

## 6.8 级冷镦螺栓的表层残余应力分布

蔡联瑜<sup>1</sup>, 孔纲<sup>1</sup>, 翁天宇<sup>1</sup>, 江爱华<sup>2</sup>, 齐凯<sup>2</sup>, 王新华<sup>2</sup>

(1.华南理工大学 材料科学与工程学院, 广州 510640; 2.广州特种机电设备检测研究院, 广州 510180)

**摘要:**利用 X 射线衍射残余应力分析仪测定了 6.8 级螺栓热处理前后表层轴向和切向残余应力及其分布, 分析了冷镦和缩径对螺杆与螺栓头部过渡圆角处残余应力的影响。结果表明: 热处理前螺栓表层残余应力分布不均匀, 最大残余拉应力为 155.8 MPa, 热处理后残余应力降低幅度可达 50%; 半径方向上, 残余应力随深度的增加由压应力向着拉应力转变。

**关键词:**6.8 级冷镦螺栓; 表面残余应力; X 射线衍射; 热处理

**中图分类号:**TG115.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-4012(2016)02-0099-05

### Surface Residual Stress Distribution of 6.8 Grade Cold Heading Bolts

CAI Lian-yu<sup>1</sup>, KONG Gang<sup>1</sup>, WENG Tian-yu<sup>1</sup>, JIANG Ai-hua<sup>2</sup>, QI Kai<sup>2</sup>, WANG Xin-hua<sup>2</sup>

(1.School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2.Guangzhou Academy of Special Equipment Inspection and Testing, Guangzhou 510180, China)

**Abstract:** The axial and tangential surface residual stress and its distribution of 6.8 grade bolts before and after heat treatment were measured by X-ray residual stress tester, and the effects of cold heading and necking down on the residual stress of screw and bolt head transition fillet were analyzed. The results show that the distribution of surface residual stress of the bolts before heat treatment was nonuniform, the maximum residual tensile stress was 155.8 MPa, and the amplitude of decline was up to 50% after heat treatment. In the radius direction, with the increase of the depth, the residual stress changed from compress stress to tensile stress.

**Keywords:** 6.8 grade cold heading bolt; surface residual stress; X-ray diffraction; heat treatment

螺栓连接是钢结构连接中比较常见的连接方式, 装卸、检修方便, 相对于焊接其连接处不会发生相变。6.8 级螺栓是介于普通螺栓和高强度螺栓分界线上的一个级别, 被广泛应用于输变电铁塔、建材和核电站等行业<sup>[1-2]</sup>。ML35 钢是常见的冷镦钢, 因其在常温条件下加工性能好、材料组织严密、尺寸精度高等特点, 常用于 6.8 级螺栓的制作。

尽管 6.8 级螺栓具有优良的力学性能, 但在其生产制作过程中常常因原材料冷拔、头部成型、缩径、螺纹成型等因素致使螺栓表面残余应力分布发生变化。表面残余应力对于螺栓强度、抗应力腐蚀开裂能力、疲劳性能、抵抗裂纹萌生与扩展的能力等都具有重要影响<sup>[3-5]</sup>。目前, GB/T 3098.1—2010<sup>[6]</sup> 对于螺栓残余应力并无明确规定, 也不强制热处理, 但美国材料

实验协会标准 ASTM A394—2008<sup>[7]</sup>、德国标准 DIN 7990—2008<sup>[8]</sup> 以及我国的电力行业标准 DL/T 284—2012<sup>[9]</sup> 则要求 6.8 级螺栓需进行热处理。在生产实践中, 残余应力诱使螺栓断裂会引发设备的非计划检修、拆换以及工程计划的延迟等, 造成经济上的重大损失; 同时, 螺栓断裂还会引起重大的安全事故, 威胁公众的生命安全。因此, 准确测定 6.8 级螺栓表面的残余应力对于生产工艺的改进和安装过程安全系数的确定有着重要的意义。X 射线衍射技术是测定钢结构材料表面残余应力经常用到的方法, 笔者结合电解抛光技术, 使用微区 X 射线衍射法测定 6.8 级螺栓热处理前后的表面残余应力, 研究热处理工艺对残余应力的影响, 为该类螺栓的生产加工提供参考<sup>[10]</sup>。

