DOI: 10.3969/j.issn.1000-6826.2022.11.0201

镀锌产品粗糙度的研究与控制

Research and Control of Surface Roughness of Hot-dip Galvanized Products

供稿|梅锐东，赵兴时，张扬，王子昂，李庆刚 / MEI Ruidong, ZHAO Xingshi, ZHANG Yang, WANG Ziang, LI Qinggang

内容导读

为了提高镀锌产品粗糙度的控制精度，通过研究镀锌产品轧制周期内粗糙度变化情况，确定光整机轧制力与轧制周期对镀锌产品板面粗糙度的影响，控制镀锌产品在一个轧制周期内的生产时间，得到目标值的粗糙度。通过现场试验论证，板面粗糙度要求 R_a=1.2~1.4 μm 安排在轧制周期 150 t 以内，板面粗糙度要求 R_a=0.8~1.2 μm 安排在轧制周期 150~6000 t，且每 1500 t 粗糙度 R_a 下降 0.1 μm。该技术的应用为热镀锌产品板面粗糙度控制生产提供了合理的技术支撑。

钢板表面粗糙度直接影响冲压成型及金属流动特性，具有一定的表面粗糙度有利于储存并保持油膜，提高钢板的滑动性。但是粗糙度过高，在凹部存储的油量增加，对凸部提供油的效果变差，从而引起凸起处油量不足以及应力过于集中而导致油膜破坏，增加钢板的摩擦阻力，造成钢板表面滑动性变差，即使钢板材质好，冲压成型时仍存在因材料流入不足或咬模而引起冲压开裂的危险[1-2]。随着科技的不断进步，汽车制造业也在不断地改进，对于产品质量的要求也更为严格，客户对于产品的外观质量也更为重视，由此对产品的粗糙度提出了新的要求。为了满足客户对于产品外观质量的需求，保质保量地完成汽车制造厂家的订货合同，粗糙度目标控制是我们重点攻关的项目之一。

粗糙度定义

表面粗糙度（Surface roughness）是指加工表面具有的较小间距和微小峰谷的不平度。其两波峰或两波谷之间的距离（波距）很小（在 1 mm 以下），属于微观几何形状误差。具体指微小峰谷 Z 高低程度和间距 S 状况，如图 1 所示。一般按 S 分：S<1 mm 为表面粗糙度；1≤S≤10 mm 为波纹度；S>10 mm 为“f”形状。

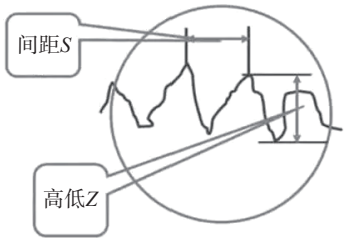

图 1　微小峰谷

表面粗糙度越小，则表面越光滑。表面粗糙度一般是由所采用的加工方法和其他因素所形成的，例如加工过程中刀具与零件表面间的摩擦、切屑分

作者单位：本钢浦项冷轧薄板有限责任公司，辽宁　本溪　117021

离时表面层金属的塑性变形以及工艺系统中的高频振动等。由于加工方法和工件材料的不同，被加工表面留下痕迹的深浅、疏密、形状和纹理都有差别。一般标注采用 R_a，Z 和 S 在一定的取样长度内构成由多个波峰波谷组成的几何轮廓，该几何轮廓代表物体表面粗糙度，R_a 是在取样长度内轮廓偏距绝对值的算术平均值，简称轮廓算术平均偏差，Z 和 S 作为粗糙度基本构成用于计算 R_a。

粗糙度相关参数研究

板面粗糙度由工作辊粗糙度、锌层、轧制力、钢种等参数共同作用形成。

轧制过程有限元分析

对比工作辊表面粗糙度与带钢表面粗糙度，可以发现两者作为直接接触的表面粗糙度并不相同，运用有限元分析软件分析光整轧制过程。为了减少计算难度，对轧制模型进行简化处理，将原来的三维模型化为二维模型。轧制过程模拟[3]，首先建立轧制过程模型（如图 2）。

