

锌铝镁镀层钢板冲压性能研究现状

王亚男, 刘 妍, 谷 鑫, 宋文钟

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 锌铝镁镀层钢板因其卓越的耐腐蚀性能, 在汽车、建筑等工业领域得到广泛应用。其冲压性能作为影响产品质量与生产效率的关键因素一直是行业内的研究热点。文章综述了锌铝镁镀层钢板冲压性能的研究现状, 包括研究背景、发展脉络、影响因素、研究方法以及面临的难题与挑战。早期研究初步探索冲压特性, 随着技术的进步, 研究逐渐深入, 涵盖了镀层成分、组织结构、厚度以及钢板力学性能等方面, 试验测试与数值模拟技术成为主要研究方法。目前, 锌铝镁镀层钢板冲压性能研究已经取得很多突破, 但在性能平衡与复杂工况评估方面仍面临挑战。未来, 新技术应用与多因素耦合研究的深化有望推动该产品进一步发展。

关键词: 锌铝镁镀层钢; 冲压性能; 进展

中图分类号: TG174.4

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2025)05-0055-05

Research Status of Stamping Performance for Zn - Al - Mg Coated Steel Sheet

Wang Yanan, Liu Yan, Gu Xin, Song Wenzhong

(Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The Zn - Al - Mg coated steel sheet is widely used in such industrial fields as automobile and construction due to its excellent corrosion resistance. Its stamping performance, the key factor affecting product quality and production efficiency, is always research hotspot in the industry. In the paper, it is summarized the research status of stamping performance for Zn - Al - Mg coated steel sheet including its research background, development sequence, influencing factors, research methods as well as problems and challenges faced. Early researches are the preliminary exploration of stamping performance and researches are gradually deepened with technological progress, which include such aspects as composition, microstructure, thickness of coating and mechanical properties of steel sheet as well as experimental testing and numerical simulation technique become the main research methods. At present, there have been many break through points in the research of stamping performance for Zn - Al - Mg coated steel sheet, but challenges are still faced in terms of performance balance and evaluation of complex working conditions. In the future, the applications of new technologies and deepening of multifactor coupling research are expected to promote further development of this product.

Key words: Zn - Al - Mg coated steel; stamping performance; progress

锌铝镁镀层钢板作为新一代高性能金属材料, 因其优异的耐腐蚀性和加工成型性, 在轻量化制造

和复杂结构件生产中备受关注,冲压性能直接决定了其工程应用的可行性与经济性,已成为连接材料研发与产业化突破的关键环节。本文系统梳理锌铝镁镀层钢板冲压性能方面的研究进展,以期对成分优化、工艺开发及性能预测提供参考。

1 锌铝镁镀层钢板的应用背景

锌铝镁镀层钢板因其优异的耐腐蚀性能、切边保护性能和加工成型性,在汽车、建筑等工业领域中得到了广泛应用。与传统的镀锌板和镀锌铝板相比,锌铝镁镀层产品具有更高的耐蚀性,这主要归因于其特殊的相结构以及合金元素(如 Al 和 Mg)的协同作用^[1]。在汽车行业中,锌铝镁镀层钢板被广泛用于制造车身零部件,尤其是对耐腐蚀性能要求较高的中高端车型。例如,首钢开发的双相钢结合锌铝镁镀层技术,不仅显著提高了材料的成型性能,还满足了轻量化设计的要求^[2]。此外,在建筑领域,锌铝镁镀层钢板因其出色的耐候性和抗老化性能,逐渐成为屋顶、墙体等结构材料的首选。其应用范围还扩展到光伏光热、彩涂板及家电行业,显示出广阔的市场前景^[1]。