### 1 试样预处理和试验参数的设置

#### 1.1 试样预处理

使用 X 射线衍射法测定 6.8 级螺栓表面残余应

收稿日期: 2015-07-07

作者简介: 蔡联瑜(1990—), 男, 硕士研究生。

力时,试样表面状态对测定结果有很大的影响。试样表面存在的氧化皮、机械加工过程遗留表面的加工痕迹和划伤等均会影响残余应力测定结果的准确性。根据 GB/T 7704—2008《无损检测 X 射线应力测定方法》<sup>[11]</sup>,测试过程中要求试样表面没有油污和较厚的氧化层,且试样表面粗糙度  $R_a < 10 \mu\text{m}$ ,因此选择的试样表面不存在缺陷和划伤区域,且测试前对试样进行电解抛光处理。

电解抛光前,先用有机溶剂去除油污,再用体积分数为 20% 的稀盐酸去除氧化皮。电解抛光机是丹麦 Struers 公司 Movipol-3 型便携式抛光仪,腐蚀电压为 10 V,抛光电压为 2 V,腐蚀电流密度为  $1.0 \sim 1.5 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,抛光电流密度为  $0.1 \sim 0.2 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,电解液是饱和 NaCl 溶液。残余应力测试采用芬兰 Stresstech Oy 公司生产的 XStress 3000 型 X 射线残余应力分析仪,其中 X 射线管工作电压为 30 kV,工作电流为 10 mA。

## 1.2 试验参数的设置

根据 GB/T 7704—2008 要求,6.8 级螺栓表面残余应力测试过程中参数选择如下。

(1) 应力方向:该试验主要测定螺栓螺杆无螺纹部分的轴向和切向残余应力。

(2) 准直器直径的选择:试样直径为 24 mm,因此选用直径为 3 mm 的准直器。

(3) 衍射晶面:6.8 级螺栓主要显微组织为铁素体,晶格类型为体心立方,因此衍射晶面选择为 (211) 晶面,采用  $\text{CrK}_\alpha$  辐射,波长为  $0.229\ 09 \text{ nm}$ ,衍射角为  $156.4^\circ$ ,晶格常数为  $0.286\ 64 \text{ nm}$ ,应力常数  $K = -318 \text{ MPa}/(^{\circ})$ ,曝光时间为 4 s。

(4) 定峰方法:仪器可供选择的定峰方法有交相关法、半高宽法、抛物线法和重心法,对于 6.8 级螺栓等材料选择交相关法测定的精度更高。试验证明,对于比较漫散的衍射峰,该方法可以较好地提高残余应力测试的重复性,因此本试验采用的定峰方法为交相关法。

(5)  $\Psi$  角设置:选择自动扫描,用于拟合  $\sin^2\Psi$  的正负  $\Psi$  方向设为 7 个。

(6) 测量计算方法的选择:仪器可供选择的方法有侧倾固定  $\Psi$  法、侧倾固定  $\Psi$  + 摆动法、同倾固定  $\Psi$  法和同倾固定  $\Psi$  + 摆动法。由于 6.8 级螺栓在制作过程中粗晶和织构现象不明显,且侧倾法相对固定法优势明显,因此该试验的测量计算方法采用侧倾固定  $\Psi$  法。

