所带来的强度损失;另外,超量析出的细晶铁素体和细片状珠光体具有良好的冷锻性能。钢中大颗粒夹杂物降低钢的冷锻变形能力,对于 30MnVS6 钢,应控制其 Al 含量低于 0.015%,可有效降低钢中大颗粒夹杂物尺寸及数量。控制成分偏析,有利于获得良好的均匀组织,对于 30MnVS6 钢,应控制组织中马氏体含量低于 3%。最后,采用非调质冷锻钢生产零件时,要综合考虑零件性能、原材料性能和冷加工硬化强度增量,从而保证零件获得最优的综合性能。

河北省省级科技计划资助(205676134H)

参考文献

- [1] 孙英达. 汽车直拉杆整体成形工艺[J]. 机械, 2004, 31(2): 43-44.
- [2] Tomov B. Hot Closed die Forging-State-of-Art and Future Development[J]. Journal of Achievements in Materials & Manufacturing Engineering, 2007, 24(1): 443-449.
- [3] 吴峰, 杨志鹏, 王良熙, 等. 基于数字样机的汽车转向横拉杆优化设计[J]. 制造业自动化, 2019, 41(6): 43-46, 91.
- [4] 张亦良, 姜公锋, 徐学东, 等. 汽车转向横拉杆断裂失效分析[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(10): 1317-1323.
- [5] Chavan U S, Saurabh Saraf and Deepak Kulkarni. Product Performance Parameter (PPP) Improvement of Inner Tie Rod for Passenger Car[J]. International Journal of Advanced Mechanical Engineering, 2018, 8(1): 39-50.
- [6] Glisovi J, Miloradovi D and Demi M. A Contribution to Research of Vibrational Loads of the Vehicle Steering System's Tie-Rod in Characteristic Exploitation Conditions[J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2012, 31(2): 105-122.
- [7] Hyunsoo, Shin Changjun and Kim Kiheon, et al. A Study on Vehicle Stability & Maneuverability Improvement for Tie Rod Actuating Steer-by-Wire System [C]. Munich, FISITA World Automotive Congress, 2008: 324-332.
- [8] 袁武华, 王峰. 国内外易切削钢的研究现状和前景[J]. 钢铁研究, 2008, 36(5): 56-62.
- [9] 董成瑞, 任海鹏, 金同哲, 等. 微合金化非调质钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [10] 陈蕴博, 马炜, 金康. 强韧微合金非调质钢的研究动向[J]. 机械工程材料, 2001, 25(3): 1-5.
- [11] 李国忠, 惠荣, 李建红. 轿车用易切削非调质钢 30MnVS 的开发[J]. 钢铁, 2002, 37(5): 42-45.
- [12] 李红英, 魏冬冬, 林武, 等. X80 管线钢冲击韧性研究[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(11): 73-78.
- [13] 齐俊杰, 黄运华, 张跃. 微合金化钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [14] 惠卫军, 田鹏, 董瀚, 等. 形变温度对中碳钢组织转变的影响[J]. 金属学报, 2005, 41(6): 611-616.
- [15] 田鹏, 惠卫军, 刘荣佩, 等. 形变参数对中碳钢组织演变的影响[J]. 材料热处理学报, 2005, 26(4): 69-73.
- [16] 冯云莉, 周颖. 中碳钢过冷奥氏体形变过程中的组织演变[J]. 热加工工艺, 2015, 44(9): 1-5.
- [17] 毛向阳, 王章忠, 蔡璐, 等. 冷作形变强化非调质钢紧固件的低温韧性[J]. 金属热处理, 2013, 38(6): 27-29.
- [18] 蔡璐, 王章忠, 赵秀明, 等. 冷作硬化非调质钢螺栓的形变强化效应[J]. 材料工程, 2010(4): 69-71.
- [19] 许沂, 袁晓光, 李智超. 加工硬化对高锰钢低温韧性的影响[J]. 金属热处理, 1998, 23(1): 14-15.
- [20] 潘晓丽, 朱健, 王秉新. 390MPa 级低合金高强度钢的低温韧性[J]. 理化检验-物理分册, 2012, 48(4): 221-223.
- [21] 高义民, 李继文, 张祖临. 硫化物夹杂形态对硅锰钢冲击韧性的影响[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(3): 74-77.
- [22] 夏志新, 杨卓越, 苏杰, 等. 硫化物形态对超高强度钢冲击韧性的影响[J]. 材料科学与工艺, 2009, 17(5): 746-749.
- [23] 郭峰, 李杰, 李志, 等. 夹杂物体积分数和平均间距对高 Co-Ni 超高强度钢断裂韧度的影响[J]. 航空材料学报, 2008, 28(4): 17-20.
- [24] 袁婷, 李国忠, 周兴海, 等. Ca-Si 处理对易切削非调质钢 30MnVS6 中硫化物形态和成分的影响[J]. 特殊钢, 2009, 30(5): 39-41.
- [25] 任学冲, 李高洋, 江波, 等. 夹杂物和晶粒尺寸对结晶车轮钢室温冲击性能的影响[J]. 理化检验(物理分册), 2012, 48(4): 207-212.
- [26] 周民, 衣海龙, 杜秀林, 等. X100 管线钢中的异常偏析带分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(3): 385-388.
- [27] 周兴海, 李国忠, 袁婷, 等. 电磁搅拌电流对 30MnVS 连铸坯显微组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29(2): 161-163.

王利军(1987-), 男, 硕士(2011 年东北大学), 高级工程师, 2009 年山东建筑大学(本科)毕业, 高品质特钢线材的研发及深加工应用研究。E-mail: wljun0604@126.com

收稿日期: 2020-11-10