2 锌铝镁镀层钢板冲压性能研究发展历程

研究锌铝镁镀层钢板的冲压性能对于保障产品质量、提高生产效率以及满足复杂零件制造需求具有重要意义。冲压成型是金属板材加工的关键工艺之一,其性能直接影响到最终产品的质量和成本。锌铝镁镀层钢板的冲压性能不仅取决于基体材料的力学性能,还受到镀层成分、组织结构和厚度等因素的影响^[3]。研究表明,锌铝镁镀层钢板的表面摩擦系数较低,且多次模拟拉伸后仍能保持稳定的行程载荷曲线,使其在复杂零件制造中具有较大优势^[3]。然而,在实际生产中,针对冲压过程中可能出现的开裂、起皱及回弹等缺陷,对冲压性能进行深入研究显得尤为重要。通过有限元仿真分析等技术手段优化工艺参数,可以有效减少缺陷的发生,从而缩短冲模制造周期并降低生产成本^[4]。因此,其冲压性能的研究不仅是理论探索的重要方向,也是推动锌铝镁镀层钢板实际应用的关键环节。

2.1 初步探索阶段

在锌铝镁镀层钢板研发初期,研究主要集中在对其冲压特性的初步认识与基本行为的测试。单梅

等通过对比热浸锌铝镁镀层钢板(ZAM)与纯锌镀层钢板(Z)的表面摩擦系数、表面粗糙度及模拟拉伸成型性能,发现锌铝镁镀层钢板的表面摩擦系数较小,且多次模拟拉伸后行程载荷曲线保持稳定,金属粉末脱落较少,表面镀层剥落现象也较少^[3]。这些初步研究为后续深入理解锌铝镁镀层钢板的冲压性能奠定了基础,并揭示了其在成型性能上的潜在优势。此外,早期研究还关注到锌铝镁镀层特殊的相结构对其冲压行为的影响,例如富 Zn 相、二元共晶和三元共晶组织的存在对冲压过程中变形和开裂行为的潜在作用^[5]。

2.2 深入研究阶段

随着技术的进步,锌铝镁镀层钢板冲压性能的研究在深度和广度上得到了显著拓展。研究人员开始关注镀层与基体之间的相互作用对冲压性能的影响。例如,首钢开发的双相钢(DH)结合锌铝镁镀层(ZM)技术,通过 Al、Si 复合添加的成分体系优化了基体组织,在退火时效过程中促进了碳元素向奥氏体的扩散,形成了铁素体、马氏体、贝氏体和残余奥氏体的混合组织,从而大幅提高了材料的加工硬化率和延伸率^[2]。这一研究表明,镀层与基体的协同作用对冲压性能至关重要。同时,针对锌铝镁镀层的耐腐蚀性能研究也进一步深化,发现其不仅具有优异的耐蚀性,还能在冲压过程中降低开裂和划伤风险,提高成型良品率^[5]。这些研究成果为锌铝镁镀层钢板在复杂工况下的应用提供了理论支持,并推动了相关技术的实际应用。

3 影响锌铝镁镀层钢板冲压性能的主要因素

3.1 镀层成分

锌铝镁镀层钢板的冲压性能受其镀层化学成分的影响较大,尤其是 Zn、Al 和 Mg 等关键元素含量的变化。研究表明,Mg 元素的添加不仅能够提高镀层的耐腐蚀性能,还对冲压过程中的裂纹产生具有重要影响。例如,当 Mg 含量增加时,镀层中 MgZn 相的比例升高,这种相结构在冲压变形过程中容易成为裂纹的起源^[6]。此外,Al 元素的加入可以细化镀层组织,并通过形成稳定的氧化层抑制晶界腐蚀,从而间接改善冲压性能^[7]。然而过高的 Mg 含量可能导致镀层表面组织复杂化,进而影响其成型性。因此,合理控制镀层中各元素的含量是优化冲压性能的关键因素之一。

3.2 组织结构

镀层的组织结构对锌铝镁镀层钢板的冲压行为具有重要影响。锌铝镁镀层主要由富 Zn 相、Zn - MgZn 二元共晶相以及 Zn - Al - Mg 三元共晶相组成,其中二元共晶相较为粗大,而三元共晶相则更为细密^[5]。这些共晶相在镀层钢板冲压过程中表现出不同的变形特性。例如,二元共晶相由于其较低的阳极溶解电流,能够在一定程度上抵抗变形过程中的开裂倾向;而三元共晶相则因其高硬度和复杂的相结构,可能在冲压时导致局部应力集中,从而引发裂纹^[7]。此外,共晶相的分布形态也至关重要,研究表明,含 Mg 的共晶相主要分布在富 Zn 相周围,这种分布模式有助于缩小腐蚀电极的有效面积,从而提高镀层的整体耐蚀性和抗变形能力。