## 2 试验材料与试验方法

### 2.1 试验材料

试验用 6.8 级冷镦螺栓规格为  $\text{M}24 \times 110$ ,材料是 ML35 钢。螺栓加工工艺流程如图 1 所示,其中热处理工艺是加热至  $570^\circ\text{C}$ ,保温 2 h 后随炉冷却至室温。螺栓化学成分(质量分数/%)如下: $0.32 \sim 0.38\text{C}$ ,  $0.60 \sim 0.90\text{Mn}$ ,  $\leq 0.35\text{Si}$ ,  $\leq 0.035\text{S}$ ,  $\leq 0.030\text{P}$ 。

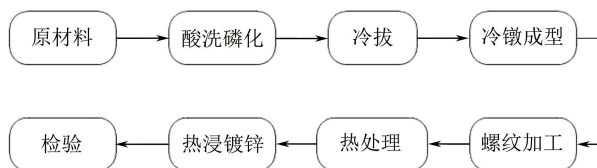


图 1 试验用 6.8 级冷镦螺栓加工工艺流程

Fig.1 The processing flow of the test 6.8 grade cold heading bolts

### 2.2 试验方法

为研究热处理对螺栓残余应力的影响,分别选取未热处理螺栓和热处理螺栓各 8 支进行测试。螺栓螺杆无螺纹部分长度为 40 mm,每个试样测试 A,B,C,D 共 4 点位置如图 2 所示,在每点位置分别测试距表面 0.02,0.1,0.2 mm 不同深度处的轴向和切向残余应力,测点表面距离是通过深度尺在多次电解抛光后测定的距离差值。

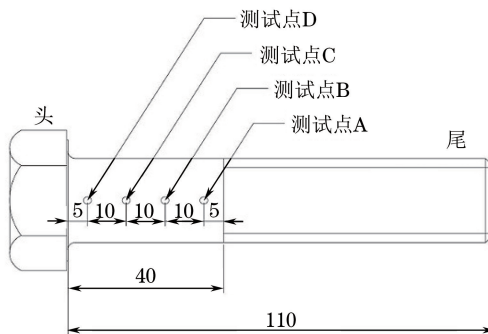


图 2 螺栓测试点示意图

Fig.2 Schematic diagram of test points of the bolts

为研究冷拔工序对螺栓头部和螺杆无螺纹部分过渡区域残余应力的影响,取冷拔后、冷镦前 8 根试样进行残余应力测试。在冷拔后、冷镦前的圆钢胚料试样距尾部 105 mm 处取点  $D_0$ ,在  $D_0$  点测试距表面 0,0.02,0.1,0.2 mm 不同深度处的轴向和切向残余应力,如图 3 所示。

残余应力测试前,进行铁粉零应力测定,以确保 X 射线应力测试仪的精度和准确性,当确定铁粉零应力测试结果误差在  $\pm 8 \text{ MPa}$  后,可以开始测试。剥层

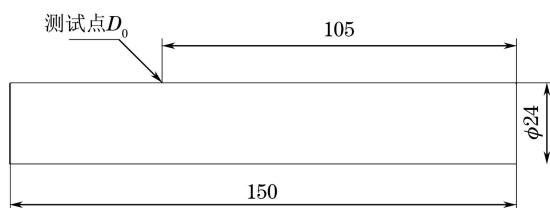


图3 冷墩前圆钢胚料测试点  $D_0$  位置示意图

Fig.3 Schematic diagram of position of test point  $D_0$  on round steel sheet before cold heading

法测得螺栓残余应力的测试值需进行修正<sup>[12]</sup>,轴向和切向残余应力修正公式分别为: $\sigma_z(r) = \sigma'_z(r) - 2 \int_r^b \frac{1}{\delta} \sigma'_z(r) d\delta$ ;  $\sigma_t(r) = \sigma'_t(r) - \int_r^b \frac{1}{\delta} \sigma'_t(r) d\delta$ 。其中, $\sigma'_z(r)$ 和 $\sigma'_t(r)$ 分别是轴向和切向残余应力测试值的平均值, $b$ 是螺栓半径, $r$ 是测定表面到中心圆轴的距离。

