DOI:10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2024.05.005

钢板残余应力检测方法的实验比较*

黄　钢[1,2]，　张清东[2]，　张勃洋[2]，　姬保平[2]，　于铭洋[2]
（1.华北电力大学能源动力与机械工程学院　北京，100096）
（2.北京科技大学机械工程学院　北京，100083）

摘要　为验证自主研制的透射式励磁感应钢板内应力无损检测系统的测量效果，在工厂生产线上切取了2种材质、不同板形的4块钢板作为残余应力测量试样，分别使用自研系统、X射线衍射法、超声法和盲孔法进行残余应力测量及比较。取样测量实验发现，4种方法的残余应力测量结果相差明显，同一被测点的测量结果也相差较大，在个别被测点出现残余应力测量值符号相反的现象。针对测量结果数据及其存在的差异，从4种方法的检测原理出发，定性分析了产生差异的原因，概括出4种方法的技术特点，并针对每种方法提出若干使用建议。

关键词　残余应力；电磁法；超声法；X射线法；盲孔法
中图分类号　TH823；TH878

引　言

钢板带是钢铁工业的主要产品，也是重要的结构材料与功能材料[1]。板形是钢板带产品的重要评价指标，板形缺陷在带钢塑性压力加工和热处理工序中可能以多种形式存在。钢板内不均匀分布的残余应力也是板形缺陷的一种存在形式[2]，属于力学形式的板形缺陷。瓢曲和翘曲是钢板几何形式的板形缺陷，往往在缺陷较为严重时才明显可见，并且有边浪、中浪、L翘及C翘等多种几何模式。因此，残余应力潜伏在钢板内部，是上一个工序的隐形“副产品”，也是下一个工序的隐性原料条件，但往往是一个负面的、破坏性的因素。钢板内部的残余应力还会影响冷弯和冲压成形的几何精度，甚至造成局部皱曲或损伤[3]。因此，实现对钢板残余应力定量检测，有助于发现潜在的板形缺陷，确定导致板形缺陷产生的原因，为改进生产工艺、提升板形质量创造前提条件。

残余应力测量技术发展至今已形成数十种测量方法[4]，可分为机械释放测量法和无损伤物理测量法。机械释放测量法属破坏性检测，典型的有盲孔法、环芯法、切槽法及剥层法；无损伤物理测量法有磁测法、超声法、X射线衍射法及中子衍射法[5]等。为了完善自主研制的透射式励磁无损内应力检测技术，笔者通过实验研究，对比了该方法与目前3种常用的方法——盲孔法[6]、X射线衍射法[7]及超声法[8]的试样测量结果，验证了透射式励磁感应钢板内应力无损检测方法的应用效果，评价其准确性，并分析了这4种不同残余应力检测方法的特点。

1　4种残余应力检测技术的检测原理

盲孔法的检测原理[9]是在被测工件表面粘贴应变片，在应变片中心钻一个小孔，小孔周围区域应力释放而产生应变，通过应变片测量应变量并计算得到钻孔深度方向的加权平均残余应力大小。

X射线衍射法的基本原理[10]如下：在不受应力的理想状态下，晶体同一族晶面之间的间距相等；当材料受到应力作用时，晶面之间的间距会随着应力的变化而变化。根据这一特性，依据X射线衍射谱线的位移大小能够计算得到残余应力的大小。

超声法的基本原理[11]是根据Snell定律进行应力检测，当超声波的入射角达到某个数值后，可在被测材料表面激发出临界折射纵波，对于各向同性材料，临界折射纵波是对应力最敏感的波形，通过精确测量其声速变化，可有效获取被测材料的应力值大小。超声法测量深度与声波波长有关。

铁磁性材料在交变磁场中材料的尺寸会发生伸长或缩短的变化，这种现象称为磁致伸缩。当铁磁材料受到外力或者转矩作用发生变形时，磁化强度随外力或转矩变化而变化的现象称为逆磁致伸缩效应。电磁检测法的基本原理[12]是当铁磁材料内部存在应力时，铁磁性材料具有各向异性，不同应力状态

*　北京市自然科学基金资助项目（3202019）
收稿日期：2021-11-26；修回日期：2022-04-02

时材料具有不同的磁导率，利用感应线圈中感应电流的变化来反映磁导率的变化，钢板带应力的变化最终转换成可以测量的电学参量（电压），从而实现对内部应力的检测。

笔者课题组研制的透射式励磁无损检测技术[13]，将传统的单侧式传感器改为对侧式四磁极传感器，以适应钢板带应力在线检测的需要。采用该布置形式能有效避免励磁传感器与检测传感器发生连通，并能降低带钢抖动引起的提离效应影响。

X射线衍射法和盲孔法被广泛用于取样离线条件下的钢板残余应力测量，超声法已成为测量各种尺寸静态钢板残余应力最有效的无损检测方法，而透射式励磁无损检测方法和激光超声波方法[14]则是针对运动钢板的检测方法。本研究通过实际测量对比，验证了自主研制的透射式励磁感应钢板内应力无损检测技术的测量效果。

2　4种检测方法对比研究的实验方案

对比测量实验所用钢板试样的材质分别为镀铝硅钢板和普碳钢板，板形质量分别为外观可见瓢曲和完全平直2种状态。试样钢板的数据及相关信息如表1所示。板形对比如图1所示。试样各个测量点位置如图2所示。其中，2块镀铝硅钢板试样上下表面9个测量位置点标注了1～9的数字，如图2(a，b)所示；2块碳钢板试样上表面5个测量位置点标注了1～5的数字，如图2(c)所示。由图2可见，测点只布置于试样幅面内的局部区域，因此所测得的残余应力只是局部应力。