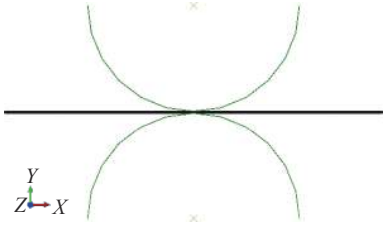

图 2　轧制过程有限元分析模型

连续轧制过程中带钢与工作辊面发生相对接触，但不发生相对位移。模拟过程中设定带钢位移为零，工作辊沿接触面转动，通过模拟结果可以发现接触点同期受力情况相同，轧制过程为连续的相同应力平移过程。轧制过程模拟结果如图 3 所示。

通过 ABAQUS 模拟可以发现轧制过程中延伸率的实现是由于金属在轧制过程中受到挤压发生轻微形变，在厚度与宽度方向轻微减小，使带钢整体变长，实现带钢在长度方向上 1.0%~1.5% 的延展，从而实现延伸率控制，所以轧制力的大小在光整工艺参数中起重要作用。将轧制过程微观进行模拟，放大轧制过程，由于粗糙度微观下波峰波谷高度差值与辊面直径相差较大，模型设计可以简化为平面与平面接触，模拟过程如图 4。

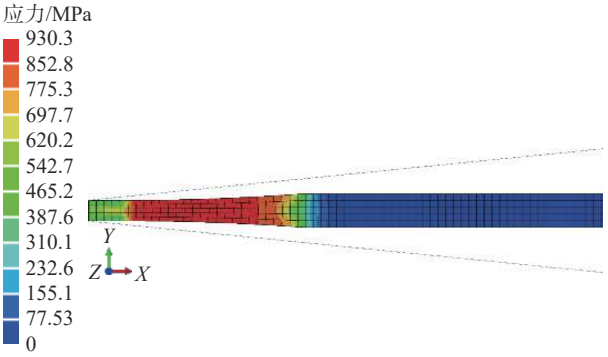

图 3　轧制过程

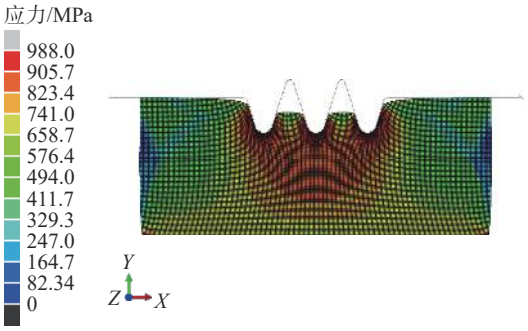

图 4　粗糙度模拟有限元模型

在模拟轧制过程中可以发现，在工作辊接触带钢后带钢开始变形，初期变形较快无较大阻力，继续变形，在到达工作辊粗糙度均值以后，变形困难程度急速加剧，且过程中存在一段几乎不变的过程，在变形结束时带钢表面粗糙度接近于工作辊粗糙度波峰与波谷的平均值。

工作辊与板面粗糙度对比分析

工作辊表面粗糙度数据如表 1，工作辊表面粗糙度要求为 2.5 μm，经现场测量发现实际粗糙度略高于要求，针对这项问题，同时收集了轧制周期开始与结束时的板面粗糙度（R_a）数据，发现轧制周期开始前 150 t 板面存在高于或接近 R_a=1.6 μm 的情况，但是在轧制周期结束时板面普遍高于 0.8 μm，普通精度产品要求粗糙度为 0.8~1.6 μm，工作辊表面粗糙度偏高会导致轧制前期粗糙度不合，但是会延长工作辊的轧制周期（使用寿命）。为了延长工作辊的轧制周期，提高工作辊表面粗糙度是可行的，同时根据轧制周期内收集的粗糙度数据可以推测出板面粗糙度在一个轧制周期内整体应该呈现下降趋势。