### 3 试验结果与讨论

#### 3.1 试验结果

图4是热处理前螺栓螺杆无螺纹部分A,B,C,D4点位置距表面不同深度处的轴向和切向残余应力分布曲线。由图4可知,6.8级螺栓在热处理前,A,B,C,D4点的轴向残余应力和切向残余应力存在着较大的分布差异,其中A点的轴向和切向残余应力明显高于其他3点的。具体说明如下:A点轴向残余应力为80.6~100.9 MPa,切向残余应力为108.2~155.8 MPa;B点轴向残余应力为-49.7~-36.3 MPa,切向残余应力为-16.5~-0.4 MPa;C点轴向残余应力为-66.9~-61.3 MPa,切向残余应力为-20.3~-13.9 MPa;D点轴向残余应力为-33.7~37.8 MPa,切向残余应力为-0.6~

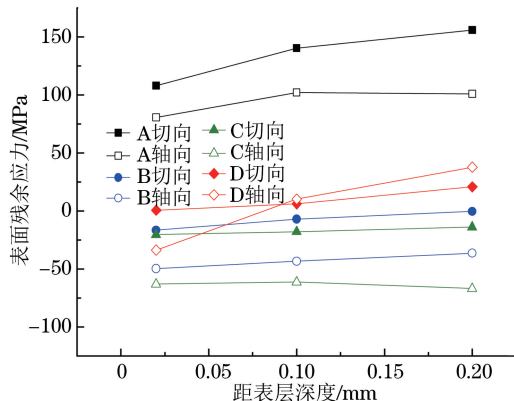


图4 热处理前螺栓表层残余应力分布

Fig.4 The residual stress distribution of bolt surface before heat treatment

20.8 MPa。由此可见,A,B,C3点的切向残余应力最大值均高于轴向残余应力最大值;B,C两点残余应力主要为压应力,从绝对值的角度,轴向残余应力是切向残余应力的1.5~3.0倍;A点残余应力主要为拉应力,且切向残余应力是轴向残余应力的1.5~3.0倍,A点测试结果与夏之秋等<sup>[13]</sup>测试TP304不锈钢薄壁管的表面残余应力分布结果基本一致。B和C两点是试样经过冷拔、缩径后的状态。螺栓表层残余应力大小和分布与其材料的软硬程度有一定的关系,一般而言,材料越软、屈服应力越低,变形也更容易,冷拔后存在于表面的残余拉应力也更低;而材料硬度越高,塑性变形由表层至心部的难易程度也越来越大,表层也可能呈现残余压应力的分布<sup>[14]</sup>。6.8级螺栓是介于高强度螺栓和普通螺栓的临界强度级别,坯料成型过程中,在远离剧烈塑性变形的区域,可能形成较小的拉应力或压应力。A和D两点附近区域在加工螺纹和螺栓头部成型过程中,发生了很大程度的塑性变形,其在金属内部的分布极不均匀,其中消耗的能量有一部分以畸变能的形式储存在晶体缺陷(空位和位错)内,形成一定程度的残余拉应力。

图5是热处理后螺栓螺杆无螺纹部分A,B,C,D4点位置距表面不同深度处的轴向和切向残余应力分布曲线。可见6.8级螺栓在热处理后,A,B,C,D4点轴向残余应力和切向残余应力与热处理前相比均有了很大的变化。具体说明如下:A点轴向残余应力为-26.8~-22.5 MPa,切向残余应力为-31.6~-26.3 MPa;B点轴向残余应力为1.2~11.2 MPa,切向残余应力为-17.5~13.6 MPa;C点轴向残余应力为-3.5~4.8 MPa,切向残余应力为