3.3 镀层厚度

镀层厚度的变化对锌铝镁镀层钢板的冲压性能具有多方面的影响。较厚的镀层通常能够提供更好的腐蚀防护能力,但在冲压过程中可能增加摩擦阻力,导致变形能力下降。研究发现,随着镀层厚度的增加,钢板表面的摩擦系数有所上升,这可能与镀层表面粗糙度的变化有关^[3]。此外,较厚的镀层在冲压过程中更容易出现剥落现象,尤其是在高应变区域,这与镀层和基体之间的结合强度密切相关^[8]。相比之下,较薄的镀层虽然能够降低摩擦阻力,但其在复杂成型工艺中的保护能力有限。因此,在实际应用中,需要根据具体的冲压需求合理选择镀层厚度,以平衡耐腐蚀性能与成型性能之间的矛盾。

3.4 钢板力学性能

钢板本身的力学性能,包括强度、塑性、加工硬化率等,对冲压性能起着决定性作用。高强度钢板虽然有利于结构轻量化,但在冲压过程中也容易因局部应力集中而导致开裂风险增加;而高塑性钢板则能更好地适应复杂变形,吸收更多能量,减少裂纹的产生。对于锌铝镁镀层钢板而言,其综合力学性能不仅取决于基板材料的化学成分和热处理工艺,还受到镀层与基体之间界面结合状态和相互作用的影响。例如,镀层中的共晶相可通过细化基体组织而提高加工硬化率,从而在一定程度上改善钢板的塑性,增强其冲压成型能力。钢板强度与塑性之间常存在此消彼长的关系,如何在保证一定强度的同时保持足够的塑性,是实际应用中的核心难点。此外,镀层的存在可能改变基板的变形行为,尤其是在高应变区域,镀层与基体之间的协同变形能力直接

决定整体成型极限。因此,合理设计基板成分,优化热处理工艺,并充分考虑镀层与基体的变形适配性,是实现锌铝镁镀层钢板优异冲压性能的关键。

高强度与高塑性之间的平衡是锌铝镁镀层钢板生产的控制难点,基体的塑性往往受到镀层抑制;镀层与基体之间的界面结合强度及变形协调性控制复杂,易在高应变区发生剥离或开裂;多因素(成分、组织、工艺)耦合作用下力学性能的稳定性控制难度大,尤其在批量生产中难以保证一致性;镀层对基体力学行为的“屏蔽”或“干扰”效应尚未完全明确,缺乏统一的本构模型描述其复合力学行为。

4 锌铝镁镀层钢板冲压性能研究方法

4.1 试验测试手段

试验测试是研究锌铝镁镀层钢板冲压性能的基础方法,主要包括拉伸试验和模拟冲压试验。拉伸试验通过测定材料在单向拉伸条件下的应力-应变曲线,获取屈服强度、抗拉强度、延伸率等基本力学性能参数,这些参数对评估冲压性能至关重要。例如,文献[3]中通过对锌铝镁镀层钢板进行拉伸试验,发现其表面摩擦系数低于纯锌镀层钢板,且多次模拟拉伸后行程载荷曲线保持稳定,表明其具有更优的成型性能。模拟冲压试验则通过模拟实际冲压过程中的复杂应力状态,进一步评估材料的成型极限和失效行为。文献[6]中对锌铝镁镀层钢板进行不同应变量的拉伸试验,并结合扫描电镜(SEM)观察镀层裂纹形貌,揭示了拉伸应变对镀层裂纹宽度和密度的影响规律。这些试验方法不仅为理解冲压性能提供了直观的数据支持,还为后续数值模拟奠定了基础。

4.2 数值模拟技术

随着计算机技术的发展,数值模拟技术在锌铝镁镀层钢板冲压性能研究中得到了广泛应用,其中有限元分析(FEA)是最常用的工具之一。有限元分析通过建立数学模型,能够预测冲压成型过程中材料的应力分布、应变集中、厚度变化以及潜在的开裂和起皱缺陷。文献[4]利用 AutoForm 软件对某车型发动机罩外板的拉深成型进行了有限元仿真分析,优化了工艺参数并有效降低了回弹量,从而提高了零件成型质量。此外,数值模拟技术还可以用于研究复杂工况下材料的冲压性能,例如高温或高应变速率条件下的材料成型行为。这种方法不仅能够缩短研发周期,还能显著降低试验成本,因此在工业界