表 1　工作辊辊面及板面粗糙度统计表

辊组	辊面粗糙度/μm		板面粗糙度/μm	
	轧制周期开始时	轧制周期结束时	轧制周期开始时	轧制周期结束时
RW4006/RW4007	2.70	2.280	1.60	1.20
RW4A02/RW4Y04	2.66	2.290	1.36	0.82
RW4Y10/RW4Y06	2.60	2.320	1.38	1.12
RW4Y02/RW4022	2.63	2.260	1.42	1.00
RW4503/RW4506	2.65	2.118	1.50	1.00
RW4006/RW4007	2.84	2.320	1.63	1.20
RW4010/RW4009	2.60	2.200	1.25	0.70
RW4006/RW4007	2.80	2.100	1.43	0.75
RW4Y03/RW4012	2.71	2.151	1.47	0.80
RW4A01/RW4015	2.83	2.432	2.00	1.12
RW4Y02/RW4022	2.79	2.315	1.81	1.12

锌层对板面粗糙度的影响

针对锌层问题，对数据进行专项分析可以发现，在相近规格连续生产过程中，若锌层厚度相同，带钢表面粗糙度几乎相同，在锌层厚度发生变化时，带钢表面粗糙度会小幅度变化。如表 2 所示，相同规格产品连续生产，在锌层厚度由 41 变为 91 g/m^2，再变回 41 g/m^2 后 4 卷产品中，粗糙度会发生改变，91 g/m^2 锌层的板面粗糙度会高于 41 g/m^2 锌层，改变幅度为 0.1 μm 以内。

表 2　板面粗糙度记录表

卷号	锌层/(g/m^2)	板面粗糙度/μm	粗糙度改变幅度/μm
1385850000	41	1.04	—
1385820000	91	1.13	0.09
1385830000	91	1.14	0.01
1385880000	41	1.05	–0.09

钢种对板面粗糙度的影响

对轧制前期收集的数据进行分析如表 3 所示，轧制前期粗糙度整体呈现下降趋势，但并不是连续平滑的下降，而是会有某些点下降幅度特别大，然后又会突然升高。对这些突变的数据进行筛选比对可以发现，他们均发生在钢种变化的阶段。

钢种由 DC51D+Z 过渡到 DC53D+Z 时板面粗糙度会突然降低，钢种变回 DC51D+Z 时，板面粗糙度又升高到之前相近的数值。从材料屈服强度方面分析，DC51D+Z 强度高于 DC53D+Z，材料变形难度增大，所需要的轧制力要求较高。由此可以推断出，钢种不同会影响板面粗糙度，且钢种强度越高，板面粗糙度越高。

表 3　钢种过渡时板面粗糙度记录表

卷号	出口卷重/t	轧制周期/t	钢种	板面粗糙度/μm
UU52920000	28.23	1421.52	DC51D+Z	1.28
UU65030000	26.94	1448.46	DC51D+Z	1.23
UU20090000	29.02	1477.48	DC53D+Z	1.10
UU20070000	29.19	1506.67	DC53D+Z	0.90
UU20080000	29.27	1535.94	DC53D+Z	0.85
UU55900000	28.28	1564.22	DC51D+Z	1.30
UU60890000	17.18	1581.40	DC51D+Z	1.25

轧制力对板面粗糙度的影响

带钢经过光整机时，光整机要对带钢赋予目标范围以内的粗糙度和延伸率[4]。其中延伸率主要由轧制力赋予，要达到一定的延伸率需要工作辊对带钢表面施加足够大的轧制力，期间材料由于受到力的挤压，在沿轧制线方向上发生宽度减小，长度增加的型变，延伸率赋予完成。粗糙度的赋予由工作辊表面完成，带钢进入光整机之前表面粗糙度很低，进入光整机后直接接触工作辊，在轧制力的作用下，工作辊表面粗糙度会覆印到带钢表面，使得带钢表面达到所需的粗糙度。如表 4 所示，对相同规格相同钢种的钢卷施加不同的轧制力，粗糙度数值存在变化，同一状态下，轧制力越大，板面粗糙度数值越高，粗糙度改变范围±0.1 μm。