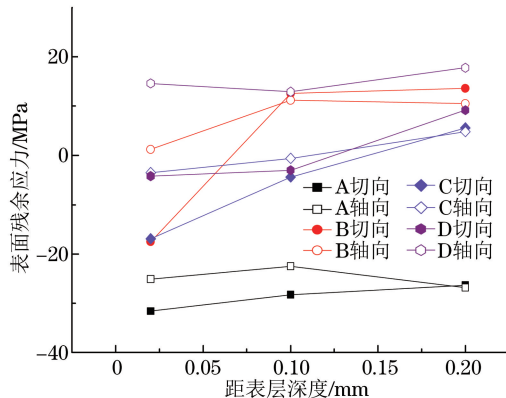


图5 热处理后螺栓表层残余应力分布

Fig.5 The residual stress distribution of bolt surface after heat treatment



-16.9~5.6 MPa; D点轴向残余应力为12.9~17.8 MPa,切向残余应力为-4.2~9.2 MPa。其中,A,D两点轴向和切向残余拉应力有了明显的降低,A点最大残余拉应力转变为一定大小的压应力,D点轴向和切向最大残余应力远高于其他3点的轴向和切向残余应力,且相对于热处理前也有50%的降幅。B点由残余压应力向较小的残余拉应力转变,C点则降低了残余压应力的幅值。由图5可知,热处理后A,B,C各点轴向和切向残余应力数值趋于近似。570℃保温2h属于高温去应力退火,是一个回复和再结晶的过程,加强了空位运动和位错的重排,降低了空位和位错的密度,消除了位于晶体结构内部的点阵畸变。从力学的角度分析可知,高温条件下材料内部吸收热能接近残余应力的松弛激活能时,残余应力释放速率加快,且保温时间越长降低幅度越大,随后趋于平缓。从扩散的角度分析,一定的温度下原子活动能力增强,钢中的铁、碳和其他合金元素的原子可以较快地进行扩散,实现原子的重新排列组合,从而使不稳定的不平衡组织逐步转变为稳定的平衡组织。

热处理前距表面0.02~0.2mm深度处,A,B,C,D4点轴向和切向残余应力变化不大;A,B,C,D4点切向残余应力,其中A点超过100MPa,其余3点均为接近,均在0MPa附近。热处理后,A,B,C,D4点切向和轴向残余应力更加趋于接近,在距表面0.02~0.2mm深度处,A,B,C,D4点轴向和切向残余应力变化规律与热处理前相似。可见热处理降低了螺杆各点残余应力的绝对值和阈值,调整了残余应力分布。

图6是螺栓试样D点冷拔后、热处理前和热处理后,距离表面不同深度处的轴向和切向残余应力变化趋势,其中D<sub>0</sub>表示冷拔后测点,D<sub>1</sub>和D<sub>2</sub>分别表示热处理前和热处理后测点。由图6可知,冷拔后D<sub>0</sub>点轴向残余应力为81.5~121.8MPa,切向残余应力为128.3~248.4MPa,切向残余应力远大于轴向残余应力,且前者是后者的2倍左右。冷拔后至热处理前,试样经过冷墩头部成型和缩径,结合图4和图5分析结果可知,缩径后螺栓测点D<sub>1</sub>轴向和切向残余应力均有极大幅度降低,由此可知螺栓表层残余应力分布在半径方向上随深度的变化很大,且残余应力较大的范围不深。冷拔时,原材料由于受到模具摩擦力的作用和周边层受到较大的拉压变形和弯曲变形,变形区域金属在半径方向上受压,

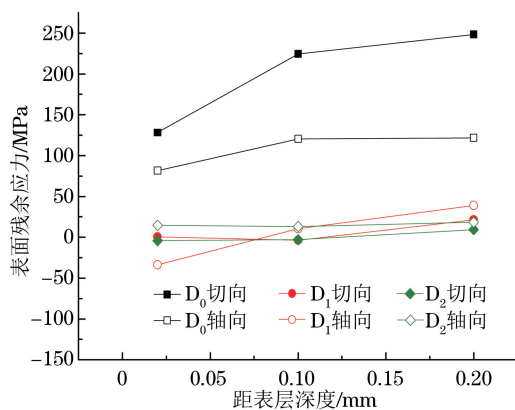


图6 胚料上测点D残余应力变化趋势

Fig.6 The variation tendency of test point D on the steel sheet

在轴向方向上受拉,因外层金属向轴向流速较慢,因此螺栓表面表现为拉应力,这一点与杨帆<sup>[15]</sup>研究残余应力对连续拉拔珠光体钢丝力学性能的影响有相似的结论。