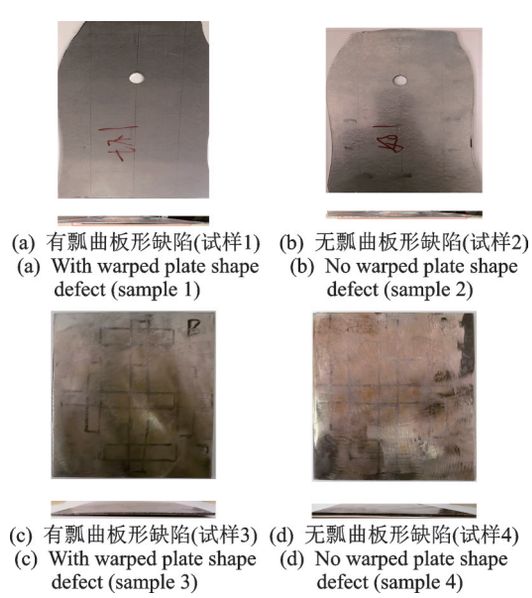


图1　板形对比

Fig.1　Comparison of plate shape diagram

首先，使用笔者团队研制的透射式励磁无损检测仪，分别对2块镀铝硅钢板试样上下表面的9个测量位置和2块普碳钢板上表面的5个测量位置依次进行残余应力检测，获得钢板残余应力的分布情况，分析残余应力分布与板形缺陷之间的对应性。为了反映板形瓢曲及镀层对于残余应力的影响，对有镀层钢板的上下表面9个测量点分别进行检测。

然后，分别使用X射线衍射法、超声法以及盲孔法对4个试样的测量点逐个进行检测，获得3种检测方法各自的残余应力分布检测结果。

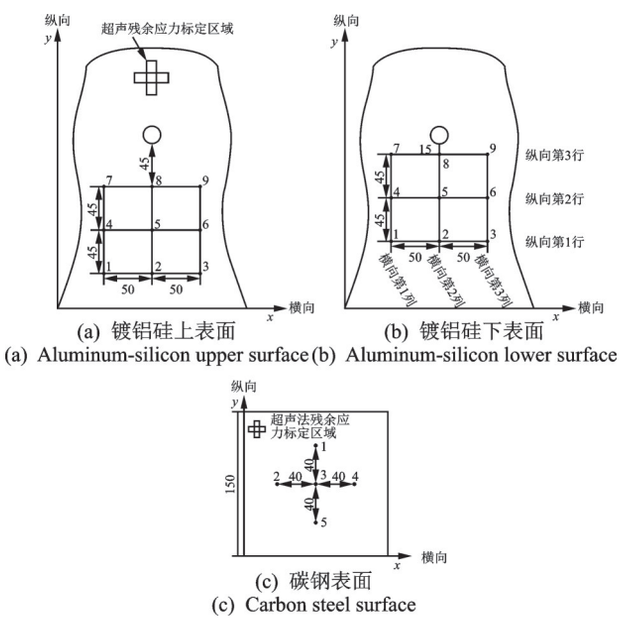


图2　试样各个测量点位置（单位：mm）

Fig.2　The position of each measuring point of the sample (unit:mm)

根据残余应力的产生机理以及钢板的二维结构特征，可以近似认为试样钢板内仅存在纵向（长度方向）和横向（宽度方向）的残余应力。纵向残余应力沿宽度方向上分布不均且有正有负，并处于自平衡状态（即整个宽度上总和为0）；横向残余应力沿长度方向上分布不均且有正有负，并处于自平衡状态（即整个长度上总和为0）。

由于镀层中铝的热膨胀系数比铁略大，硅的热膨胀系数仅为铁的18%，导致在热镀铝硅后的冷却过程中镀层与基板在相同温降下产生不同冷收缩形变，导致沿钢板厚向出现不均匀分布的热处理纵向残余应力。在光整轧制过程中，又由于镀层和基板的力学性能不同而产生不同的轧制纵向延伸形变，并与前工序的热处理形变叠加而导致沿钢板厚向出现新的不均匀分布的纵向残余应力。但是，由于基板厚度是镀层厚度的数十倍甚至更多，故该残余应力的峰值在镀层内比在基板内要大得多。

表 1 试样钢板的数据及相关信息

Tab.1 Data and related information of the sample steel plate

试样标号	材质/状态	有无铝硅镀层	(长×宽×厚)/mm	板形状态
1	冷轧高强钢板/热镀态	有(约 10 μm/侧)	400×200×2	瓢曲
2	冷轧高强钢板/热镀态	有(约 10 μm/侧)	400×200×2	平直
3	热轧 Q235 钢板/淬火态	无	150×150×3	瓢曲
4	热轧 Q235 钢板/退火态	无	150×150×3	平直

根据板形生成理论,发生瓢曲的钢板的残余应力分布比板形平直的钢板峰值更高且更不均匀。由于板形瓢曲是纵向延伸不均的结果,所以板形相关的纵向残余应力比横向残余应力更大一些。但是,由于 4 块样板的测点布置较为密集,间距最大仅为 50 mm,板形瓢曲导致的试样同一表面上各点的同向残余应力的波动相对较小,甚至不及上下表面对应测点的同向残余应力的变化明显。

钢板冷却方式也是残余应力的关键影响因素。对于大致相同的材料及初始条件,淬火与退火、自然冷却相比,总是具有更不均匀、峰值更高的残余应力分布。由于试样钢板尺寸较小,所以淬火相关的横向残余应力与纵向残余应力也大小相当。