得到了广泛认可和应用。

4.3 各方法优势与局限

试验测试和数值模拟方法各有优势和局限性,二者的结合使用可以更全面地研究锌铝镁镀层钢板的冲压性能。试验测试的优势在于其真实性和可靠性,能够直接反映材料在实际冲压条件下的行为特征。然而,试验测试通常耗时较长且成本较高,尤其是在需要多次重复试验时更为明显。相比之下,数值模拟具有高效性和灵活性的特点,能够在较短时间内对多种工艺方案进行对比和优化。但数值模拟的准确性依赖于材料模型的精确性和边界条件设置的合理性,若模型设置不当可能导致结果与实际情况偏差较大。文献[4]指出,尽管有限元分析在预测材料冲压缺陷方面表现出色,但仍需结合试验验证以确保结果的可靠性。因此,在实际研究中,应根据具体需求合理选择试验测试与数值模拟方法,以实现优势互补。

5 锌铝镁镀层钢板冲压性能研究挑战及应对策略

5.1 性能平衡难题

锌铝镁镀层钢板的耐腐蚀性能与冲压性能之间的平衡是研究中的难题,在提高镀层耐腐蚀性能的同时,往往会导致冲压性能的下降。研究表明,随着镁含量的增加,虽然镀层的耐腐蚀性能得以增强,但裂纹产生的风险也随之提高,从而显著影响冲压过程中材料的成型性^[6]。此外,镀层组织结构中二元共晶相和三元共晶相的比例变化同样会对两种性能产生相反的影响。较粗大的二元共晶组织能够提高材料的耐腐蚀性能,但其塑性较差,容易导致冲压过程中的开裂现象^[5]。因此,如何通过优化镀层成分和微观结构,在保证材料耐腐蚀性能的前提下最大限度地维持冲压性能,成为当前研究的重点方向之一。

5.2 复杂工况评估挑战

在实际应用中,锌铝镁镀层钢板常需面对高温、高应变速率等复杂工况,这对冲压性能的准确评估提出了严峻挑战。高温环境下,镀层的软化行为及其与基体的相互作用可能导致变形机制的变化,进而影响冲压成型的稳定性^[6]。与此同时,高应变速率条件下的动态响应特性尚未得到充分研究,现有试验手段难以全面捕捉这一过程中的力学行为。此外,复杂工况下的多因素耦合作用进一步增加了评

估难度,例如温度和应变速率的协同效应可能对冲压性能产生非线性影响。因此,开发适用于复杂工况的评估方法和测试技术,成为亟待解决的关键问题。

5.3 应对策略

为应对上述难题,研究者提出了多种策略以优化锌铝镁镀层钢板的冲压性能。首先,通过优化成分设计,可以缓解材料耐腐蚀性能与冲压性能之间的矛盾。例如,适当调整铝和镁的比例,不仅能够提高镀层的耐腐蚀性,还能改善其塑性,从而降低冲压开裂的风险^[9]。其次,改进生产工艺也是提高冲压性能的重要途径。研究表明,采用多级清洗和精确控制退火工艺参数,能够有效减少镀层表面缺陷,提高其成型性能^[10]。此外,引入先进的数值模拟技术,如有限元分析,可以帮助优化冲压工艺参数,从而在复杂工况下实现更精准的性能预测与控制。这些策略的综合应用,为解决锌铝镁镀层钢板冲压性能研究中的难题提供了重要支持。

6 锌铝镁镀层钢板冲压性能研究展望

6.1 新技术应用

随着科学技术的不断进步,新型检测技术和先进制造技术在锌铝镁镀层钢板冲压性能研究中的应用前景愈发广阔。例如,高分辨率扫描电子显微镜(SEM)与X射线衍射(XRD)技术的结合使用,能够更精确地分析镀层微观结构及成分分布对冲压行为的影响^[11]。此外,先进的原位测试技术可以在冲压过程中实时监测材料的应力、应变状态,从而揭示冲压性能与微观结构演变之间的动态关系。在制造技术方面,增材制造和精密轧制技术的引入为优化镀层与基体的结合强度提供了新思路,有助于提高整体冲压性能。这些技术的应用不仅推动了锌铝镁镀层钢板冲压性能研究向纵深发展,也为工业领域复杂零部件的高效制造奠定了坚实基础。