表 4　轧制力与板面粗糙度统计表

卷号	轧制力/kN	板面粗糙度/μm
1385720000	2100	1.17
1385730000	1900	1.13
1385860000	1700	1.04

板面粗糙度的研究

将收集到的一个轧制周期内上下板面粗糙度变化数据进行分类汇总，将此数据制作成折线图分析此钢种的粗糙度变化情况，如图 5 所示。

从曲线图看，随轧制周期的增加，板面粗糙度整体呈现下降趋势，个别轧制周期的板面粗糙度增

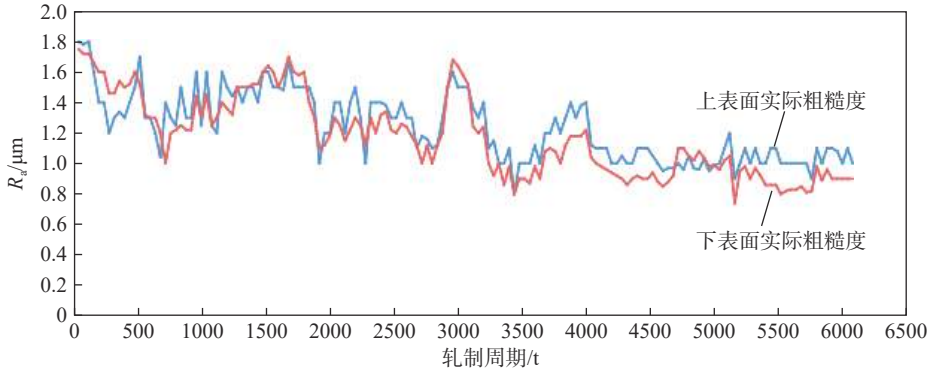

图 5　轧制周期内粗糙度变化曲线图

高，但随后会下降至原有粗糙度水平，轧制周期开始前期，板面粗糙度相对较高，超过工艺范围 0.8~1.6 μm 的上限，但很快就降低至工艺范围内，且在后续生产中除个别点超出工艺范围，其它部分均在合格范围内。

查询曲线中粗糙度突变的点，发现此部分产品均为厚规格产品，生产厚规格产品时机组速度相对较低，易产生锌流纹缺陷，此缺陷在经过光整轧制后能够改善，但不能完全消除，因此对板面粗糙度的测量存在一定影响。

排除板面缺陷的影响得到钢种板面粗糙度变化的理想曲线应为先快速降低，后缓慢衰变，转折点根据数据分析应在 150 t 处会进入稳定期。由此得到在一个轧制周期内，轧制周期–R_a 对照曲线图，如图 6。