通过定性分析可知,这 4 块试样钢板具有完全不同的残余应力大小及分布。由于实际中无法获得试样钢板残余应力的真实值,则上述 4 种方法的测量结果之间的差异可以互为参考和验证。

3 4种方法的检测结果分析

3.1 透射式励磁无损检测法测量结果及分析

使用透射式励磁无损检测法测量镀铝硅钢板和无镀层碳钢板试样的各个测点,得到的残余应力分别如表 2,3 所示。其中:残余应力值前面的负号表示所测值为压应力;无符号表示所测值为拉应力。

透射式励磁无损检测法的测量深度为整个钢板厚度,测量值可以近似认为是测量点处钢板整个厚度上的残余应力的平均值。

由表 2 可知,使用透射式励磁无损检测法得到 2 块镀铝硅钢板试样的残余应力有正有负。其中:试样 1 为存在板形瓢曲的试样,横向和纵向残余应力均有正有负且变化幅度较大,纵向残余应力的最大值与最小值相差 424.49 MPa,横向残余应力的最大值与最小值相差 476.87 MPa;试样 2 为板形平直的试样,横向和纵向残余应力均为正值,残余应力比试样 1 的变化幅度小且分布更均匀,纵向残余应力的最大值与最小值相差 135.37 MPa,横向残余应力的最大值与最小值相差 148.72 MPa。

表 2 透射式励磁无损检测法测量的镀铝硅钢板残余应力

Tab.2 Excitation non-destructive testing method to measure the residual stress of aluminized silicon steel sheet

测量点	纵向残余应力/MPa		横向残余应力/MPa	
	试样 1	试样 2	试样 1	试样 2
1	−20.80	246.54	21.09	155.21
2	281.64	247.03	−28.45	108.50
3	277.87	254.66	−36.99	134.39
4	−142.85	181.73	13.95	257.22
5	−118.84	128.35	−223.63	249.29
6	−118.18	148.18	253.24	255.49
7	4.18	119.29	180.33	130.72
8	260.98	151.15	−104.13	116.65
9	269.22	135.17	−141.03	139.12

表 3 透射式励磁无损检测法测量的普碳钢板残余应力

Tab.3 Excitation non-destructive testing method to measure the residual stress of carbon steel sheet

测量点	纵向残余应力/MPa		横向残余应力/MPa	
	试样 3	试样 4	试样 3	试样 4
1	−86.90	−59.11	−102.69	−51.64
2	−111.19	−51.70	−71.25	−57.62
3	−87.25	−42.89	−68.59	−54.76
4	−226.15	−59.26	−395.25	−62.03
5	17.70	−43.72	−113.30	−40.30

由表 3 可知,使用透射式励磁无损检测法得到 2 块碳钢试样的测量值均为负值。其中:试样 3 为淬火态且有板形瓢曲的试样,横向和纵向残余应力变化幅度较大,最大值与最小值分别相差 326.66 MPa 和 208.45 MPa;试样 4 为退火态且板形平直的试样,横向和纵向残余应力变化幅度较小,最大值与最小值分别相差 21.73 MPa 和 16.37 MPa,分布更均匀。

由表 2,3 测量结果可见,透射式励磁无损检测法检测结果能够反映残余应力分布与板形瓢曲或平

直、淬火或退火的对应关系。被测材料有无镀层对于透射式励磁无损检测法的检测结果影响较小，但该方法不能直接反映镀层内的残余应力。此外，当测点靠近钢板边缘或透射式励磁磁场水平域超出钢板范围时，钢板边部漏磁会对测量结果有一定影响。

3.2　盲孔法测量结果及分析

使用盲孔法测量镀铝硅钢板和碳钢钢板试样的各个测点，得到的残余应力分别如表 4，5 所示。

理论上，盲孔法测量值为测量点打孔深度方向上各层残余应力释放导致的表面变形协调应变值对应的应力，应变片粘贴在钢板表面使得表层残余应力的影响更大些。本实验的目标打孔深度为 1.5 mm，接近或超过钢板厚度的一半，所测残余应力是以表层为主且受一定深度上残余应力影响的综合结果。

表 4　盲孔法测量的镀铝硅钢板残余应力

Tab.4　Blind hole method to measure the residual stress of aluminized silicon steel sheet

试样 1 测量点	（上/下）纵向 残余应力/MPa	（上/下）横向 残余应力/MPa	试样 2 测量点	（上/下）纵向 残余应力/MPa	（上/下）横向 残余应力/MPa
1	−113.88/−64.73	−34.78/−43.23	1	−4.81/23.82	−2.42/41.39
2	−92.06/−20.72	−11.10/−22.76	2	23.79/34.69	−36.63/70.32
3	27.33/−47.75	53.43/−33.99	3	19.56/33.30	−60.32/70.00
4	−104.65/−18.47	−6.24/−8.35	4	−93.59/76.49	77.47/145.61
5	−88.17/−37.84	−17.87/−28.25	5	43.26/22.51	78.44/46.23
6	−31.53/−29.88	−4.15/−1.25	6	−4.02/−23.94	103.82/−4.17
7	−141.21/−53.93	−44.33/−43.50	7	−79.79/20.50	30.36/51.71
8	−65.02/−37.05	−23.27/−18.52	8	52.69/−6.53	−3.16/−0.79
9	−2.56/−37.51	13.94/−28.02	9	23.65/−40.04	71.51/−30.58

表 5　盲孔法测量的普碳钢板残余应力

Tab.5　Blind hole method to measure the residual stress of carbon steel sheet

测量点	纵向残余应力/MPa		横向残余应力/MPa	
	试样 3	试样 4	试样 3	试样 4
1	18.60	27.29	18.60	63.37
2	64.61	62.06	153.70	111.95
3	124.05	44.33	388.69	47.54
4	30.83	−9.64	69.25	−11.49
5	84.21	−36.32	100.35	−46.49