### 3.2 分析和讨论

测点D和A分别位于螺栓头部与螺杆无螺纹部分过渡处和螺杆无螺纹部分与螺纹部分过渡处,测点D和A附近几何形状、加工工艺不同,因而存在几何变形的不均匀性,尤其是D点附近有极大的塑性变形。实际应用中螺栓断裂也常见于螺纹末端(从螺纹加工的角度来看)和螺栓头部与螺杆的过渡区域,原因是这些区域相对于其他区域更容易形成应力集中,螺栓头部冷加工塑性变形产生金属纤维,螺纹加工经过挤压引入一定大小残余应力。为了更好地分析热处理对A和D两点残余应力分布的影响,将图4和5反馈的信息绘制在图7中,图7是热处理前后各点在半径方向上层残余应力范围分布图,其中紧随于A和D之后的数字1,2分别表示热处理前和热处理后。

由图7可知,570℃保温2h后,A和D两点轴向和切向残余应力均有显著的降低,其中D点切向残余应力降低幅度接近50%,而A点轴向和切向残余应力降低幅度则更大。从A和D点的测试值范围的离散性角度分析,可知热处理后的残余应力测试值在不同深度处趋向于更加均匀和稳定。说明热处理过程可使位错运动重排和点阵空位减少,显著降低残余应力<sup>[16-17]</sup>。从A,B,C,D点距表面0.02~0.2mm深度范围测试值平均残余应力的变化幅值来看,4点之间的幅值变化均有较大的降低,残余应力绝对值最大值在30MPa附近。

测点A和D是靠近螺栓断裂部位的两个测试

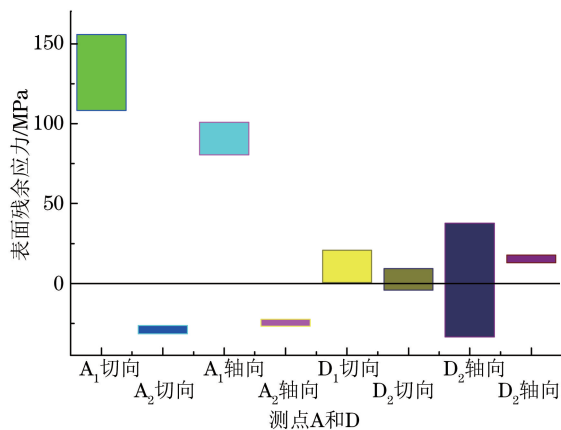


图7 热处理前后测点A和D残余应力范围

Fig.7 The range of residual stress of test point A and D before and after heat treatment

点,热处理前后该两测点的轴向和切向最大残余应力测试值如表1所示,其中 $\sigma_{z, \max}$ 、 $\sigma_{t, \max}$ 分别表示轴向残余应力和切向残余应力最大值,其中A点冷拔后,考虑该点尚没有冷镦,因此没有测试残余应力。从螺栓安全性的角度看,热处理前螺栓A点0~0.2 mm深度范围轴向和切向残余应力最大值是抗拉强度的17.4%和26.9%,屈服强度的26.8%和33.6%;D点0~0.2 mm深度范围轴向和切向残余应力最大值是抗拉强度的6.5%和3.6%,屈服强度的8.1%和4.5%。考虑到热处理前残余应力的离散性,有些螺栓残余应力值可能更高,这无疑增加了螺栓在服役过程中失效的风险性。