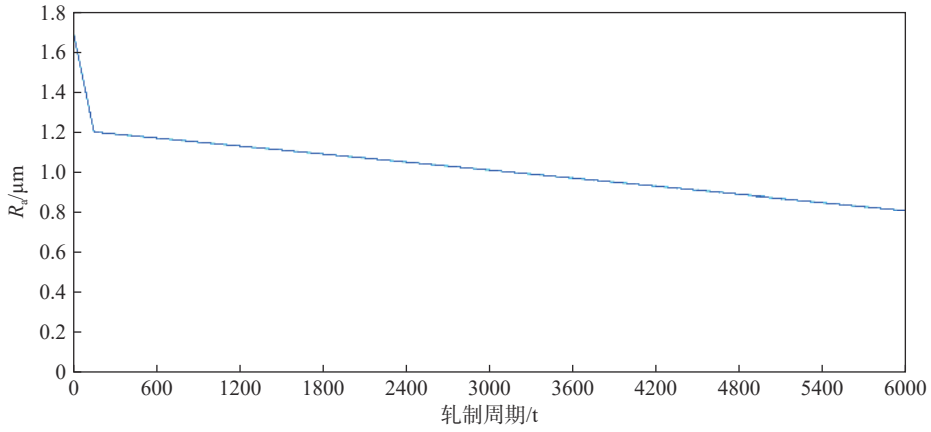

图 6　轧制周期–R_a 对照曲线图

在轧制周期–R_a 对照曲线图的基础上，结合 ABAQUS 轧制过程分析结果可知在轧制过程中，工作辊辊面的实际使用部位为工作辊表面粗糙度的波峰处，金属在变形流动过程中越靠近波谷处变形越困难，根据分析结果与实际辊面测量得到工作辊辊面粗糙度覆印到钢板板面的有效利用率为 50%~60%。引入覆印率系数可得到公式：

$$R_a = R_r \cdot r_{eff} \quad (1)$$

式中，R_a 为板面粗糙度，R_r 为工作辊辊面粗糙度，r_{eff} 为覆印率，取 50%~60%。

在实际应用过程中，发现工作辊辊面存在磨损，且由于粗糙度微观表面受力情况不一致，导致磨损主要集中为粗糙度波峰处，粗糙度波谷处却无磨损，由此可以得出工作辊辊面粗糙度的变化为粗糙度波峰处对比波峰波谷平均值的变化。如图 7，通过对辊面粗糙度磨损情况进行分析，磨损前波峰高度为阴影部分，磨损后波峰高度降低为灰色部分，期间高度降低的差值就是辊面粗糙度降低的范围，通过对磨损情况的评估，可得到磨损后的波峰高度

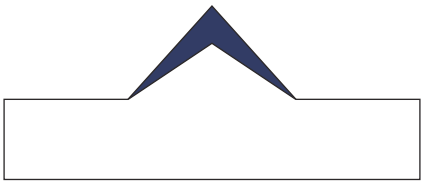

图 7　波峰磨损前后对比图

为原波峰高度的 60%~100%，由此引入系数波峰使用效率。可得到进一步优化的粗糙度公式：

$$R_a = R_r \cdot r_{eff} \cdot r_w \quad (2)$$

式中，r_w 为波峰使用效率，取 60%~100%。

结合镀锌机组生产产品结构分析，不同钢种对应的材料屈服强度不同，屈服强度越高，变形越困难，所需轧制力越大，轧制力均值存在差异，由此引入钢种系数 k 来补偿轧制力均值差异，以常规钢种 2000 kN 轧制力为基准，不同钢种轧制力均值对比 2000 kN 轧制力的比值作为钢种系数 k 进行修正（一般取 0.8~1.2），得到最终公式。板面粗糙度与工作辊辊面粗糙度的对应关系为：

$$R_a = kR_r \cdot r_{eff} \cdot r_w \quad (3)$$

粗糙度控制优化及效果

对产品表面粗糙度的精准控制，通过控制产品生产周期和控制轧制力参数等控制手段来完成。

控制轧制周期

选取 3 卷镀锌产品，产品表面粗糙度目标值分别控制 R_a=1.2、1.1 和 1.0 μm，成品卷表面取操作侧、中间、传动侧 3 点平均值计算板面粗糙度。通过计算与查询轧制周期–R_a 对照曲线图，以粗糙度误差不超过目标值的±0.05 μm 视为合格，以上 3 卷镀锌产品应按如下生产方案组织生产。

1）R_a=1.2 μm 产品安排在轧制周期 500~1650 t 生产，最佳组织生产时间为轧制周期 1150 t 时。

2）R_a=1.1 μm 产品安排在轧制周期 1650~2650 t 生产，最佳组织生产时间为轧制周期 2150 t 时。

3）R_a=1.0 μm 产品安排在轧制周期 2650~3650 t 生产，最佳组织生产时间为轧制周期 3150 t 时。

3 卷产品均按照最佳轧制周期组织生产，收集生产过程中的板面粗糙度及参数信息，对比板面粗糙度与目标值，通过对比检测结果（见表 5）可见同钢种在安排的周期内板面粗糙度在目标值的±0.05 μm 要求范围内，检测结果与查询轧制周期–R_a 对照曲线图相对应，可以证实曲线对应关系符合且具有指导意义。