由表 4 可知，使用盲孔法测得的 2 块镀铝硅钢板试样的横向残余应力值与纵向残余应力值均有正有负。其中：有瓢曲的试样 1 上下表面的纵向残余应力的最大值与最小值分别相差 168.54 MPa 和 46.26 MPa，横向残余应力的最大值与最小值分别相差 97.76 MPa 和 42.25 MPa；板形平直的试样 2 上下表面的纵向残余应力的最大值与最小值分别相差 146.28 MPa 和 116.53 MPa，横向残余应力的最大值与最小值分别相差 164.14 MPa 和 149.78 MPa。

由表 5 可知，使用盲孔法测得 2 块碳钢板试样的残余应力大部分为正值。其中：淬火态且有瓢曲的试样 3 的横向和纵向残余应力均为正值，退火态且板形平直的试样 4 的横向和纵向残余应力有正有负；试样 3 的横向和纵向残余应力的最大与最小值相差分别为 370.09 MPa 和 105.45 MPa，试样 4 的横向和纵向残余应力的最大与最小值相差分别为 158.44 MPa 和 98.38 MPa。

试样 1 与试样 2 的上下表面的残余应力差别反映出钢板有瓢曲与板形平直对应的残余应力不同，同一表面的残余应力差别也包括钢板有瓢曲与板形平直对应的残余应力不同；试样 3 与试样 4 的残余应力差别反映出有瓢曲与板形平直的钢板淬火与退火处理所对应的残余应力不同。试样同一表面各测点之间由于点与点间距较小，在顺序测量中先打孔对于后打孔有影响，导致了同向残余应力的波动。

盲孔法在钢结构残余应力检测中的检测结果可信度较好，但其只能保证测量深度为孔径的 1～1.2 倍范围内结构残余应力的准确度。此外，在打孔过程中材料会发生塑性变形，产生热和不圆度偏差等，所以测量结果也会存在一定的误差[15]。检测结果表明，应变片贴于表面，当测试样品有镀层且残余应力沿厚向在浅表层分布更不均匀时，对于测量结果的影响更加显著。

3.3　X 射线衍射法测量结果及分析

使用 X 射线衍射法测量镀铝硅钢板和碳钢钢板

试样的各个测点，得到的残余应力分别如表6，7所示。

X射线衍射法测量值为材料浅表层（约15 μm）的残余应力的平均值。测定时电压设为27 kV，电流为8 mA，靶材为Cr靶。由于2种材质主要材料均为铁素体，测定时选用体心立方结构进行测量表征，衍射面为211晶面。

表6 X射线衍射法测量的镀铝硅钢板残余应力

Tab.6 X-ray diffraction method to measure the residual stress of aluminized silicon steel sheet

试样1 测量点	（上/下）纵向 残余应力/MPa	（上/下）横向 残余应力/MPa	试样2 测量点	（上/下）纵向 残余应力/MPa	（上/下）横向 残余应力/MPa
1	−44.25/−194.50	−335.15/−184.50	1	−142.00/−243.00	−283.00/−235.50
2	−191.33/−274.00	−307.18/−200.50	2	−101.50/−127.50	−146.50/−279.00
3	−257.67/−133.40	−327.00/−158.50	3	−249.33/−148.00	−239.00/−112.00
4	−288.33/−222.45	−222.75/−228.75	4	−81.00/−176.00	−260.00/−319.50
5	−139.33/−122.00	−80.50/−199.13	5	−114.00/−180.00	−214.50/−188.00
6	−251.75/−153.50	−245.75/−153.00	6	−239.50/−174.50	−164.00/−262.00
7	−282.67/−80.00	−263.43/−160.95	7	−81.00/−289.00	−198.50/−169.00
8	−67.00/−115.50	−154.50/−63.40	8	−195.00/−345.00	−237.00/−214.00
9	−195.00/−81.20	−239.30/−166.00	9	−237.50/−229.00	−181.50/−196.65

表7 X射线衍射法测量的普碳钢板残余应力

Tab.7 X-ray diffraction to measure the residual stress of carbon steel sheet

测量点	纵向残余应力/MPa		横向残余应力/MPa	
	试样3	试样4	试样3	试样4
1	−191.90	−57.74	−191.32	−76.36
2	−104.20	−56.72	−197.27	−42.00
3	−221.42	−30.73	−159.87	−42.34
4	−284.15	−96.23	−174.49	−46.00
5	−47.80	−117.60	−25.70	−21.14

由表6可知，使用X射线衍射法测得2块镀铝硅试样钢板镀层内的残余应力均为负值，其上下表面的残余应力大小相当，横向与纵向残余应力以及板形瓢曲与平直的试样钢板的残余应力也基本相当，即上下表面镀层内同为较大的压缩残余应力。其中：有瓢曲的试样1上下表面的纵向残余应力的最大值与最小值分别相差244.08 MPa和194.00 MPa，横向残余应力的最大值与最小值分别相差254.65 MPa和165.35 MPa；板形平直的试样2上下表面的纵向残余应力的最大值与最小值分别相差158.50 MPa和217.50 MPa，横向残余应力的最大值与最小值分别相差136.50 MPa和207.50 MPa。

由表7可知，使用X射线衍射法测得2块碳钢试样的残余应力均为负值，但存在明显差别。其中：试样3为淬火态且有板形瓢曲的试样，其横向和纵向残余应力变化幅度较大，最大与最小值分别相差165.62 MPa和236.35 MPa；试样4为退火态且板形平直的试样，其横向和纵向残余应力变化幅度较小，最大与最小值分别相差55.22 MPa和86.87 MPa，分布相对较为均匀。试样3与试样4的残余应力差别反映了有瓢曲与板形平直钢板淬火与退火处理所对应的残余应力不同。