6.2 多因素耦合研究

深入研究多因素耦合作用对锌铝镁镀层钢板冲压性能的影响是未来研究的重要方向。镀层成分、组织结构以及力学性能之间的复杂相互作用决定了钢板在冲压过程中的行为表现。例如,镁元素的添加不仅能够显著提高镀层的耐蚀性,还可能通过改变共晶相分布影响材料冲压时的裂纹扩展行为^[7]。因此,需要系统探讨不同成分体系下镀层组织结构的变化规律及其对冲压性能的协同作用。此外,数

值模拟技术的进一步发展将有助于构建更加精确的多因素耦合模型,从而实现对冲压性能的全面预测与优化。这种跨学科的研究方法不仅能够揭示冲压性能的本质机制,还将为开发高性能锌铝镁镀层钢板提供理论指导。

未来研究进一步聚焦于先进表征与模拟技术的融合应用,深化对多因素耦合作用下镀层、基体协同变形机制的理解,重点突破耐蚀性、成型性平衡难题,发展跨尺度建模方法与智能工艺设计策略,以推动锌铝镁镀层钢板在高端工业领域的更广泛应用。

7 结束语

锌铝镁镀层钢板的冲压性能受镀层成分、组织结构、厚度及基板力学性能等多因素综合影响,其中基体与镀层间的协同变形行为尤为关键,直接决定了材料的成型能力与失效模式。当前研究已从早期性能表征发展为试验与数值模拟相结合的系统方法,显著提高了对冲压过程的预测与优化水平,尤其在复杂零件制造中,有限元分析已成为重要工具。尽管在成分设计、工艺优化与性能评估方面取得显著进展,该材料在耐蚀性与成型性平衡、复杂工况响应及多因素耦合机制等方面仍存在挑战,亟待通过跨学科方法与创新技术深入探索。未来研究着力于突破性能平衡瓶颈并拓展高端工业应用。

参 考 文 献

- [1] 马常帅,冉长荣,郭太雄,等. 国内外锌铝镁镀层钢板的研究现状及未来市场前景[J]. 广州化工,2024,52(4):35-38.
- [2] 朱国森,韩贇,蒋光锐,等. 汽车车身用新型冷轧薄板研发进展[J]. 工程科学学报,2022,44(9):1585-1594.
- [3] 单梅,葛浩,崔磊,等. 热浸镀锌铝镁与纯锌镀层钢板成型性能对比研究[J]. 安徽冶金科技职业学院学报,2022,32(4):1-4.
- [4] 蒋磊,李十全,王龙,等. 基于 AutoForm 的锌铝镁镀层板拉深成型及回弹研究[J]. 模具工业,2021,47(2):11-16.
- [5] 刘旭亮,刘云,孙震,等. 锌铝镁镀层钢板耐蚀性能研究[J]. 环境技术,2022,40(3):104-108.
- [6] 宋志岗,王淑华,梅淑文,等. 拉伸应变对锌铝镁镀层裂纹及耐蚀性的影响[J]. 电镀与精饰,2024,46(3):44-49.
- [7] 宋裕. 热浸镀锌-铝-镁合金镀层钢板的研究与应用现状[J]. 电镀与涂饰,2019,38(9):442-446.
- [8] 蒋光锐,郑学斌,赵晓非,等. 汽车车身用热浸镀锌铝镁镀层钢板[J]. 汽车工艺与材料,2021(4):12-22.
- [9] 王海. 锌铝镁技术改造探讨[J]. 中国金属通报,2021(2):289-290.
- [10] 金永清,尹红国. 低铝型热镀锌铝镁镀层钢板生产技术探索[J]. 材料保护,2022,55(1):227-230.
- [11] 李锋,吕家舜,杨洪刚,等. 锌铝镁镀层钢板的研究进展[J]. 轧钢,2013,30(2):45-51.