表 5　不同轧制量区间产品的板面粗糙度

卷号	轧制量/t	轧制力/kN	目标粗糙度/μm	板面粗糙度/μm	偏差值/μm
1385701000	880	2345	1.2	1.20	0
1340852000	1400	2800	1.1	1.14	0.04
1360670000	1600	2300	1.0	1.03	0.03

轧制力控制

如表 6，选取相同规格的 4 卷产品，研究不同轧制力对板面表面粗糙度的影响规律。根据收集的数据分析轧制力大小对板面粗糙度的影响，轧制力与板面粗糙度对应关系中应存在粗糙度平台，此平台内轧制力变化几乎不影响粗糙度，根据数据分析此平台的轧制力为 1500~1700 kN，由表 6 中轧制力和板面粗糙度的对应关系可得到粗糙度变化存在如下规律：

表 6　相同产品不同轧制力下的板面粗糙度

卷号	轧制力/kN	板面粗糙度/μm
1385720000	2100	1.17
1385730000	1900	1.13
1385860000	1700	1.04
1385960000	1500	1.01

轧制力 1500 kN 增至 1700 kN，板面粗糙度变化较小（<0.1 μm）；轧制力 1700 kN 增至 1900 kN，板面粗糙度变化较大（约为 0.1 μm）；轧制力 1900 kN 增至 2100 kN，板面粗糙度变化又较小。由此可得出板面粗糙度受轧制力变化的影响规律为：轧制力处于 1700~1900 kN 时，轧制力对板面粗糙度影响程度较大，轧制力处于 1700~1900 kN 区间外时对板面粗糙度不影响或影响程度很小。

结束语

1）产品表面粗糙度与工作辊辊面粗糙度呈线性关系，在一个完整的轧制周期内板面粗糙度整体呈现下降趋势，以轧制周期 150 t 为分界点，轧制周期 0~150 t 粗糙度急剧下降，轧制周期 150~6000 t 粗糙度呈线性均匀下降，可得到轧制周期–R_a 对照曲

线图。

2）通过对试验数据的分析与归纳，得到板面粗糙度与工作辊辊面粗糙度、覆印率、波峰使用效率及钢种系数 k 相关，其中覆印率取 50%~60%，波峰使用效率取 60%~100%，k 一般取 0.8~1.2。

3）结合 ABAQUS 分析与轧制力单一参数调整控制实际验证，证明轧制力对板面粗糙度的影响在特定范围内时线性的，具体规律为：轧制力处于 1700~1900 kN 时，轧制力对板面粗糙度影响程度较大（约 0.1 μm），轧制力处于 1700~1900 kN 区间外时对板面粗糙度不影响或影响程度较小。

4）通过对不同锌层厚度的产品板面粗糙度进行对比可知，锌层厚度可以小幅度影响板面粗糙度，影响程度为 0.1 μm。

参考文献

[1] 马兵智，齐春雨，娄德诚，等. 镀锌板平整过程“宽窄印”缺陷研究. 金属世界，2019(3)：40
[2] 郭晶，燕际军，张秀香. 平整工序对 B170P 冷轧钢板表面波纹度的影响. 金属世界，2022(1)：60
[3] 石亦平，周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解. 北京：机械工业出版社，2006
[4] 李九龄，马国和，汪晓林. 铝锌硅镀层板露钢缺陷的产生与对策. 武钢技术，2010，48(5)：54

作者简介：梅锐东（1994—），男，大学本科，助理工程师，轧钢，板材冷轧厂，主要从事轧钢相关工作，E-mail：meiruidong1994@163.com。