可见，X射线衍射法只能测得镀层下较浅深度的残余应力，不能反映钢板整个厚度上的残余应力，也不能反映板形瓢曲与残余应力的对应关系[16]。此外，相邻测点的残余应力值变化平缓，这与试样各个测点距离较近、残余应力值不会剧烈突变的理论分析是一致的，说明X射线衍射法的测量稳定性更好。但是，由于X射线衍射法测前需进行被测材料标定，当钢板表层内有多种金属元素时会使标定困难且降低测量精度，如果在被测范围内元素分布不均匀甚至不稳定，则可能导致测量结果不可信。

3.4 超声法测量结果及分析

使用超声法测量镀铝硅钢板和碳钢钢板试样的各个测点，得到的残余应力分别如表8，9所示。

理论上，临界折射纵波超声法的残余应力测量值为测点处一个波长深度内的残余应力的平均值。本实验测量使用的是5 MHz的超声波，检测深度约为1 mm，不到钢板厚度的一半，因此其测量值约为1 mm厚度上的残余应力的平均值。本研究超声法测量值为标定区域的相对残余应力值。

由表8可知，使用超声法测得的2块镀铝硅钢板试样的纵向残余应力多为负值，横向残余应力均

表 8　超声法测量的镀铝硅钢板残余应力

Tab.8　Ultrasonic method to measure the residual stress of aluminized silicon steel sheet

试样 1 测量点	（上/下）纵向残余应力/MPa	（上/下）横向残余应力/MPa	试样 2 测量点	（上/下）纵向残余应力/MPa	（上/下）横向残余应力/MPa
1	−24.54/−39.43	87.64/18.20	1	−78.00/−138.02	68.80/88.00
2	−4.84/−4.97	83.70/113.04	2	−88.59/−108.47	58.95/63.00
3	−5.00/−14.72	29.51/98.00	3	−90.50/−83.84	54.01/34.11
4	−15.10/−64.08	95.50/127.80	4	−123.00/−93.71	113.10/68.58
5	−0.21/−49.31	93.50/108.80	5	−49.23/−142.97	132.80/63.64
6	9.75/−14.85	24.54/103.14	6	−98.47/−118.35	118.02/19.32
7	−44.35/−78.89	26.50/122.84	7	−118.17/−133.14	122.93/34.09
8	−54.16/−59.20	4.82/157.30	8	−68.94/−167.63	78.61/78.40
9	−65.50/−56.50	24.52/93.00	9	−158.67/−152.85	177.09/71.00

表 9　超声法测量的普碳钢板残余应力

Tab.9　Ultrasonic method to measure the residual stress of carbon steel sheet

测量点	纵向残余应力/MPa		横向残余应力/MPa	
	试样 3	试样 4	试样 3	试样 4
1	11.00	1.00	9.00	−3.00
2	11.00	4.00	5.00	2.00
3	7.00	3.00	11.00	5.00
4	14.00	3.00	8.00	7.00
5	18.00	2.00	22.00	−4.00

为正值。其中：试样 1 上下表面纵向残余应力的最大与最小值分别相差 75.25 MPa 和 73.92 MPa，横向残余应力的最大与最小值分别相差 90.68 MPa 和 139.1 MPa；试样 2 上下表面纵向残余应力的最大与最小值分别相差 89.73 MPa 和 83.79 MPa，横向最大与最小值分别相差 123.08 MPa 和 68.68 MPa。

由表 9 可知，淬火态且有瓢曲的试样 3 的横向和纵向残余应力均为正值，退火态且板形平直的试样 4 的纵向残余应力均为正值，横向残余应力有正有负。其中：试样 3 横向和纵向残余应力的最大与最小值分别相差 17 MPa 和 11 MPa；试样 4 最大与最小值分别相差 11 MPa 和 3 MPa。

从整体上看，超声法测量的 4 块试样的残余应力值都偏小。其中：试样 1 和试样 2 的纵向残余应力比对应点的横向残余应力更略小一些；试样 4 的纵向和横向的残余应力接近于 0。但是，如果选择不同波长的超声波进行测量，有可能实现钢板厚度上不同深度的平均残余应力的测量，可用来近似反映整个板厚上的残余应力分布。对于有镀层的钢板，由于镀层和基板钢板的材料属性的差异，会对超声法测量结果产生较大影响[17]。

4　4 种检测方法的测量结果比较

将自主研制的透射式励磁无损检测方法和其余 3 种常用残余应力检测方法用于镀铝硅钢板试样 1 和试样 2 以及碳钢板试样 3 和试样 4，测量各点的纵向和横向残余应力值。试样 1 和试样 2 的上下表面纵向与横向残余应力及其均值分布情况分别如图 3，4 所示。试样 3 和试样 4 上表面纵向和横向残余应力分布情况分别如图 5，6 所示。

由图 3～6 的可以看出，这 4 种检测方法的测量结果差别很大。同一位置不同方法测量结果出现不同，既因为检测方法原理不同，也因为不同方法的适宜测量对象、场景不同所导致。不同方法测量结果存在差异是钢板等材料或结构残余应力检测中面临的困难，也是残余应力表征与检测技术研究的重点。检测实验还表明，虽然通过在钢板上布置更多的测点可以测得钢板横向和纵向残余应力在其面内任意方向上的分布，但当被测钢板的横向和纵向残余应力在其厚度上分布不均匀时，这 4 种方法都无法测出该方向不均匀分布的残余应力。