表1 测点A和D热处理前后最大残余应力测试值

Tab.1 The maximum residual stress of test point A and D before and after heat treatment

状态	测点 A		测点 D	
	$\sigma_{z, \max}$	$\sigma_{t, \max}$	$\sigma_{z, \max}$	$\sigma_{t, \max}$
冷拔态	—	—	121.8	248.4
热处理前	100.9	155.8	37.8	20.8
热处理后	-22.5	-26.3	17.8	9.2

## 4 结论

(1) 热处理前,6.8级螺栓螺杆从表面起随深度的增加残余应力略有增加。在不同深度处,各点切向残余应力均比轴向残余应力要大。

(2) 螺栓头部与螺杆无螺纹部分过渡圆角处以及螺杆无螺纹部分和螺纹部分过渡处是螺栓常见断裂部位,两处在热处理前残余应力为拉应力,尤其是螺杆无螺纹部分和螺纹部分过渡处甚至接近156 MPa,这几乎是6.8级螺栓抗拉强度的26.9%,屈服强度的33.6%。

(3) 热处理后,6.8级螺栓螺杆表面随深度的增加残余应力的变化规律基本不变。螺杆残余应力均有一定程度的降低,其中螺栓头部和螺杆无螺纹部分连接处的切向残余应力降低幅度接近50%,螺杆无螺纹部分和螺纹部分连接处的残余应力降低幅度则更大。

(4) 冷拔后,测点D切向残余应力约为轴向残余应力的2倍,缩径降低了螺栓表层残余应力的分布,螺栓表面加工工艺对表层残余应力影响较大。

## 参考文献:

- [1] 冯金良.常用电力铁塔螺栓加工工艺及残余应力浅析[J].机械工业标准化与质量,2012(2): 28-31.
- [2] RUIZ-HERVIAS J, LUZIN V, PRASK H, *et al.* Effect of thermo-mechanical treatments on residual stresses measured by neutron diffraction in cold-drawn steel rods[J].Materials Science and Engineering A,2006, 435/436: 725-735.
- [3] DENG D, MURAKAWA H. Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements[J]. Computational Materials Science, 2006,37(3): 269-277.
- [4] 陆业航,张杰,吴冰,等.铸造TC4钛合金电子束焊残余应力测试[J].理化检验-物理分册,2013,49(11): 711-713.
- [5] 周磊,赵秀娟,陈春焕,等.热处理工艺对GCr15钢轴承外环淬火组织和性能的影响[J].理化检验-物理分册,2013,49(10): 650-653.
- [6] GB/T 3098.1-2010 紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱[S].
- [7] ASTM A394-2008 钢制镀锌输变电铁塔螺栓和螺母规格[S].
- [8] DIN 7990-2008 钢结构用带六角螺母的六角头螺栓[S].
- [9] DL/T 284-2012 输电线路杆塔及电力金具用热浸镀锌螺栓与螺母[S].
- [10] SATO S, WAGATSUMA K, SUZUIKI S, *et al.* Relationship between dislocations and residual stresses in cold-drawn pearlitic steel analyzed by energy-dispersive X-ray diffraction[J].Materials Characterization,2013,83: 152-160.
- [11] GB/T 7704-2008 无损检测 X射线应力测定方法[S].
- [12] 李益华,吴运新,龚海,等.应用X射线衍射法测定轴类工件中的残余应力[J].机械工程材料,2012,36(7): 96-99. (下转第113页)

表 1 不同取样方向试样测得的  $R_{t0.5}$ 

Tab.1 The measured  $R_{t0.5}$  of samples with different sampling directions

钢板卷号	取样方向	$R_{t0.5}/\text{MPa}$
1	横向	521
	45°	545
	纵向	585
2	横向	530
	45°	553
	纵向	586
3	横向	527
	45°	540
	纵向	588
4	横向	527
	45°	558
	纵向	588