采用 4 种测量方法检测 2 种材料的 2 块板形平直试样，并用标准差对测量结果离散情况进行评价。4 种检测方法测得的残余应力标准差见表 10。

试样 2 和试样 4 为板形平直的钢板，各测点之间的间距较小，且试样 4 为退火态，所以每个试样同一表面的同向残余应力分布较为均匀。因此，比较

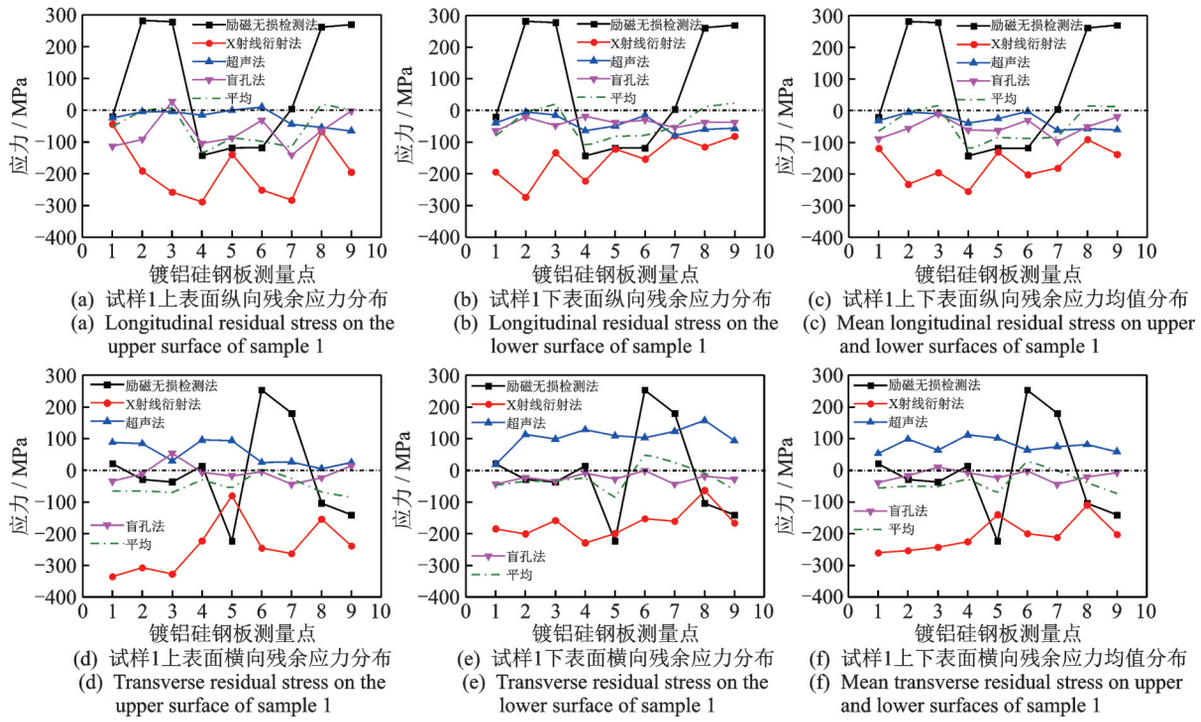


图 3 试样 1 上下表面纵向与横向残余应力及其均值分布情况

Fig.3 The distribution of longitudinal and transverse residual stresses on the upper and lower surfaces of sample 1 and mean values

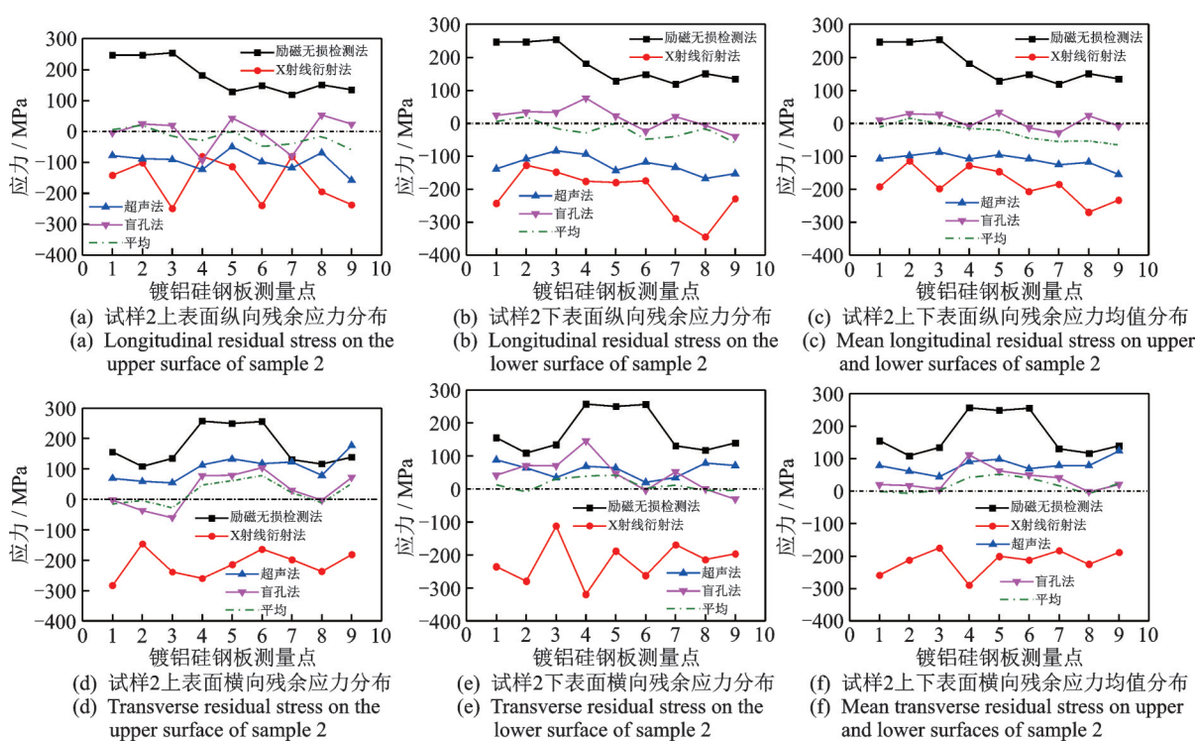
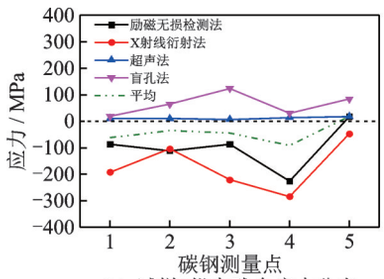


图 4 试样 2 上下表面纵向与横向残余应力及其均值分布情况

Fig.4 The distribution of longitudinal and transverse residual stresses on the upper and lower surfaces of sample 2 and mean values

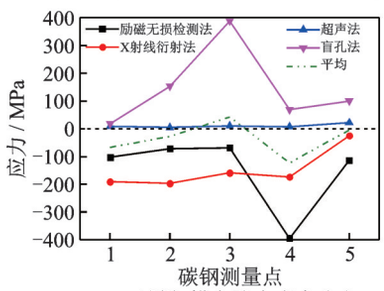
同一试样、同一表面及同向的 9 个或者 5 个残余应力值的标准差，可以获得每种检测方法测量值的离散程度，可反映出每种检测方法的测量稳定性。

由表 10 可见：试样 2 的测量值离散度从小到大依次为超声法、盲孔法、透射式励磁无损检测法和 X 射线衍射法；试样 4 的测量值离散度从小到大依次为超声法、透射式励磁无损检测法、X 射线衍射法和盲孔法。



(a) 试样3纵向残余应力分布

(a) Longitudinal residual stress of sample 3

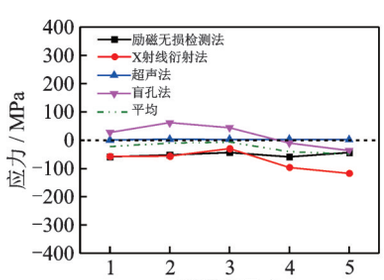


(b) 试样3横向残余应力分布

(b) Transverse residual stress of sample 3

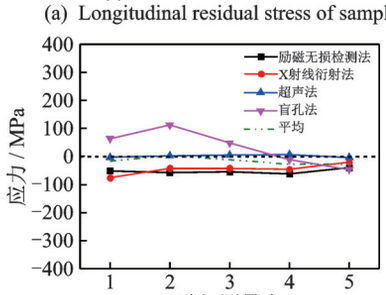
图 5　试样 3 上表面纵向和横向残余应力分布情况

Fig.5　The distribution of longitudinal and transverse residual stresses on the upper surfaces of sample 3



(a) 试样4纵向残余应力分布

(a) Longitudinal residual stress of sample 4



(b) 试样4横向残余应力分布

(b) Transverse residual stress of sample 4

图 6　试样 4 上表面纵向和横向残余应力分布情况

Fig.6　The distribution of longitudinal and transverse residual stresses on the upper surfaces of sample 4

5　结　论

1）为了验证和完善自主研制的透射式励磁感应钢板内应力无损检测技术，将透射式励磁无损检测法与常用的 3 种检测方法——盲孔法、超声法和 X 射线衍射法进行了实验比较分析。

表 10　4 种检测方法测得的残余应力标准差

Tab.10　Standard deviation of residual stress measured by four detection methods

试样	透射式励磁无损检测	X 射线衍射	超声法	盲孔法
试样 2 上表面纵向	44.52	64.01	21.71	49.29
试样 2 下表面纵向	44.52	68.97	36.10	31.20
试样 2 均值纵向	35.87	35.80	16.81	22.79
试样 2 上表面横向	41.56	46.62	24.60	23.30
试样 2 下表面横向	53.80	62.21	31.55	42.60
试样 2 均值横向	43.62	45.80	23.44	21.33
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
试样 4 表面纵向	7.11	31.12	1.02	35.87
试样 4 表面横向	7.33	17.64	4.32	55.97

2）以 2 种材质、不同板形的 4 块钢板为残余应力测量样本，对比了透射式励磁感应检测方法与 X 射线衍射法、超声法及盲孔法的残余应力测量结果，发现 4 种检测方法的测量结果存在明显差异。

3）基于实际测量数据并结合检测原理，对比分析了 4 种检测方法的检测结果，得知造成较大差异是因为检测方法的原理不同，以及不同方法适宜的测量对象与场景不同。因此，针对不同的测量需求应该选择正确合适的测量方法。

4）目前，对于残余应力检测方法缺乏成熟的评价标准。针对此，笔者使用同试样、同表面及同向的各个残余应力值的标准差，评价每种检测方法测量值的离散情况，反映每种检测方法的测量稳定性。实验发现：对于镀铝硅钢板，测量值离散度从小到大依次为超声法、盲孔法、透射式励磁无损检测法及 X 射线衍射法；对于普通碳钢板，测量值离散度从小到大依次为超声法、透射式励磁无损检测法、X 射线衍射法及盲孔法。

参　考　文　献

[1] 李博，张清东，张晓峰. 平整轧制过程工艺参数对带钢残余应力场的影响[J]. 塑性工程学报，2013，20(5)：65-70.