线钢  $R_{t0.5}$  测定结果有一定影响。其中纵向取样方向测得的  $R_{t0.5}$  最大;横向取样方向测得的  $R_{t0.5}$  最小,45°取样方向测得的  $R_{t0.5}$  居中。因此在产品的供货协议中,必须注明拉伸试样取样方向,以便获得真实且具有可比性的力学性能指标。

## 2 试样压平的影响

### 2.1 试验方法

用某钢厂生产的 1 卷 X70 管线钢(规格为 19.65 mm)进行试验,分别在板卷 1/4 处,按照 45°取样方向制取 8 根拉伸试样,采用 50.8 mm 定标距,其中 4 根试样不进行完全压平<sup>[3]</sup>,另外 4 根试样要完全压平,所有拉伸试样均符合 GB/T 228.1—2010 中的尺寸要求。在室温 25℃下,使用 Zwick Z1200 电子拉力试验机进行拉伸试验,试验结果及分析见表 2。

### 2.2 试验结果分析

X70 管线钢测试规定总延伸强度  $R_{t0.5}$  时均采用 50.8 mm 定标距,其测量的变形量只有 0.254 mm,如果试样存在些微不平,拉伸试验过程中引伸计标距内的实际变形由两部分组成,一是试样弯曲受拉展平所

表 2 不同压平程度试样测得的  $R_{t0.5}$ 

Tab.2 The measured  $R_{t0.5}$  of samples with different flattening degree

试验次数	未完全压平 $R_{t0.5}/\text{MPa}$	完全压平 $R_{t0.5}/\text{MPa}$
1	512	562
2	561	558
3	521	564
4	552	573
平均值	536.5	565.0
标准差	23.7	6.2

产生的附加变形,另一个是试样真实的弹性、塑性变形(相当于完全展平后试样的拉伸变形)。因此如果试样存在不平,将会造成  $R_{t0.5}$  数值波动,数据重复性偏低。通过表 2 中的对比数据可以看出,拉伸试样完全压平测得的  $R_{t0.5}$  标准差偏低,且数值的一致性较好;拉伸试样未完全压平测得的  $R_{t0.5}$  标准差相对较高,且数值的波动性较大。

## 3 结论

(1) 不同取样方向会对 X70 管线钢的规定总延伸强度  $R_{t0.5}$  测定结果造成影响,因此为了获得真实准确的  $R_{t0.5}$  试验结果,在产品的供货协议中必须注明取样方向。

(2) 试样压平程度也会对 X70 管线钢规定总延伸强度  $R_{t0.5}$  测定结果造成影响,因此为了获得真实准确的  $R_{t0.5}$  试验结果,制样人员必须保证试样严格压平,为了避免出现质量疑义,制样人员可拍照留存。

## 参考文献:

- [1] GB/T 228.1—2010 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法[S].
- [2] 李军伟.拉伸试样宽度对 X65 管线钢屈服强度测试结果的影响[J].理化检验-物理分册,2014,50(6): 396-398.
- [3] 陈小伟,李延丰,张远生,等.试样形式对 X80 级钢板及钢管拉伸试验结果的影响[J].焊管,2009,32(21): 21-25.

(上接第 103 页)

- [13] 夏之秋,顾伟生,朱世根.TP304 不锈钢薄壁管的表面残余应力[J].理化检验-物理分册,2010,46(6): 356-359.
- [14] 徐萍,王伯健.钢丝拉拔过程中的残余应力[J].金属制品,2008,34(3): 1-4.
- [15] 杨帆.残余应力对连续拉拔珠光体钢丝力学性能的影响[J].材料导报,2010(5): 105-109.

- [16] 张尧武,曾卫东,史春玲,等.真空去应力退火对 TC18 钛合金残余应力及组织性能的影响[J].中国有色金属学报,2011(11): 2780-2785.
- [17] 周伟,周廉,于振涛.TA2 环形管表面残余应力及消除[J].稀有金属材料与工程,2005(6): 1002-1004.