LI Bo，ZHANG Qingdong，ZHANG Xiaofeng. Research on the effect of process parameters on the residu-

al stress of strip after temper rolling[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20(5): 65-70.(in Chinese)

[2] 钟路. 冷轧高磁感取向硅钢板型缺陷研究[J]. 装备维修技术, 2014(3): 45-49.
ZHONG Lu. Study on plate defects of cold rolled high magnetic induction oriented silicon steel[J]. Equipment Technology, 2014(3): 45-49.(in Chinese)

[3] 米谷茂. 残余应力的产生和对策[M]. 朱荆璞, 邵会孟,译. 北京: 机械工业出版社, 1983: 344.

[4] 陈丽娟, 韩斌, 谭文, 等. 带钢板形检测与控制技术现状及趋势[J]. 轧钢, 2012, 29(4): 38-42.
CHEN Lijuan, HAN Bin, TAN Wen, et al. Technology status and trend of shape detecting and shape controlling of rolled strip[J]. Steel Rolling, 2012, 29(4): 38-42.(in Chinese)

[5] 徐小严, 吕玉廷, 张荻, 等. 中子衍射测量残余应力研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(9): 117-122.
XU Xiaoyan, LÜ Yuting, ZHANG Di, et al. Measuring residual stress by neutron diffraction[J]. Materials Review, 2015, 29(9): 117-122.(in Chinese)

[6] MATHAR J. Determination of inherent stresses by measuring deformations of drilled holes[J]. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1934, 56(2): 249-254.

[7] 刘倩倩, 刘兆山, 宋森, 等. 残余应力测量研究现状综述[J]. 机床与液压, 2011, 39(11): 135-138, 124.
LIU Qianqian, LIU Zhaoshan, SONG Sen, et al. Research status of measurement for residual stress[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011, 39(11): 135-138, 124.(in Chinese)

[8] HUGHES D S, KELLY J L. Second-order elastic deformation of solids [J]. Physical Review, 1953, 92(5): 1145.

[9] 张铁浩, 王洋, 方喜风, 等. 残余应力检测与消除方法的研究现状及发展[J]. 精密成形工程, 2017, 9(5): 122-127.
ZHANG Tiehao, WANG Yang, FANG Xifeng, et al. Research status and development of residual stress detection and elimination methods[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(5): 122-127.(in Chinese)

[10] 段能全, 任建亮, 庞瑞强, 等. 3003铝合金X射线法表面残余应力的检测[J]. 中国表面工程, 2012, 25(6): 79-84.
DUAN Nengquan, REN Jianliang, PANG Ruiqiang, et al. Measurement of surface residual stress of 3003 aluminum alloy by X-ray diffraction[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(6): 79-84.(in Chinese)

[11] 徐春广, 宋文涛, 潘勤学, 等. 残余应力的超声检测方法[J]. 无损检测, 2014, 36(7): 25-31.
XU Chunguang, SONG Wentao, PAN Qinxue, et al. Residual stress nondestructive testing method using ultrasonic[J]. Nondestructive Testing, 2014, 36(7): 25-31.(in Chinese)

[12] 王金凤, 樊建春, 仝钢, 等. 磁声发射无损检测方法研究进展[J]. 石油矿场机械, 2008, 37(5): 72-75.
WANG Jinfeng, FAN Jianchun, TONG Gang, et al. Research advance of MAE nondestructive testing method[J]. Oil Field Equipment, 2008, 37(5): 72-75.(in Chinese)

[13] 曾杰伟, 张清东, 缪存孝, 等. 透射式磁弹性带钢应力无损检测[J]. 工程科学学报, 2015, 37(supp1): 12-17.
ZENG Jiewei, ZHANG Qingdong, MIAO Cunxiao, et al. Stress nondestructive testing of strip steel based on transmissive magnetoelastic effect[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(supp1): 12-17.(in Chinese)

[14] DUQUENNOY M, OUAFTOUH M, QIAN M L, et al. Ultrasonic characterization of residual stresses in steel rods using a laser line source and piezoelectric transducers[J]. NDT & E International, 2001, 34(5): 355-362.

[15] 胡斌. 应力测试方法的现状及发展趋势[J]. 中国特种设备安全, 2015, 31(12): 1-9.
HU Bin. The present condition and the developing trend of the stress testing methods[J]. China Special Equipment Safety, 2015, 31(12): 1-9.(in Chinese)

[16] 郑卜祥, 宋永伦, 席峰, 等. 对接焊铝合金板材残余应力的X射线测试[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 275-281.
ZHENG Buxiang, SONG Yonglun, XI Feng, et al. Residual stresses measurement of butt-welded aluminium alloy plates by X-ray[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 275-281.(in Chinese)

[17] 卢明辉, 丁雷, 颜学俊, 等. 激光超声技术在工业检测中的应用与展望[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(4): 631-643.
LU Minghui, DING Lei, YAN Xuejun, et al. Application and prospect of laser ultrasonic nondestructive testing technology in advanced manufacturing[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(4): 631-643.(in Chinese)

第一作者简介: 黄钢, 男, 1992 年 3 月生, 博士、讲师。主要研究方向为金属材料残余应力消减与检测技术。
E-mail:HGhuangAY@163.com

通信作者简介: 张清东, 男, 1965 年 10 月生, 博士、教授、博士生导师。主要研究方向为板带轧制与板形厚度表面控制、塑性成形装备与工艺界面力学行为、薄带屈曲与皱曲等。
E-mail:zhang_qd@me.ustb.edu.cn